



tmmob
elektrik mühendisleri odası
izmir şubesi



tmmob
makina mühendisleri odası
izmir şubesi



5. İZMİR RÜZGÂR SEMPOZYUMU ve SERGİSİ

3-4-5 Ekim 2019



BİLDİRİLER KİTABI



tmmob
elektrik mühendisleri odası
izmir şubesi



tmmob
makina mühendisleri odası
izmir şubesi

5. İZMİR RÜZGÂR SEMPOZYUMU

3-4-5 EKİM 2019

BİLDİRİLER KİTABI

**İZMİR
EKİM 2019**



tmmob
elektrik mühendisleri odası
izmir şubesi



tmmob
makina mühendisleri odası
izmir şubesi

ISBN 978-605-01-1294-8

Adres

TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası İzmir Şubesi
Kazım Dirik Mahallesi Üniversite Caddesi 374/1 Sokak No:1 Bornova - İzmir
Telefon: 0 232 4893435 - Faks: 0 232 4454949
e-posta: izmir@emo.org.tr <http://izmir.emo.org.tr>

TMMOB Makina Mühendisleri Odası İzmir Şubesi
MMO Tepekule Kongre Sergi ve İş Merkezi
Anadolu Cad. No: 40 Kat:M2 Bayraklı - İzmir
Telefon: 0 232 462 33 33 Faks: 0 232 486 20 60
e-posta: izmir@mmo.org.tr <http://izmir.mmo.org.tr>

Dizgi Tasarım

TMMOB Makina Mühendisleri Odası İzmir Şubesi

Bu yayın Elektrik Mühendisleri Odası İzmir Şubesi ve Makina Mühendisleri Odası İzmir Şubesi tarafından derlenmiştir. Elektrik Mühendisleri Odası ve Makina Mühendisleri Odası bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir. Bu eserin yayın hakkı Elektrik Mühendisleri Odası İzmir Şubesi ve Makina Mühendisleri Odası İzmir Şubesi'ne aittir. Kitaptaki bilgiler kaynak gösterilerek kullanılabilir.

SUNUŞ

TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası ve TMMOB Makina Mühendisleri Odası İzmir Şubeleri tarafından düzenlenen 5. İzmir Rüzgâr Sempozyumu ve Sergisi "Yerli Üretim ve İzmir" temasıyla 3-4-5 Ekim 2019 tarihlerinde MMO Tepekule Kongre ve Sergi Merkezi'nde gerçekleştirilmektedir. Sektöre ait en son teknolojilerin ve hizmetlerin paylaşılacağı sempozyumda, yerel, bölgesel ve ulusal enerji planlamaları ile ilgili gelişmelerin değerlendirilerek, karşılaşılan sorunlara ilişkin çözüm önerilerinin de geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

1. İzmir Rüzgâr Sempozyumu ve Sergisi 2001 tarihinde Çeşme-Alaçatı'da düzenlenmiş ve ülkemizde rüzgâr enerjisinin daha yeni tartışıldığı bir dönemde gerçekleştirilen bu ilk sempozyum ile bugün ulaşılan noktaya ışık tutulmuştur. Bölgemizde rüzgâr enerjisine ilişkin yatırımların artması ve sektörün gelişmesiyle İzmir Rüzgâr Sempozyumu ve Sergisi'nin ikincisi 2011'de, üçüncüsü 2015'de ve dördüncüsü 2017 yılında düzenlenerek etkinliğimiz ve rüzgâr enerjisi sektörü bugünkü haline evrilmiştir.

Rüzgâr Enerjisi sektörü bileşenlerini bir araya getirerek sektörün gelişmesinin önündeki sorunların çözümüne odaklanan etkinliğimizin üç günlük programında, açılış oturumunun yanı sıra altı ana konuda 10 oturum gerçekleştirilecektir. "Yerli Rüzgâr Endüstrisi", "Denizüstü ve Karasal YEKA'lar", "Rüzgâr Santrallerinin İşletilmesi ve Bakımı", "Rüzgâr Santrallerinde Dijitalleşme", "Rüzgâr Santrallerinde Çalışma Güvenliği", ve "Rüzgâr Santrallerinin Çevresel ve Sosyal Etkileri" başlıklı oturumlarda sunumlar düzenlenirken, iki paralel toplam 4 oturumda ise akademik bildiriler sunulacaktır. Sempozyum paralelinde düzenlenecek olan sergide ise rüzgâr enerjisi alanında ürün ve hizmet üreten kurum ve kuruluşlar çalışmalarını katılımcılarla paylaşma imkanı bulacaktır. Sergiyle, teorik bilginin yanı sıra uygulama ve ürün geliştirme deneyimlerinin de katılımcılar arasında paylaşılması sağlanacaktır.

5. İzmir Rüzgâr Sempozyumu ve Sergisi'nin yerli kaynağın yerli ekipmanlarla değerlendirilmesi amacıyla Ar-Ge çalışmalarının önünü açmasının yanında, bölgemizin doğaya, yaşam ve tarım alanlarına olumsuz etkilerini en aza indirgeyerek kamu yararına rüzgâr projelerinin merkezine dönüşmesine katkı sağlamasını diliyoruz.

Sempozyumda sunumu gerçekleştirilen bildirilerin yer aldığı bu yayın, rüzgâr enerjisi alanında çalışan akademisyenlerin kamudan yatırımcılara, mühendislik hizmetleri veren firmalardan derneklere kadar tüm sektör bileşenlerine iletilen bir kayıt niteliği taşımaktadır. İzmir Rüzgâr Sempozyumu ve Sergisi'nin oluşumuna katkı koyan Sempozyum Yürütme Kuruluna, bildiri yazarlarına, Sempozyuma destek veren firmalara, görev alan öğrencilere, sempozyum sekreterleri ve sekreteryasına teşekkür ediyoruz.

**TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası
İzmir Şubesi Yönetim Kurulu**

**TMMOB Makina Mühendisleri Odası
İzmir Şubesi Yönetim Kurulu**

3 Ekim 2019 - İzmir

SEMPOZYUM YÜRÜTME KURULU

A. Onur Kısar	TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası
Ali Emre Demirel	TMMOB Makina Mühendisleri Odası
Ali Eray Ergin	TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası
Alper Kalaycı	TMMOB Makina Mühendisleri Odası
Aydın Yalçın	TMMOB Makina Mühendisleri Odası
Fahri Eryılmaz	TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası
Görkem Teneler	TMMOB Makina Mühendisleri Odası
İskender Kökey	TMMOB Makina Mühendisleri Odası
Mustafa Serdar Çınarlı	TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası
Mümtaz Ayça	TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası

SEMPOZYUM BİLİM KURULU

Abdül Balıkçı	Mutlu Boztepe
Alpaslan Turgut	Nurdan Yıldırım
Engin Karatepe	Oğuz Uzol
Ferhat Bingöl	Orhan Ekren
Hacer Şekerci Öztura	Tolga Sürgevil
Levent Bilir	Ziya Haktan Karadeniz
M. Barış Özerdem	

SEMPOZYUM SEKRETERLERİ

Mustafa Serdar Çınarlı	TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası İzmir Şubesi
Fatih Efe Çiçek	TMMOB Makina Mühendisleri Odası İzmir Şubesi

SEMPOZYUM SEKRETARYASI

Sungu Köksalözkan	TMMOB Makina Mühendisleri Odası İzmir Şubesi
Önder Sözen	TMMOB Makina Mühendisleri Odası İzmir Şubesi

SEMPOZYUM DANIŞMANLAR KURULU

Ali Eminel
Alpaslan Turgut
Alper Tortoç
Cengiz Oğuzer
Ebru Arıcı
Emre Uraz
Enis Fakıoğlu
Ersan Özsoy
Fatma Murray
Ferhat Bingöl
Kerem Paksoy
Levent Bilir
Levent İshak
Levent Özkan
M. Barış Özerdem

Mahir Tosun
Mehmet Şener Arslan
Murat Çekirdek
Mutlu Boztepe
Nihat Diler
Orhan Ekren
Ö. Emre Orhan
Remziye Derin
Sarper Başak
Serra Özer
Taylan Arslan
Taylan Kabaş
Tibet Arbak
Ufuk Yaman
Z. Haktan Karadeniz

DESTEKLEYEN KURULUŞLAR

EBSO – Ege Bölgesi Sanayi Odası
Enerji Mühendisleri Derneği
ENSİA – Enerji Sanayicileri ve İş Adamları Derneği
ESBAŞ – Ege Serbest Bölge
İzmiRüzgâr
İZTO – İzmir Ticaret Odası
Kompozit Sanayicileri Derneği
Ostim Enerjik – Yenilenebilir Enerji ve Çevre Teknolojileri Kümelenmesi
TÜREB – Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği
Türk Loydu
TWRE – WOMEN EmPOWERing – Yenilenebilir Enerji ve Enerji Sektörü Türk Kadınları Grubu
İstanbul Teknik Üniversitesi
İzmir Ekonomi Üniversitesi
İzmir Katip Çelebi Üniversitesi
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi Rüzgem – Rüzgar Enerjisi Araştırma Merkezi
Enerji IQ
Rüzgar Enerjisi Dergisi
Solarbaba
Yeni Enerji

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

1. Oğuz,	Keriman. Uzol, Nilay Sezer. “Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini Kanadı ve Kanat Profillerinin BEM ve CST Metotları ve Genetik Algoritma Kullanarak Aerodinamik Optimizasyonu” 1
2. Almaz,	Rıdvan. Kökey, İskender. Acarer, Sercan. Karadeniz, Z.Haktan. Turgut, Alpaslan. “Geliştirilen DMST Yazılımı İle Yunuslama Açısı Kontrolünün Darrieus Türbini Performansına Etkisinin İncelenmesi” 14
3. Şahin,	Mustafa. Yavrucuk, İlkay. “Rüzgâr Türbini Kanat Yunuslama Açısı Kontrolcüsü Tasarımı ve Performans Analizi” 28
4. Akcengiz,	Ezgi Orbay, Uzol, Nilay Sezer. “Rüzgâr Türbini Rotorları İçin Kalın Kanat Profillerinin HAD Simülasyonları” 41
5. Demir,	Erdem. Bingöl, Ferhat. “Rüzgâr Türbinlerinde Atmosferik Buzlanma ve Güç Eğrisi Üzerindeki Etkisi” 60
6. Bozkurt,	Miraç Onur. Çöker, Demirkan. Parnas, Levend. “Tabakalı Kompozitlerde Düşük Hızlı Darbeye Bağlı Hasarın Sayısal Olarak İncelenmesi” 69
7. Durak,	Murat. Şahin. Ahmet Duran. “Çoklu Noktasal Toplam Yarıvარიogram Alansal Tahmin Modeli Geliştirilmesi ve Söke Rüzgâr Elektrik Santralı Üretim ve İşletme Verilerine Uygulanması” 80
8. Muyan,	Can. Çöker, Demirkan. “Kompozit Rüzgâr Türbini Kanadının Mukavemet Özelliklerinin Progresif Hasar Analizi Yardımıyla İyileştirilmesi” 94
9. Kalay,	Yüksel. Bingöl, Ferhat. “Küresel Rüzgâr Atlası Validasyonu: Türkiye Örneği” 104
10. Pourkeivannour,	Siamak. Ertan, H. Bülent. “Rüzgâr Enerji Dönüşümü Emülasyon Sistemi” 113
11. Yalçın,	A. Hazal Altuğ. Yavrucuk, İlkay. Uzol, Oğuz. “Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri İçin Gürbüz Tasarım Yöntemi” 121
12. Yorulmaz,	Tarkan. “Yarasalar ve RES’ler Özelinde Yatırımın ve Çevrenin Sürdürülebilir Dengesi Nasıl Sağlanabilir?” 130
13. Ateşşönmez,	Ali Batuhan. “Rüzgar Enerji Sektöründe Mesleki Eğitimin Durumu ve Geliştirilmesi” 139
14. Deneçli,	B. Kıvanç. Boztepe, Mutlu. “Çok-Rotorlu Rüzgâr Türbin Sistemlerinin İncelenmesi” 162
15. Durak,	Murat. “Denizüstü Rüzgâr Elektrik Santral (DRES) Projeleri İçin Rüzgâr Ölçümleri” 169
16. Kaya,	Baran. Oğuz, Elif. “Tekil Kazık Temelli Açık Deniz Rüzgâr Türbinlerinin Avrupa’daki Gelişimi” 175
17. Huvaj,	Nejan. Caceoğlu, Eray. Baidol, Yelaman. “Deniz Üstü Rüzgâr Türbinleri: Temel Tipi Seçimi ve Gerekli Deniz Tabanı Zemin Araştırmaları” 197
18. Güneyli,	Anıl. “Rüzgâr Ekonomisi” 211

YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNİ KANADI VE KANAT PROFİLLERİNİN BEM VE CST METOTLARI VE GENETİK ALGORİTMA KULLANARAK AERODİNAMİK OPTİMİZASYONU

Keriman Oğuz¹, Nilay Sezer Uzol²

^{1,2}Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, ODTÜ

^{1,2}ODTÜ RÜZGEM

¹keriman.karakas@metu.edu.tr, ²nuzol@metu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada yatay eksenli rüzgar türbini palalarının ve kanat kesitlerinin aerodinamik optimizasyonu yapılmaktadır. Kanat kesit geometrisi tasarımında Sınıf-Şekil Transformasyonu Metodu (CST) kullanılmıştır. Aerodinamik veriler, bir potansiyel akış çözücüsü olan XFOIL yazılımı ile elde edilmiştir. Rotor güç hesaplamaları için Pala Elemanı-Momentum (BEM) teorisi kullanılmıştır. Genetik Algoritma (GA), rotor maksimum güç üretimi amacıyla, pala kanat kesiti geometrisi optimizasyonunda kullanılmıştır. Bu bildiride, seçilen rotorlar için doğrulama çalışmaları yapılmış, ve yapılan optimizasyon çalışmaları ve aerodinamik performans karakteristikleri hesaplamaları ve sonuçlar literatürdeki mevcut test rüzgar türbinleri ile karşılaştırılmıştır. Kalın ve ince kanat kesiti optimize tasarımlarını da kullanan üç kanat kesitli tasarlanan yeni rotor için analizler yapılmış ve aerodinamik performans artırımları incelenmiştir.

1. GİRİŞ

Rüzgar türbini tasarımı, temel olarak aerodinamik, mekanik ve elektriksel tasarım alanlarını kapsayan disiplinler arası bir optimizasyon çalışmasıdır. Literatürün çoğunluğu, jeneratör, kanat, açık deniz platformu, mikro-yerleşim vb. gibi bileşen-odaklı bir bakış açısına sahip uzmanlık alanlarından birine odaklanmıştır. Bununla birlikte, farklı bileşenlerin optimizasyon hedefleri birbirleri ile paralel olmayabilir. Rüzgar enerjisi tasarım çalışmalarının motivasyonu daha bütünsel bir yaklaşım ve geniş perspektifle oluşturulmalıdır.

Daha önce ODTÜ’de yapılan çalışmalarda, Ceyhan vd. [1,2], 2008-2009, özgün Pala Elemanı-Momentum (BEM) Teorisi kodu ve genetik algoritma kullanarak rotor pala geometrisinin optimizasyonunu yapmışlar ve hatve açısı değişimi ile güç üretimi kontrolünü incelemişlerdir. Sağol vd. [3,4], 2009-2010, belirli bir rüzgar türbini yerleşim sitesine özgü rüzgar karakteristikleri için minimum enerji maliyetine göre BEM kodu ve genetik algoritma kullanarak kanat optimizasyonu yapmışlardır. Polat vd. [5-8], 2011-2013, rotor pala geometrisinin maksimum güce göre optimizasyonunda kanat boyunca üç farklı kesit için bezier eğrileri ile tanımları, BEM ve genetik algoritma kullanmıştır. Ayrıca, Polat vd. [9], 2014’de, hem helikopter hem de rüzgar türbini rotor palalarının tasarımını ve kanat kesiti optimizasyonunu karşılaştırmalı incelemiştir. Elfarra vd. [10-15], 2010-2015, rüzgar türbini kanadı aerodinamik optimizasyonunda Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), genetik algoritma ve yapay sinir ağları kullanarak kanat uç geometrisinin optimizasyonu ve performans etkilerini çalışmıştır.

Kanat kesiti geometrisinin tanımlanmasında literatürde farklı yöntemler mevcuttur. Kanat kesitinin üst ve alt yüzey koordinatlarının verilmesi en basit tanımdır. Bu koordinatlara farklı eğrilerin uydurulması ile geometri tanımı, basit polinomlardan bezier eğrilerine kadar farklı doğrulukta tanımlar elde edilmesi en genel tanımlamalardır. Kanat kesiti için özelleşmiş geometri tanımları da yaygın kullanılmaya başlayan diğer tanımlamalardır: Sobieczky’nin [16],

2000’de tanımladığı, Parametrik Kesitleme Yöntemi (PARSEC) ile kanat kesitinin hücum kenarı yarıçapı, maksimum kalınlığı, firar kenarı açıları gibi belli karakteristik büyüklüklerin geometriyi tanımlayan eğrilerle birlikte kullanılması, Kulfan vd’nin [17,18], 2008-2006, ortaya koyduğu Sınıf-Şekil Transformasyonu (CST) ile geometri tanımlarının kullanılmasıdır.

Literatürdeki son çalışmalarda, Javed vd. [19], 2016, küçük rüzgar türbinleri için pala tasarımı yapmak için, bir açık kaynak panel kodu olan XFOIL tabanlı olan XFLR5 yazılımı kullanarak ve MATLAB’de BEM metodu ile veter uzunluğu, burkulma açısı ve önceden belirlenmiş kanat kesiti parametrelerini hesaplayan bir optimizasyon yazılımı geliştirmiştir. Barret [20], 2018, enerji maliyetini en aza indirmek amacıyla CST kullanarak tasarlanan kanat kesitleriyle, XFOIL ve Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ve gradyan tabanlı optimizasyon yöntemi ile rüzgar türbini pala tasarımı yapmıştır. Hem önceden optimize edilmiş kanat kesitleri hem de pala planformu ile birlikte kanat kesitlerini de optimize ederek palalar tasarlamışlardır. Liang vd. [21], 2018, CST metoduyla optimize edilmiş dikey rüzgar türbini kanat kesitinin türbin güç performansına etkisini, XFOIL, HAD, genetik algoritma ve dikey rüzgar türbini rotoru için çoklu akım borusu modeli kullanarak incelemiştir.

Bu çalışmanın amacı, yatay eksenli rüzgar türbini palalarının ve kanat kesitlerinin aerodinamik optimizasyonu için farklı geometri tanımlamaları kullanılarak tasarım yöntemi geliştirilmesidir. Tasarım yönteminin uygulama adımları şöyledir: Öncelikle kanat kesit geometrisi tasarımlarında CST metodu kullanılmıştır ve bu bildiride bu yöntem anlatılmaktadır. İlgili aerodinamik verileri, bir potansiyel akış çözücü yazılımı olan XFOIL ile elde edilir. Daha sonra, her pala bölümünde güç üretimini hesaplamak için BEM kullanılır. Ardından genetik algoritma, maksimum güç üretim hedefi için pala genişliği boyunca kesit veter uzunluğunu ve burkulma açısını optimize etmek için kullanılır. Son olarak, geliştirilen modeli doğrulamak için, literatürdeki model referans türbin olarak da yaygın kullanılan yatay eksenli rüzgar türbini deneysel çalışmalarından elde edilen veriler kullanılmıştır. Ana tasarımda kullanılan yöntemler Tablo 1’de de verilmiştir. Çalışma kapsamında ele alınan problem, seçilen bir rüzgar türbini kanat kesitinin ve rotor palasının aerodinamik optimizasyonu ve performans analizleridir. Bir karşılaştırma çalışması olarak, NREL Faz III ve NREL Faz VI referans rüzgar türbinleri doğrulama çalışmalarında kullanılmış ve sonuçlar incelenmiştir. Daha sonra, tek kanat kesiti, S809, kullanan NREL Faz VI palası için bu kanat kesitinin daha kalın ve daha ince versiyonları optimize edilerek tasarlanmış ve yeni rotor palasında bu 3 kesit dağılımı kullanılarak performans analizleri yapılmıştır.

Tablo 1. Ana Tasarım Prosedürü

TASARIM YÖNTEMLERİ	
Kanat Kesiti Geometrisi Tasarımı	Sınıf-Şekil Transformasyonu Metodu
Aerodinamik Veri	Potansiyel Akış Panel Metodu, XFOIL
Güç Hesaplamaları	Pala Elemanı Momentum Teorisi
Optimizasyon	Genetik Algoritma

2. YÖNTEM

2.1. Sınıf-Şekil Transformasyonu Metodu

Sınıf-Şekil Transformasyonu (CST) metodu, çeşitli 2-boyutlu ve 3-boyutlu geometrileri tanımlamak için kullanılan genel bir matematiksel transformasyon tekniğidir. Bu yöntemde şekil fonksiyonu ve sınıf fonksiyonu kullanılmaktadır. Şekil fonksiyonu yapının geometrisini tanımlarken, sınıf fonksiyonu farklı ana geometriler için uygulanabilir yöntemi sağlar. Her bir sistem bileşeni türünü belirtmek için, iki temel geometri sınıflandırılması yapılır:

- Sınıf 1 : Kanat tipi şekiller (kanat, pala, kanatçık, vb.);
- Sınıf 2 : Gövde tipi şekiller (gövde, kanallar, borular, rotor göbeği, vb.)

Bu iki temel sınıf içinde farklı ana geometriler tekrar sınıflandırılır ve şekil fonksiyonu detaylı geometri belirlenir. Bu çalışmanın ana amaçlarından biri, kanat kesiti geometrilerinin CST metodu ile tanımlanmasıdır. Bu yöntem, hücum kenarı yarıçapı, maksimum kalınlık, firar kenarı açıları gibi parametrelere bağlı olarak genel bir matematiksel eğri tanımlar.

Kanat kesiti geometrileri bu genelleştirilmiş matematiksel ifade ile tanımlanır:

$$\zeta(\psi) = \underbrace{\sqrt{\psi}}_I \cdot \underbrace{(1 - \psi)}_II \cdot \underbrace{\sum_{i=0}^N A_i \cdot \psi^i}_{III} + \underbrace{\psi \cdot \zeta_T}_{IV}$$

$$\psi = x/c; \quad \zeta = y/c; \quad \zeta_T = \Delta\zeta_{TE}/c$$

- I : Hücum kenarı yarıçapı ile ilgili terim
- II : Firar kenarı açıları ile ilgili terim
- III : Kanat kesiti kalınlığı ile ilgili terim
- IV : Firar kenarı kalınlığı ile ilgili terim

Şekil fonksiyonu $S(\psi)$ aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$S(\psi) = \frac{\zeta(\psi) - \psi \zeta_T}{\sqrt{\psi} \cdot [1 - \psi]}$$

Böylece şekil fonksiyonu aşağıdaki gibi tekrar tanımlanabilir:

$$S(\psi) = \sum_{i=0}^N [A_i \cdot \psi^i]$$

Kanat kesiti şeklinin temel geometrik özellikleri, hücum kenarı yarıçapı ve firar kenarı açısı ve kalınlığı ile ilgili tanımlar aşağıda Şekil fonksiyonunun sınır değerleri olarak verilir:

$$\psi = 0; \quad S(0) = \sqrt{2R_{LE}/c}$$

$$\psi = 1; \quad S(1) = \tan \beta + \Delta Z_{TE}/c$$

Temel geometri kanat kesiti birim şekil fonksiyonundan türetilir, $S(\psi) = 1$. Birim şekil fonksiyonu n'inci dereceden Bernstein polinomlarına aşağıdaki gibi ayrıştırılabilir:

$$S_i(\psi) = K_i \psi^i (1 - \psi)^{n-1}$$

$$K_i \equiv \binom{n}{i} = \frac{n!}{i! (n-i)!}$$

Sınıf fonksiyonunun $C(\psi)$ genel formda tanımlanması aşağıdaki gibi yapılmıştır:

$$C_{N2}^{N1}(\psi) = (\psi)^{N1} [1 - \psi]^{N2}$$

Sınıf fonksiyonu, genel geometri sınıflarını belirlerken; fonksiyonun $N1$ ve $N2$ üsleri, temel geometri sınıfını belirler. Birim şekil fonksiyonuna karşılık gelen geometri, ilgili sınıf için temel şekil olarak adlandırılır. Yuvarlak burunlu pala kesiti için, $N1 = 0.5$ ve $N2 = 1.0$ olarak tanımlanmıştır.

Sonuç olarak, bu yöntemde genelleştirilmiş ifade aşağıdaki gibi bulunur:

$$\zeta(\psi) = C_{N2}^{N1}(\psi) \cdot S(\psi) + \psi \cdot \zeta_T$$

Bu denklem, üst ve alt yüzeyler için ayrıştırılabilir:

$$\begin{aligned}\zeta(\psi)_{üst} &= C_{N2}^{N1}(\psi) \cdot S_{üst}(\psi) + \psi \cdot \Delta\xi_{üst} \\ \zeta(\psi)_{alt} &= C_{N2}^{N1}(\psi) \cdot S_{alt}(\psi) + \psi \cdot \Delta\xi_{alt} \\ \Delta\xi_{üst} &= y u_{TE}/c \quad \Delta\xi_{alt} = y l_{TE}/c \quad C_{N2}^{N1}(\psi) = (\psi)^{N1}[1 - \psi]^{N2} \\ S_{üst}(\psi) &= \sum_{i=1}^n [A_{üst\ i} \cdot S_i(\psi)] \quad S_{alt}(\psi) = \sum_{i=1}^n [A_{alt\ i} \cdot S_i(\psi)]\end{aligned}$$

Belirli performans hedeflerine tabi yeni kanat kesiti geometrilerini tasarlarlarken, $A_{üst\ i}$ ve $A_{alt\ i}$ ağırlık katsayıları optimizasyon sürecinde tasarım değişkenleri haline gelir. Öte yandan, CST metodu ile bilinen bir kanat kesiti için, bu katsayılar eğri uydurma teknikleri yardımıyla bulunur. Bu çalışmada, rüzgar türbini palasının farklı bölümleri için yeni kanat kesiti geometrileri oluşturmak amacıyla bu metod kullanılmıştır.

2.2 Pala-Elemanı Momentum Teorisi

Pala-Elemanı teorisi ve Momentum teorisinden ayrı ayrı elde edilen kuvvet ve tork değerlerinin eşitlenmesiyle oluşturulan teori Pala-Elemanı Momentum (BEM) teorisidir. Pala Elemanı Teorisi, pala uzunluğu boyunca kanat kesitlerinin oluşturduğu aerodinamik yükler, taşıma ve sürüklenme kuvvetleri, tarafından üretilen kuvvetleri hesaplar. Momentum Teorisi ise, türbinin kontrol hacminden geçen dönen bir dairesel akım borusu için momentum dengesini kurar ve kullanır. BEM temel olarak ilgili indüksiyon faktörlerini, a ve a' hesaplayarak indüklenmiş hızları bulur. Böylece rüzgar türbininin gücü ve torku bu indüksiyon faktörleri sayesinde kolayca hesaplanabilir.

$$\begin{aligned}T_{pala\ elemanı\ teorisi} &= T_{momentum\ teori} \\ Q_{pala\ elemanı\ teorisi} &= Q_{momentum\ teori} \\ a &= \frac{1}{\frac{4 F \sin^2 \varphi}{\sigma C_n} + 1}; \quad a' = \frac{1}{\frac{4 F \sin \varphi \cos \varphi}{\sigma C_t} - 1}; \quad \sigma = \frac{N_b c}{2\pi r}\end{aligned}$$

Prandtl uç kaybı düzeltmesi, F , Glauert düzeltmesi, ve rotor göbeği düzeltmesi dikkate alınarak yukarıdaki denklemler değiştirilmiştir ve gerçekleştirilecek tasarım, analiz ve değerlendirme çalışmaları için MATLAB'da bir BEM kodu, AeroBEM, yazılmıştır. Yinelemeli sayısal çözüm yöntemi, Ceyhan vd.'nin [1,2], 2008-2009, çalışmalarında da verildiği gibi, indüksiyon faktörlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Garantili yakınsama sağlanabilmesi için Ning vd.'nin [22], 2013, geliştirdiği çözüm algoritması uyarlanarak kodlanmıştır.

2.3 Genetik Algoritma

Genetik Algoritma, en iyi bireylerin hayatta kalma stratejisinin güdüldüğü, çok amaçlı, yarı rasgele bir arama optimizasyon tekniğidir. Optimizasyon şeması bir grup olası çözüm üretmekte, çözümleri bir uygunluk fonksiyonuna göre değerlendirmekte, bir dizi uygun ebeveyn çözümünü seçmekte ve bu ebeveynleri yeni bir olası çözüm popülasyonu oluşturmak için yeniden üretmektedir. Çapraz geçiş, çoğaltma ve mutasyon işlemleri popülasyondaki doğal seçim sürecinde de kullanılır.

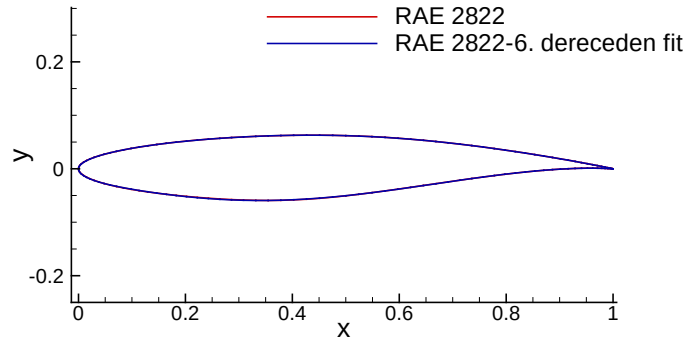
Bu çalışmada, BEM kodunda bir rüzgar türbini palasının tanımlanması için kullanılan parametrelerin optimizasyonu genetik algoritma ile gerçekleştirilmektedir.

3. ANALİZLER ve SONUÇLAR

3.1 Sınıf-Şekil Transformasyonu Metodu (CST) Doğrulamaları

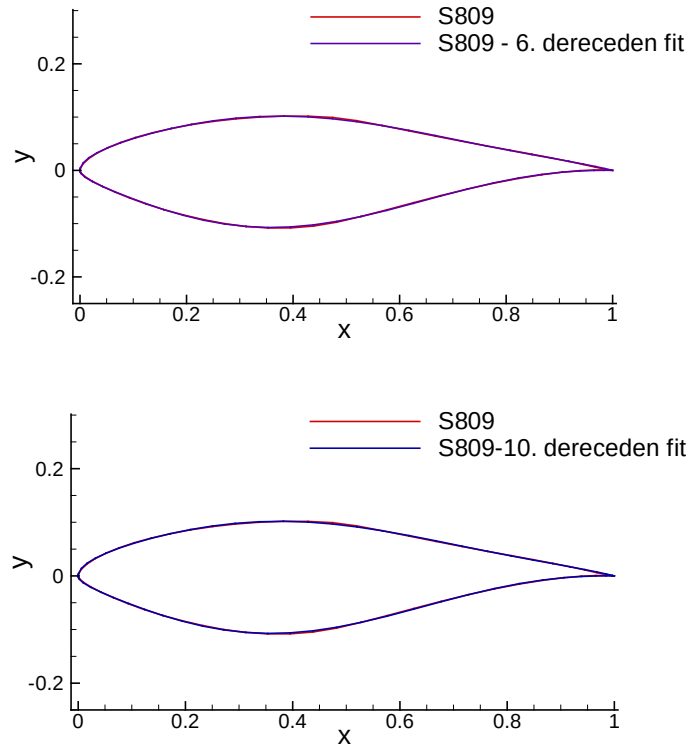
CST için yazılan MATLAB kodu, AirfoilCST, literatürde yer alan farklı kanat kesitlerinin tanımlanması için kullanılarak doğrulanmıştır.

Şekil 1’de RAE 2822 kanat kesiti için yapılan 6. dereceden CST sonuçları gösterilmiştir. RAE 2822 kanat kesiti orijinal koordinatlardan çizilen geometrisi kırmızı, bu çalışmada geliştirilen kod ile çizilen geometri mavi kesikli çizgi ile verilmiştir. Bu yöntemle, kompleks bir geometriye sahip kanat kesiti alt eğrisinin dahi oldukça düzgün bir şekilde takip edilebildiği görülmektedir.



Şekil 1. RAE 2822 kanat kesiti için yapılan 6. dereceden Sınıf-Şekil Transformasyonu

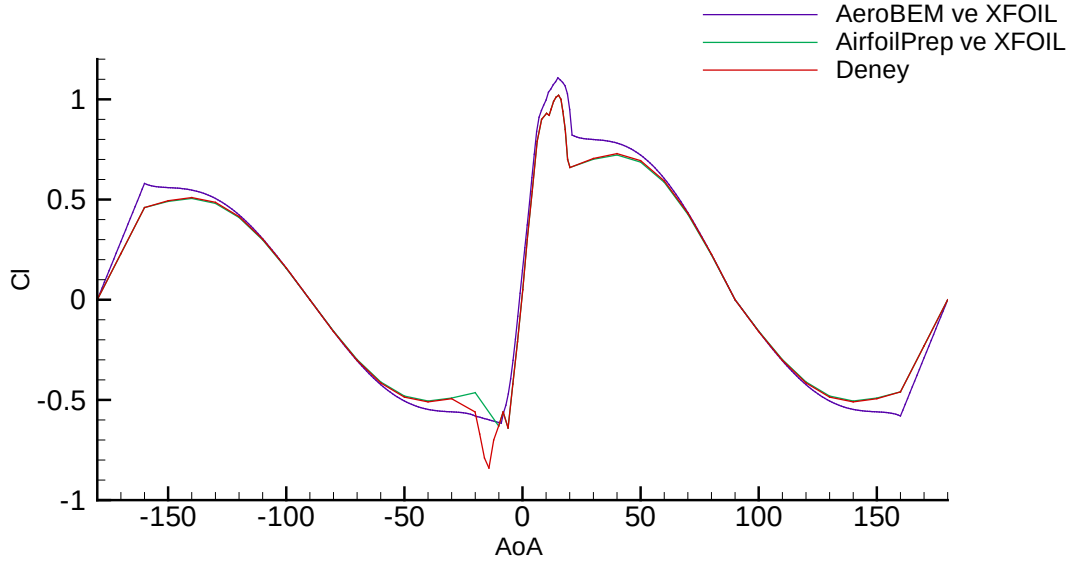
S809 kanat kesiti, NREL Faz III ve Faz VI test rüzgar türbini kanatlarında kullanılmaktadır. Şekil 2’de S809 kanat kesiti için yapılan, 6. ve 10. derecelerden iki farklı CST sonucu gösterilmiştir. S809 kanat kesiti orijinal geometrisi kırmızı, bu çalışmada kullanılan kod ile çizilen geometri mavi çizgi ile verilmiştir. Bu karşılaştırmada görüldüğü üzere, 6. derece CST kullanmak, kanat kesiti geometrisini yüksek çözünürlükte çıkarmak için yeterlidir.



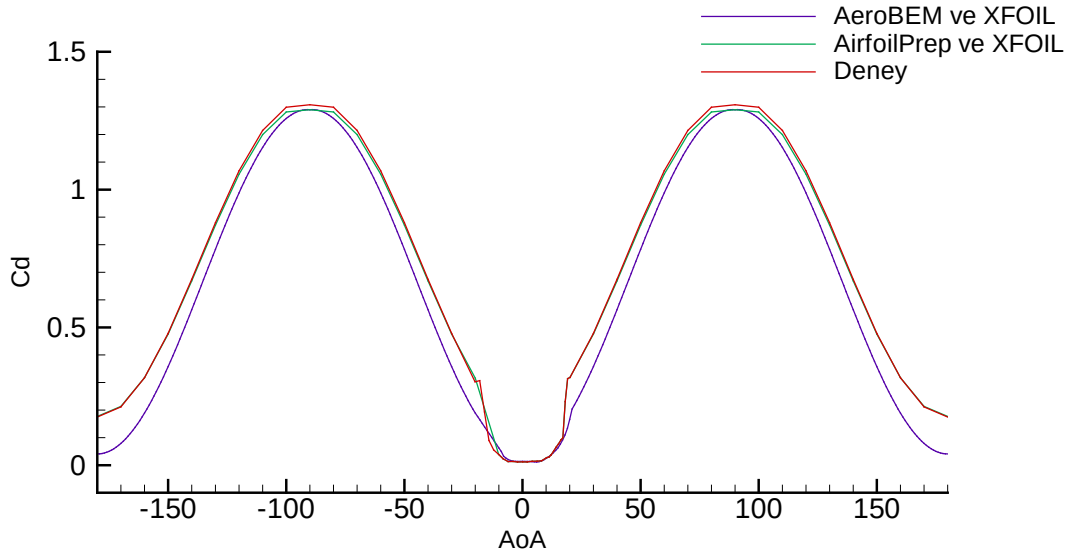
Şekil 2. S809 kanat kesiti için 6. (üst) ve 10. (alt) dereceden Sınıf-Şekil Transformasyonu

3.2 Aerodinamik Yük Katsayıları Hesaplamaları

Pala tasarımında kullanılacak kanat kesitlerinin farklı Reynolds sayıları ve farklı hücum açılarındaki (AoA) taşıma ve sürtünme kuvvetlerini hesaplamak için ve böylece aerodinamik yük verilerinin oluşturulması için XFOIL yazılımı kullanılmıştır. Viterna-Corrigan metodu kullanarak 360 derece polar değerleri ekstrapolasyonu yapan bir MATLAB kodu da yazılmıştır. Taşıma ve sürüklenme kuvveti katsayılarının, C_l ve C_d , polar dağılımları, S809 kanat kesiti için, 750.000 Reynolds sayısı için bir açık kaynak kod olan “AirfoilPrep v2.02.03” sonuçları ve rüzgâr tüneli ölçüm sonuçları ile Şekil 3 ve Şekil 4’te karşılaştırılmıştır.



Şekil 3. S809 Kanat Kesiti için Taşıma Kuvveti Katsayısının Hücum Açısı ile Değişimi (Re=750.000)



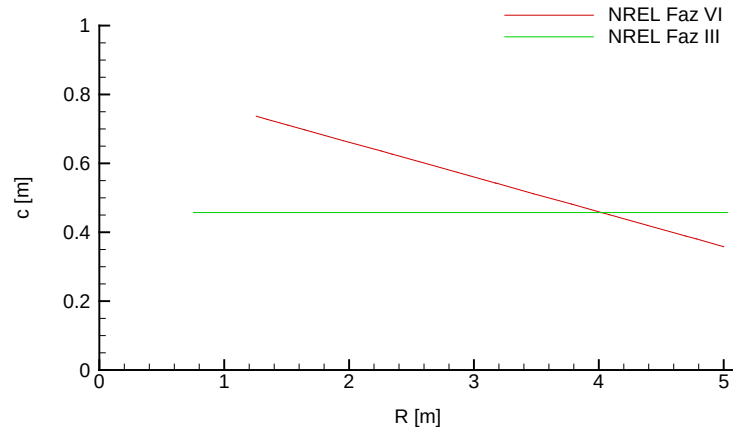
Şekil 4. S809 Kanat Kesiti için Sürüklenme Kuvveti Katsayısının Hücum Açısı ile Değişimi (Re=750.000)

3.3 Pala Elemanı Momentum Teorisi Analizleri Doğrulamaları

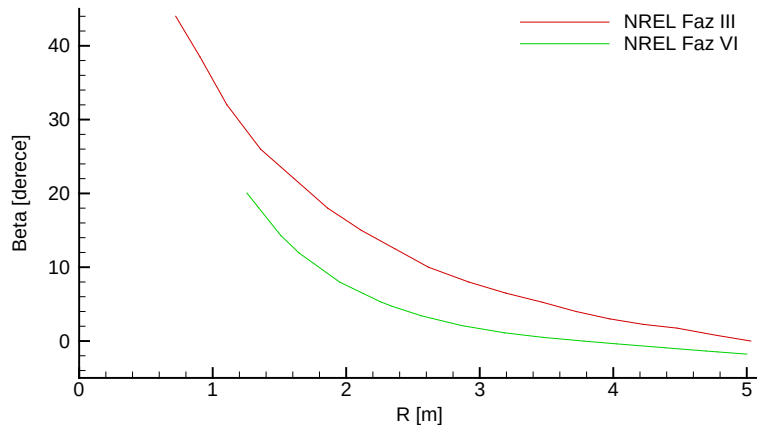
Çalışma kapsamında MATLAB’da geliştirilen BEM kodu, AeroBEM, ile NREL Faz III ve NREL Faz VI rüzgar türbini rotorları için analizler yapılmış ve deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Referans türbinlere ait rotor geometrik parametreleri Tablo 2’de, veter uzunluğu dağılımı Şekil 5’te, ve burkulma açısı dağılımı Şekil 6’da verilmiştir.

Tablo 2. NREL Faz III ve NREL Faz VI Rotorlarının Geometrik Parametreleri

Rotor Parametreleri	NREL Faz III	NREL Faz VI
Pala Sayısı	3	2
Rotor Yarıçapı	5.03 m	5.03 m
Dönüş Hızı	71.63 rpm	71.63 rpm
Devreye Girme Rüzgar Hızı	6 m/s	6 m/s
Anma Gücü	19.8 kW	19.8 kW
Kanat Göbek Uzantısı Uzunluğu	0.723 m	1.275 m
Pala Hatve Set Açısı	3°	0°
Burkulma Açısı	Lineer olmayan: 44° (kök) — 0° (uç)	Lineer olmayan: 20° (kök) — -1.775° (uç)
Pala Daralma Oranı	Sabit	Lineer
Kök Veter Uzunluğu	0.4572 m	0.737 m
Uç Veter Uzunluğu	0.4572 m	0.358 m
Kanat Kesiti	S809	S809

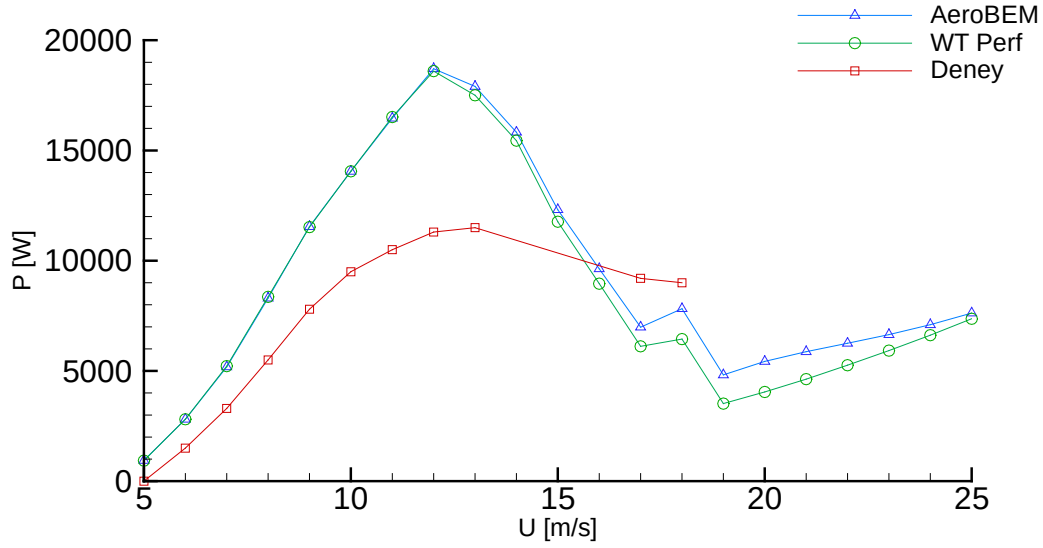


Şekil 5. NREL Faz III ve NREL Faz VI Rotor Palalarının Veter Uzunluğu Dağılımı

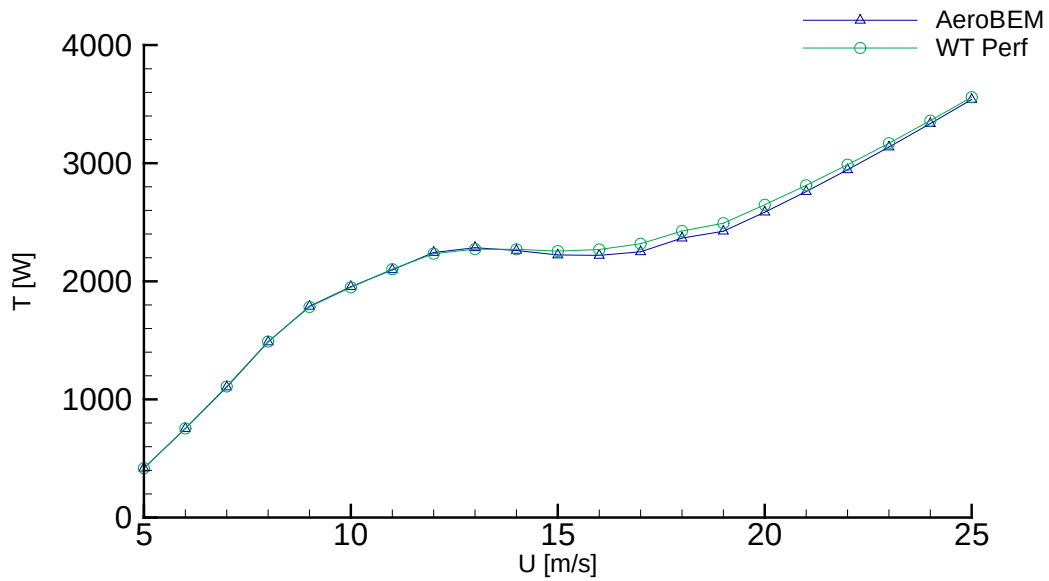


Şekil 6. NREL Faz III ve NREL Faz VI Rotor Palalarının Burkulma Açısı Dağılımı

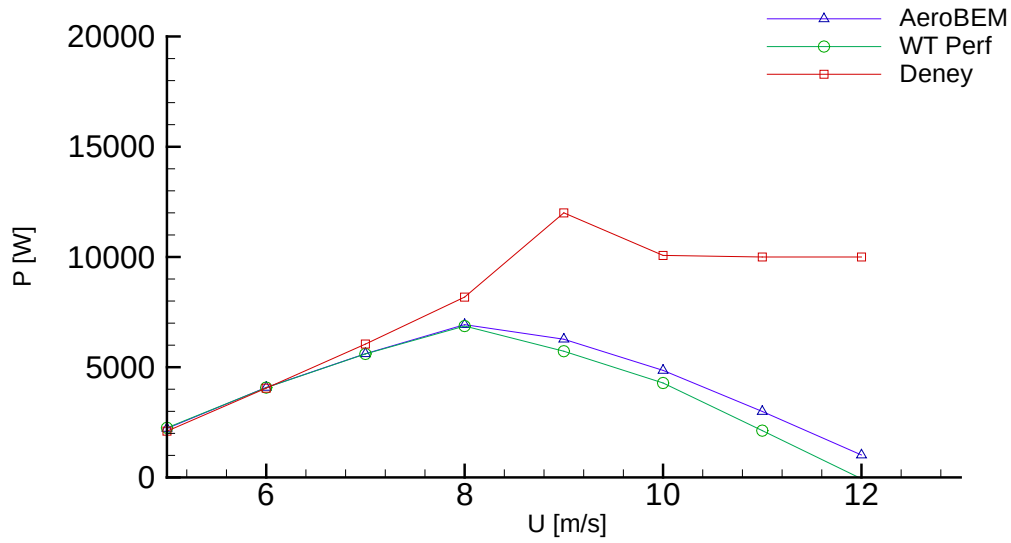
BEM analiz sonuçları, NREL tarafından geliştirilmiş, BEM teorisini kullanarak hesaplama yapan bir açık kaynak kod olan “WT Perf” yazılımı sonuçları ile de karşılaştırılmıştır. NREL Faz III rotoru güç eğrisi karşılaştırması Şekil 7’de, itki eğrisi karşılaştırması Şekil 8’de; NREL Faz VI rotoru güç eğrisi karşılaştırması Şekil 9’da, itki eğrisi karşılaştırması Şekil 10’da gösterilmiştir.



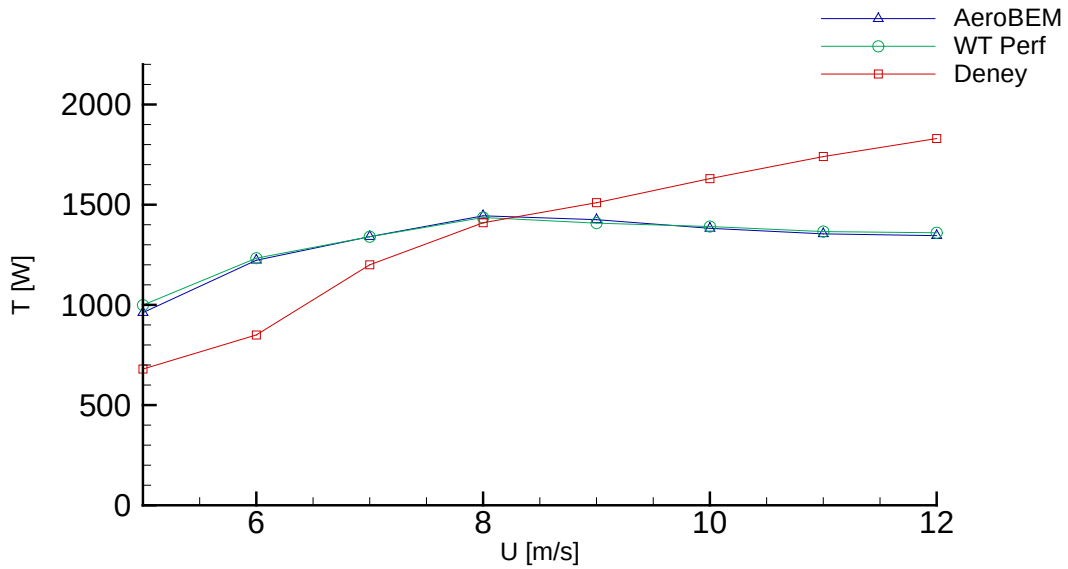
Şekil 7. NREL Faz III Rotoru Güç Eğrisi Karşılaştırması



Şekil 8. NREL Faz III Rotoru İtki Eğrisi Karşılaştırması



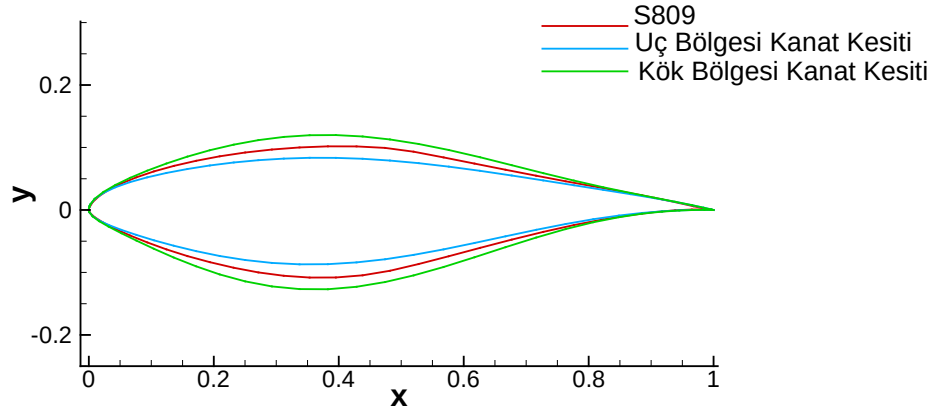
Şekil 9. NREL Faz VI Rotoru Güç Eğrisi Karşılaştırması



Şekil 10. NREL Faz VI Rotoru İtke Eğrisi Karşılaştırması

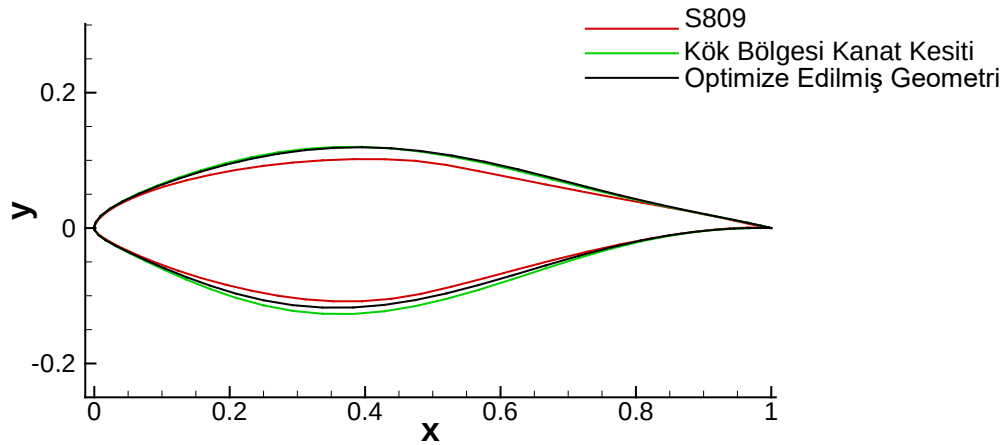
3.4 CST Metodu ile Kanat Kesiti Optimizasyonu

Bu bölümde, pala yarıçapı boyunca belirlenen farklı bölgelerde değişken kanat kesiti tasarlanması amaçlanmıştır. Öncelikle pala; pala kök bölgesi, pala orta bölgesi ve pala uç bölgesi olmak üzere üç bölgeye bölünmüştür. Pala kök bölgesinde, S809 kanat kesitinden CST metodu ile türetilen daha kalın bir kanat profili temel alınıp, bu profilin ağırlık katsayıları genetik algoritma kullanılarak optimize edilmiştir. Pala orta bölgesinde S809 kanat kesiti geometrisi değiştirilmeden kullanılmıştır. Pala uç bölgesinde ise, yine S809 kanat kesitinden CST metodu ile türetilen daha ince bir kanat profili temel alınıp, bu profilin ağırlık katsayıları genetik algoritma kullanılarak optimize edilmiştir. Şekil 11’de pala kök bölgesi ve pala uç bölgesinde optimizasyonda temel alınan profillerin S809 profili ile karşılaştırması verilmiştir. Bu temel geometrileri oluşturmak için, CST ağırlık katsayıları parametrelerinden kanat kesitinin orta kısımlarındaki kalınlık dağılımını etkileyenler %20 artırılıp ve azaltılarak, sırasıyla kalın ve ince profiller elde edilmiştir.



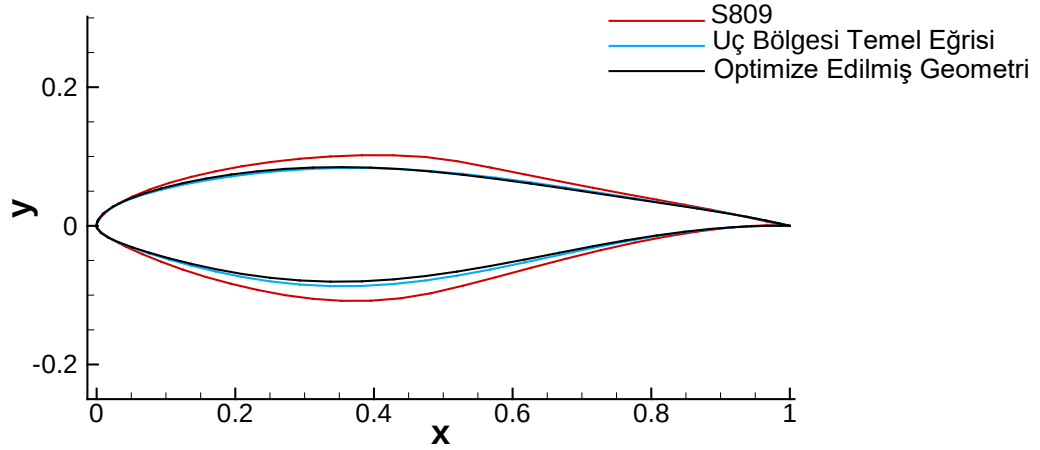
Şekil 11. Kök Bölgesi ve Uç Bölgesinde Optimizasyonda Temel Alınan Kalın ve İnce Kanat Kesiti Geometrilerinin S809 Profili ile Karşılaştırması

Pala kök bölgesi için, Şekil 11’de yeşil renkli eğri ile verilen temel kanat kesiti geometrisi üst ve alt yüzeyleri 6. dereceden CST parametreleri, ağırlık katsayısı parametreleri, ile tanımlanmıştır. Toplam 12 adet olan CST ağırlık katsayılarından kesit kalınlığına etkiyen 6 tanesi, optimizasyon girdisi olarak verilmiştir. 5° hücum açısı ve 1.000.000 Reynolds sayısı için XFOIL ile hesaplanan C_l/C_d oranının maksimize edilmesi optimizasyon hedefi olarak belirlenmiştir. Genetik algoritma ile elde edilen optimizasyon sonucunun S809 geometrisi ve pala kök bölgesi optimizasyonunda temel alınan geometri ile karşılaştırması Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 12. Pala Kök Bölgesi için Optimize Edilen Kanat Kesiti Geometrisinin S809 Profili ve Pala Kök Bölgesi Optimizasyonunda Temel Alınan Geometri ile Karşılaştırması

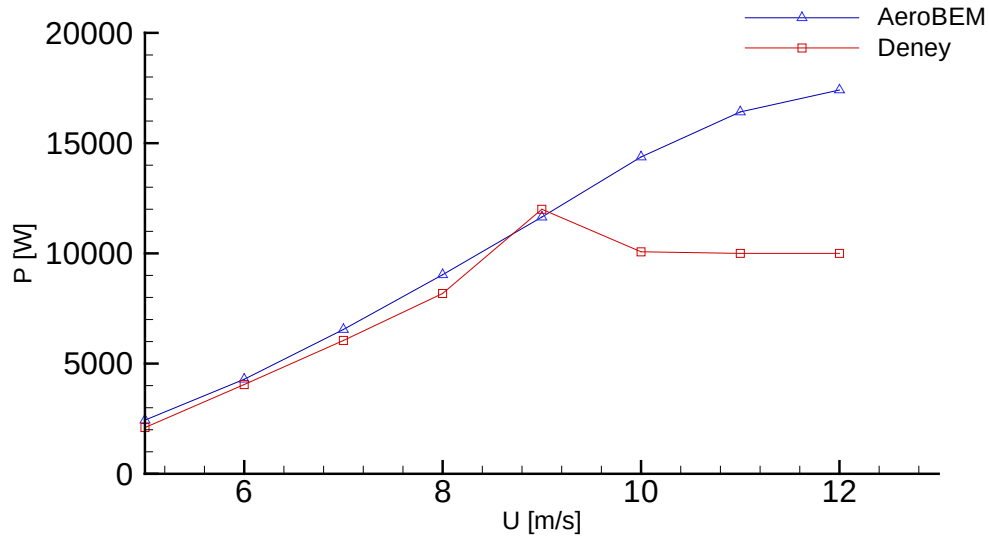
Pala uç bölgesi için, Şekil 11’de mavi renkli eğri ile verilen temel kanat kesiti geometrisi üst ve alt yüzeyleri 6. dereceden CST parametreleri ile tanımlanmıştır. Toplam 12 adet olan CST ağırlık katsayılarından kesit kalınlığına etkiyen 6 tanesi, optimizasyon girdisi olarak verilmiştir. 5° hücum açısı ve 5.000.000 Reynolds sayısı için XFOIL ile hesaplanan C_l/C_d oranının maksimize edilmesi optimizasyon hedefi olarak belirlenmiştir. Genetik algoritma ile elde edilen optimizasyon sonucunun S809 geometrisi ve pala uç bölgesi optimizasyonunda temel alınan geometri ile karşılaştırması Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 13. Pala Uç Bölgesi için Optimize Edilen Kanat Kesiti Geometrisinin S809 Profili ve Pala Uç Bölgesi Optimizasyonunda Temel Alınan Geometri ile Karşılaştırması

3.5 Optimize Edilen Kanat Kesitleriyle Pala Tasarımı

Bu bölümde, pala kök bölgesi ((%25-50R) ve pala uç bölgesi (%75-100R) için optimize edilen kalın ve ince kanat kesitlerinin türbin güç performansına etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, NREL Faz VI türbini baz alınarak optimize edilmiş kanat kesitleriyle aynı veter ve burkulma açısı dağılımına sahip yeni bir türbin palası tasarlanmıştır. Şekil 14'te yeni tasarlanan rotor ile NREL Faz VI rotoru güç eğrisi karşılaştırması verilmiştir. Optimize edilmiş kanat kesitleri kullanılarak tasarlanan türbinin güç performansının arttığı görülmüştür.



Şekil 14. Üç Farklı Kanat Kesiti Kullanan Yeni Tasarlanan Rotor ile NREL Faz VI Rotoru Güç Eğrisi Karşılaştırması

4. SONUÇ

Bu çalışmada yatay eksenli rüzgâr türbini rotor palalarının ve kanat kesitlerinin aerodinamik optimizasyonu Sınıf-Şekil Transformasyonu (CST) Metodu, XFOIL, BEM ve Genetik Algoritma kullanılarak yapılmıştır. BEM kodu için doğrulama çalışmaları NREL referans türbinleri için yapılmıştır. Daha sonra, seçilen iki kanat kesiti için CST yöntemi test edilmiştir. Ardından yeni bir türbin palası tasarımı için CST metodu ile iki farklı kanat kesiti kök bölgesi

için kalın olan ve uç bölgesi için daha ince olan kanat kesitleri, optimize edilmiştir. Bu yeni kanat kesitleri ile birlikte üç kesit kullanan tasarlanan yeni rotor palasının aerodinamik performansı NREL Faz VI türbini ile karşılaştırılmıştır. Devam eden çalışmalarda, palanın planform optimizasyonu için veter uzunluğu ve burkulma açısının etkileri incelenerek pala planformu optimizasyonu yapılacaktır. Kanat kesiti ve pala planformu, bu çalışmadaki yazılan kodlarla ve bu yöntemle hepsi birlikte de optimize edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Ceyhan, O.**, “Aerodynamic Design and Optimization of Horizontal Axis Wind Turbines by Using BEM Theory and Genetic Algorithm,” MS Thesis, METU Dept. of Aerospace Engineering, September 2008.
- [2] **Ceyhan, O., Ortakaya, Y., Korkem, B., Sezer-Uzol, N. ve Tuncer, I.H.**, “Optimization of Horizontal Axis Wind Turbines by using BEM Theory and Genetic Algorithm,” 5th Ankara International Aerospace Conference, METU Ankara, Turkey, 17-19 August 2009.
- [3] **Sağol, E., Sezer-Uzol, N., ve Uzol, O.**, “Site Specific Cost-Effective Design Optimization of A Horizontal Axis Wind Turbine,” NUYEK 2009, Nuclear & Renewable Energy Sources with International Participation, Ankara, 28-29 September 2009.
- [4] **Sağol, E.**, “Site Specific Design Optimization of A Horizontal Axis Wind Turbine Based On Minimum Cost of Energy,” MS Thesis, METU Dept. of Aerospace Engineering, January 2010.
- [5] **Polat, O., Sezer-Uzol, N., ve Tuncer, I.H.**, “Aerodynamic Optimization Of Horizontal Axis Wind Turbines Based On Potential Flow Solutions With BEM Theory And Genetic Algorithm,” ECCOMAS CFD & OPTIMIZATION 2011 - 064, An ECCOMAS Thematic Conference, Antalya, Turkey, 23-25 May 2011.
- [6] **Polat, O.**, “Genetic Algorithm Based Aerodynamic Shape Optimization of Wind Turbine Rotor Blades Using A 2-D Panel Method with a Boundary Layer Solver,” MS Thesis, METU Dept. of Aerospace Engineering, December 2011.
- [7] **Polat, O., Sezer-Uzol, N., ve Tuncer, I.H.**, “Aerodynamic Shape Optimization of Wind Turbine Blades Using A 2-D Panel Method With A Boundary Layer Solver And A Genetic Algorithm,” European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2012), Vienna, Austria, September 10-14, 2012.
- [8] **Polat, O., Sezer-Uzol, N., ve Tuncer, I.H.**, “Aerodynamic Shape Optimization of Wind Turbine Blades Using a Parallel Genetic Algorithm,” AIAC-2013-154, 7. Ankara International Aerospace Conference, METU, Ankara, Turkey, 11-13 September 2013.
- [9] **Polat, O., Sezer-Uzol, N., ve Tuncer, I.H.**, “Genetic Algorithm Based Aerodynamic Shape Optimization Tool for Wind Turbine Blades and its Implementation to Helicopters,” AHS 70th Forum and Technology Display, Montreal, Canada, May 19-22, 2014.
- [10] **Elfarrar, M.A., Sezer-Uzol, N., ve Akmandor, I.S.**, “Investigations on Tangential Tip Tilting for HAWT Rotor Blades,” 10th International Conference on Clean Energy, ICCE-2010, Famagusta, North Cyprus, 15-17 September 2010.
- [11] **Elfarrar, M.A., Akmandor, I.S., ve Sezer-Uzol, N.**, “Pitch Angle Design of NREL VI Wind Turbine Blade,” ECCOMAS CFD & OPTIMIZATION 2011-1080, An ECCOMAS Thematic Conference, Antalya, Turkey, 23-25 May 2011.
- [12] **Elfarrar, M.A., Akmandor, I.S., ve Sezer-Uzol, N.**, “Investigation and Optimization of Winglets for HAWT Rotor Blades,” ETC 2011, 9th European Conference on TURBOMACHINERY Fluid Dynamics and Thermodynamics, Istanbul, Turkey, 21-25 March 2011.
- [13] **Elfarrar, M.**, “Wind Turbine Design and Optimization,” PhD Thesis, METU Dept. of Aerospace Engineering, April 2010 - Ocak 2011.
- [14] **Elfarrar, M.A., Sezer-Uzol, N., ve Akmandor, I.S.**, “NREL VI Rotor Blade: Numerical Investigation and Winglet Design and Optimization Using CFD,” Wind Energy, (Online Early View, 6 February 2013) Vol 17. Issue 4. pp 605-626, April 2014.

- [15] **Elfarra, M.A., Sezer-Uzol, N., ve Akmandor, I.S.**, “Investigations on Blade Tip Tilting for HAWT Rotor Blades Using CFD,” *International Journal of Green Energy*, (Published Online: 08 Oct 2014) Vol. 12, Issue 2, pp. 125-138, 2015.
- [16] **Sobieczky, H.**, “Aerodynamic Design and Optimization Tools Accelerated by Parametric Geometry Preprocessing,” *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering ECCOMAS 2000*, Barcelona, 11-14 September 2000.
- [17] **Kulfan B.M.**, “Universal Parametric Geometry Representation Method,” *45. Journal of Aircraft*, Vol. 45, No.1, January-February 2008.
- [18] **Kulfan B.M. and J.E. Bussolotti.**, ““Fundamental” Parametric Geometry Representations for Aircraft Component Shapes,” *11th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference: The Modeling and Simulation Frontier for Multidisciplinary Design Optimization*, Virginia, USA, 6 - 8 September 2006.
- [19] **Javed F., Javed S., Bilal T., Rastogi V.**, “Design of Multiple Airfoil HAWT Blade using MATLAB Programming,” *5th International Conference on Renewable Energy Research and Applications - ICRERA 2016*, November 2016.
- [20] **Barret R.T.**, “Investigation into Integrated Free-Form and Precomputational Approaches for Aerostructural Optimization of Wind Turbine Blades”, *MS Thesis*, Brigham Young University Dept. of Mechanical Engineering, January 2018.
- [21] **Liang C, Li H.**, “Aerofoil Optimization for Improving The Power Performance of a Vertical Axis Wind Turbine Using Multiple Streamtube Model and Genetic Algorithm,” *R Soc Open Sci.* 2018;5(7):180540. Published 2018 Jul 25. doi:10.1098/rsos.180540
- [22] **Ning, S.A.**, “A Simple Solution Method For The Blade Element Momentum Equations With Guaranteed Convergence,” *Wind Energy* 17(9), July 2013.

GELİŞTİRİLEN DMST YAZILIMI İLE YUNUSLAMA AÇISI KONTROLÜNÜN DARRIEUS TÜRBİNİ PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

**Rıdvan Almaz², Sercan Acarer³
Z.Haktan Karadeniz³, İskender Kökey¹, Alpaslan Turgut⁵**

¹XGEN ENERGY, ²Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, ³İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, ⁵Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü
ridvanalmaz@gmail.com, sercan.acarer@ikc.edu.tr, zhaktan.karadeniz@ikc.edu.tr, iskender.kokey@xgen.com.tr, alpaslanturgut@gmail.com

ÖZET

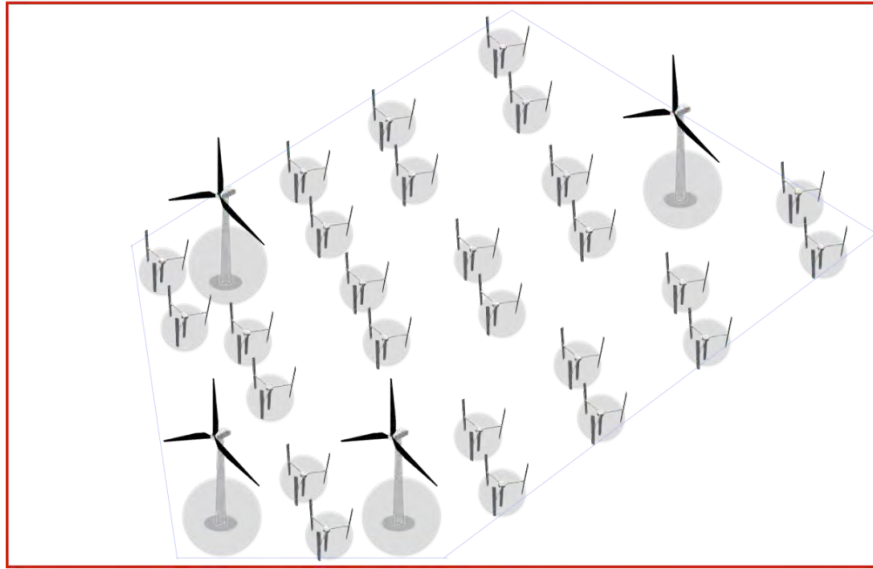
Değişken geometri ve buna uygun kontrol teknikleri ile rüzgar türbinlerinin adaptasyonunu ve esnekliğini arttırmak, yenilenebilir enerjinin toplam küresel enerji üretimindeki payı arttıkça, önemli konulardan biri haline gelmiştir. Kentsel veya kırsal bölgelerdeki değişken rüzgar yönü ve türbülanslı rüzgar koşulları için uygun olan Darrieus türbinleri, dinamik (anlık değişen) kanat yunuslama açısından faydalanılarak daha esnek hale getirilebilir. Dinamik yunuslama açısı kontrolü, özellikle dönme hızları (ve yunuslama açısı değişim frekansı) düşük olan büyük rüzgar türbinleri için pratikte uygulanabilir durumdadır. Bu çalışmada, Darrieus türbinlerinde dinamik yunuslama açısının etkisini incelemek için, yarı-deneyssel (kanat profili verilerini kullanarak) ve bir boyutlu “İki Bölgeye Ayrılmış Çoklu Akış Tüpü Modeli (Double Multiple Stream Tube / DMST)” rüzgar türbini modeli geliştirilmiştir. Ampirik veri tabanlı model, literatürde bulunan 4 bağımsız deney verisiyle kalibre edilmiş ve bunlardan bağımsız 1 deney verisiyle doğrulanmıştır. Bu sayede literatürde mevcut olan benzer çalışmalar kullanılarak bu modelin tahmin yeteneği gösterilmiştir. Ardından, hem negatif hem de pozitif sabit yunuslama açısının türbin performansına etkisi incelenmiştir. Son olarak, yunuslama açısı dinamik olarak kontrol edilerek, akışın kanada en düşük kaldırma/sürüklenme kuvvet oranında gelmesi sağlanmış ve bunun türbin performansına olan etkisi incelenmiştir. Buna göre türbin çalışma aralığı önemli derecede artmıştır. Ancak kanadın akıştan maksimum düzeyde enerji soğurmasına dayalı bu strateji, kanada daha az hava gelmesiyle sonuçlandığı için türbinin maksimum verimini arttırmamıştır.

1. GİRİŞ

Modern rüzgar türbinleri, rotor eksenlerinin konumlarına bağlı olarak düşey eksenli ve yatay eksenli olarak iki ana sınıfa ayrılmış durumdadır. Düşey eksenli rüzgar türbinleri (DERT) üzerine yapılan çalışmalar 70’lerin sonlarında başlamış olsa dahi, yatay eksenli rüzgar türbinlerinin (YERT) verimlerinin ve çalışma aralıklarının daha yüksek olması sebebiyle yaygın bir kullanım alanı sağlayamamışlardır [1]. Dolayısıyla günümüzde yüksek kapasiteli enerji üretilmesi için çoğunlukla YERT’ler tercih edilmektedir. Bu RES’lerde kullanılan YERT’lerin kanat ucu hızı, havanın serbest akışının 6-9 katına kadar çıkabilmekte ve bu durum beraberinde pahalı ve karmaşık frenleme sistemi ile kanat açısı ayarlama mekanizması ihtiyacını doğurmaktadır [2]. Ayrıca, artan kanat çapları ve kule yükseklikleri nedeniyle, birden fazla YERT’in bir arada kullanılması ile oluşturulan modern RES’lerdeki türbinlerin birbirleri ile olan indirmesinin azaltılması için ihtiyaç duyulan boş alan da artmaktadır [3].

Alternatif olarak geliştirilen DERT’ler ise günümüzde daha çok, düşük güç ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılmaktadır. Farklı tasarımlarda DERT’ler bulunmakla birlikte başarımları ayrıntılı olarak incelenip belgelenmiş, yayın üretimi sağlamış, güvenilirliği yüksek, uygun maliyetli ve ticari olarak bulunabilen DERT piyasası henüz oluşmamıştır [2]. Ancak, özellikle

2009 yılı sonrasında üzerine yoğun bir şekilde çalışılan DERT'ler ile ilgili yapılan akademik çalışmalar DERT'lerin çalışma mekanizmaları hakkında son derece detaylı sonuçları ortaya koymaktadır. DERT'ler gerek tekli, gerek eşli gerekse eşli ve gruplar halinde kullanılabilirler. Eşli şekilde çalıştırılıp gruplar halinde sahaya konumlandırılarak oluşturulan RES'lerde aynı taban alanı başına güç yoğunluğunun YERT'ler ile kurulan RES'lere oranla 3-4 kat daha fazla olduğu saptanmıştır [4]. Ayrıca DERT'lerin YERT'ler ile kurulmuş RES'lerdeki atıl alanların da kurulu güce çevrilebilmesi için çalı-ağaç konseptinde kullanılmaları önerilmektedir (Şekil 1)[5].



Şekil 1. Çalı-ağaç konseptine sahip bir RES [5]

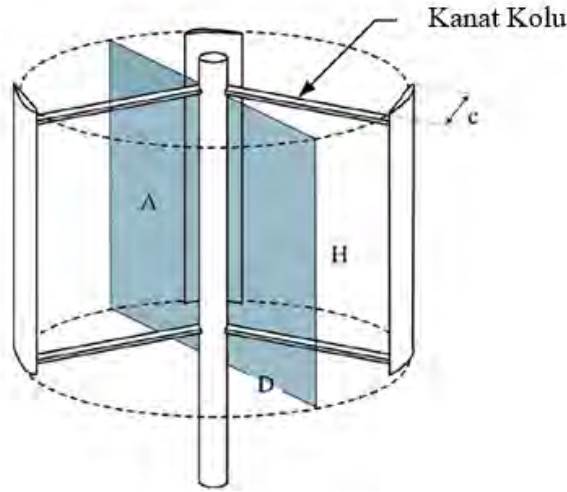
Son dönemde DERT'lerin kullanım alanlarında yaşanan bu hızlı gelişmeler, gerek akademik araştırmacıları gerekse ticari firmaları DERT'ler üzerine daha fazla çalışmaya motive etmiştir. Bu amaçla gerek eşli ve gruplar halinde çalışan DERT'lerin enerji indirgemelerinin incelenmesi gerekse, tekil DERT'lerin performanslarının artırılması amacıyla çok sayıda akademik ve ticari grup çalışmalarını sürdürmektedir.

2. DERT'lerde KANADA ETKİYEN KUVVETLER VE TASARIM PARAMETRELERİ

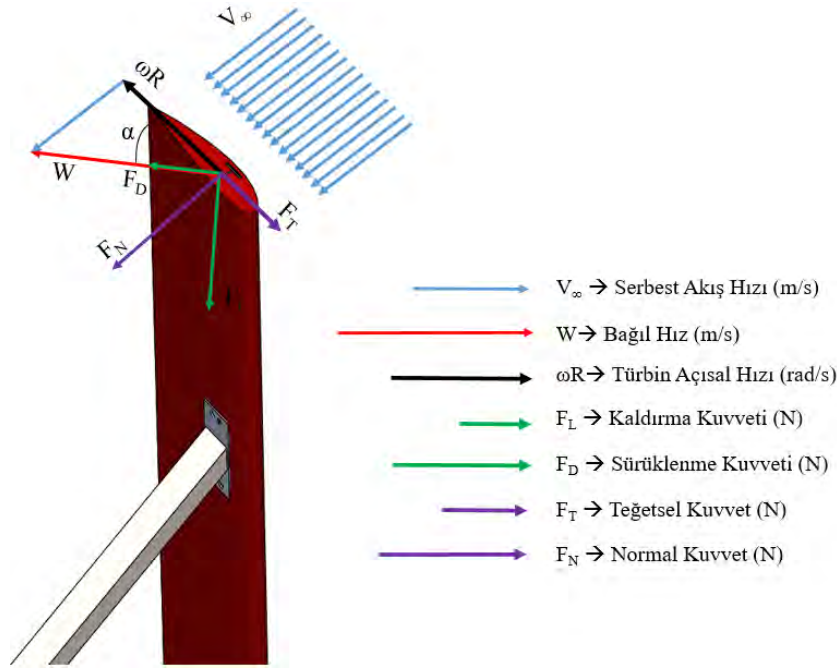
DERT geometrisi Tablo 1'de numaralandırılan 12 temel parametre ile tanımlanabilmektedir. Bunlar, Şekil 2 üzerinde gösterilmektedir. Şekil 3 ise kanada gelen akımın ve oluşan kuvvetlerin yönünü göstermektedir.

Tablo 1. Türbin Parametreleri

Parametre Tanımı	Sembolü	Birimi (SI)
Veter (Kord) Uzunluğu	c	m
Türbin/Kanat Yüksekliği	H	m
Rotor Çapı	D	m
Türbin Süpürme Alanı	A	m ²
Kanat Sayısı	N	-
Serbest Rüzgâr Hızı	V_{∞}	m/s
Türbin Dönüş Hızı	ω	rad/s
Kanat Profili	NACA-serisi	-
Katılık Oranı	σ	-
Hücum Açısı	α	Derece
Yunuslama Açısı	β	Derece
Türbin Açısal Konumu	θ	Derece



Şekil 2. Türbin üzerinde bazı parametrelerin gösterimi [6]

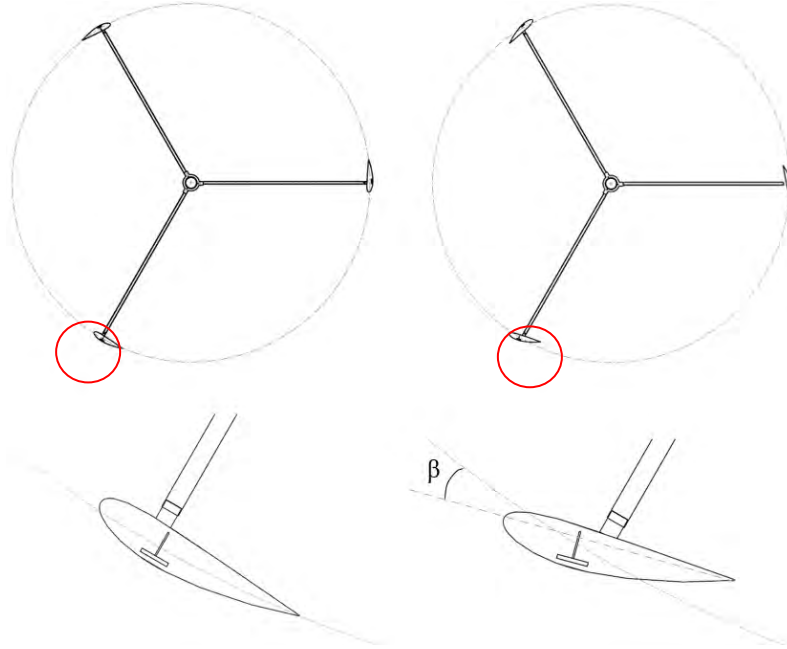


Şekil 3. Kanat üzerine etkiyen hızlar ve aerodinamik kuvvetlerin gösterimi

Tasarım parametrelerinden her birini ayrı ayrı dikkate alarak tasarım yapmak uzun bir süreci içerdiği için için, çoğu zaman literatürde bulunan ve daha önce test edilip onaylanmış boyutsuz gruplar üzerinden tasarım gerçekleştirmek mümkündür. Ancak daha detaylı olarak, 1-boyutlu bir model geliştirerek ve bu model üzerinde gerekli parametrelerin değerlerini girerek, türbinden elde edilecek güç değeri, tork değeri, aerodinamik katsayı ve kuvvet değerlerini saptamak ve türbinin optimum çalışma şartlarını belirlemek, bir diğer alternatiftir. Rüzgar türbini tarafından üretilen güç ile havada bulunan kinetik gücün oranı bize güç katsayısı (Coefficient of Power) olarak adlandırılan C_p değerini verir. Betz'in teorisinden bunun teorik üst sınırı 0.593'tür. Pratikte bu değer, mekanik ve aerodinamik kayıplardan dolayı daha da düşük olacaktır. Pazardaki küçük düşey eksenli rüzgar türbinlerinden alınan verilere göre DERT'ler için tipik güç katsayısı C_p yaklaşık 0.15 ile 0.22 aralığındadır [7]. Ancak türbin büyüdükçe (Reynolds sayısı arttıkça ve dolayısıyla göreceli sürtünme etkileri azaldıkça) bu değer 0.5 seviyelerine gelebilmektedir.

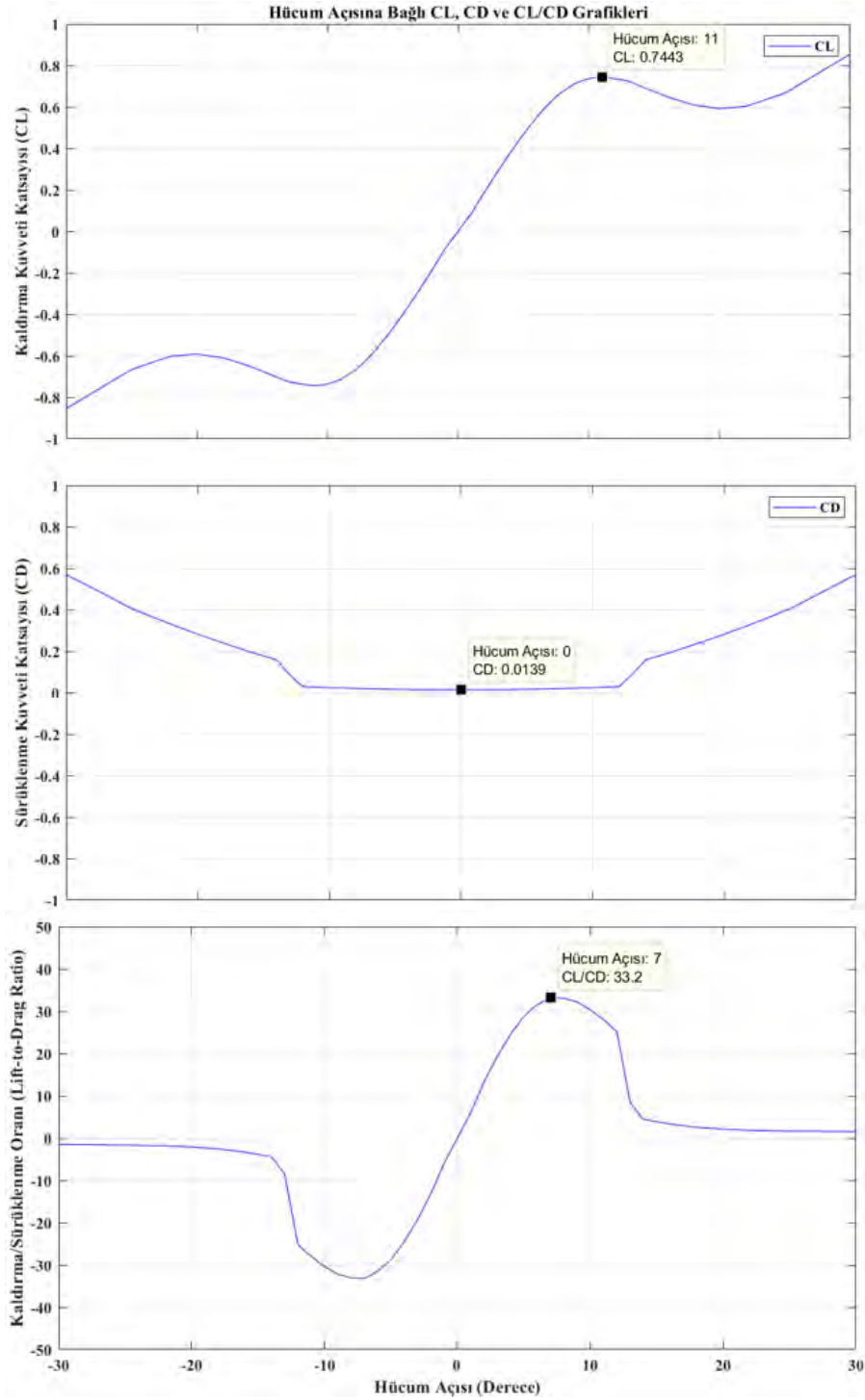
3. YUNUSLAMA AÇISI

Önceki bölümde anlatılan tasarım parametrelerinden yunuslama açısı Şekil 4'te görselleştirilmiştir. Yunuslama açısı, türbinin dönme dairesine teğet olan çizgi ile kanat profilinin kord hattına teğet olan çizgi arasında kalan ve β ile gösterilen açı olarak ifade edilmektedir [8]. Şekil 4'te negatif bir yunuslama açısı gösterilmiştir.



Şekil 4. Yunuslama açısının olmadığı durum (sol) ve yunuslama açısının negatif olduğu durum (sağ)

Yunuslama açısı temel olarak akışın kanada hangi (bağıl) hücum açısı ile geleceğini belirler. Bu baştan ayarlanan bir açı da olabilir, dinamik olarak anlık da ayarlanabilir. Kanada gelen (bağıl) akışın aynı kaldığı düşünülürse, kaldırma kuvvetinin gelen akışa dik yönlü ve sürüklenme kuvvetinin ise gelen akışa paralel ve aynı yönde olduğu göz önünde bulundurulursa (Şekil 3), kaldırma/sürüklenme kuvvet oranının arttıkça kanadın üreteceği torkun ve dolayısıyla türbin gücünün artacağı ortaya çıkar. Bu kapsamda yunuslama açısı ile konumlandırılan kanat, türbin dönüşü boyunca ağırlıklı olarak kaldırma kuvvetini artırır, sürüklenme kuvvetini ise azaltırsa türbin performansı artacaktır. Uygun olmayan bir yunuslama açısı seçimi ise tersi yönde etki yapacaktır. Bir kanadın tipik performansı (NACA0018 için) Şekil 5'te sunulmuştur. Buna göre maksimum kaldırma/sürüklenme kuvvet oranı, kaldırma kuvvetinin maksimum olduğu ya da sürüklenme kuvvetinin minimum olduğu hücum açılarına denk gelmeyip, ikisinin ortasında bir hücum açısında gerçekleşmektedir. Ayrıca bu karakteristikler anlık yerel Reynolds sayısına güçlü şekilde bağlıdır. Her şartta bu ideal çalışma şartının sağlanması, ancak gerçek zamanlı saha kontrolü ile sağlanabilir. Yunuslama açısı kontrolü olmadan, değişen koşullarla birlikte (rüzgar hızı, rüzgar yönü vb.) kanat profili, tasarım performansının ideal değerinin dışında çalışmaktadır [9].



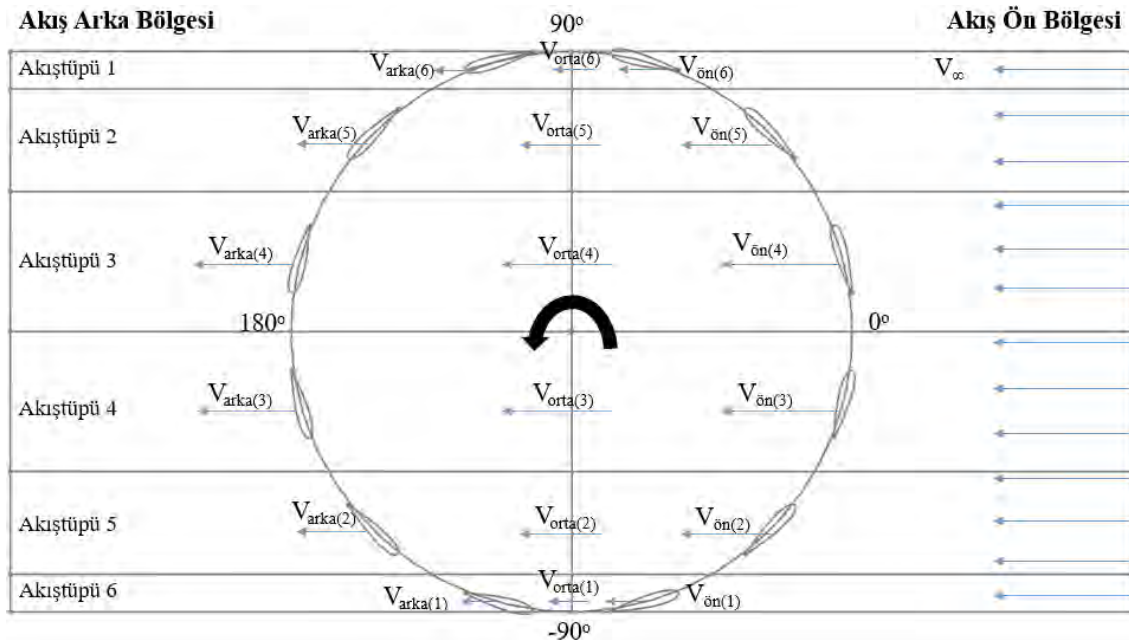
Şekil 5. Hücum açısına bağlı olarak kaldırma, sürüklenme katsayıları ve kaldırma/sürüklenme oranının gösterimi

Daha yüksek performans değerine ulaşmak için dinamik yunuslama açısı kontrolü önemli olsa da gerçek hayatta ekonomik ve pratik olmayabilir. Ayrıca kanatların gerçek zamanlı olarak bu aralıklarda yunuslama yapması hem dinamik yükleri hem de yorulma yükünü arttıracaktır. Bunun yerine sabit bir yunuslama açısı değeri seçilip baştan sabitlenebilir. Ancak büyük türbinlerde dönüş hızları düşük olduğundan, bu anlık kontrol düşük frekanslı değişimlere cevap şeklinde olacağından pratik uygulama alanı bulabilir ve türbinden daha yüksek başarımlar elde etmek mümkün olabilir.

4. ANALİZ YÖNTEMLERİ VE DMST

Darrieus türbinleri için çeşitli aerodinamik performans tahmin modelleri vardır. Kanat-momentum prensiplerine dayanan aerodinamik modeller kanat yükünü tahmin etmede yetersizdir [10]. Buna rağmen momentum modelleriyle çalışma yürütmekteyiz çünkü bu modellerin en büyük avantajı çok hızlı bir şekilde sonuç vermeleri ve hesaplama maliyetlerinin oldukça düşük olmasıdır. Ayrıca düşey eksenli türbinleri geniş bir Reynolds sayısı ve hücum açısı aralığında çalışmaktadır. Bu geniş aralıkta diferansiyel denklemlere dayalı çok boyutlu ve detaylı sayısal simülasyon yöntemlerinin bu türbinlere uygulanması zaman ve doğruluk (düşük Reynolds sayıları için turbülans modeli) ile ilgili problemlere neden olmaktadır. Amacımız 1-boyutlu ampirik tabanlı hızlı sonuç veren bir modelle literatürde bulunan türbin karakteristiklerine yakın sonuçlar elde etmektir.

Ion Paraschivoiu tarafından geliştirilen model ile akış tüpleri (rüzgarın geliş yönüne göre) ön ve arka olmak iki bölgeye ayrılmıştır (Şekil 6). Ayrıca her iki bölgede birçok akış tüpü bulunmaktadır. İki parçaya bölünmüş çoklu akışkan tüplü bu analitik model ‘DMST’ olarak adlandırılmaktadır. Rotorun her iki tarafındaki indirgenen hızların değişimi, ön bölgede daha büyük torklar üretirken arka bölgede enerjinin büyük kısmının ön bölgede soğurulmasından dolayı daha küçük torklar üretmektedir [11].



Şekil 6. DMST modelinin dönme dairesindeki dört farklı bölgede gösterimi

Akış ön bölgesindeki hız bileşeni türbinin akışı kısmi engellemesi sebebiyle yerel ortam rüzgar hızından daha düşüktür, $V_{\text{ön}} < V_{\infty}$, ve akış ön bölgesi ile akış arka bölgesi arasındaki orta düzlemde indirgenmiş bir denge hızı vardır, $V_{\text{orta}} < V_{\text{ön}}$; bu nedenle indirgenen hız, eksenel akış doğrultusunda azalır, böylece akış arka bölgesindeki rüzgar bileşeni, denge hızından daha az olur, $V_{\text{arka}} < V_{\text{orta}}$. Rotorun ön bölgesi için, yerel rüzgar hızı V_{∞} , $u < 1$ olan bir indirgeme (interference) faktörü ile azalır ve indirgenen hız, aşağıdaki gibi olur:

$$V_{\text{ön}} = u \cdot V_{\infty} \quad (1)$$

Nihayetinde indirgenen denge hızı :

$$V_{\text{orta}} = (2u - 1)V_{\infty} \quad (2)$$

Rotorun arka bölgesi için, V_{orta} , giriş hızıdır ve akış tüpünün sonunda, indirgenen hız aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$V_{arka} = u_{arka}(2u - 1)V_{\infty} \quad (3)$$

$u_{arka} = V_{arka}/V_{orta}$ olduğu rotorun bu kısmı için ikinci indirgeme faktörü $u_{arka} < u$ olur. Bu koşullar altında akış tüpünde indirgenen hız, rotorun her bir yarısı için ayrı ayrı iterasyonlarla hesaplatılır. $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$ ile sınırlandırılan rotorun ön bölgesi için yerel bağıl hız bileşeni, aşağıdaki denklemle verilir:

$$W_{\text{ön}} = V_{\text{ön}} \sqrt{1 + X_{\text{ön}}^2 - 2X_{\text{ön}} \sin(\theta)} \quad (4)$$

Burada rotor ön bölgesindeki yerel kanat uç hız oranı olarak adlandırılan $X_{\text{ön}}$,

$$X_{\text{ön}} = \omega R / V_{\text{ön}} \quad (5)$$

Denklemleri ile elde edilir. Daha sonra aşağıdaki denklem ile yerel Reynolds sayısı hesaplanır.

$$Re = W_{\text{ön}} c / \text{kinematik viskozite} \quad (6)$$

Hücum açısı değerini de sinüs teoreminden hesaplayacak olursak aşağıdaki denklemi elde ederiz:

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{V_{\text{ön}} \cos(\theta)}{W_{\text{ön}}} \right) \quad (7)$$

Bu aşamadan sonra rotorun ön bölgesinden başlanacak ve $-\pi/2 < \theta < \pi/2$ arasında bulunan bölgede indirgeme katsayısının (u) değerleri elde edilecektir. Daha sonra rotorun arka bölgesi için bu ' u ' değerleri kullanılarak $\pi/2 < \theta < 3\pi/2$ arasında tanımlanan arka bölgede u_{arka} hesaplatılacak ve gerekli yakınsama sağlanana kadar iterasyona devam edilecektir.

$$F_{L_{\text{ön}}} = \frac{1}{2} \rho A_{kanat} W_{\text{ön}}^2 C_L \quad (8)$$

$$F_{D_{\text{ön}}} = \frac{1}{2} \rho A_{kanat} W_{\text{ön}}^2 C_D \quad (9)$$

Kanat profili kaldırma ve sürüklenme katsayıları, (sırasıyla C_L ve C_D) yerel Reynolds sayısı ve yerel hücum açısı parametrelerinin her ikisini de kullanarak interpolasyon ile elde edilir. Bunun için gereken kanat karakteristikleri Sandia Laboratuvar deney verilerinden alınmıştır [12]. Yarı deneysel olan bu veriler geliştirilecek programın veritabanını oluşturmuştur.

$$F_{T_{\text{ön}}} = F_{L_{\text{ön}}} \sin(\alpha) - F_{D_{\text{ön}}} \cos(\alpha) \quad (10)$$

$$F_{N_{\text{ön}}} = F_{L_{\text{ön}}} \cos(\alpha) + F_{D_{\text{ön}}} \sin(\alpha) \quad (11)$$

$$C_{T_{\text{ön}}} = \frac{F_{T_{\text{ön}}}}{0.5 \rho A_{kanat} W_{\text{ön}}^2} \quad (12)$$

$$C_{N_{\text{ön}}} = \frac{F_{N_{\text{ön}}}}{0.5 \rho A_{kanat} W_{\text{ön}}^2} \quad (13)$$

$$F_{\text{ön}} = \frac{Nc}{8\pi R} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \left(C_{N_{\text{ön}}} \frac{\cos \theta}{|\cos \theta|} - C_{T_{\text{ön}}} \frac{\sin \theta}{|\cos \theta| \cos \delta} \right) \left(\frac{W_{\text{ön}}}{V_{\text{ön}}} \right)^2 d\theta \quad (14)$$

$$u = \frac{\pi}{F_{\text{ön}} + \pi} \quad (15)$$

Eşitlik 1'den eşitlik 15'e kadar olan işlemler yapılarak ilk iterasyon gerçekleştirilmiş olur ve her akış tüpü için 'u' değerleri elde edilir. Yakınsama, özellikle yüksek TSR'ler için ekvator düzlemi akışındaki en fazla sayıda iterasyonda daha hızlı gerçekleşir. Bir kez indirgenen hız doğru hesaplatıldığında, denklem 4 ile yerel bağıl hız (W) ve denklem 7 ile efektif hücum açısı (α) da doğru olarak elde edilecektir. Akış ön bölgesindeki tork ve güç katsayısı değerlerini elde etmek için aşağıdaki denklemler kullanılır:

$$\overline{T_{\text{ön}}} = \frac{N/2}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} T_{\text{ön}}(\theta) d\theta \quad (16)$$

Ve ortalama tork katsayısı aşağıdaki gibi olacaktır:

$$\overline{C_{Q1}} = \frac{NcH}{2\pi A} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-1}^1 C_{T_{\text{ön}}} \left(\frac{W_{\text{ön}}}{V_{\infty}} \right)^2 \left(\frac{\eta}{\cos \delta} \right) d\zeta d\theta \quad (17)$$

Böylece rotorun ön bölgesi için olan güç katsayısı aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$C_{P1} = \frac{\omega R}{V_{\infty}} \overline{C_{Q1}} = X_{\text{orta}} \overline{C_{Q1}} \quad (18)$$

Akış ön bölgesi için tork ve güç katsayısı değerleri elde edildikten sonra aynı işlemler akış arka bölgesi için tekrar edilir. Rotorun arka tarafında kalan akış yönünde, yerel bağıl hız:

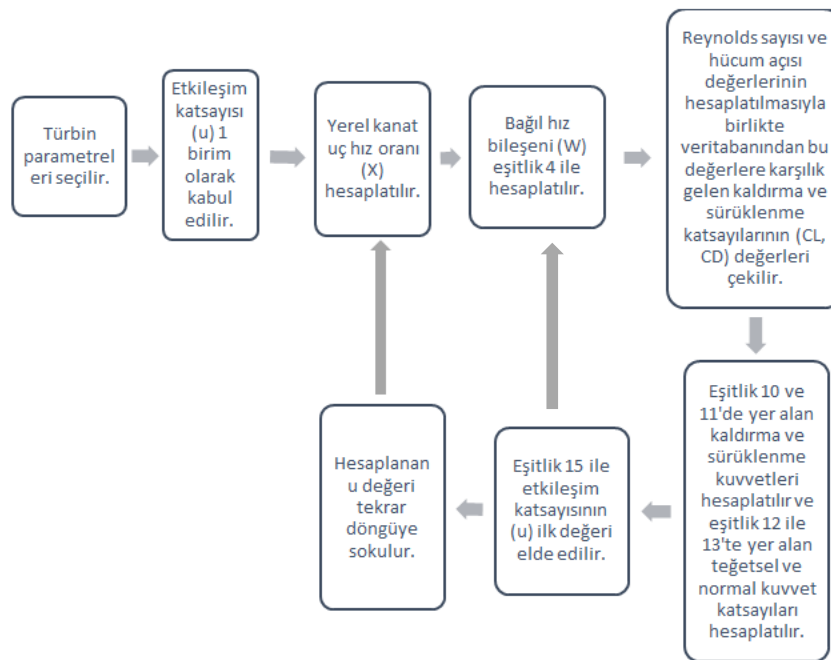
$$W_{\text{arka}}^2 = V_{\text{arka}}^2 [(X_{\text{arka}} - \sin(\theta))^2 + \cos^2(\theta) \cos^2(\delta)] \quad (19)$$

Burada,

$$X_{\text{arka}} = \omega R / V_{\text{arka}} \quad (20)$$

Denklem 6'da yer alan ön bölgede hesaplatılan yerel bağıl hız bileşeni yerine arka bölgede hesaplatılan yerel bağıl hız bileşeni yerleştirilir ve Reynolds sayısının arka bölgedeki değerine ulaşılır. Ayrıca hücum açısı değerinin hesaplatıldığı Eşitlik 7'de arka bölgeye indirgenerek gelen serbest akış hızı değeri ve arka bölgede hesaplatılan bağıl hız bileşeni yerleştirilerek hücum açısının arka bölgedeki değeri hesaplatılır. Denklem 4'ten Denklem 18'e kadar olan tüm denklemler akış arka bölgesi için tekrar hesaplatılır. Bu işlem gerekli yakınsama sağlanıncaya kadar devam eder. İndirgeme katsayısının (u) doğru değerine bir kez ulaşıldıktan sonra türbinin akış arka bölgesindeki tork ve güç katsayısı değerlerine ulaşılmış olur. İşlemlerin sonunda ön ve arka bölgede ayrı olarak hesaplatılan tork ve güç katsayısı değerleri skaler olarak toplanarak türbinin toplam tork değerine ve toplam güç katsayısı değerine ulaşılır. Bu algoritma Şekil 7'de özetlenmiştir.

$$C_P = C_{P1} + C_{P2} \quad (21)$$

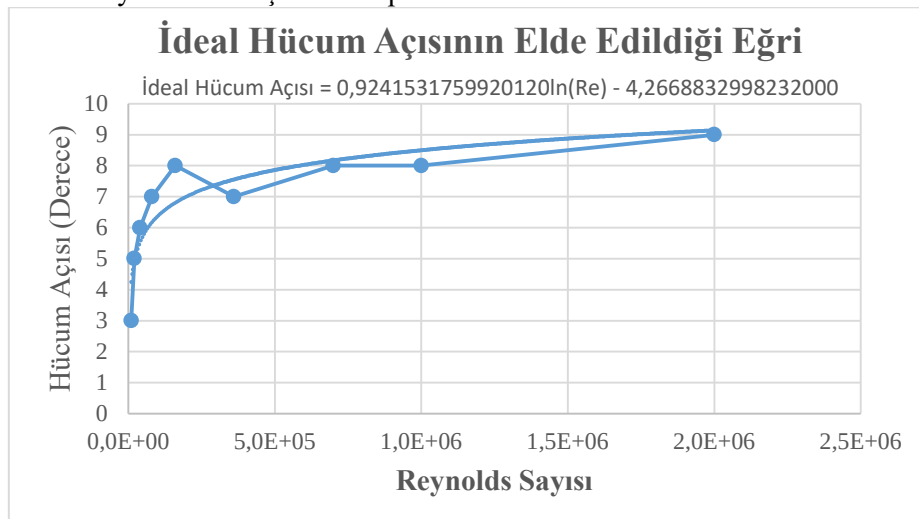


Şekil 7. Algoritmanın çalışma prensibi

Modelin talep ettiği kaldırma ve sürüklenme katsayıları veritabanından hesaplatılarak elde edilmektedir. Programın işleyişinde yerel Reynolds sayısı ve hücum açısına bağlı olarak interpolasyon işlemini yapılmaktadır ve gerekli kaldırma ve sürüklenme katsayısı değerleri hesaplanarak işleme sokulmaktadır.

MATLAB yazılımı ile geliştirilen bir arayüz ve arka planda bu kanat karakteristikleri veritabanı ile birlikte genel tasarım parametreleri (Tablo 1) girilen türbinlere ait performans değerleri hızlıca elde edilmektedir.

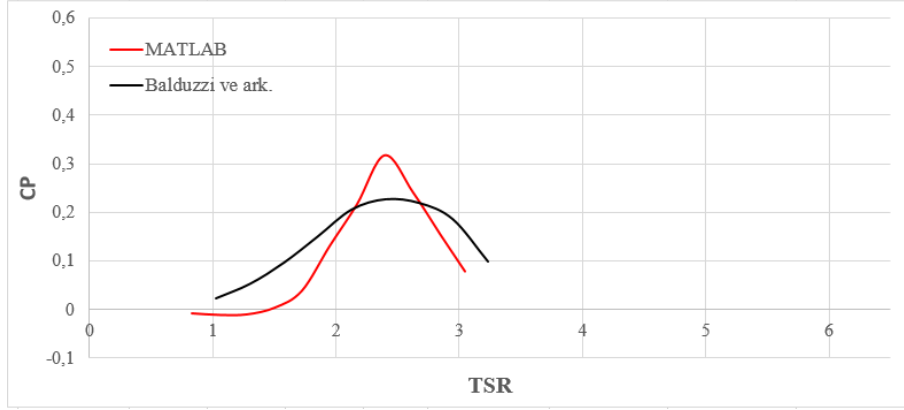
Çalışmanın asıl amacı dinamik olarak yunuslama açısını gerçek zamanlı kontrol ederek teorikte elde edilebilecek maksimum güç üretimini görebilmektir. Bu doğrultuda programın ilk olarak yerel Reynolds sayısına bağlı olarak ideal kaldırma/sürüklenme oranının elde edildiği hücum açısı değerlerini saptaması ve tüm kanat profilleri için ayrı bir fonksiyon elde ederek türbinin her açısal konumda ideal performansı göstereceği kaldırma ve sürüklenme katsayılarını program veritabanında çekebilmesi gerekmektedir. Buna göre program ideal hücum açısına göre, her açısal konumdaki yunuslama açısını hesaplamaktadır.



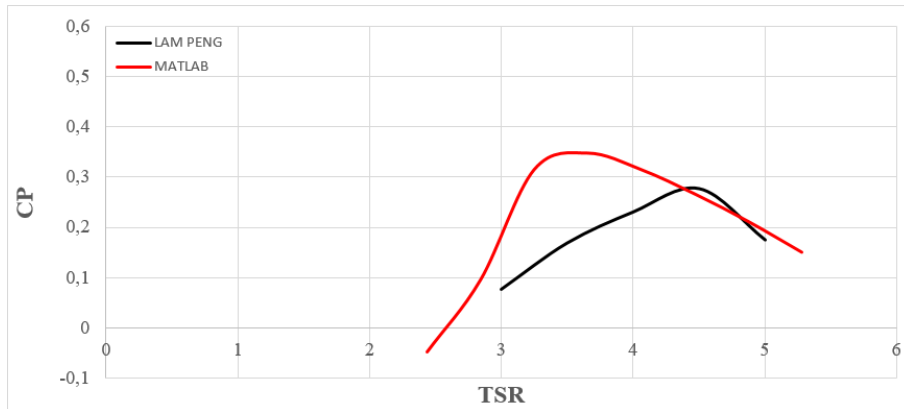
Şekil 8. İdeal hücum açısının Reynolds sayısına bağlı fonksiyonu.

5. KALİBRASYON ve DOĞRULAMA

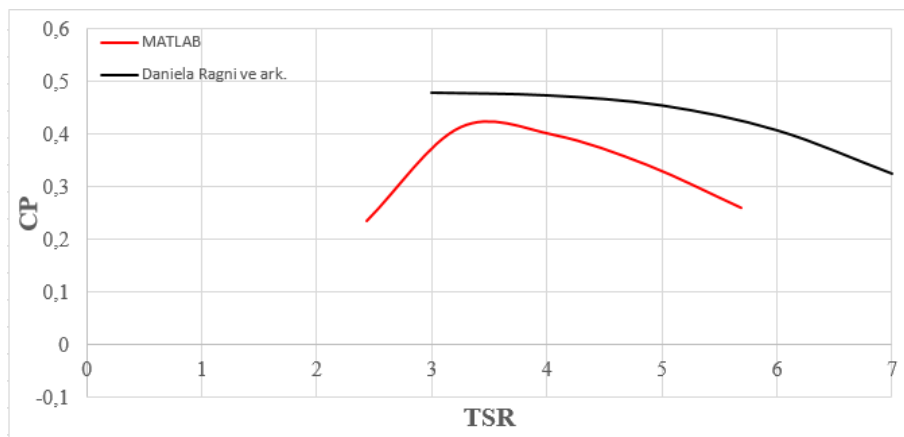
Kalibrasyon ve doğrulama için beş farklı türbin için tasarım parametreleri belirlenmiş ve MATLAB yazılımında geliştirilen 1-Boyutlu modelde bunlar tanımlanmıştır. Şekil 9-12 arasında 4 türbin için ortak bir kalibrasyon gerçekleştirilmiştir. Şekil 13'te bu kalibrasyon bozulmadan bağımsız bir 5. türbinde metodun başarımı sunulmuştur.



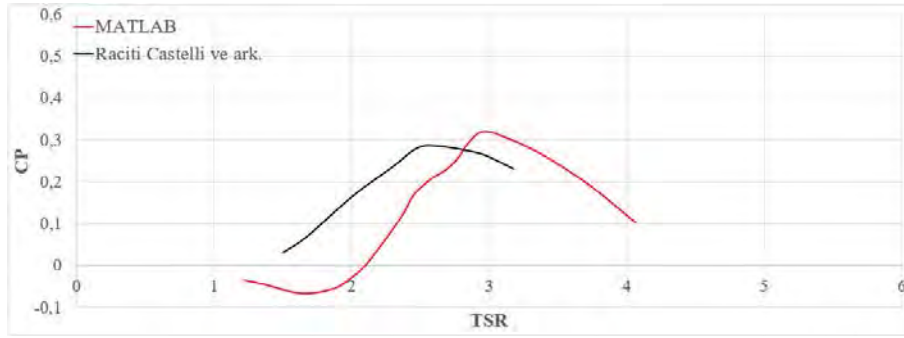
Şekil 9. Balduzzi ve ark. Deneysel çalışmaları ile 1 boyutlu modelin karşılaştırılması [13]



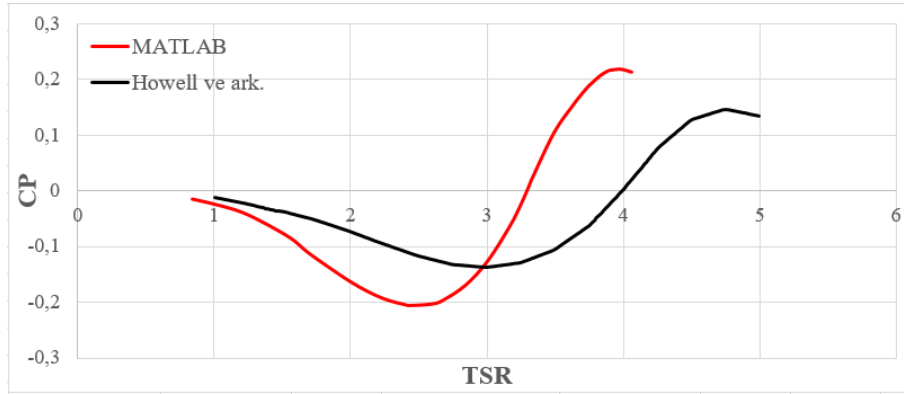
Şekil 10. Lam&Peng deneysel çalışması ile 1-boyutlu modelin karşılaştırılması [14]



Şekil 11. Daniela Ragni ve ark. deneysel çalışması ile 1-boyutlu modelin karşılaştırılması [15]



Şekil 12. Raciti Castelli ve ark. deneysel çalışması ile 1-boyutlu modelin karşılaştırılması [16]

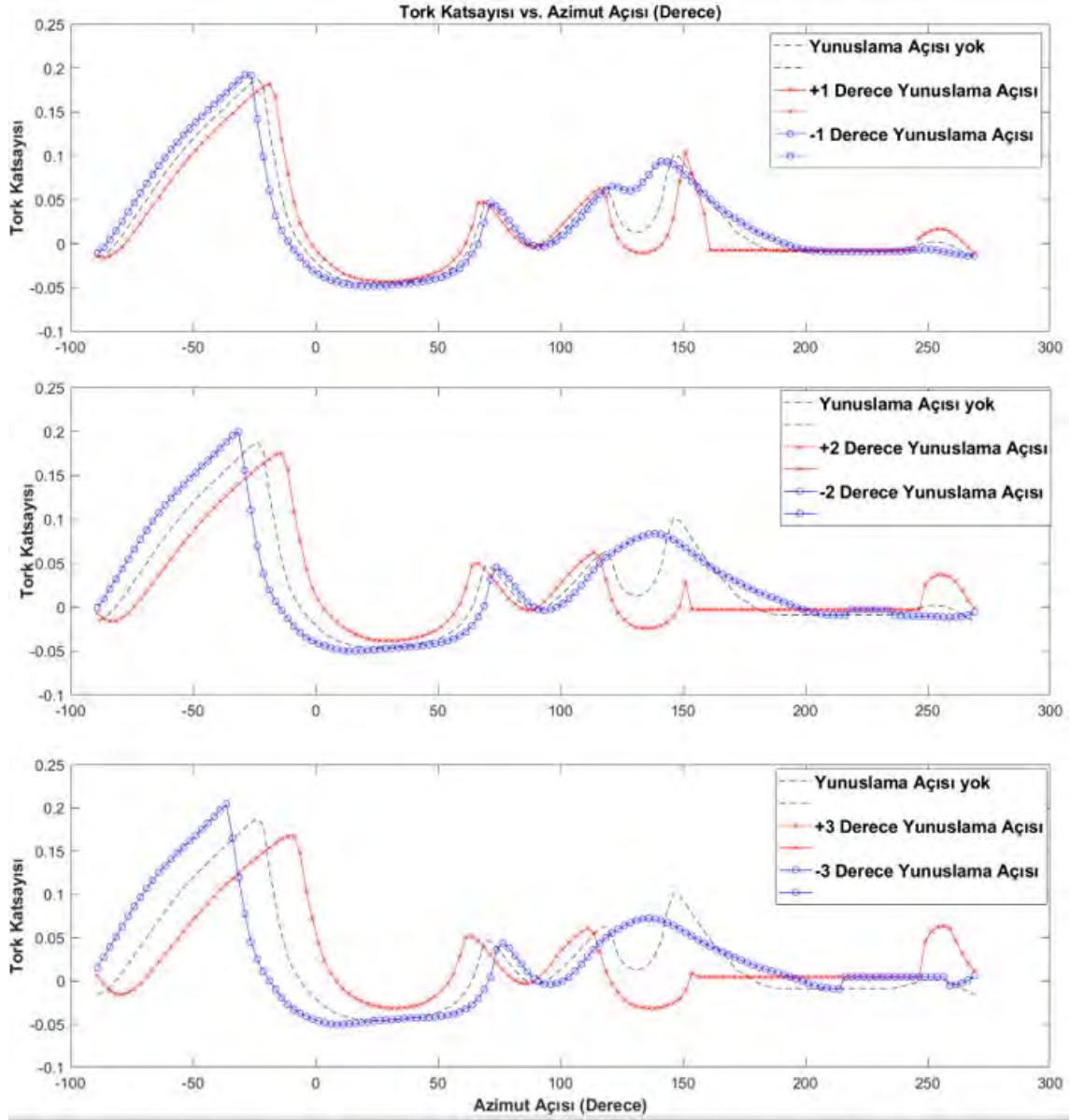


Şekil 13. Howell ve ark. deneysel çalışması ile 1-boyutlu modelin doğrulanması [17]

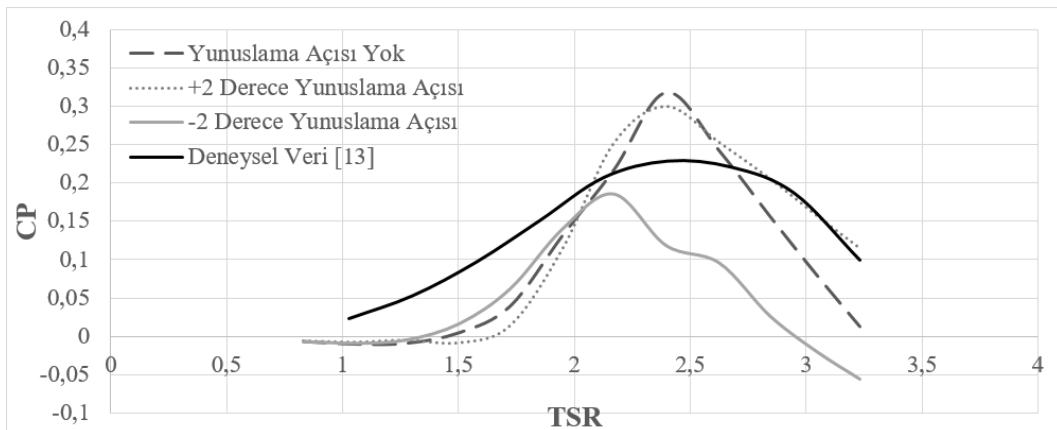
Programın doğruluğu test edildikten sonra sabit (statik) ve dinamik yunuslama açısının etkisi incelenmiştir. Sabit yunuslama açısı ile farklı sonuçlar elde edilmiş ve çalışmanın nihai amacı olan dinamik yunuslama açısının etkisi incelenmiştir.

6. SONUÇLAR

Şekil 14'te önden ayarlı sabit yunuslama açısının türbin başarımına (tork katsayısının türbin kanadının açısal konumuna göre değişimi) etkisi gösterilmiştir. Beklendiği gibi -90 ile -45 derece arasındaki bölgede eksi yunuslama açısı kanadın hücum açısını arttırdığından burada tork katsayısını arttırmaktadır. Zıt yunuslama açısı ise ters yönde etki yapmaktadır. -45 dereceden sonra ise kanat stol bölgesine girdiğinden eksi yunuslama açısı tork katsayısını düşürmektedir. Yunuslama açısının türbine olan net etkisi birçok alt etkinin birleşiminden oluşmaktadır.



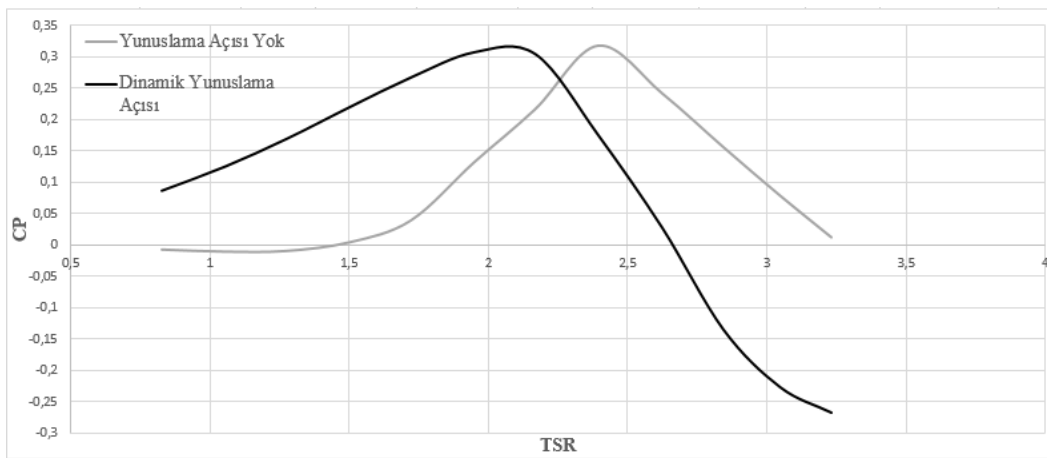
Şekil 14. Sabit yunuslama açısı kontrolünde tork katsayısının türbin açısal konumuyla değişimi, (a) +2 ve -2, (b) +1 ve -1, (c) +3 ve -3 derece sabit yunuslama açılarının etkileri



Şekil 15. Güç katsayısının kanat uç hız oranıyla değişimi

Şekil 14'te görüldüğü üzere -1, -2 ve -3 derece yunuslama açıları türbin başlangıç anında kaldırma kuvvetinin etkisini arttırdığından dolayı performansı olumlu etkilemiştir. Ancak türbinin akış arka bölgelerinde, akışın ön tarafta büyük bir kısmının soğurulmasından kaynaklı daha düşük tork elde edilmiştir. Genel anlamda negatif yunuslama açısı türbin performansında olumlu etki oluşturmuştur. Şekil 15'e bakıldığında pozitif yönlü yunuslama açısı, türbinin çalışma aralığının artmasını sağlamıştır. Her iki performans göstergesinden de anlaşılabileceği üzere türbin açısal konumuna ve bu parametrenin bir fonksiyonu olan hücum açısına bağlı olarak her noktada performansı olumlu yönde etkileyecek bir yunuslama açısı mevcuttur.

Daha etkili performans artışı için, dinamik kontrol ile yunuslama açısı, türbin kanadının açısal konumuna bağlı ve yerel maks C_L/C_D hücum açısını sağlayacak şekilde değişebilir. Bu sağlandığı takdirde ise geliştirilen yöntem ile Şekil 16'da sunulan performans eğrisi elde edilmiştir.



Şekil 16. Türbinin yunuslama açısı yapmadığı ve dinamik yaptığı durumlarda türbin performans eğrileri

Şekil 16'dan görüldüğü üzere dinamik yunuslama açısı kontrolü ile türbinin maksimum güç katsayısı değeri değişmemiş gibi gözükse de türbinin çalışma bölgesi ciddi olarak genişlemiş ve her koşulda türbinden güç eldesi sağlanmıştır. Bu bulgular eşliğinde programın mantıklı sonuçlar verdiği görülmektedir. Bir sonraki adım daha doğru yunuslama açısı stratejilerinin geliştirilmesi olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Baytekin E. ve ark.**, Uluslararası Temiz Enerji Sempozyumu (UTES), 2016. Effect of Tip Speed Ratio on The Wake of a Darrieus Type Wind Turbine.
- [2] **Karadeniz Z.H.**, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu (YEKSEM), 2015. Düşey Eksenli Rüzgar Türbinlerinde Son Gelişmeler.
- [3] **Kokey I. ve ark**, İzmir Rüzgar Sempozyumu, 2017. Eşli Olarak Çalışan Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri ve Fırsat Penceresi.
- [4] **Dabiri, J. O., Greer, J. R., Koseff, J. R., Moin, P., & Peng, J.** 2015. A new approach to wind energy: Opportunities and challenges. AIP Conference Proceedings, 51–57.
- [5] **Kokey I. ve ark**, WindEurope 2018. Energy Interaction of Vertical Axis Wind Turbines Working in Pairs : A Case Study and An Application of IEC 61400-12-1:2017.
- [6] **Bianchini A., Ferrara G., Ferrari L.**, 2015. Design Guidelines for H-Darrieus Wind Turbines: Optimization of the Annual Energy Yield. Energy Conversion and Management, 89, (690-707).

- [7] **Paraschivoiu I.** 2002. Wind Turbine Design with Emphasis on Darrieus Concept (1. Baskı). Kanada: Polytechnic International Press.
- [8] **Tushar R. Mali, Avinash P. Dhale, Harsh A. More, Prachi R. Kavade, Prof. Ramesh K Kavade5, Dr. P. M. Ghanegaonkar,** 2018. Analysis of VAWT Using Pitching Mechanism. International Journal of Innovative Studies in Sciences and Engineering Technology, 4 (3), Mart 2018. <http://ijisset.org/wp-content/uploads/2018/04/IJISSET-040407.pdf>.
- [9] **Hau E.,** 2013. Wind Turbines Fundamentals , Technologies, Application, Economics (3.baskı). London: Springer Heidelberg New York Dordrecht London. (89-120).
- [10] **Nguyen T. V.,** 1978. A Vortex Model of The Darrieus Turbine. Yüksek lisans tezi, Graduate Faculty of Texas Tech University, USA.
- [11] **Paraschivoiu I.,** 1981. Double Multiple Streamtube Model for Darrieus Wind Turbines. NASA, Lewis Research Center Wind Turbine Dyn. (19-25).
- [12] **Sheldahl R. E., Klimas P. C.** 1981. Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through 180-Degree Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines. Sandia National Laboratories Energy Report, USA.
- [13] **Balduzzi F., Bianchini A., Maleci R., Ferrara G., Ferrari L.,** 2015. Critical issues in the CFD simulation of Darrieus wind turbines. Renewable Energy, 85 (2016), (419-435).
- [14] **Lam H. F., Peng H.Y.,** 2016. Study of wake characteristics of a vertical axis wind turbine by two- and three-dimensional computational fluid dynamics simulations. Renewable Energy, 90(2016), (386-398).
- [15] **Ragni D., Ferreira C. S., Correale G.,** 2014. Experimental investigation of an optimized airfoil for vertical-axis wind turbines. Wind Energy (2014).
- [16] **Castelli M.C., Englaro A., Benini E.,** 2011. The Darrieus wind turbine: Proposal for a new performance prediction model based on CFD. Energy, 36 (2011), (4919 – 4934).
- [17] **Eboibi O., Danao L.A.M., Howell R.J.,** 2016. Experimental investigation of the influence of solidity on the performance and flow field aerodynamics of vertical axis wind turbines at low Reynolds numbers. Renewable Energy, 92 (2016), (474-483).

RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT YUNUSLAMA AÇISI KONTROLCÜSÜ TASARIMI VE PERFORMANS ANALİZİ

Mustafa Şahin¹, İlkey Yavrucuk²

^{1,2}Orta Doğu Teknik Üniversitesi

¹musahin@metu.edu.tr, ²yavrucuk@metu.edu.tr

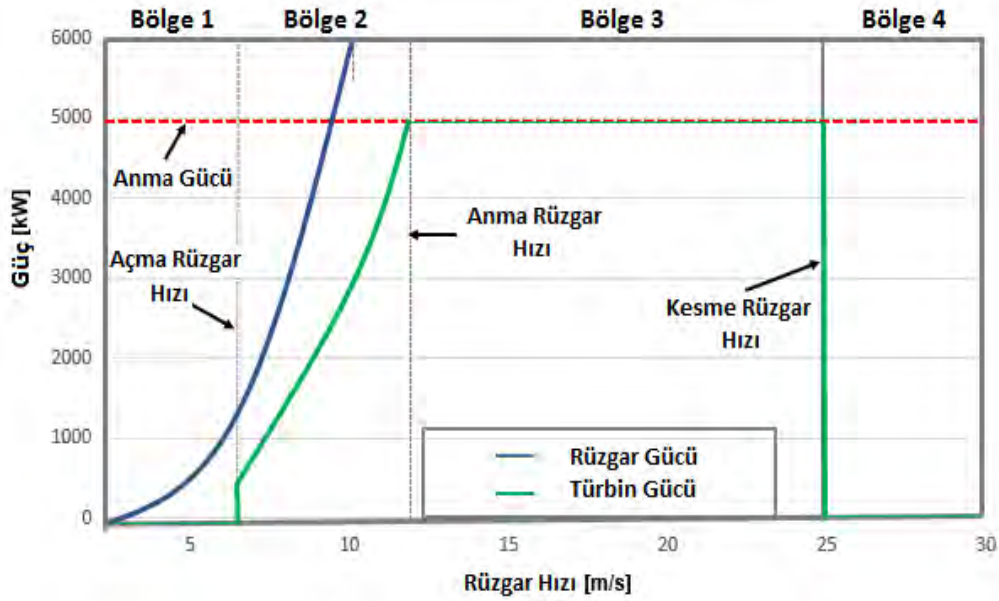
ÖZET

Bu çalışma, MS (Mustafa ŞAHİN) Bladed Rüzgar Türbin Simülasyon Modeli kullanılarak, NREL 5 MW'lık rüzgar türbini için lineer bir kanat yunuslama açısı kontrolcüsünün tasarımı, türbin kontrollerinde kullanılan bir kazanç çizelgeleme metodunun uygulanması ve performans analizi ile ilgilidir. Tasarımda, tam yük bölgesindeki herhangi bir türbin çalışma noktası için tasarlanan tek bir lineer yunuslama açısı kontrolcüsünün, aynı çalışma bölgesindeki farklı çalışma noktalarında yapılan performans inceleme analizlerinde, performansının azaldığı görülmüştür. Bu sebeple, türbin kontrolünde kullanılan bir kazanç çizelgeleme metodu, 5 MW'lık rüzgar türbini için tasarlanan kontrolcüye uygulanarak, diğer çalışma noktalarında da türbinden benzer performanslar vermesi sağlanmıştır.

1. GİRİŞ

Modern rüzgar türbinlerinin kontrol sistemi, en üst, orta ve en düşük seviye olmak üzere, üç temel seviyeden oluşmaktadır. En üst seviye kontrolcü, rüzgar hız bilgisini kullanarak, türbinin ne zaman devreye alınacağına ve ne zaman devreden çıkaracağına karar verir. Türbinin devreye girdiği rüzgar hızı, açma (cut-in) rüzgar hızı olarak isimlendirilirken, devreden çıkma rüzgar hızı ise, kesme rüzgar (cut-out) hızı olarak adlandırılır. Orta seviyedeki kontrolcüler operasyonel kontrolcülerdir. Bunlar, jeneratör tork, kanat yunuslama açısı ve nasel sapma açısı kontrolcüleridir. Jeneratör tork kontrolü vasıtasıyla, türbin rotorundan maksimum aerodinamik güç elde edilir. Kanat yunuslama açısı kontrolcüsü ile de, rotor shaftı anma rotor devrinde döndürülerek, türbinden anma gücünde elektrik alınması sağlanır. Nasel sapma açısı kontrolcüsü de, türbin naselini rüzgarın geldiği yöne doğru döndürerek, türbin rotorunun karşıdan gelen rüzgardan en iyi bir şekilde faydalanmasını sağlar. En düşük kontrol seviyesinde ise, güç elektroniği, kanat yunuslama akçuatörlerinin kontrolü gibi vb. kontroller yer alır[1], [2].

Yukarıda belirtilen kontrol özelliklerine sahip türbinler, değişken rotor devrinde ve değişken yunuslama açısında çalışırlar. Bu türbinler, üç temel çalışma bölgesine sahiptir. Şekil 1'de verilen bu bölgeler, şu şekilde açıklanabilir. Bölge 1, türbinin açma rüzgar hızının altında kalan ve türbin tarafından herhangi bir elektrik enerjisinin üretilmediği bölgedir. Elektrik enerjisinin üretimi, türbinin açma ve kesme rüzgar hızları arasında bulunan Bölge 2 ve 3'te gerçekleşir[1], [3]. Bu bölgeler, sırasıyla kısmi yük ve tam yük bölgeleri olarak da bilinir. Bazen, kesme rüzgar hızının üstünde kalan bölge de, türbinin çalışma bölgelerinden biri olarak sayılır ve Bölge 4 olarak adlandırılır. Çoğu türbinler, Bölge 4'te hiç çalıştırılmazken, en modern türbinler, kesme rüzgar hızının üstündeki, bu bölgede de, çeşitli yumuşak kesme yöntemleri kullanılarak[4], türbin hiç durdurulmadan elektrik üretimlerine devam ettirilirler. Ancak, bu türbinler, bu bölgede anma güçlerinden daha az elektriksel güç üretir.



Şekil 1. Güç eğrileri ve türbin çalışma bölgeleri[5]

Kısmi yük bölgesinde (Bölge 2) amaç, türbini maksimum güç katsayısında çalıştırmaktır. Bu katsayı, türbin rotorunun en uygun uç hız oranı ve kanat yunuslama açısında çalışması ile elde edilir. Maximum güç katsayısında çalışan türbin, anma gücünü elde edemese de, türbine gelen rüzgara göre, üretebileceği maksimum gücü üretir. Bu gücün üretilmesi için, değişen rüzgar hızına göre, jeneratörün torku ayarlanarak, türbin rotor şaft devrinin değişmesi sağlanır. Değişken rotor devri ile türbin, en uygun uç hız oranında çalıştırılır. Bu esnada, rotor kanatlarının yunuslama açısı en uygun değerde olduğundan, türbin maksimum seviyede güç üretmiş olur. Bu işlemi yapan kontrolcü, jeneratör tork kontrolcüsüdür. Değişken devirli rüzgar türbinlerini sabit devirli türbinlerden ayıran özellik budur[1], [3], [6].

Tam yük bölgesinde (Bölge 3) ise, türbin rotoru yüksek hızlı rüzgarlara maruz kaldığından, anma gücünden daha fazla güç üretir. Rotor kanatlarının kontrolü yapılmazsa, türbin üzerinde, aşırı mekanik ve elektriksel yükler meydana gelir. Bu yüzden, türbin rotoru tarafından üretilen güç, kanat yunuslama açısı kontrolcüsü vasıtasıyla jeneratörün anma gücüne eşitlenir. Bu kontrol işlemi esnasında, jeneratörün torku anma tork değerindedir. Tasarlanan kontrolcü ile kanat yunuslama açısı kontrolü yapılarak, türbinin rotor şaftı, türbinin anma devrinde döndürülmesi sağlanır [1], [3], [6]. Böylece, anma devrinde ve anma torkunda çalışan türbin, Bölge 3'te anma gücünde enerji üretir.

Bu çalışmada, MS Bladed Rüzgar Türbin Simülasyon Modeli kullanılarak, NREL 5 MW'lık rüzgar türbininin Bölge 3'ü için kanat yunuslama açısı kontrolcüsünün tasarımı ve performans analizi gerçekleştirilmiştir. İlgili türbine ait özellikler, Ref.[7]'de bulunmaktadır. Kontrolcünün tasarımı ile ilgili detaylara geçmeden önce, MS Bladed Rüzgar Türbin Simülasyon Modeli, türbin yunuslama açısı kontrolü ile ilgili biraz daha detaylı bilginin verilmesinin yararlı olacağı düşünülmüştür.

2. MS BLADED SİMÜLASYON MODELİ

MS (Mustafa ŞAHİN) Bladed Rüzgar Türbin Simülasyon Modeli, (kısaca, MS Bladed Modeli) Pal Elemanı Momentum teorisi üzerine kurulu olup, yatay eksenli rüzgar türbinlerinin simülasyonu için geliştirilmiştir. Modeldeki aerodinamik hesaplamalar, PROP kodu[8], Wt_Perf[9] ve AeroDyn[10] gibi Pal Elemanı Momentum teorisi içeren programlar ile belirli bir ölçüde benzerlik göstermektedir. MS Bladed Modeli ile yatay eksenli rüzgar türbinlerine ait rotor aerodinamik performans tahminleri (güç ve itki eğrileri gibi vb.) yapılabilir. Türbin kontrolcülerinin tasarım ve simülasyon analizleri gerçekleştirilebilir. Ayrıca, yeni kontrol algoritmalarının geliştirilmesi ve performans incelemeleri de yapılabilir. Normal ve aşırı türbülanslı rüzgarlar altında türbinin davranışı zamana bağlı olarak izlenebilir. MS Bladed Modeli, daha gerçekçi türbin davranışlarını modelleyebilmek için özel koordinat sistemlerini ve çeşitli aerodinamik düzeltme formüllerini de içermektedir. Türbin simülasyon modeli, nasel sapma ve kanat yunuslama hareketi yapma özelliklerine sahiptir. Kanatların, yunuslama hareketi bireysel veya kolektif olarak yapılabilir. Ayrıca, MS Bladed Modelinde, kullanıcı istediği rotor koni ve nasel eğim açılarını da modelde tanımlayabilmektedir. MS Bladed Modeli ile ilgili detaylı bilgiler [5], [11], [12] referanslarında yer almaktadır. Türbin modeli, türbinin bütün parçalarını, kanat, rotor şaftı vs. esnemeyen yapı olarak farz etmektedir. Sistemin ana parçaları, türbin rotoru, dişli kutusu ve değişken tork üretebilen jeneratör olup, sistemin dinamik modeli aşağıdaki ilişkiler üzerine kurulmuştur.

$$J_t \dot{\Omega} = \tau_{aero} - \tau_{jen} \quad (1)$$

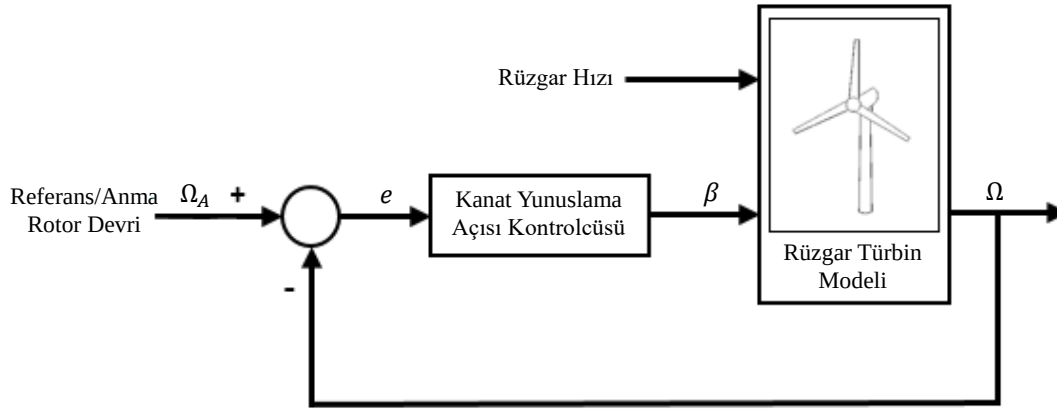
$$J_t = J_r + N_{dişli}^2 J_{jen} \quad (2)$$

Yukarıdaki denklemlerde τ_{aero} aerodinamik torku, τ_{jen} jeneratörün türbin rotoru tarafındaki torkunu, J_t , türbin sisteminin toplam atalet momentini, Ω türbin rotor devrini, $N_{dişli}$ dişli kutusu dönüştürme oranını, J_{jen} ise jeneratörün atalet momentini temsil etmektedir.

3. KANAT YUNUSLAMA AÇISI KONTROLÜ

Kanat yunuslama açısı kontrolcüsü, rüzgar türbininin rotor şaftından alınan mekaniksel gücün, türbin anma gücüne sınırlandırılmasında kullanılır. Bu işlem, türbin kanadının tamamı ya da bir kısmının yunuslama hareketi yaptırılması ile gerçekleştirilebilir. Günümüz türbinlerinde kanadın tamamının hareket ettirilmesi tercih edilmektedir. Güç sınırlama işlemi, ya türbin kanadının hücum kenarı kısmının rüzgarın geldiği yöne doğru döndürülmesi (pitch to feather), ya da uzaklaştırılması (pitch to stall) ile sağlanır. Birinci yöntemde, rüzgar türbininin kanadı boyunca yerleştirilen airfoiller daha düşük aerodinamik kaldırma ve sürüklenme katsayıları ile çalışması sağlanırken, ikinci durumda ise, düşük kaldırma ve yüksek sürüklenme katsayılarında çalıştırılır. Büyük gövdeli modern türbinlerde, birinci yöntem (pitch to feather) daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, tasarlanan yunuslama açısı kontrolcüsü, bütün türbin kanatlarını aynı miktarda ve kolektif olarak hareket ettirmekte ve birinci yöntem (pitch to feather) göre çalışmaktadır.

Yukarıda bahsedilen her iki yöntem, farklı aerodinamik olaylara göre çalışsa da, yunuslama açısı kontrolcüsü açısından, Şekil 2’de verilen aynı blok diyagramına sahiptirler. Her iki kontrol işleminde de, gerekli kanat yunuslama açısının miktarının tespiti için, türbin veya jeneratör rotorunun devir verisi kontrolcüye geri besleme olarak verilir. Yapısal kısıtlamalardan dolayı, yunuslama açısı actüatörleri, ani hareket sınırlayıcıları (rate limiter), üst ve alt değer (min ve max) sınırlayıcılarına ihtiva eder. Bu çalışmada, 5 MW’lık rüzgar türbini için kullanılan alt limit değeri -0.875 derece, üst limit değeri ise 90 derecedir. Kanatların ani hareketini önlemek için 8 derece/saniye’lik bir ani hareket sınırlayıcısı da kontrol sistemine eklenmiştir.



Şekil 2. Kanat yunuslama açısı kontrolcüsü blok diyagramı

Bu çalışmada, kazanç çizelgeleme yöntemine dayalı oransal-integral (Proportional-Integral, PI) kanat yunuslama açısı kontrolcüsü, Ref.[13]’nden yararlanılarak tasarlanmıştır. Geri besleme sinyali olarak, türbinin rotor şaftdevri kullanılmıştır. Yunuslama açısı bilgisi, rotor şaft devri ile türbin rotorunun dönmesini istediğimiz anma rotor devri arasındaki hataya göre tesbit edilmiştir. Kontrolcünün kazanç değerlerini hesaplamak amacıyla, MS Bladed Modeli kullanılmıştır.

4. RÜZGAR TÜRBİN SİSTEMİNİN LINEERLEŞTİRİLMESİ

Denklem (1)’deki türbin sistemi, lineer gibi görünse de, oldukça lineer olmayan bir sistemdir. Bunun nedeni, hem rotorundan hem de jeneratöründen alınan torkların lineer olmamasıdır. Tam yük bölgesinde, sistemin lineer olmamasının nedeni aerodinamik torktur. Çünkü, bu çalışma bölgesinde, jeneratörden alınan tork sabit değerdedir. Burada, türbin sistemi bir tane durum değişkenine sahip olup, o da türbinin rotor şaftı devridir. MS Bladed Modelinde, kontrol girişleri sadece kanat yunuslama açılarıdır. Rüzgar ise, model için dış etkenlerden kaynaklı olan bozucu bir girişe karşılık gelmektedir.

Lineer bir kontrolcü tasarımı, sistemin belirlenen bir çalışma noktasında lineerleştirilmesini gerektirir. Bu işlem için, perturbasyon yöntemi sıklıkla başvurulmuş bir yoldur. Türbin rotorundan alınan aerodinamik tork, rotor hızı, kanat yunuslama açısı ve rüzgar hızının sürekli bir fonksiyonudur. O zaman, Ref.[14]’ten yola çıkarak, türbinden alınan tork Taylor serisi olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\tau_{aero}(U, \Omega, \beta) = \tau_{aero}(U_e, \Omega_e, \beta_e) + \frac{\partial \tau_{aero}}{\partial U}(U - U_e) + \frac{\partial \tau_{aero}}{\partial \Omega}(\Omega - \Omega_e) + \frac{\partial \tau_{aero}}{\partial \beta}(\beta - \beta_e) + \text{YMTler} \quad (3)$$

Burada, U_e, Ω_e, β_e parametreleri seçilen bir çalışma noktasındaki rüzgar hızı, rotor hızı ve kanat yunuslama açılarının değerleridir. $U - U_e = \Delta U$, $\Omega - \Omega_e = \Delta \Omega$ ve $\beta - \beta_e = \Delta \beta$ ise, bu çalışma noktalarından perturbasyonlardır. Perturbasyon, herhangi bir kararlı durum değerinden küçük bir miktar sapma anlamına gelir. Klasik ve ileri seviye lineer kontrolcü tasarımı, birinci mertebeden Taylor açılımı lineer olmayan sistemlerin lineerleştirilmesinde yeterli olduğundan, denklem (3)'teki yüksek mertebeden terimler (YMTler) ihmal edilebilir. Daha sonra, Taylor serisi açılımı denklem (1)'deki türbin sistemi için uygulanırsa, denklem (4) elde edilir.

$$J_t(\Omega - \Omega_e) = \tau_{aero}(U_e, \Omega_e, \beta_e) + \frac{\partial \tau_{aero}}{\partial U}(U - U_e) + \frac{\partial \tau_{aero}}{\partial \Omega}(\Omega - \Omega_e) + \frac{\partial \tau_{aero}}{\partial \beta}(\beta - \beta_e) - \tau_{jen} \quad (4)$$

τ_{jen} ise türbinin rotor şaftından alınan jeneratör tork değeridir. Burada, türbinin tam yük bölgesinde (Bölge 3) çalışacağı düşünüldüğünden, jeneratörün tork değeri anma tork değerine sabitlenir. Bu çalışmada kullanılan 5 MW'lık rüzgar türbininin rotorundan alınan anma tork değeri, 4180074.35Nm olarak belirlenmiştir[7]. Ayrıca, kararlı durum çalışması esnasında, aerodinamik tork ve jeneratör tork değerleri birbirine eşittir ve birbirinin etkisini yok eder. Sonuçta, rotor ivmelenmesi meydana gelmeyip, rotor devrinin türevi sıfır olacağından, sistemin denklemi şu şekilde yazılabilir.

$$J_t \dot{\Omega} = \gamma \Delta \Omega + \eta \Delta \beta + \mu \Delta U \quad (5)$$

Buradaki γ, η ve μ ifadeleri, sırasıyla $\frac{\partial \tau_{aero}}{\partial \Omega}$, $\frac{\partial \tau_{aero}}{\partial \beta}$ ve $\frac{\partial \tau_{aero}}{\partial U}$ kısmi türevlerinin yerini tutmaktadır. Rotor ivmelenmesi tek başına bırakılırsa, sistemin denklemi aşağıdaki şekli alır.

$$\dot{\Omega} = \frac{\gamma}{J_t} \Delta \Omega + \frac{\eta}{J_t} \Delta \beta + \frac{\mu}{J_t} \Delta U \quad (6)$$

Eğer aşağıdaki ilişkiler de tanımlanırsa,

$$\frac{\gamma}{J_t} = A \quad (7)$$

$$\frac{\eta}{J_t} = B \quad (8)$$

$$\frac{\mu}{J_t} = B_d \quad (9)$$

Açık devre türbin sistemi,

$$\dot{\Omega} = A \Delta \Omega + B \Delta \beta + B_d \Delta U \quad (10)$$

şekline döner. Burada, A, sistem kazancını, B, sistem giriş kazancını, B_d ise, türbin sistemine bozucu bir giriş kazancı olarak karşımıza çıkar. Bunlar, (7), (8) ve (9)'da görüldüğü üzere, sırasıyla aerodinamik torkun, rotor devrine, kanat yunuslama açısına ve rüzgar hızına göre kısmi türevleri olup, türbin sisteminin toplam atalet momentine oranlarıdır. Bu kazanç değerlerinin elde edilmesinde, türbin simülasyon modeline ihtiyaç olup, bu değerler MS Bladed Modeli ile elde edilmiştir. Burada, amacımız PI tabanlı kolektif kanat yunuslama açısı kontrolcüsü tasarlamaktır. O zaman, Ref.[13]'e göre, yunuslama açısındaki pertürbasyon, $\Delta\beta$, doğrudan rotor devrindeki pertürbasyonla, $\Delta\Omega$ ilişkilendirilebilir.

$$\Delta\beta(t) = K_p\Delta\Omega(t) + K_i \int \Delta\Omega(t)dt \quad (11)$$

Buradaki, K_p and K_i parametreleri sırasıyla oransal ve integral kazanç ifadeleridir. Ayrıca, kontrolcü çıkışı, $\beta = \Delta\beta + \beta_e$ şeklinde yazılabilir. Denklem (11)'deki $\Delta\beta$ eşitliği denklem (10)'daki yerine konulursa, denklem (12)'daki PI stratejisine sahip kapalı devre türbin sistemi ortaya çıkar.

$$\dot{\Omega} = A\Delta\Omega + B \left(K_p\Delta\Omega(t) + K_i \int \Delta\Omega(t)dt \right) + B_d\Delta U \quad (12)$$

Denklem (12)'ye Laplace dönüşümü uygulandıktan sonra, bazı cebirsel işlemler de gerçekleştirilirse, rotor devri $\Delta\Omega(s)$ ile rüzgar hızı $\Delta U(s)$ arasındaki kapalı devre transfer fonksiyonu, denklem (13)'teki gibi olur.

$$G_{CL}(s) = \frac{\Delta\Omega(s)}{\Delta U(s)} = \frac{B_d s}{s^2 + (-A - BK_p)s + (-BK_i)} \quad (13)$$

Sistemin transfer fonksiyonun paydası (karakteristik denklemi), kontrolcülerin kazanç parametrelerinin de hesaba katılmasıyla sistemin kararlılığı hakkında bilgi verir. O zaman, K_p ve K_i değerlerini tasarlayarak/elde ederek, türbin sisteminden arzulanan rotor devri performansı kolaylıkla alınabilir. Kapalı devre sistemin, kararlılığının sağlanabilmesi için karakteristik denklemde bulunan her iki kökünde, en azından negatif değerli olması gerekir. Öyle ise,

$$-A - BK_p > 0 \quad (14)$$

$$-BK_i > 0 \quad (15)$$

olmalıdır. Sistemden arzulanan performansın elde edilmesi, doğal frekansı, W_n ve sönüm oranı, ζ değerlerine bağlıdır. Bir sonraki kısımda, bu değerlerin belirlenmesi ve kazanç değerlerinin elde edilmesinden bahsedilecektir.

5. KANAT YUNUSLAMA AÇISI KONTROLCÜSÜNÜN TASARIMI VE PERFORMANSI

Bu kısımda, NREL 5 MW'lık türbin için PI tabanlı bir kanat yunuslama açısı kontrolcüsünün tasarlanması tartışılmıştır. İlk olarak, tam yük bölgesinde seçilen bir çalışma noktasında, sönüm oranı değerinin türbinin rotor devri cevabı üzerine etkisi incelenerek, uygun bir sönüm oranı değerinin bulunması irdelenmiştir. Doğal frekans için ise, literatürde verilen bir değer kullanılmıştır[15]. Yapılan incelemelerde, seçilen çalışma noktası için sönüm oranı değerinin

0.8 olarak seçilmesi, sistemin kararlı duruma geçme süresinde en iyi performansı sergilediği görülmüştür. Daha sonra, tasarlanan kontrolcü, türbinin tam yük bölgesindeki diğer çalışma noktalarında da, test edilmiştir. Kontrolcü performansının, farklı çalışma noktalarında azaldığı sonucuna varılmıştır. Benzer bir durum, Wright and Fingersh[13] tarafından NREL'in CART adını verdiği 600 KW'lık rüzgar türbininin kolektif kanat yunuslama açısı kontrolcüsü tasarımı esnasında da görülmüştür. Bu performans azalmasından dolayı, kontrolcü tasarımında kazanç çizelgeleme metodunun da, uygulanması gerektiği anlaşılmıştır. Böylece, türbinden alınan rotor devri cevaplarının türbinin tam yük bölgesindeki bütün çalışma noktalarında benzer sonuçlar vermesi sağlanmıştır. Aşağıda, tasarımla ilgili detaylar bulunmaktadır.

Yunuslama açısı kontrolcüsünü tasarlamak için, öncelikle γ ve η kısmi türev değerlerinin belirlenmesi gerekir. Çünkü bu değerler, A ve B kazanç değerlerinin seçilen bir çalışma noktasında bulunması için gereklidir. Bu kazanç ifadeleri, (13)'de verilen transfer fonksiyonun karakteristik denkleminde açıkça görülmektedir. Bu kazanç değerlerinin bulunması, MS Bladed Modeli kullanılarak, istenilen bir çalışma noktası etrafında sistemin lineerize edilmesiyle elde edilmiştir. Sistemin lineerleştirilmesi, merkezi farklar metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Eğer, (13)'de verilen kapalı devre türbin sisteminin karakteristik denklemi (16)'de verilen Laplace formundaki ikinci derece standart bir sistem olarak düşünülürse,

$$s^2 + 2w_n\zeta s + w_n^2 \quad (16)$$

O zaman, (17) ve (18) numaralı denklemler, doğal frekans, sönüm oranı, türbinin sistem ve giriş kazançları ve kontrolcünün kazanç değerleri arasındaki ilişkileri verir.

$$2w_n\zeta = -A - BK_p \quad (17)$$

$$w_n^2 = -BK_i \quad (18)$$

MS Bladed Modeli ile herhangi bir çalışma noktasındaki, sistem ve giriş kazanç değerleri kolayca tespit edilebildiğinden, doğal frekans ve sönüm oranı değerlerinin bilinmesi ile de, kontrolcü kazanç değerleri, K_p ve K_i sırasıyla (19) ve (20) numaralı denklemler kullanılarak tespit edilebilir.

$$K_p = \frac{-2w_n\zeta}{B} - \frac{A}{B} \quad (19)$$

$$K_i = \frac{-w_n^2}{B} \quad (20)$$

Yukarıda yapılan açıklamalar nezdinde, kontrolcü tasarımı ve analizinin tartışılması için Tablo 1 hazırlanmıştır. Çeşitli çalışma noktaları, rüzgar, rotor devri ve kanat yunuslama açısı ve anma rotor torku cinsinden verilmiştir. Tablo 1'deki ÇN terimi, çalışma noktası anlamına gelmektedir.

İlk olarak, ÇN 1 dikkate alınmıştır. Bu çalışma noktası için bir PI tabanlı kanat yunuslama açısı kontrolcüsü tasarlanmıştır. Ref.[15]'de, bir rüzgar türbin kontrolcüsü tasarlanırken, doğal frekansın 0.6, sönüm oranı değerinin ise, 0.6-0.7 olarak seçilmesi, kontrolcünden iyi bir performans alınabileceği belirtilmektedir. Bununla birlikte, Wright and Fingersh[13] NREL CART türbininin yunuslama açısı kontrolcüsünün tasarlanması esnasında, farklı denemelerden

sonra, sönüm oranı değerinin 1 olması ile daha iyi sonuçlar elde etmiştir. O zaman, bu parametre değerleri, özellikle de sönüm oranı değeri, türbinden türbine değişiklik gösterebilir. Böylece, Ref.[13]'dekine benzer bir yaklaşım, burada da, daha iyi bir sönüm oranı değerinin seçimi için kullanılmıştır. Daha sonra da, elde edilen bu sönüm oranı değeri, kontrolcü tasarımının ileriki aşamalarında da kullanılmaya devam edilmiştir.

Tablo 1. Kontrolcü tasarımı ve analizleri için seçilen çalışma noktaları

Çalışma Noktaları	Rüzgar Hızı (m/s), U_e	Rotor Hızı (rpm), Ω_e	Yunuslama Açısı (derece), β_e	Rotor Torku (Nm), τ_e
ÇN 1	18	12.1	14.9525	4180074.35
ÇN 2	16	12.1	10.5521	4180074.35
ÇN 3	13	12.1	6.7206	4180074.35
ÇN 4	11.5	12.1	2.2792	4180074.35
ÇN 5	12.6607	12.1	5.9676	4180074.35
ÇN 6	23	12.1	20.9964	4180074.35

MS Bladed Modeli ile 5 MW'lık türbin sistemi, ÇN 1 etrafında lineerize edilirse, A, B ve B_d kazanç değerleri aşağıdaki gibi elde edilir.

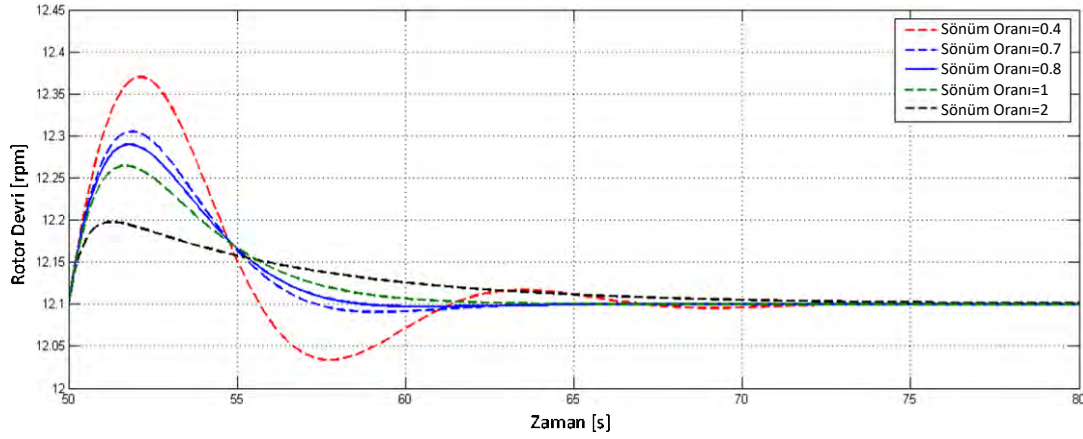
$$A = -0.2401$$

$$B = -1.1672$$

$$B_d = 0.0275$$

Sistem kazancı, A ve giriş kazancı, B değerleri yukarıdaki gibi kullanılır, doğal frekans ve sönüm oranı değerleri sırasıyla 0.6 ve 0.7 seçilirse, oransal, K_p ve integral, K_i kontrolcü kazanç değerleri (19) ve (20) numaralı deklemleri kullanılarak, sırayla 0.5140 ve 0.3084 olarak hesaplanır. Şekil 3'de tasarlanan bu kanat yunuslama açısı kontrolcüsünün, simülasyonun 50. saniyesinde birim basamak olarak, 17'den 18 m/s'ye artan bir rüzgar giriş hızına verdiği rotor devri cevabı kesikli mavi çizgi ile görülmektedir. Bu rotor devri cevabı, simülasyon süresinin 57. saniyesinde, rotor devrinin kalıcı durum değerini az miktarda aşmakta ve yaklaşık 65. saniye civarında kalıcı durum değerine yerleşmektedir. Burada, rotorun kalıcı durum değeri, rotorun anma devri olup, NREL 5 MW'lık türbin için 12.1 rpm'dir. Bu değer, türbin rotorunun dönmesini istediğimiz ve kontrolcüye referans olarak verdiğimiz rotor devridir. Rüzgarın 50. saniyedeki ani değişiminden dolayı, tasarlanan kontrolcünün cevabı kararlı durumuna geçiş süresi bakımından oldukça tatmin edicidir. Çünkü, cevabın kararlı durum değerine yerleşmesi 15 saniyeden daha azdır. Ancak, alınan bu rotor devri cevabından daha iyi bir rotor devri cevabını veren başka bir sönüm oranı değeri olabilir. İyi bir sönüm oranı değerine karar verebilmek için, kapalı devre türbin sistemi için seçilen sönüm oranı değeri azaltıp artırılarak, sönüm oranı değerinin türbinden alınan rotor devri cevabına etkisi incelenmiştir. Bu cevaplar da, Şekil 3'de yer almaktadır. Şekilden de görüldüğü üzere, sönüm oranı değeri 0.4 olması durumunda, rotor devri cevabı sönümsüz bir osilasyona sahip olup, kararlı durum değerine yerleşmek için oldukça büyük bir zaman almaktadır. 15 saniye içinde bile, rotor devri cevabı kalıcı durum değerine ulaşamamakta ve osilasyon devam etmektedir. Kararlı durum değerine yerleşme süresi açısından, sönüm oranı değerinin 2 olması durumunda da, benzer bir durum geçerlidir. Ancak, 0.7 ve 1 sönüm oranı değerleri, yaklaşık aynı yerleşme sürelerine sahiptir. Sönüm oranı değerinin 1 olması durumunda, türbinden alınan rotor devri cevabı, yaklaşık 64.

saniye civarında kararlı durum değerine ulaşmaktadır. Oysa ki, sönüm oranı değerinin 0.7 olması durumunda, kararlı durum değerine ulaşım daha erken olmakta ve 58. saniye civarındadır. Fakat, kararlı durum değerini hafifçe aşmakta ve 15 saniyeden daha az bir süre de, bu değere yerleşmemektedir. O zaman, sönüm oranı 0.7 olması daha iyi bir sönüm oranı değeri olarak anlaşılabilir.



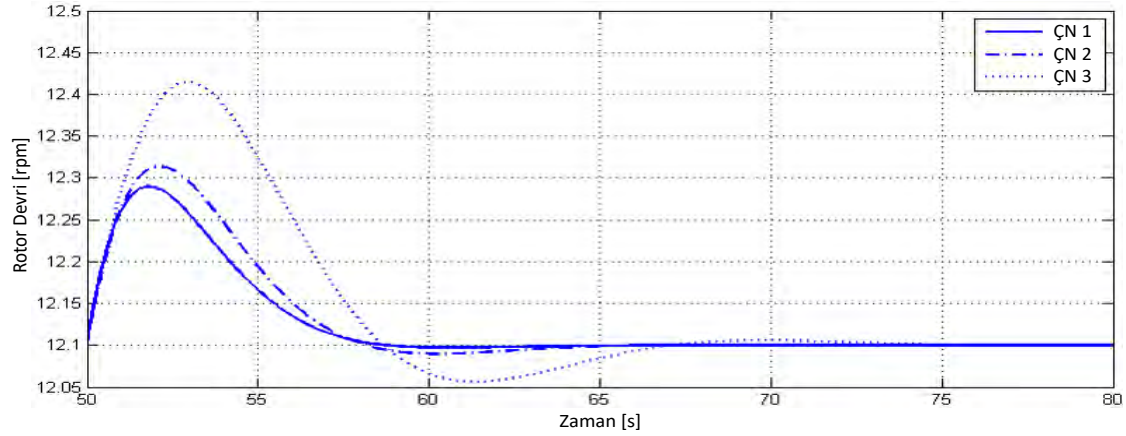
Şekil 3. ÇN 1'deki en iyi rotor cevabı, sönüm oranı, 0.8

Ancak, Şekil 3'ten de görüleceği üzere, 0.8 sönüm oranı değerine sahip kontrolcünün, birim basamak olarak artan rüzgar giriş sinyaline cevabı, diğerleriyle karşılaştırıldığında, yerleşme zamanı açısından en iyi cevaptır. En iyi sönüm oranı değerinin seçilmesi, kontrolcü kazanç değerlerinden oransal kazancı etkilemektedir. Tablo 2'de kontrolcü tasarımı esnasında, yukarıda bahsedilen sönüm oranı değerleri ve mevcut doğal frekansın kullanılması durumunda, kapalı devre türbin sistemin oransal ve integral kazanç değerleri göstermektedir.

Tablo 2. En iyi sönüm oranı değerini belirleme

Sönümleme Oranı	Doğal Frekans	Oransal Kazanç	Integral Kazanç
ζ	w_n	K_p	K_i
0.4	0.6	0.2055	0.3084
0.7	0.6	0.5140	0.3084
0.8	0.6	0.6168	0.3084
1	0.6	0.8224	0.3084
2	0.6	1.8505	0.3084

Şu ana kadar, ÇN 1 için PI tabanlı farklı kontrolcü kazançlarına sahip yunuslama açısı kontrolcüsü incelenmiş, sönüm oranı değerinin 0.8 olduğu durumda tasarlanan kontrolcü, en iyi performansı verdiği görülmüştür. Bu nedenle, bu çalışmada, sönüm oranı değeri, 0.8 istenilen değer olarak kullanılmıştır. Doğal frekans değeri ise, literatürde olduğu gibi 0.6 olarak kullanılmasına devam edilmiştir. Bu değerler ile tasarlanan kontrolcü, ($K_p = 0.6168$, $K_i = 0.3084$), diğer çalışma noktaları olan ÇN 2 ve 3' de (Tablo 1) test edilirse, ilgili çalışma noktalarında performansları kötüleşmektedir. Bu kötüleşme, Şekil 4'te açıkça görülmekte olup, daha çok ÇN 3'te meydana gelmekte ve rotor devri cevabı, simülasyonun 58.inci saniyesinde kararlı durum değerini büyük miktarda aşmaktadır. Kontrolcü performansının kötüleşmesi, kanat yunuslama açısı ve rüzgar hızındaki değişimle birlikte giriş kazancı, B'de meydana gelen değişimden kaynaklanmaktadır[13]. Bu sebeple, kontrolcü kazançlarının kanat yunuslama açısına bağlı olarak değiştirilmesi/çizelgelenmesi gerekir.



Şekil 4. Diğer çalışma bölgelerinde kontrolcü performansının bozulması

O zaman, PI tabanlı olarak tasarlanan kanat yunuslama açısı kontrolcüsünün tam yük bölgesinde, performansını artırmak için, kazanç çizelgeleme metodunun kontrolcüye uygulanması gerekir. Literatürde, PI tabanlı kazanç çizelgeleme metodlu kontrolcü iki yöntemle yapılmaktadır. Bunlar, aerodinamik torkun kanat yunuslama açısına göre kısmi türevine [13] ya da rotor aerodinamik gücün kanat yunuslama açısına göre türevine bağlıdır[7]. Kazanç çizelgeleme yönteminin uygulanması, her iki yöntemde de, kazanç düzeltme faktörünün, $GK(\beta)$ kullanılması ile gerçekleştirilebilir. Literatürde, bu formül, şu şekilde tanımlanmaktadır.[7], [13].

$$GK(\beta) = \frac{1}{\left(1 + \frac{\beta}{\beta_K}\right)} \quad (21)$$

Förmüldeki, β , türbinin anma rotor devrinde dönerken, herhangi bir rüzgar hızında anma torkunu üretebilmesi için gerekli kanat yunuslama açısıdır. Wright and Fingers'e [13] göre, β_K ise, giriş kazancının, B, kısmi yük bölgesinden tam yük bölgesine geçişine yakın bir çalışma noktasındaki değerinin iki katına çıktığı tam yük bölgesindeki başka bir çalışma noktasındaki kanat yunuslama açısının değeridir[13]. Buradaki, β_K değerinin tespiti, MS Bladed Modeli ile gerçekleştirilmiştir.

Öyle ise, kanat yunuslama açısı kontrolcüsünün tasarımı, Ref.[13]'e göre yapılırsa, ilk olarak kısmi yük bölgesinden tam yük bölgesine geçiş bölgesine yakın bir çalışma noktası seçilir. Burada, bu çalışma noktası, Tablo 1'de verilen ÇN 4'e karşılık gelmektedir. Daha sonra, MS Bladed Modeli ile, β_K değeri tespit edilir. ÇN 4'teki lineerleştirme işleminde, sistem kazancı, A, giriş kazancı, B, ve bozucu giriş kazancı, B_d değerleri, MS Bladed Modeli kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$A = -0.0554$$

$$B = -0.2658$$

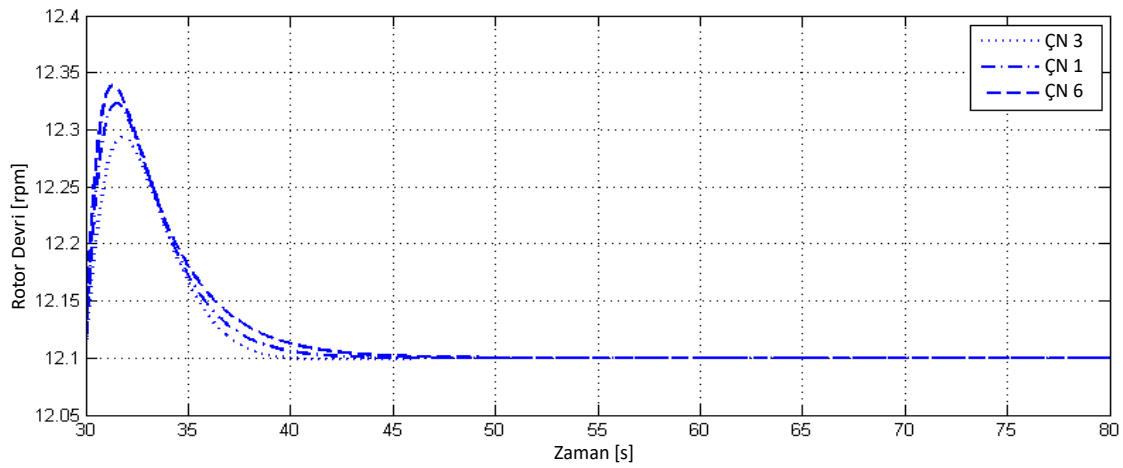
$$B_d = 0.0227$$

Eğer istenilen sönüm oranı ve doğal frekans değerleri sırasıyla 0.8 ve 0.6 olarak kullanılırsa, kontrolcünün oransal ve integral kazanç değerleri, denklem (19) ve (20) ile aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$K_p = 3.4033$$

$$K_i = 1.3544$$

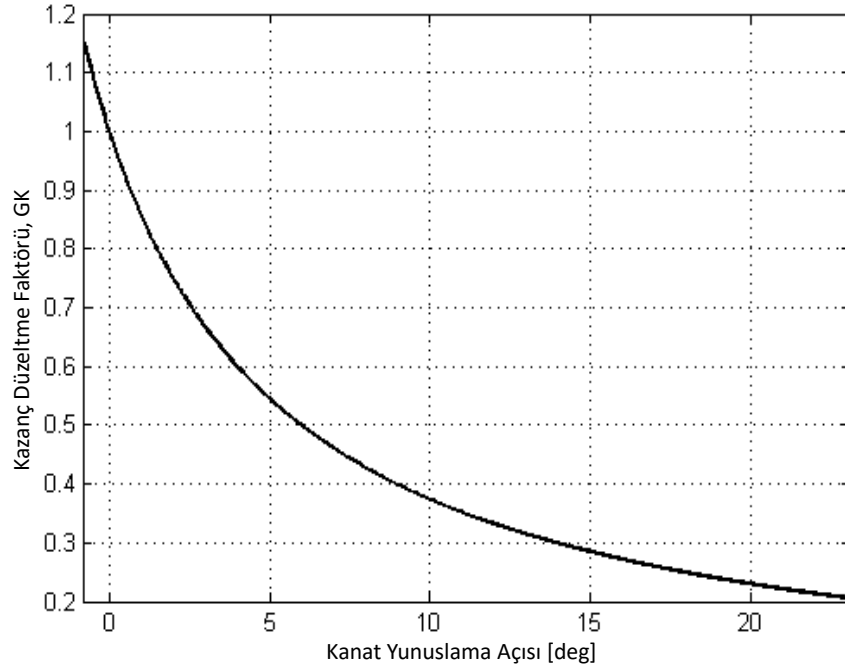
ÇN 5, tam yük bölgesinde (Bölge 3) bulunan ve ÇN 4'teki giriş kazancı, B değerinin iki katına çıktığı kararlı durum çalışma noktasıdır. MS Bladed Modeli ile ÇN 5'teki β_K değeri 5.9676 derece olarak tesbit edilmiştir. O zaman, kazanç düzeltme faktörü, $GK(\beta)$, β_K değerinin de kullanılmasıyla, kolaylıkla elde edilebilir. Burada, (21)'deki GK formülündeki β değeri, farklı yöntemlerle elde edilebilir. Burada kullandığımız yöntem, rüzgar hızına göre kanat yunuslama açısı değerlerinin interpolasyonundan elde edilmiştir. Kazanç çizelgeleme işlemi, yukarıda hesaplanan oransal, K_p ve integral, K_i kazanç değerlerinin kazanç düzeltme (21) faktörüyle, GK çarpılmasıyla gerçekleşir.



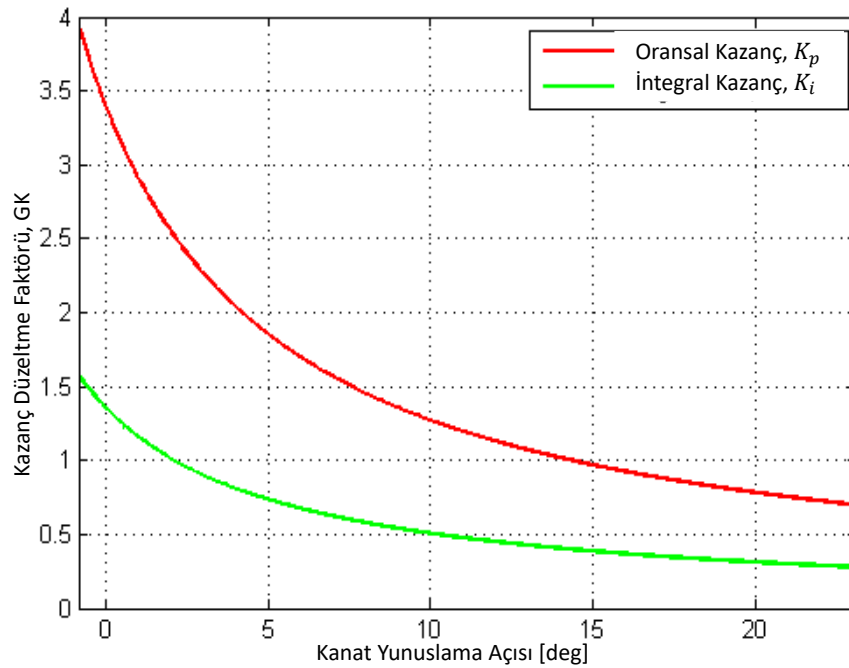
Şekil 5. Kazanç çizelgeleme yöntemine sahip PI tabanlı yunuslama açısı kontrolcüsünün performansı, sönüm oranı, 0.8

Şekil 5'de tasarlanan kazanç çizelgeleme metoduna sahip kontrolcünün 3 farklı çalışma noktasındaki performansı verilmiştir. Bu noktalarda, MS Bladed Modelinde uygulanan rüzgar girişleri, 12'den 13 m/s, 17'den 18 m/s ve 22'den 23 m/s'ye birim basamak olarak artan rüzgar hızlarıdır. Bunlar da, sırasıyla Tablo 1'de verilen ÇN 3, ÇN 1 ve yeni eklenen ÇN 6'ya karşılık gelmektedir. Simülasyon sonuçlarından görüleceği üzere, kazanç çizelgelemeli yunuslama açısı kontrolcüsü bu üç farklı çalışma noktasında da, hemen hemen aynı performansı göstermektedir. Bu, Şekil 4'te verilen daha önceki tek bir lineer kontrolcünün farklı çalışma noktalarındaki sergilediği performansın tersine, daha iyidir. Rotor devrinin bu çalışma noktalarındaki kararlı duruma geçme süresi, 22 saniye iken, Şekil 4'de ise, tek bir lineer kontrolcünün farklı çalışma noktalarında, farklı kararlı duruma geçme süresi vardır.

Şekil 6, kazanç düzeltme faktörünün, GK kanat yunuslama açısına göre değişimini göstermekte iken, Şekil 7'de kontrolcünün oransal ve integral kazanç değerlerinin GK 'ya bağlı olarak, yunuslama açısına göre değişimini göstermektedir.



Şekil 6. Kazanç düzeltme faktörünün yunuslama açısına göre değişimi



Şekil 7. Oransal, K_p ve integral, K_i kazançların yunuslama açısına göre değişimi

Şekil 6 ve Şekil 7'den anlaşılabacağı üzere, kazanç çizelgeleme metodunun uygulanması ile tam yük bölgesindeki farklı çalışma noktalarında kontrolcü kazançları, benzer performanslar sergilemek adına değişmektedir. Kanat yunuslama açısının artması durumunda, kazanç düzeltme faktörünün değeri azalmakta, buna bağlı olarak da, oransal ve integral kontrolcü kazançlarının değerleri azalmaktadır.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, MS Bladed Modeli kullanılarak, NREL 5MW'lık rüzgar türbin sistemi üzerinde, çeşitli çalışma noktalarında sistem, giriş kazancı gibi vb. değerlerin elde edilmesi, yunuslama açısı kontrolcüsü tasarımı, türbin kontrolünde kullanılan bir kazanç çizelgeleme yönteminin uygulanması ve tasarlanan kontrolcünün farklı çalışma noktalarındaki performanslarına yer verilmiştir. Türbinin tam yük bölgesi için tasarlanan tek bir lineer kontrolcünün tam yük bölgesindeki bütün çalışma noktalarında aynı performansı sergilemeyeceği sonucuna ulaşılmıştır. Kazanç çizelgeleme metoduna sahip PI tabanlı kolektif yunuslama açısı kontrolcüsü ise, türbini tam yük bölgesindeki farklı çalışma noktalarında benzer performans vermesini sağlayarak, türbin anma rotor devrinde çalıştırılmıştır. Ayrıca, tam yük bölgesinde, jeneratörün torku anma torkuna eşit olacağından, 5MW'lık türbinden anma gücünde enerji sağlanır.

KAYNAKLAR

- [1] **K. E. Johnson, L. Y. Pao, M. J. Balas, and L. J. . Fingersh**, 2006, "Control of Variable Speed Wind Turbines-Standard and Adaptive Techniques for Maximizing Energy Capture," *IEEE Control Syst. Mag.*, vol. 26, no. 3, pp. 70–81.
- [2] **M. Şahin and İ. Yavrucuk**, 2017, "Değişken Hızlı Rüzgar Türbinlerinin Kısmi ve Tam Yük Bölgeleri için Kontrolcü Tasarımı," in *YEKSEM 2017*, p.12.
- [3] **A. Merabet, J. Thongam, and J. Gu**, 2011, "Torque and Pitch Angle Control for Variable Speed Wind Turbines in All Operating Regimes," in *10th International Conference on Env. and Electrical Engineering (EEEIC), 2011*, vol. 1, no. 2, pp. 1–5.
- [4] **B. Fischer and M. Shan**, 2013, "A Survey on Control Methods for the Mitigation of Tower Loads,".
- [5] **M. Sahin**, 2018, "Dynamic Modeling, Control and Adaptive Envelope Protection System for Horizontal Axis Wind Turbines, PhD Thesis, Department of Aerospace Engineering, METU, Ankara," Middle East Technical University.
- [6] **K. A. Stol and L. J. . Fingersh**, 2004, "Wind Turbine Field Testing of State-Space Control Designs," *Technical Report NREL/SR-500-35061*, no. September, Golden, Colorado.
- [7] **J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, and G. Scott**, 2009, "Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development,".
- [8] **R. E. Wilson and P. B. S. Lissaman**, 1974, "Applied Aerodynamics of Wind Power Machines,".
- [9] **A. D. Platt and M. L. Buhl**, 2012, "WT_Perf User Guide for Version 3.05.00,".
- [10] **P. J. Moriarty and A. C. Hansen**, 2005, "AeroDyn Theory Manual, NREL/TP-500-36881, Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory,".
- [11] **M. Şahin and İ. Yavrucuk**, 2017, "Rüzgar Türbininin Dinamik Modellemesinde Belirli Parametrelerin Güç Eğrisi Tahminine Olan Etkilerinin İncelenmesi," in *YEKSEM 2017*, p. 8.
- [12] **M. Sahin and I. Yavrucuk**, 2017, "Dynamical modelling of a wind turbine system with precone and tilt angles," in *9th Ankara International Aerospace Conference*, no. 20–22 September, pp. 1–11.
- [13] **A. D. Wright and L. J. Fingersh**, 2008, "Advanced Control Design for Wind Turbines Part I: Control Design, Implementation, and Initial Tests," *Tech. Rep. Natl. Renew. Energy Lab.*, no. March, p. 98.
- [14] **A. D. Wright**, 2004, "Modern Control Design for Flexible Wind Turbines," no. July.
- [15] **M. H. Hansen, A. Hansen, T. J. Larsen, S. Øye, P. Sørensen, and P. Fuglsang**, 2005, "Control design for a pitch-regulated , variable speed wind turbine, Risø-R-1500(EN),Risø National Laboratory," Roskilde, Denmark

RÜZGAR TÜRBİNİ ROTORLARI İÇİN KALIN KANAT PROFİLLERİNİN HAD SİMÜLASYONLARI

Ezgi Orbay Akcengiz¹, Nilay Sezer Uzol²

^{1,2}Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, ODTÜ

^{1,2}ODTÜ RÜZGEM

¹eorbay@metu.edu.tr, ²nuzol@metu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada rüzgar türbini rotorlarında kullanılan çeşitli kalın kanat profillerinin üzerindeki akış simülasyonları daimi ve zamana bağlı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kullanılarak yapılmıştır. Kalın kanat profilleri genellikle büyük rüzgar türbini rotorlarının kanat tasarımında tercih edilmektedir. Kanat profiline kalınlığı, kanatların dış kısımlarında aerodinamik performans açısından, kanatların kök kısmına yaklaştıkça ise hem yapısal hem de aerodinamik performans gereksinimleri açısından artmaktadır. Bu tür kanat profilleri için doğru aerodinamik özelliklerin hem deneylerle hem de sayısal analizlerle elde edilmesi büyük ölçüde ayrılan akışlardan dolayı oldukça zordur. Bu çalışmada, seçilen kalın kanat profillerinin HAD simülasyonları gerçekleştirilerek akış karakteristikleri incelenmiş ve sonuçlar literatürdeki mevcut deneylerle karşılaştırılmıştır.

1. GİRİŞ

Kalın kanat profilleri, büyük rüzgar türbinlerinde büyük bükülme yüklerini absorbe etmek için tasarlanmıştır. Güçlü yapılar elde etmek için kalın kanat profilleri rotor kanatlarının yani palaların kök kısımlarından ortalarına kadar uygulanmaktadır. Son yıllarda, kalın profillerin rüzgar türbini kanatlarına uygulanması artmaktadır. Kalın kanat profilleri genel olarak keskin ya da küt firar kenarına sahip olabilir. Keskin firar kenarıyla kıyaslandığında, küt firar kenarlı profiller rüzgar türbinlerinde daha yaygın kullanılır, çünkü daha geniş kesit alanlarına uyarlanabilirler. Ayrıca, daha fazla taşıma kuvveti üretebilir ve yapısal dayanıklılığı arttırmak için kullanılabilirler.

Literatürde, farklı kalın kanat profilleri üzerine yapılmış birçok deneysel ve hesaplamalı çalışmalar bulunmaktadır [1-14]. Bu kanat profillerinin etrafındaki akışı incelemek ve profil kalınlığının aerodinamik performansa olan etkisini incelemek için farklı türbülans modelleri ve hesaplama yöntemleri de kullanılmıştır. 2001 yılında Bertagnolio vd. [1] birçok farklı kanat profili içeren bir rüzgar türbini kanat profili kataloğu yayınlamıştır. Bu katalogta, hem deneysel aerodinamik verileri hem de 2-boyutlu Navier-Stokes çözücü EllipSys2D ve panel yöntemi kodu XFOIL kullanılarak elde edilen sayısal veriler bulunmaktadır. Deneysel verilerle hesaplama sonuçları arasında genel olarak iyi bir uyuma olduğu belirtilmiştir.

Küt firar kenarlı kanat profillerinin yaygın örneklerinden olan DU kanat profilleri, Delft Teknoloji Üniversitesi tarafından rüzgar türbinlerinde kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Timmer ve Rooij [2,3] tarafından 2003 yılında deneysel ve sayısal olarak bir dizi DU kanat profili araştırılmıştır. Pürüzlülüğün çeşitli kanat profillerinin performansı üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. V-girdap yaratıcılarının DU91-W2-250 kanat profiline aerodinamik performansına olan etkisi Velte [4] tarafından 2008 yılında incelenmiştir. 2009'da Barone ve Berg [5], DU97-W-300 profiline değiştirilmemiş ve düz kalın firar kenarlı (flatback) versiyonlarının Reynolds sayısı 3×10^6 için hem deneysel hem de hesaplamalı analiz sonuçlarını sunmuştur. Kanat profillerinin, aerodinamik ve aeroakustik özelliklerini incelemişlerdir.

Farklı araştırma amaçlı rüzgar türbinleri için yapılan çalışmalarda, 2011 yılında Bechmann vd. [6], MEXICO rüzgar türbinin arkasında oluşan iz bölgesini HAD kodu EllypSys3D kullanarak incelemişlerdir. DU 91-W2-250, RISOE-A1-21 ve NACA 63-418 kanat profilleri, MEXICO rüzgar türbini palinin sırasıyla kök kısmından uç kısmına doğru kullanılır. Sıkıştırılabilen RANS denklemlerini k-omega SST çevrinti viskozitesi yöntemi ile birlikte çözmüşlerdir. Elde ettikleri sonuçları kullanarak, 3-boyutlu kanat profilinin aerodinamik özelliklerini çıkartıp 2-boyutlu deneysel aerodinamik verilerle karşılaştırmışlardır. 2013’de Lago vd. [7], NREL 5 MW rüzgar türbini için farklı kanat konfigürasyonlarını analiz etmiştir. NREL 5 MW rüzgar türbininde farklı kalınlıklarda DU40-DU21 kanat profilleri ve NACA64 serisi profilleri kullanılmaktadır. Fischer vd. [8] 2014’te ve Yang vd. [9] 2016’da kalın profillere sahip rüzgar türbini palalarının aerodinamik ve yapısal optimizasyonu üzerine çalışmıştır. Cakmakcioğlu vd. [10] 2014’te, düşük Reynolds sayılarında NTNU model rüzgar türbininde kullanılan S826 kanat profili için 2 ve 3-boyutlu HAD analizleri yapmış deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. 2015 yılında Gao vd. [11], Reynolds sayıları 3×10^6 ve 2×10^6 ’da girdap yaratıcıları olan ve olmayan DU97 profil kanatlar üzerinde oluşan akış ayrılmalarını araştırmıştır. HAD analizleri Spalart-Allmaras türbülans modeli ile Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemleri çözülerek FLUENT yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Bu analizler için, iz bölgesinde 30 veter uzaklığında uzak alan sınırlarına sahip 3-boyutlu C-H tipi hesaplama alanı kullanılmıştır. Hız girişi ve basınç çıkışı, alanın girişi ve çıkışında tanımlanmış olup, kanat ve girdap yaratıcılar duvar sınır şartları olarak tanımlanmıştır.

Yakın zamanda yapılan deneysel ve sayısal çalışmalarda ise, 2018 yılında Özçakmak vd. [12], serbest akış türbülansı ve hücum kenarı pürüzlülüğü etkileriyle NACA 63-418 kanat üzerindeki Laminer-Türbülans Geçişini araştırmıştır. DAN-AERO rüzgar tünelinden farklı Reynolds sayıları 1.6×10^6 - 6×10^6 ve farklı hücum açıları için elde edilen aerodinamik ölçümleri sunmuşlardır. Rogowski vd. [13] 2018’de, DU91 kanat profilinin Reynolds sayısı 3×10^6 ’daki aerodinamik karakteristiğini incelemek için 2-boyutlu RANS denklemlerini ve 3-boyutlu DES yöntemini kullanmıştır. Simulasyon sonuçları incelendiğinde, Laminer-türbülans geçiş modelinin, k-w SST tam türbülans modeline göre deney verileri ile daha uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Deneysel ölçümler, LM Wind Power Düşük Hızlı Rüzgar Tüneli’nde elde edilmiştir. Li vd. [14] 2018’de, DU91-W2-250 kanat profilinin düşük Reynolds sayısı 3×10^5 ’te dinamik tutunma kaybı altındaki aerodinamik performansını, geçiş SST türbülans modeli ile daimi olmayan RANS (URANS) denklemlerini çözerek incelemiştir. 2-boyutlu bir hesaplama alanı kullanılmış olup, kanat profili ile birlikte hareket eden dairesel çözüm ağının salınım hareketi ile dinamik tutunma kaybının benzetimi sağlanmıştır.

Bu bildiride, Şekil 1’de gösterilen 3 farklı kalın kanat profilleri için, keskin firar kenarlı profilden NACA 63-418 ve küt firar kenarlı profillerden DU91-W2-250 ve DU97-W-300, 2-boyutlu HAD simülasyonları yapılarak kanat profilleri etrafındaki akış alanları ve aerodinamik performans karakteristikleri incelenmektedir. DU 97-W-300, yaklaşık %1.74 veter uzunluğunda küt firar kenarı kalınlığına sahip olup maksimum kalınlığı veterin %30’unda bulunmaktadır. Bu profil, kanat boyunca diğer kanat profillerine sorunsuz bir şekilde dönüşebildiği için genellikle rüzgar türbinlerinde kanat buyunun kökten %40’ına kadar kullanılmaktadır. Reynolds sayısı 3×10^6 iken DU97-W-300 1,5 ila 1,6 aralığında maksimum taşıma kuvveti katsayısına sahiptir. DU91-W2-250 kanat profili, %25’lik bir maksimum kalınlığa ve %0.65 veter uzunluğunda küt firar kenarı kalınlığına sahiptir. Bu çalışmada ele alınan bir diğer kalın kanat profili olan NACA 63-418, %18’lik bir profil kalınlığına ve keskin bir firar kenarına sahiptir.

2. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ ANALİZLERİ

Sayısal analizler, ön koşullandırılma tekniği ile birlikte sıkıştırılabilir Reynolds-Ortalama Navier-Stokes denklemleri ve k- ω SST türbülans modeli çözülerek, ticari bir sonlu hacim HAD akış çözücü yazılımı olan CFD++ [15] kullanılarak yapılmıştır. 2-boyutlu C-H tipi yapısal çözüm ağı hesaplama alanı Pointwise [16] yazılımı kullanılarak üretilmiştir.

Cözüm Ağları

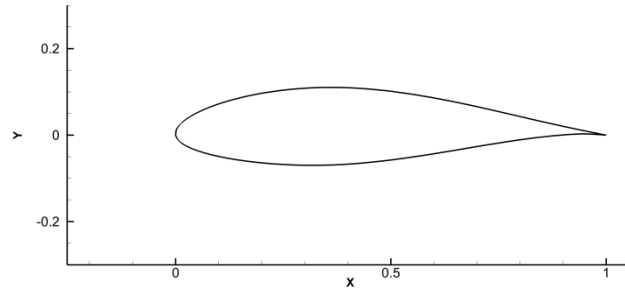
Bütün çözüm ağları kanat profilinin üst ve alt yüzeylerinden itibaren 20 veter uzunluğunda olup, iz bölgesi 30 veter uzunluğu boyunca uzanmaktadır. Keskin firar kenarlı NACA63-418 için üretilen çözüm ağı yaklaşık olarak 120 bin dörtgen (quadrilateral) grid hücresi içerirken, küt firar kenarlı DU91-W2-250 kanat profilinin çözüm ağı yaklaşık olarak 150 bin dörtgen hücreden oluşmaktadır. Daha geniş küt firar kenarından dolayı daha seyrek olarak yapılabilen DU97-W-300 kanat profilinin çözüm ağına ise yaklaşık olarak 80 bin dörtgen hücre bulunmaktadır. Çözüm ağları, kanat profil geometrisin etrafında ve iz bölgesinde yoğunlaştırılmıştır. NACA 63-418 ve DU91-W2-250 profillerinin üst ve alt yüzeylerinde 200'er ağ noktası bulunurken, DU97-W-300 profilinin etrafına toplamda 200 ağ noktası yerleştirilmiştir. y^+ değerini olabildiğince küçük tutmak için, bütün kanat profillerinde ızgara aralığı, ilk hücre için 10^{-5} veter uzunluğunda verilmiştir.

Şekil 2'de NACA 63-418 kanat profili için üretilmiş olan C-H tipi yapısal çözüm ağı ve hesaplama alanı görülebilmektedir. Diğer kanat profilleri için de benzer geometriye sahip çözüm ağları yapılmıştır. Şekil 3'te, kanat profili etrafındaki ağ hücreleri sırasıyla NACA 63-418, DU91-W2-250 ve DU97-W-300 profilleri için verilmiştir. Sınır tabakası bölgesinde, ağ çizgileri kanat yüzeyine dik bir şekilde uzanmaktadır.

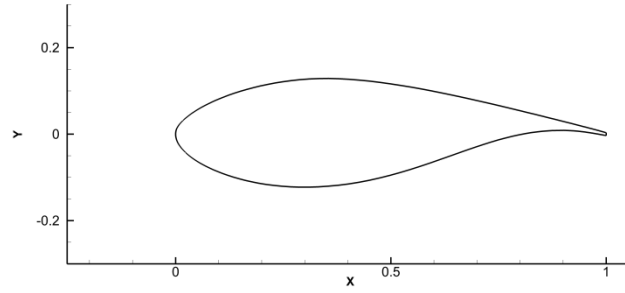
HAD Analizleri

Daimi durum simülasyonları 2000 iterasyon adımı boyunca yürütülmüştür. Analizlerin yakınsama süreleri farklılık göstermekle birlikte, NACA63-418 ve DU91-W2-250 profilleri için yaklaşık olarak 500 iterasyon adımı yakınsama gerçekleşmiştir. Böylece, akış alanının yakınsama durumuna ulaştıktan sonraki davranışları da gözlenmiştir. Kanat profillerinin aerodinamik özellikleri standart deniz seviyesi koşulları için ve Reynolds sayısı 3×10^6 iken incelenmiştir. Standart deniz seviyesi koşullarında, açık hava basıncı 101325 Pa, sıcaklık 288.15 K olarak hesaplanmıştır. Bu koşullarda, serbest akış hızı 42.86 m/s olarak verilmiştir. Hesaplama alanın dış kenarlarına, karakteristik uzak alan sınır koşulları uygulanmıştır. Ayrıca, kanat profili duvar sınır koşulu (kaymazlık koşulu) olarak tanımlanmıştır. Böylece, kanat profilinin yüzey akış hızı sıfır olacak ve kanat profili üzerinde sınır takası oluşabilecektir. Yürütülen bütün simülasyonlar temiz/pürüzsüz yüzey koşullarında yapılmış olup, kanat profili etrafındaki akış $k-\omega$ SST'nin tam türbülans modeli kullanılarak çözülmüştür.

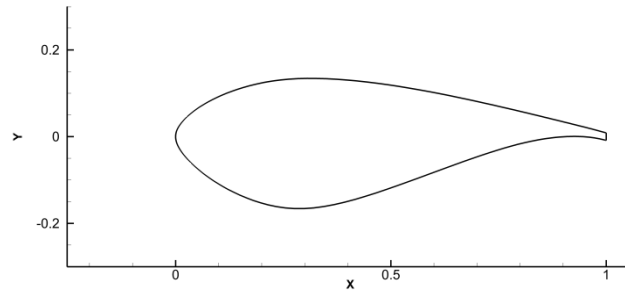
Bütün kanat profilleri için, aerodinamik analizler -10° ila 20° aralığındaki hücum açıları (Angle of Attack, AoA) için yapılmıştır. Hücum açısına bağlı olarak hız vektörü bileşenlerinin değişimi de akış koşulları olarak verilmiştir. Taşıma ve sürüklenme kuvveti katsayıları son 1000 iterasyonun ortalaması olarak hesaplanmıştır. NACA 63-418 profili için Reynolds sayısı 3×10^6 'da elde edilen sayısal sonuçlar Bertagnolio vd., 2001, [1]'de verilen deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. DU91-W2-250 ve DU97-W-300 profilleri için sayısal analizler de aynı Reynolds sayısında yapılmıştır ve sırasıyla Gao vd., 2015, [11] ve Rogowski vd., 2018, [13] deneysel verileri ile karşılaştırılmıştır. Bütün hesaplamalar, ODTÜ RÜZGEM'deki Yüksek Başarımli Hesaplama öbek bilgisayarlarında 16 işlemci kullanılarak yapılmış olup, 2000 iterasyonluk daimi durum simülasyonlarını elde etmek yaklaşık olarak 10 dakika sürmektedir.



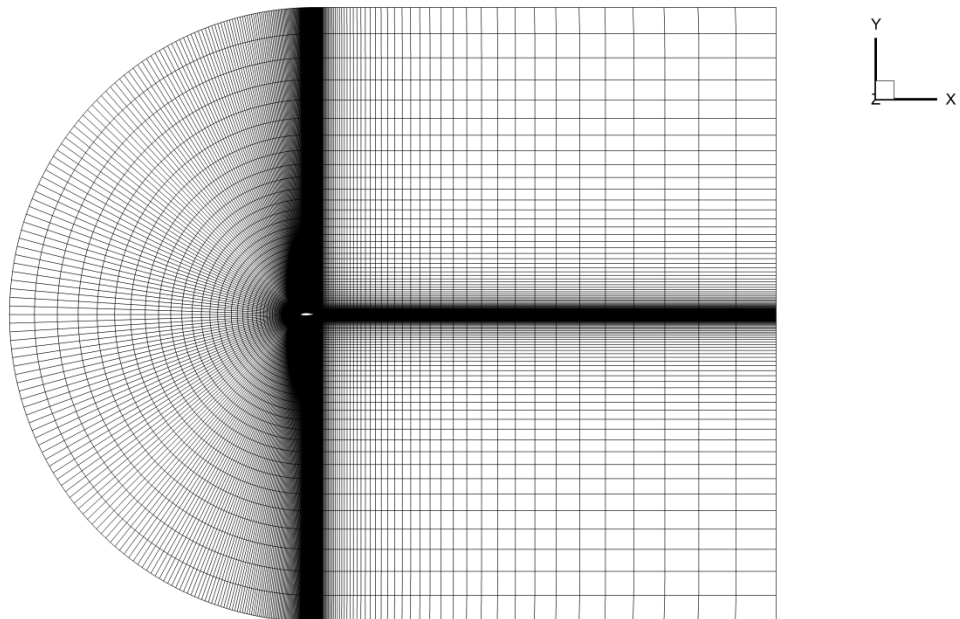
a) NACA 63-418 kanat profili [1, 17]

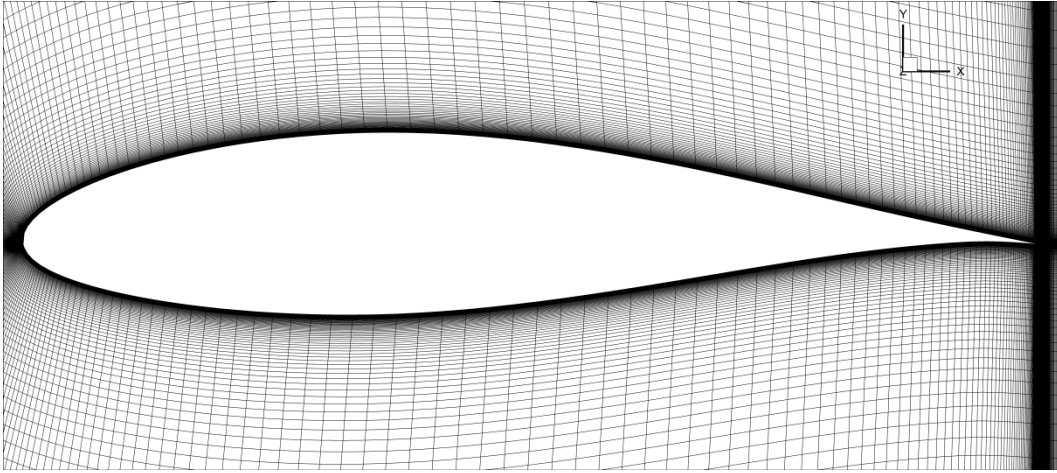


b) DU91-W2-250 kanat profili [3, 14]

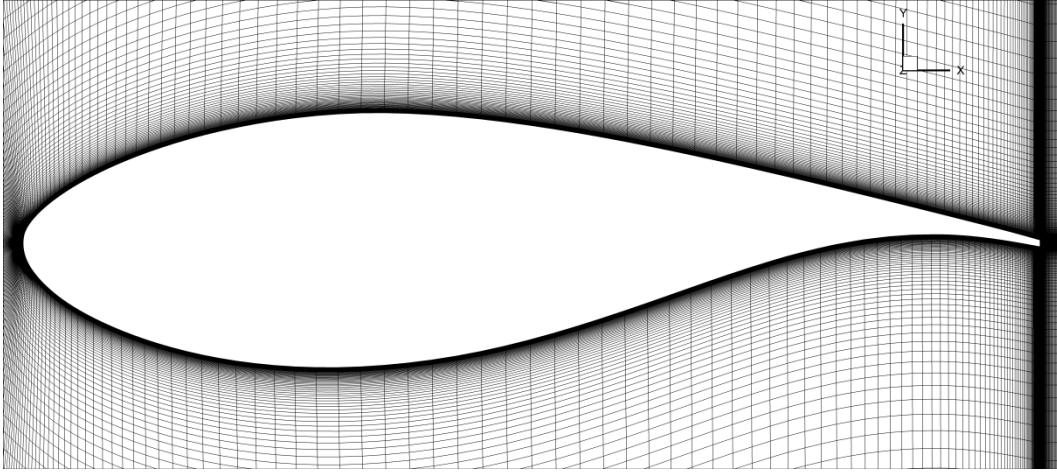


c) DU97-W-300 kanat profili [3, 5]

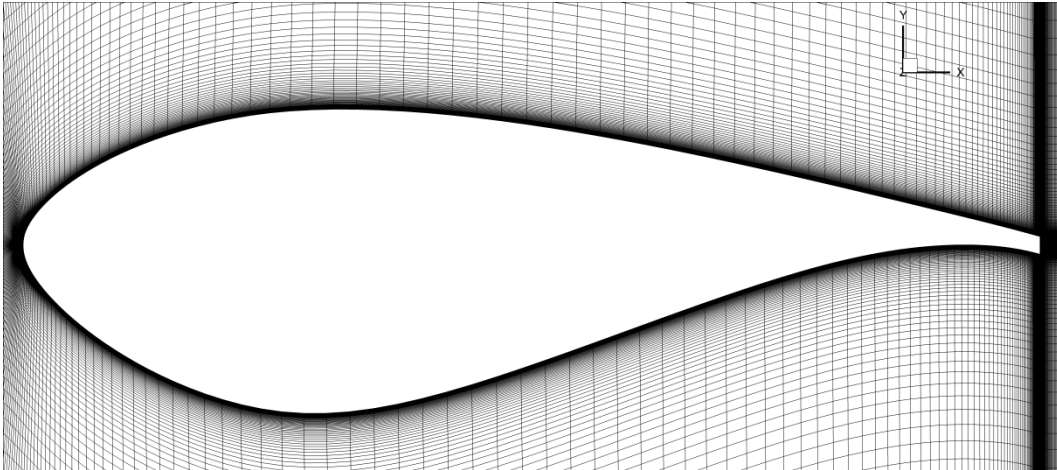
Şekil 1. Rüzgar Türbini Kalın Kanat Profili Geometrileri**Şekil 2.** NACA 63-418 kanat profili için üretilmiş yapısal çözüm ağı ve C-H tipi hesaplama alanı



a) NACA 63-418 kanat profili



b) DU91-W2-250 kanat profili



c) DU97-W-300 kanat profili

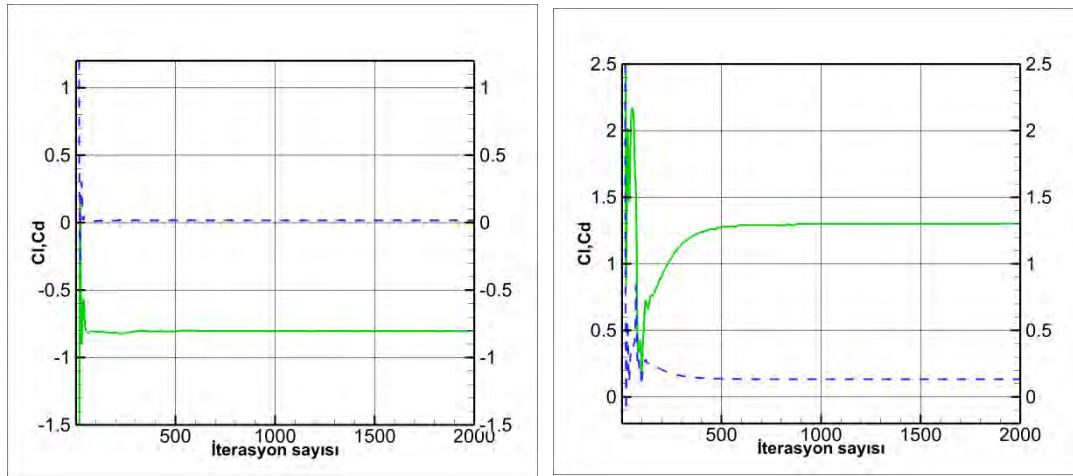
Şekil 3. Kanat profilleri etrafındaki 2-boyutlu, yapısal çözüm ağları

3. HAD ANALİZ SONUÇLARI

3 farklı kalın kanat profili için yapılan HAD simülasyon sonuçları aşağıda değerlendirilmiştir.

NACA 63-418 Kanat Profili

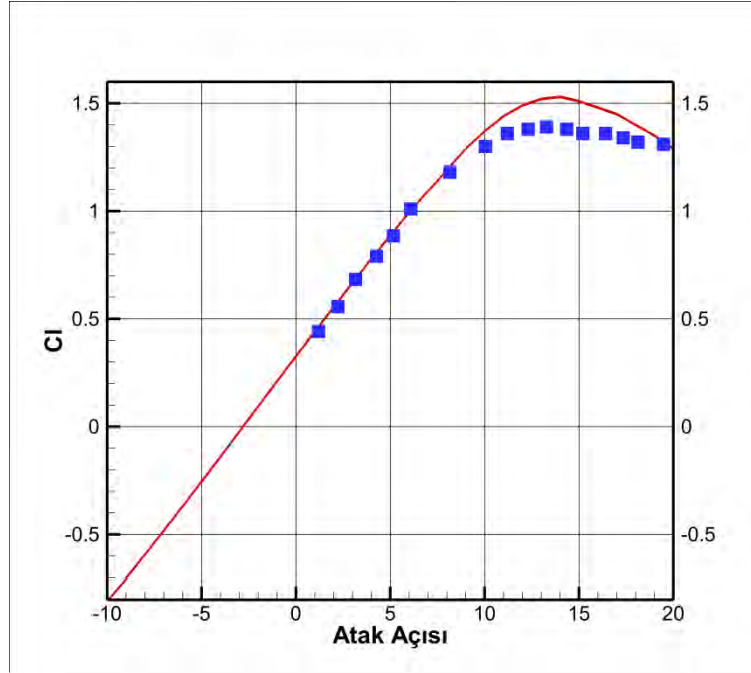
Taşıma kuvveti ve sürüklenme kuvveti katsayılarının 20° ve -10° lik hücum açılarındaki yakınsama grafikleri Şekil 4'te verilmektedir. Sonuçlar NACA 63-418 kanat profili için elde edilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere, yakınsama elde edildikten sonra, taşıma kuvveti ve sürüklenme kuvveti katsayılarında salınımlar olmamaktadır. Hücum açısı arttıkça grafiklerin belirli bir değere yakınsamaları daha uzun sürmektedir. Hücum açısı 20° iken, grafik 500. adımdan sonra yakınsarken, 10° 'lik hücum açısı için grafikler çok daha erken daimi durum değerine ulaşmaktadır.



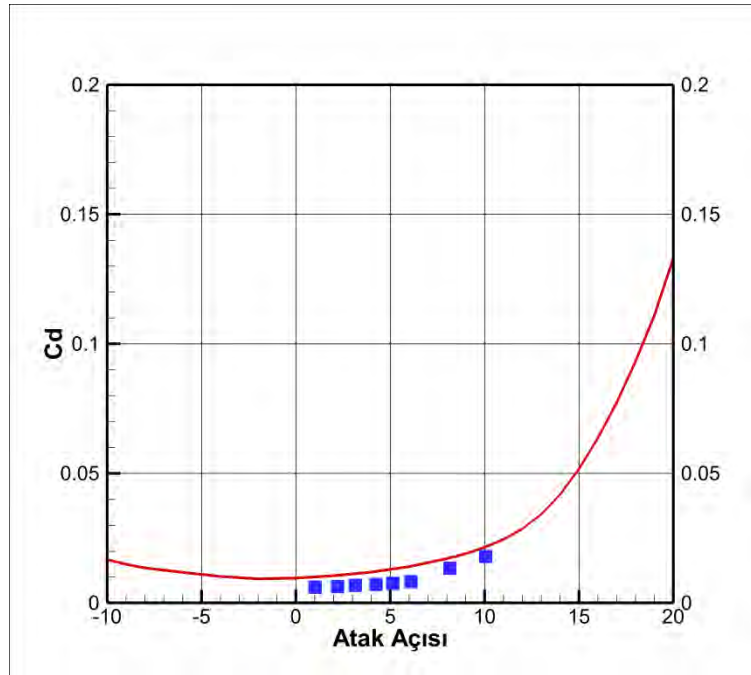
Şekil 4. NACA 63-418 kanat profilinin -10° (sol) ve 20° (sağ) derecelik hücum açıları için yapılan analizlerin yakınsama grafiği (düz yeşil çizgi taşıma kuvveti katsayısını gösterirken, kesik mavi çizgi sürüklenme kuvveti katsayısını.)

Taşıma kuvveti ve sürüklenme kuvveti katsayılarının hücum açısına göre değişimi Şekil 5 ve 6'da sırasıyla verilmektedir. Hesaplama sonuçları, literatürden elde edilen deneysel veriler [1] ile karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Grafiklerden anlaşıldığı üzere, NACA 63-418 14° 'lik tutunma kaybı açısına ve 1.5 değerindeki maksimum taşıma kuvveti katsayısına sahiptir. Tutunma kaybı açısına kadar, hesaplama sonuçları deney verileri ile uyum içinde görünmektedir. Fakat tutunma kaybı açısında, HAD analizi sonuçlarına göre maksimum taşıma kuvveti katsayısı daha yüksek çıkmaktadır. Ayrıca, Şekil 6 incelendiğinde, yaklaşık olarak tutunma kaybı açısından sonra sürüklenme kuvveti katsayısında hızlı bir artış gözlenmektedir.

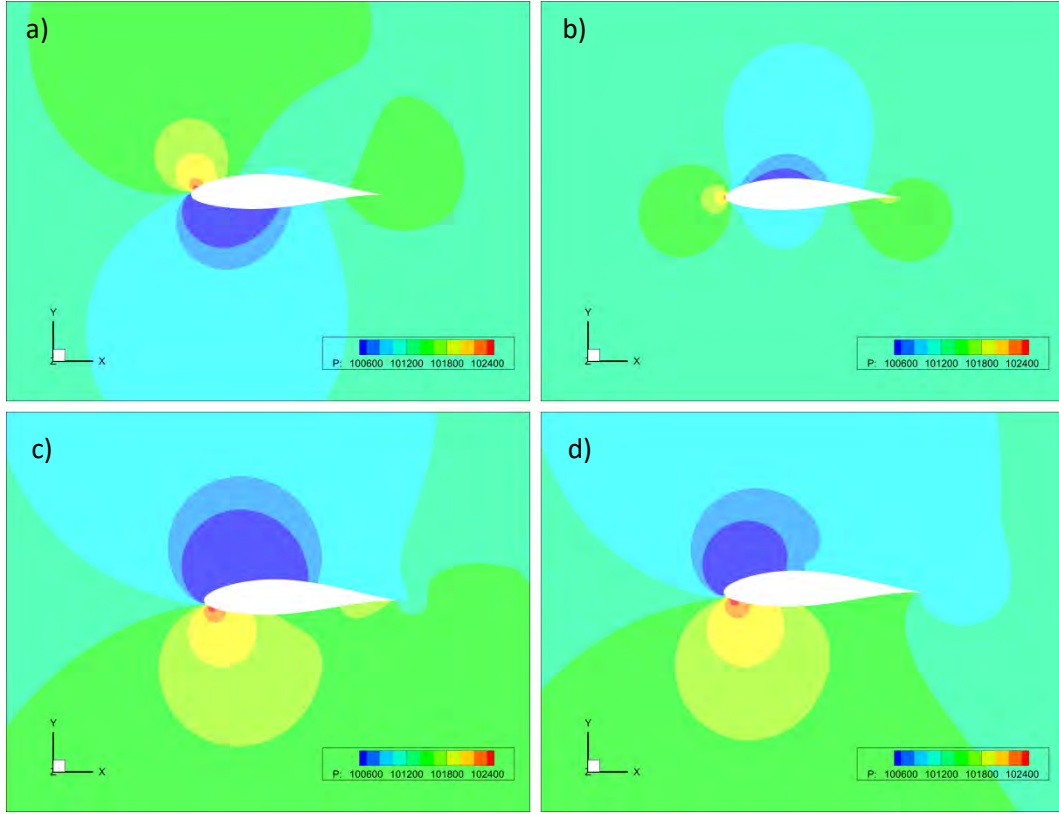
Şekil 7, 8, 9 ve 10'da, kanat profili etrafındaki akış alanı farklı hücum açıları için verilmiştir. Şekillerde sırasıyla basınç dağılımı, akış hızı büyüklükleri ile birlikte akış çizgileri ve girdap şiddeti dağılımı gösterilmektedir. Sonuçlar -10° , 0° , 14° (tutunma kaybı açısı) ve 20° hücum açıları için elde edilmiştir. -10° ve 0° 'de akış kanat profili etrafında yumuşak bir geçiş yaparken, daha büyük hücum açılarında akışta ayrılmalar oluşur ve bu akış kopmaları ve girdaplı bölgeler hücum açısı ile birlikte büyümektedir.



Şekil 5. NACA 63-418 kanat profili için taşıma kuvveti katsayısının hücum açısına göre değişimi (kare sembol: deneysel veri [1]).

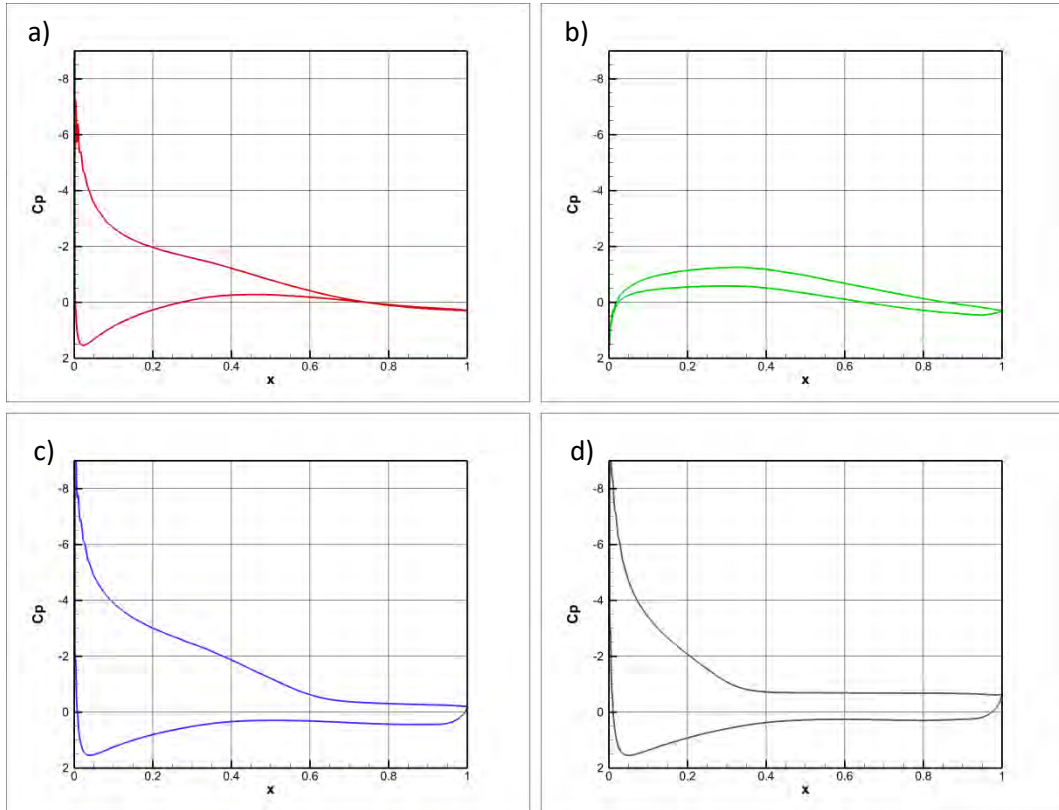


Şekil 6. NACA 63-418 kanat profili için sürüklenme kuvveti katsayısının hücum açısına göre değişimi (kare sembol: deneysel veri [1]).



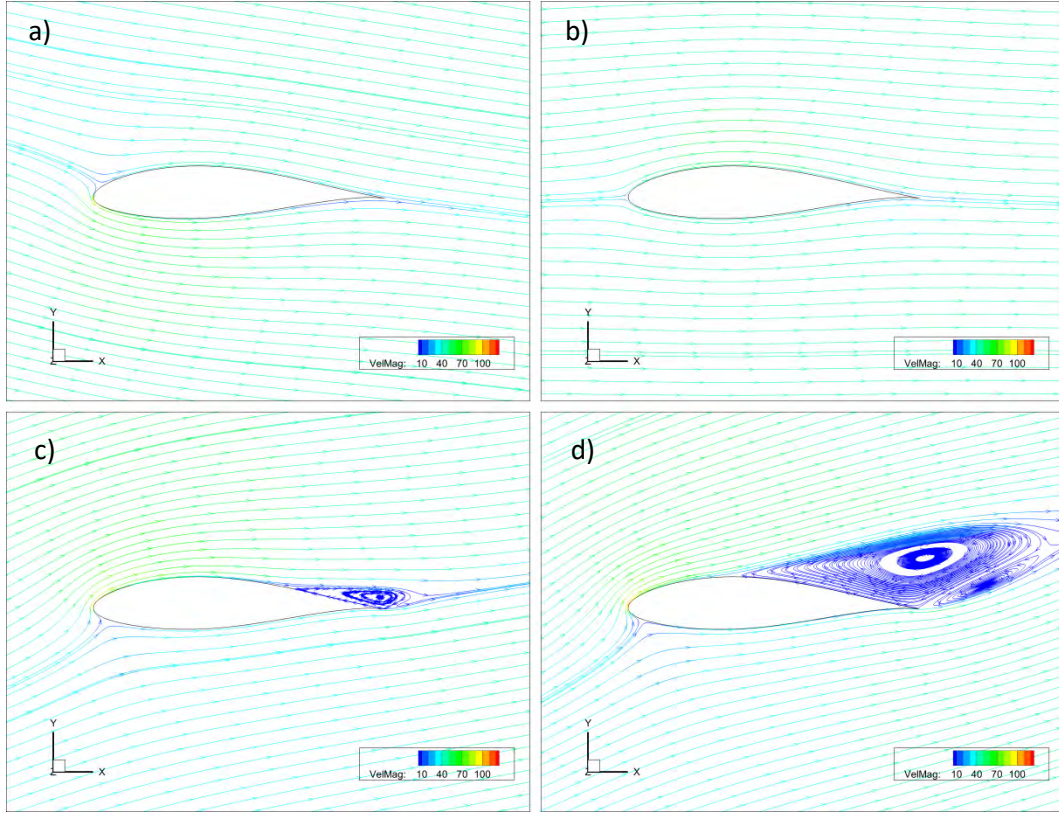
Şekil 7. NACA 63-418 kanat profili üzerinde farklı hücum açılarında oluşan basınç dağılımları

a) $AoA = -10^\circ$, b) $AoA = 0^\circ$, c) $AoA = 14^\circ$, d) $AoA = 20^\circ$

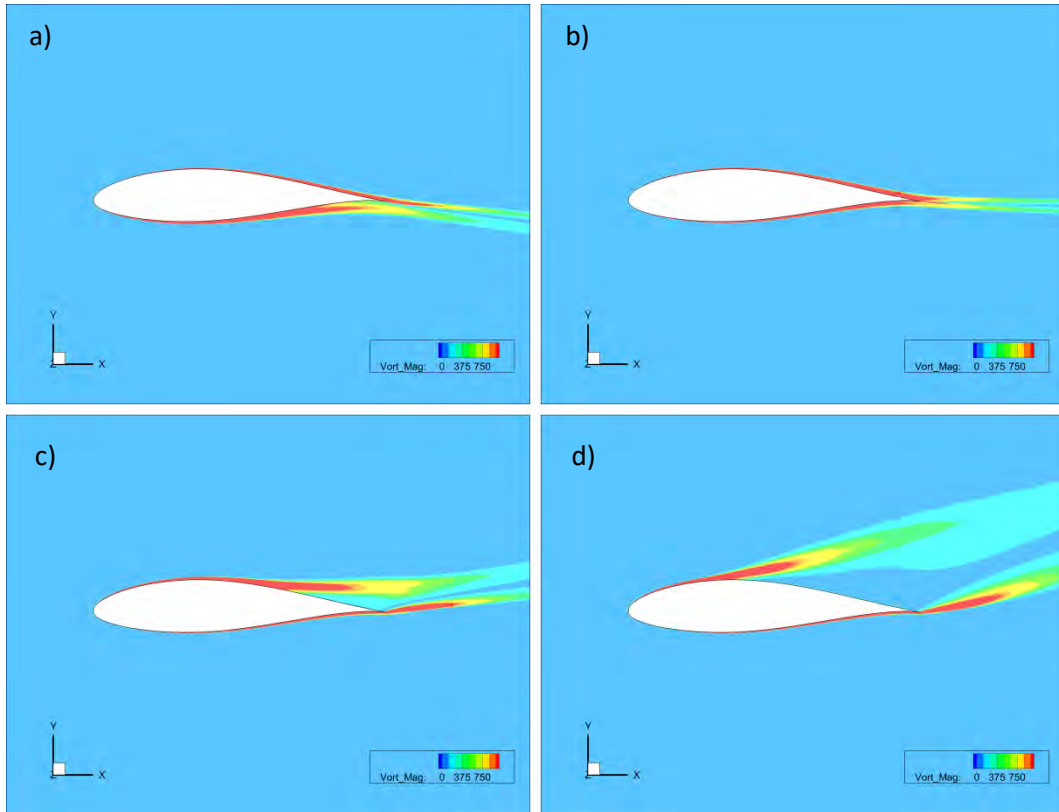


Şekil 8. NACA 63-418 kanat profili üzerinde farklı hücum açılarında oluşan basınç katsayısı dağılımları

a) $AoA = -10^\circ$, b) $AoA = 0^\circ$, c) $AoA = 14^\circ$, d) $AoA = 20^\circ$



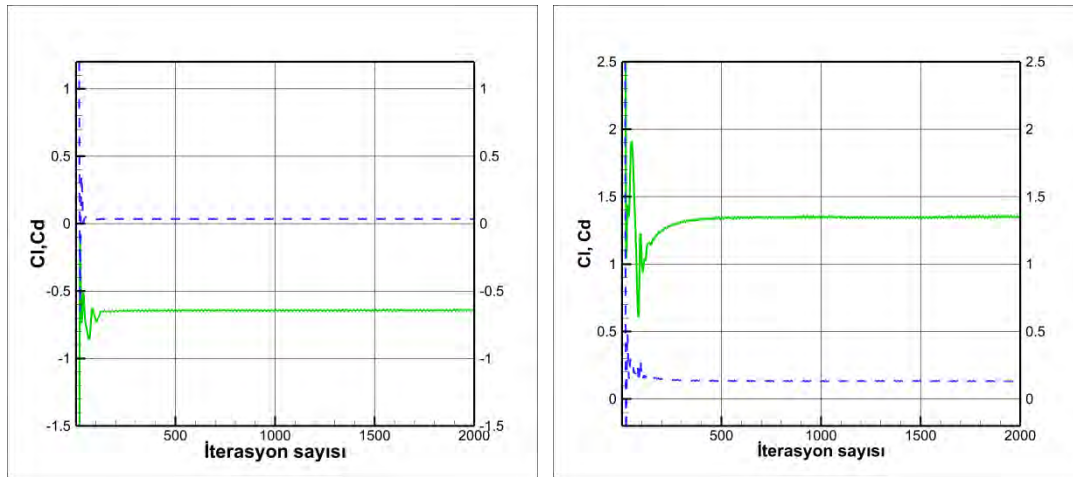
Şekil 9. NACA 63-418 kanat profili üzerinde farklı hücum açılarında oluşan akış çizgileri ve akış hızı büyüklükleri a) AoA= -10°, b) AoA= 0°, c) AoA= 14°, d) AoA= 20°



Şekil 10. NACA 63-418 kanat profili üzerinde farklı hücum açılarında oluşan girdap şiddeti dağılımı a) AoA= -10°, b) AoA= 0°, c) AoA= 14°, d) AoA= 20°

DU91-W2-250 Kanat Profili

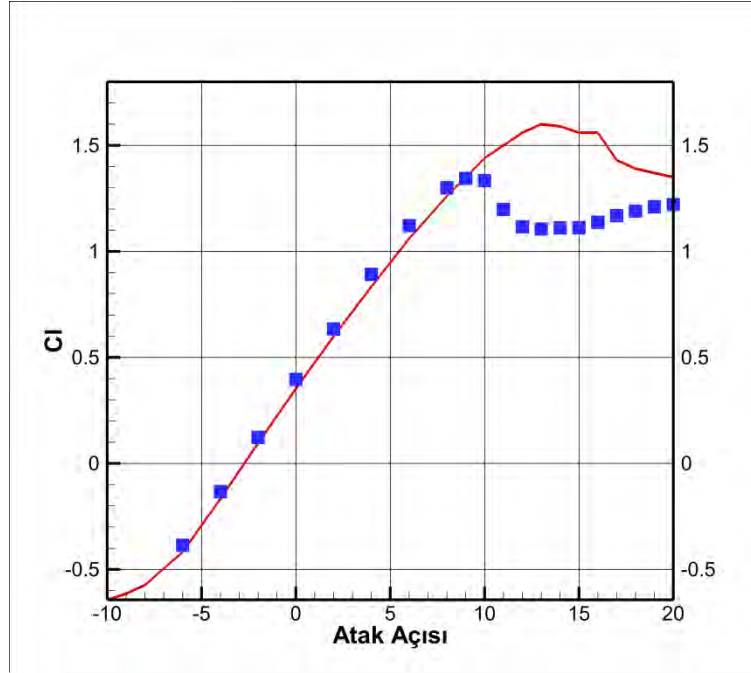
DU91-W2-250 kanat profili için elde edilen yakınsama grafikleri Şekil 11’de verilmektedir. Aynı NACA 63-418 profilinde olduğu gibi, yakınsama hücum açısı arttıkça daha fazla adımdan sonra gerçekleşmektedir. Bu durum, akıştaki ayrılmanın profilin hücum kenarına doğru gelmekte olduğunu göstermektedir. Erken ayrılan akış kanat profili etrafındaki akışı dengesiz yapmaktadır. Bu yüzden, yakınsama elde edildikten sonra dahi kuvvet katsayılarında küçük salınımlar gözlemlenebilir. NACA 63-418 kanat profili ile karşılaştırıldığında, DU91-W2-250 daha kalın bir kanat profilidir.



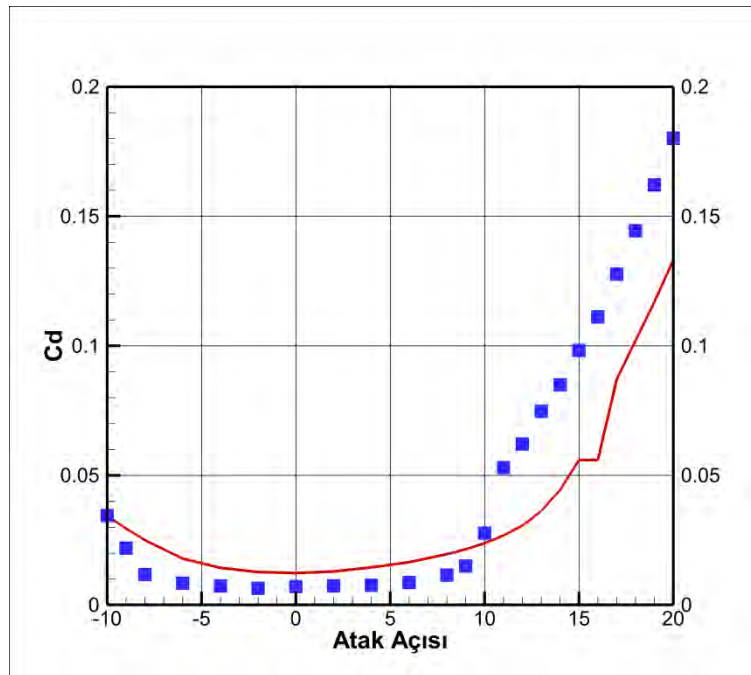
Şekil 11. DU91-W2-250 kanat profilinin -10 (sol) ve 20 (sağ) derecelik hücum açıları için yapılan analizlerin yakınsama grafiği (düz yeşil çizgi taşıma kuvveti katsayısını gösterirken, kesik mavi çizgi sürüklenme kuvveti katsayısını göstermektedir.)

Taşıma kuvveti ve sürüklenme kuvveti katsayılarının hücum açısına göre değişimi Şekil 12 ve 13’de sırasıyla gösterilmektedir. NACA 63-418 profilinin analizlerinde olduğu gibi, deneysel veriler [11] ile karşılaştırıldığında HAD analizlerinde maksimum taşıma kuvveti katsayısı fazla çıkmıştır. Ayrıca, tutunma kaybı açısından da bir erteleme söz konusudur. Deneylere göre tutunma kaybı açısı $9^{\circ} - 10^{\circ}$ arasında çıkmışken, HAD analizlerinde 13° olarak bulunmuştur. Tutunma kaybı yaşandıktan sonra, taşıma kuvveti katsayısında, NACA 63-418 profiline oranla ani bir düşüş yaşanmaktadır. Bu durum sürüklenme kuvveti katsayısındaki hızlı artışı da etkilemektedir. Küçük ve orta değerlerdeki hücum açılarında akış daha düzenli olduğu için taşıma kuvveti katsayısı lineere yakın değişim gösterirken, sürüklenme kuvveti katsayısı hemen hemen sabit kalmaktadır. Fakat daha yüksek hücum açılarında ise akış daha düzensiz olduğu için taşıma kuvveti katsayısındaki artış yavaşlar ve hücum açısı arttıkça azalırken, sürüklenme kuvveti katsayısındaki artışlar ise çok hızlanmaktadır.

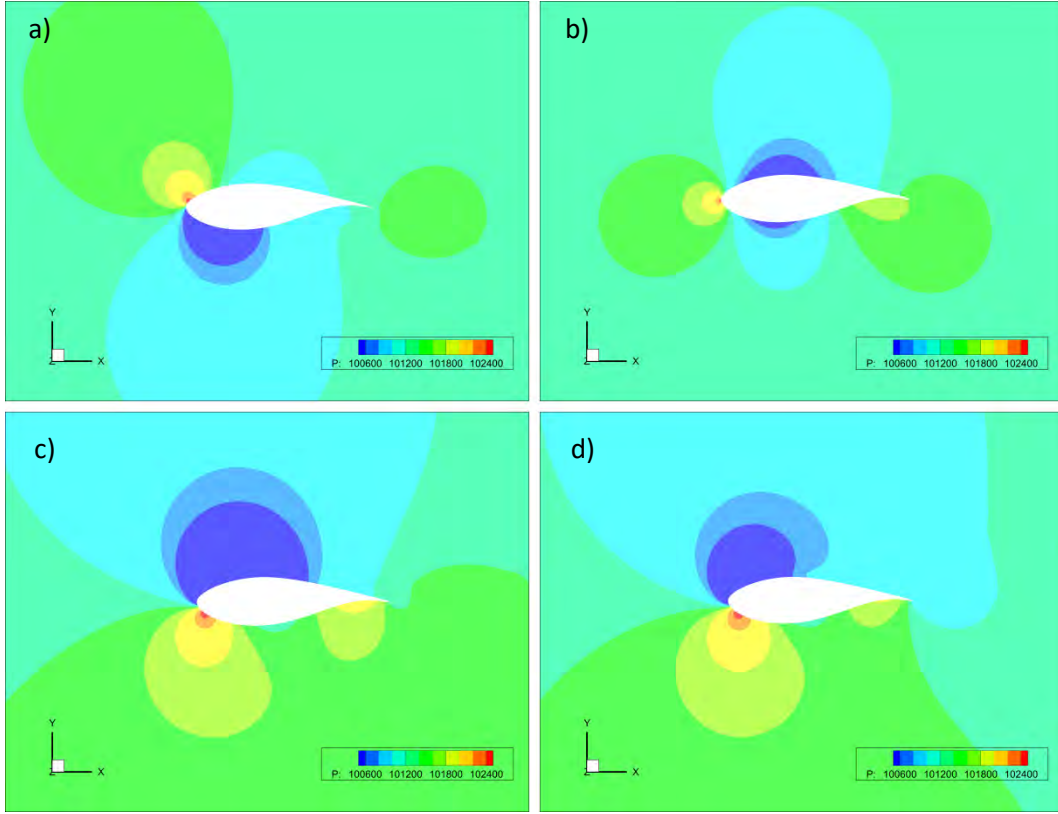
DU91-W2-250 kanat profili etrafında oluşan akış alanı üzerindeki basınç dağılımı, -10° , 0° , 13° (tutunma kaybı açısı) ve 20° ’lerdeki hücum açıları için Şekil 14’de verilmektedir. Şekil 15’de ise DU91-W2-250 kanat profili üzerindeki basınç katsayılarının dağılımı verilmektedir. Akış NACA 63-418’nin etrafında daha yumuşak bir geçiş yaşarken, DU91-W2-250’nin alt yüzeyinde akışın geniş bir döngü bölgesi vardır ve bu girdaplı bölge Şekil 16’da görülebilmektedir. Şekil 17’de akış alanı içerisindeki girdap şiddeti dağılımı ve akış kopmaları gözlemlenmektedir. NACA 63-418 profilinin aksine, -10° ’lik hücum açısında dahi DU91-W2-250 kanat profilinin alt yüzeyinde yüksek değerli girdap bölgesi oluşmaktadır. Bir başka deyişle, DU91-W2-250’nin etrafındaki akış, negatif ve düşük değerlerdeki hücum açıları için daha fazla ayrılmaya elverişlidir.



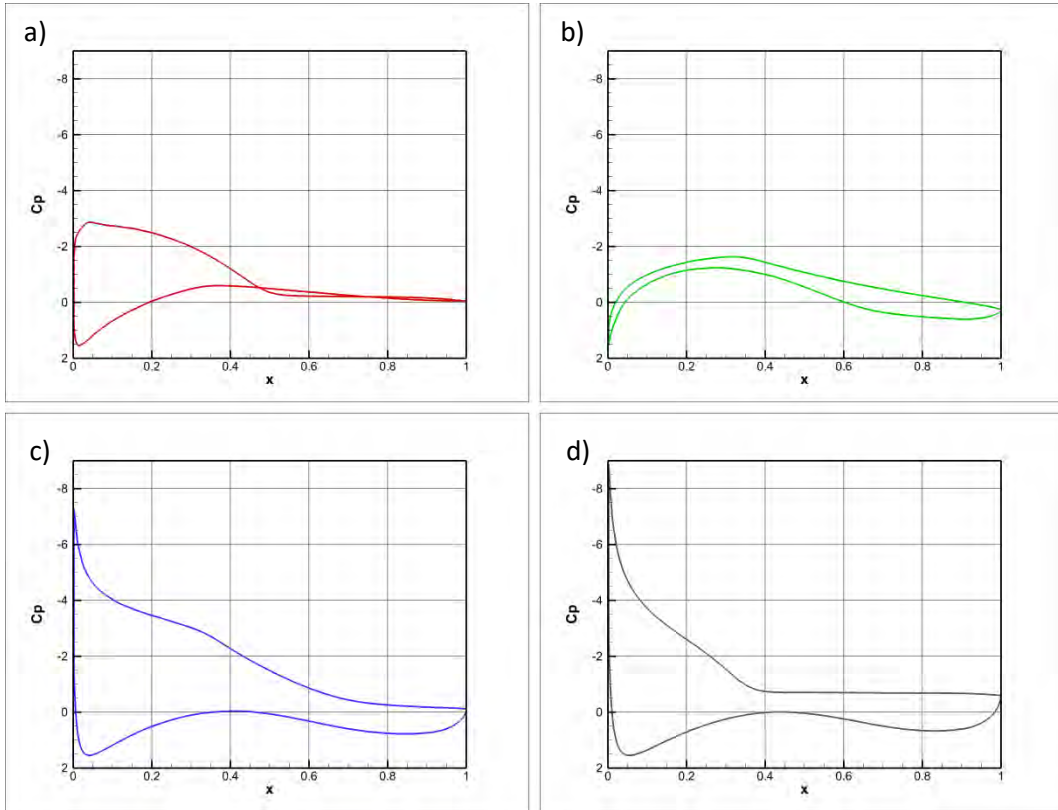
Şekil 12. DU91-W2-250 kanat profili için taşıma kuvveti katsayısının hücum açısına göre değişimi (kare sembol: deneysel veri [11]).



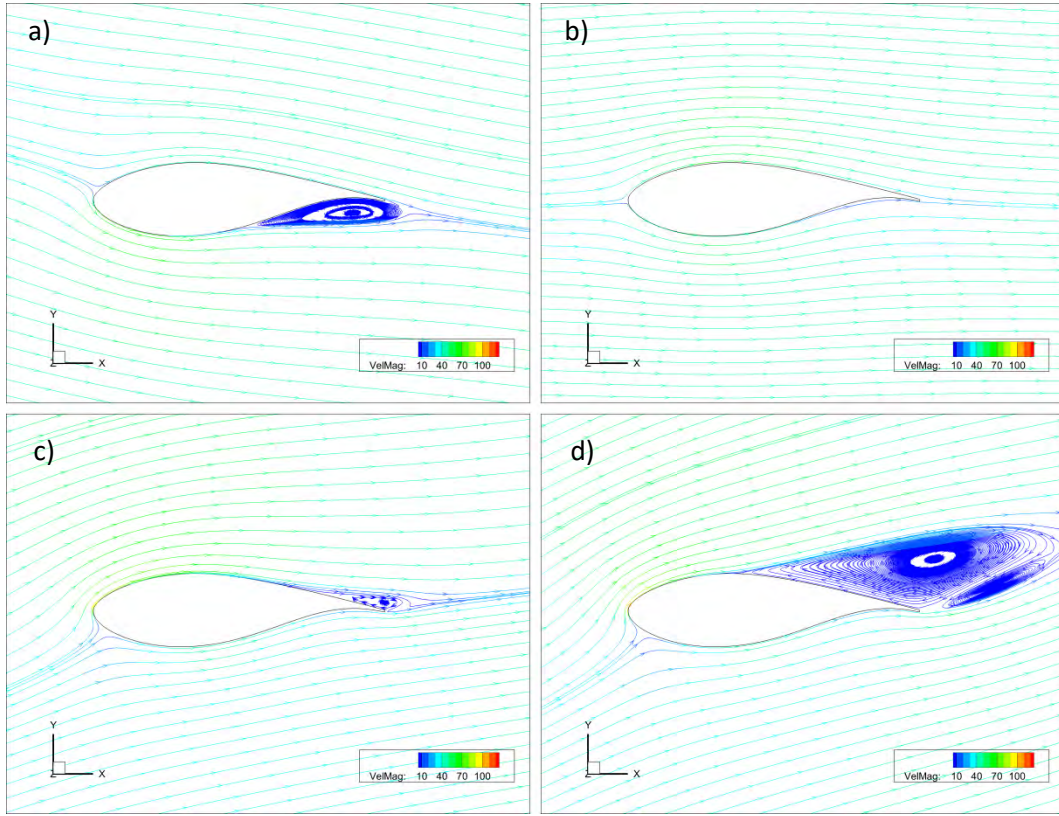
Şekil 13. DU91-W2-250 kanat profili için sürüklenme kuvveti katsayısının hücum açısına göre değişimi (kare sembol: deneysel veri [11]).



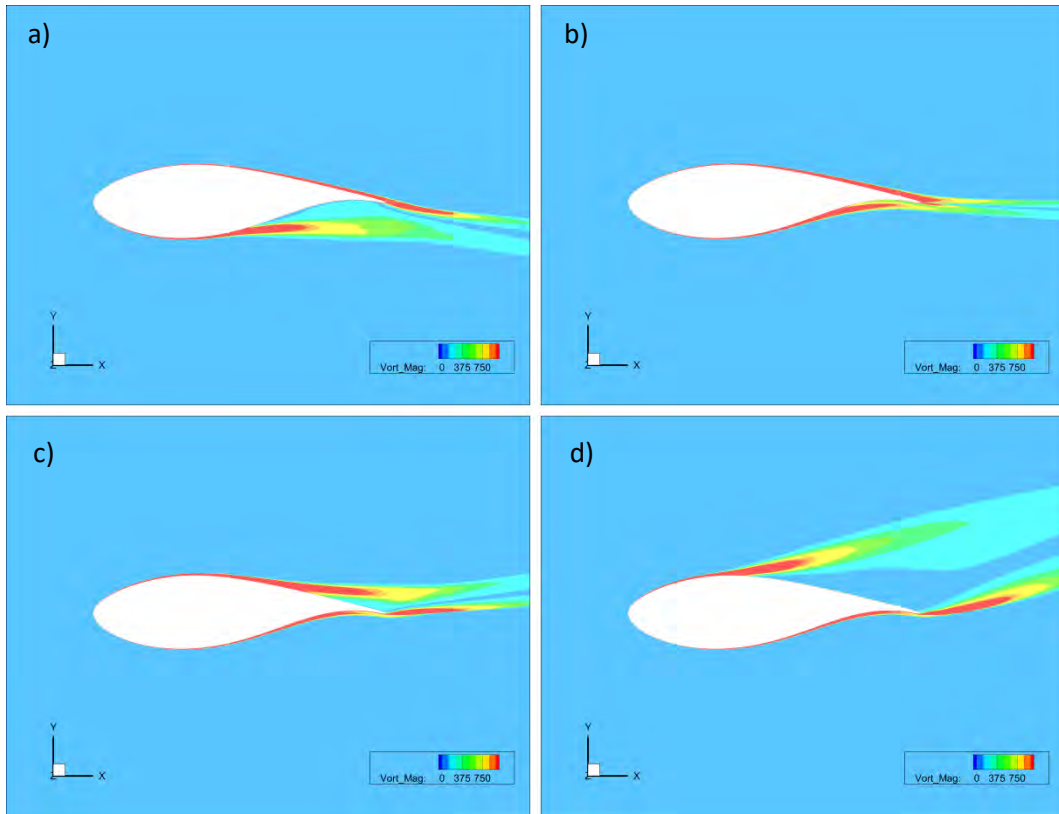
Şekil 14. DU91-W2-250 kanat profili üzerinde farklı hücum açılarında oluşan basınç dağılımları
a) $AoA = -10^\circ$, b) $AoA = 0^\circ$, c) $AoA = 13^\circ$, d) $AoA = 20^\circ$



Şekil 15. DU91-W2-250 kanat profili üzerinde farklı hücum açılarında oluşan basınç katsayısı dağılımları
a) $AoA = -10^\circ$, b) $AoA = 0^\circ$, c) $AoA = 13^\circ$, d) $AoA = 20^\circ$



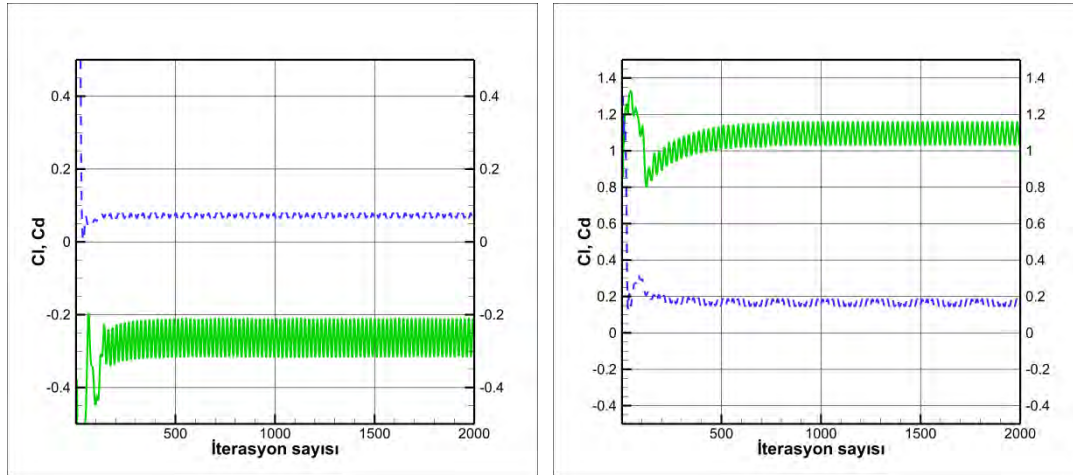
Şekil 16. DU91-W2-250 kanat profili üzerinde farklı hücum açılarında oluşan akış çizgileri ve akış hızı büyüklükleri a) $AoA = -10^\circ$, b) $AoA = 0^\circ$, c) $AoA = 13^\circ$, d) $AoA = 20^\circ$



Şekil 17. DU91-W2-250 kanat profili üzerinde farklı hücum açılarında oluşan girdap şiddeti dağılımı a) $AoA = -10^\circ$, b) $AoA = 0^\circ$, c) $AoA = 13^\circ$, d) $AoA = 20^\circ$

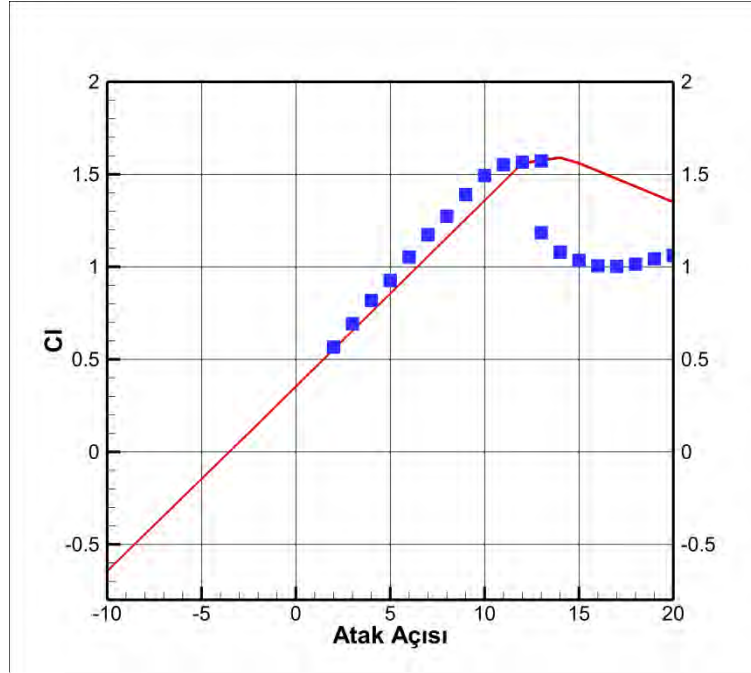
DU97-W-300 Kanat Profili

DU97-W-300 kanat profili etrafındaki akışı incelemek için yapılan daimi durum analizleri sonucunda elde edilen yakınsama grafikleri Şekil 18’de hücum açıları -10° ve 20° için verilmektedir. Şekil 18’de görüldüğü üzere, kuvvet katsayıları etrafındaki salınımlar, -10° ’lık hücum açısında bile görülebilmektedir. Bu durum akışın küt cisimler etrafında zamana bağlı kopmalı olması ile açıklanabilir. Zamanla değişen akış ayrılması diğer kanat profillerinde yüksek hücum açılarında görülürken, DU97-W-300 kanat profilinde küçük hücum açılarında bile zamana göre değişen ayrılmış akış alanları bulunmaktadır. Bu yüzden, bu kanat profilinin etrafındaki akış alanını anlayabilmek için zamana bağlı (daimi olmayan) sıkıştırılabilir akış analizleri yürütülmelidir.

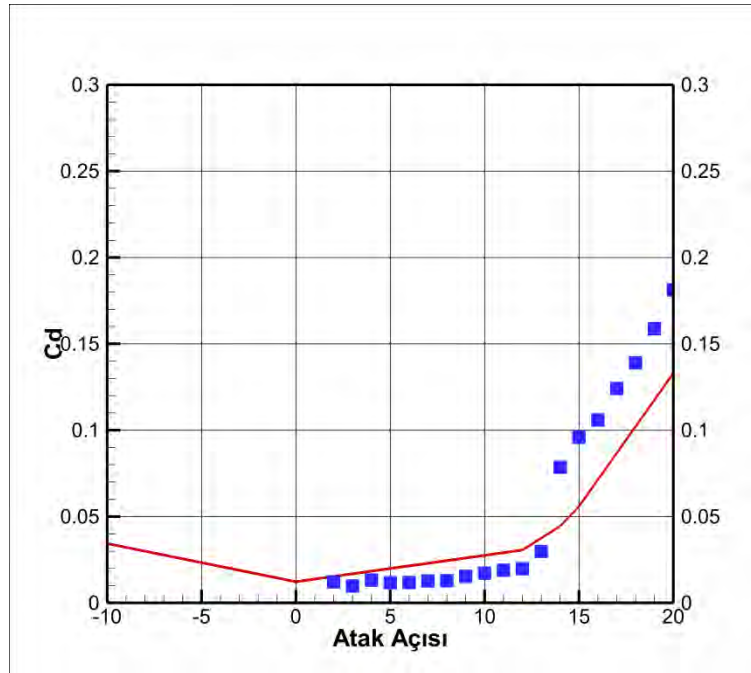


Şekil 18. DU97-W-300 kanat profilinin -10 (sol) ve 20 (sağ) derecelik hücum açıları için yapılan analizlerin yakınsama grafiği (düz yeşil çizgi taşıma kuvveti katsayısını gösterirken, kesik mavi çizgi sürüklenme kuvveti katsayısını göstermektedir.)

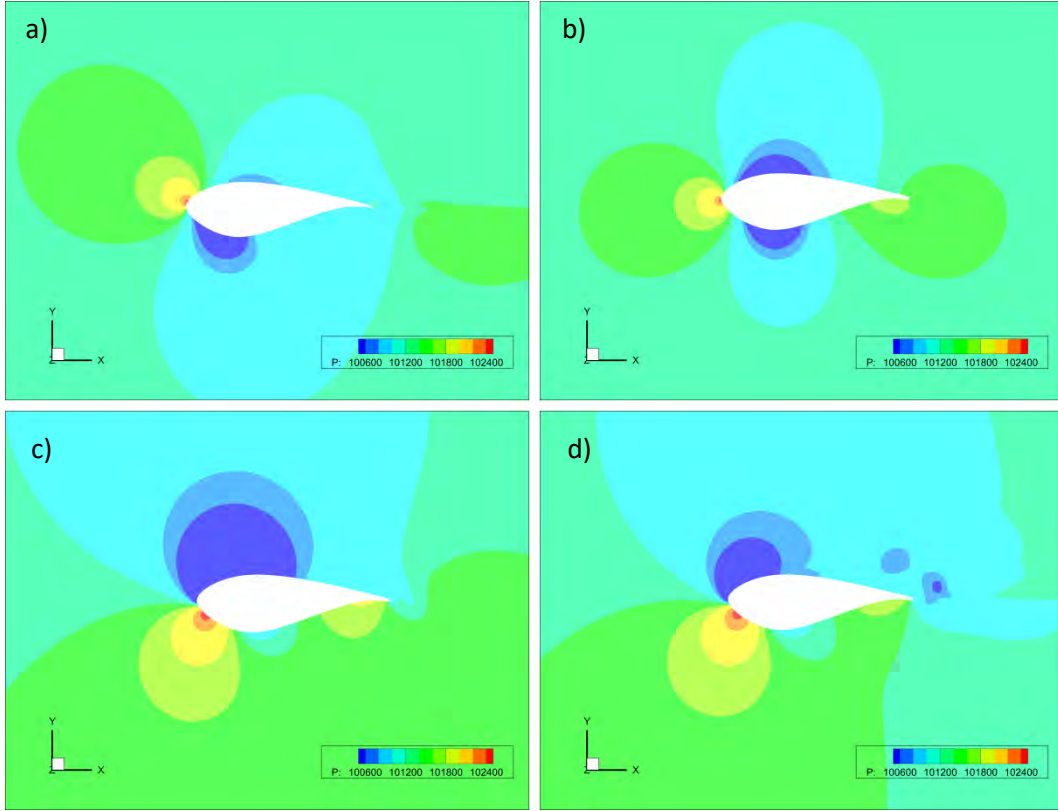
DU97-W-300 kanat profili etrafında oluşan akış alanı üzerindeki basınç dağılımı ve basınç katsayısı dağılımları, -10° , 0° , 14° (tutunma kaybı açısı) ve 20° ’lerdeki hücum açıları için Şekil 21 ve 22’de sırasıyla verilmektedir. Şekil 23’de akış çizgileri gözlemlenmektedir. Oldukça kalın bir kanat profili olan DU 97-W-300’ün alt yüzeyinde negatif hücum açısında geniş bir döngü bölgesi oluşmaktadır. Diğer profillere göre daha küt profile sahip olduğu için, akış ayrılması daha geniş bir alanda görülebilmektedir. Girdap şiddeti dağılımı ayrıca Şekil 24’de verilmiştir. Profilin kalınlığı arttıkça akışın ayrıldığı bölge, hücum kenarına doğru yaklaşmakta ve hücum açısı arttıkça akış kopmakta ve zamanla değişen girdaplı, türbülanslı bir hal almaktadır. Daha önce bahsedildiği üzere, bu tarz akış problemleri daimi olmayan yani zaman bağlı HAD simülasyonları gerektirmektedir.



Şekil 19. DU97-W-300 kanat profili için taşıma kuvveti katsayısının hücum açısına göre değişimi (kare sembol: deneysel veri [13]).

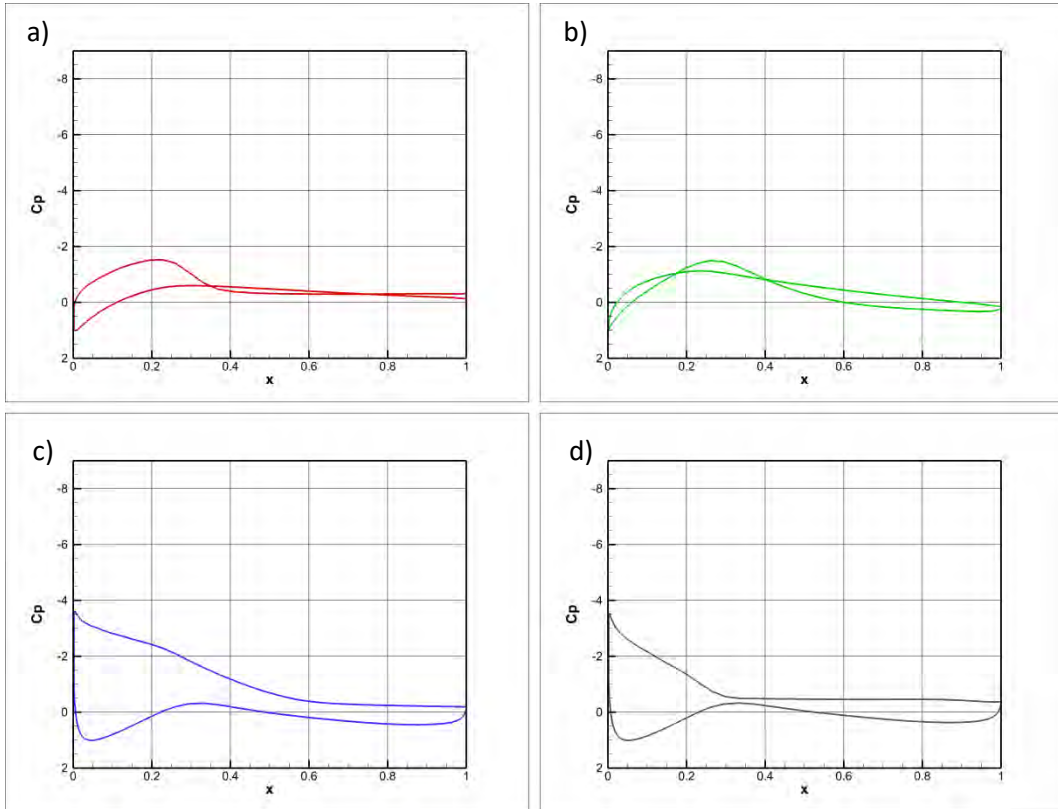


Şekil 20. DU97-W-300 kanat profili için sürüklenme kuvveti katsayısının hücum açısına göre değişimi (kare sembol: deneysel veri [13]).



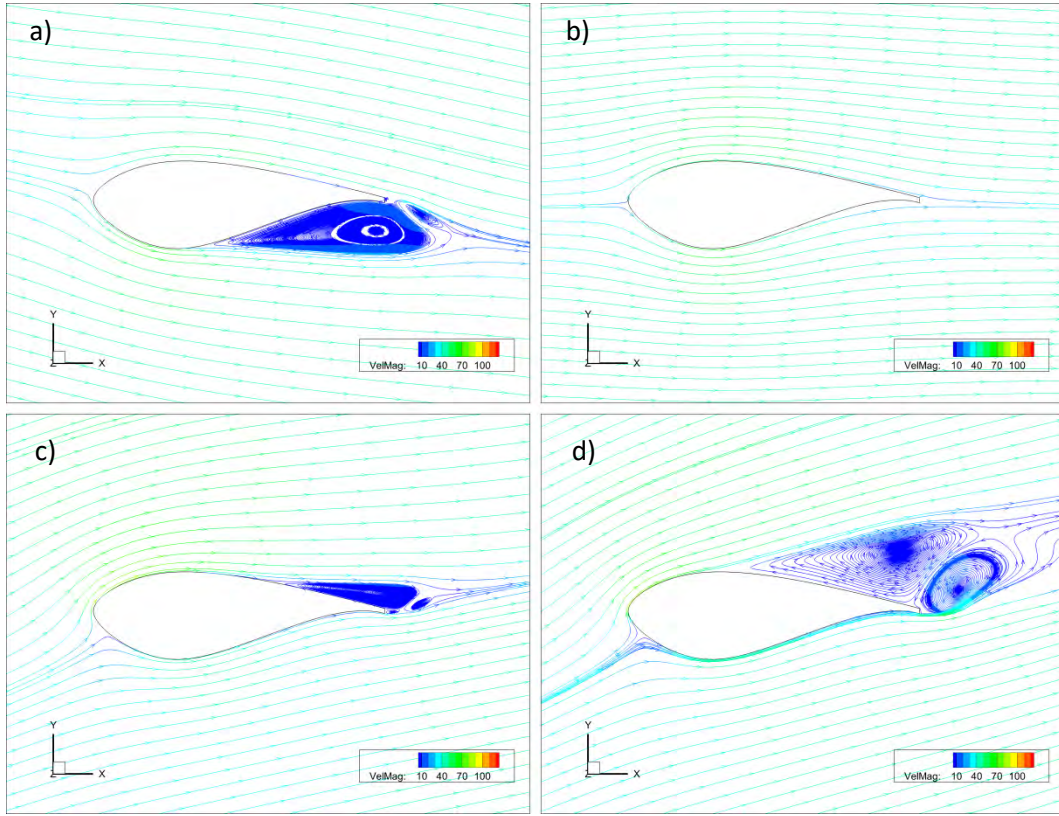
Şekil 21. DU97-W-300 kanat profili üzerinde farklı hücum açılarında oluşan basınç dağılımları

a) $AoA = -10^\circ$, b) $AoA = 0^\circ$, c) $AoA = 14^\circ$, d) $AoA = 20^\circ$

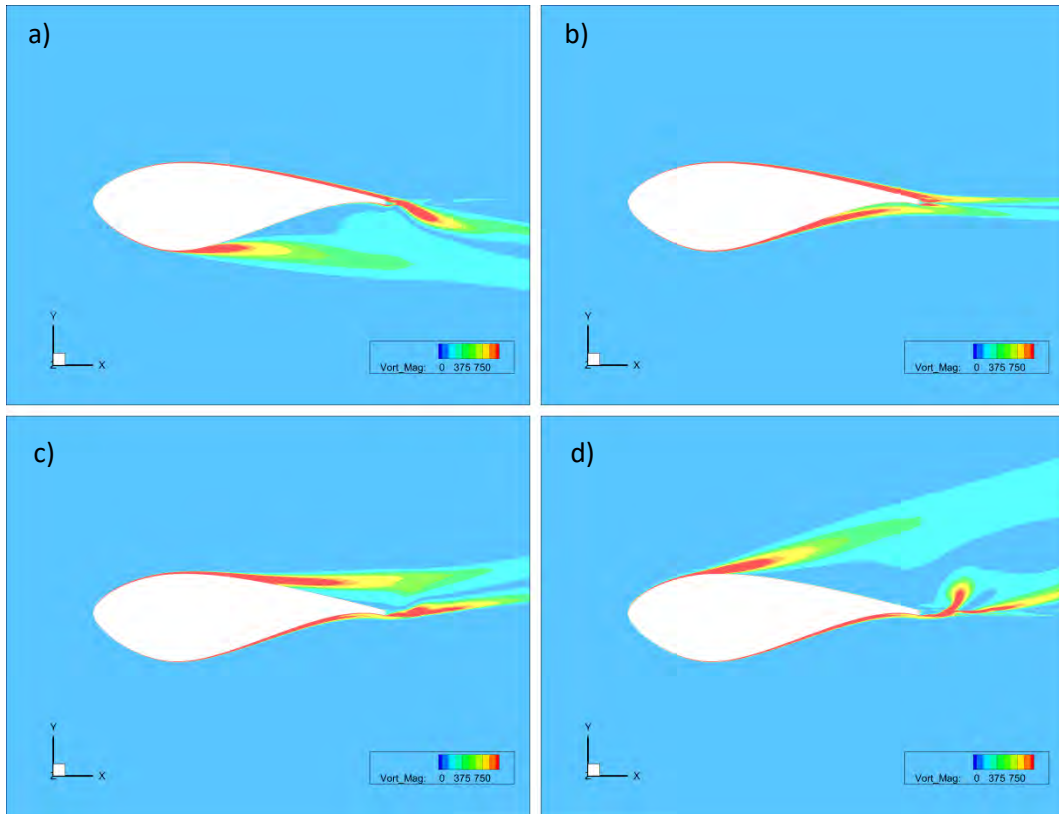


Şekil 22. DU97-W-300 kanat profili üzerinde farklı hücum açılarında oluşan basınç katsayısı dağılımları

a) $AoA = -10^\circ$, b) $AoA = 0^\circ$, c) $AoA = 14^\circ$, d) $AoA = 20^\circ$



Şekil 23. DU97-W-300 kanat profili üzerinde farklı hücum açılarında oluşan akış çizgileri ve akış hızı büyüklükleri a) $AoA = -10^\circ$, b) $AoA = 0^\circ$, c) $AoA = 14^\circ$, d) $AoA = 20^\circ$



Şekil 24. DU97-W-300 kanat profili üzerinde farklı hücum açılarında oluşan girdap şiddeti dağılımı a) $AoA = -10^\circ$, b) $AoA = 0^\circ$, c) $AoA = 14^\circ$, d) $AoA = 20^\circ$

4. SONUÇ

Bu çalışmada, rüzgar türbini rotorlarında tercih edilen kalın kanat profillerinden NACA 63-418, DU91-W2-250 ve DU97-W-300 profilleri etrafındaki akış alanları için farklı hücum açıları için HAD simülasyonları yapılmıştır. Kanat profilleri etrafındaki akış alanları, daimi durum simülasyonları ile incelenmiş olup, analizlerden elde edilmiş veriler literatürde mevcut olan deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, akışın kanat profilleri etrafındaki davranışının, profillerin aerodinamik performansı üzerine olan etkisi de birbirleri ile karşılaştırılmalı olarak tartışılmıştır. NACA 63-418 ve DU 91-W2-250 profilleri daimi durum simülasyonlarında iyi sonuçlar verirken, göreceli olarak daha kalın ve fırar kenarı küt bir kanat profili olan DU 97-W-300 için daimi durum simülasyonlarında istenen daimi sonuçlar elde edilememiştir. Bu profilin etrafındaki akışı inceleyebilmek için zamana bağlı HAD simülasyonlarını yapılması ve anlık ve ortalama değerlerin incelenmesi gerekmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmadaki HAD simülasyonları ODTÜ RÜZGEM Yüksek Başarımlı Hesaplama Laboratuvarı paralel öbek bilgisayarlarında yapılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Bertagnolio, F., Sørensen, N. N., Johansen, J., & Fuglsang, P., 2001. *Wind turbine airfoil catalogue*. Denmark. Forskningscenter Risoe. Risoe-R, No. 1280(EN)
- [2] Timmer, W. A., & Rooij, R. P. J. O. M., 2003. Summary of the Delft University wind turbine dedicated airfoils. In *41st aerospace sciences meeting and exhibit* (s. 352).
- [3] Van Rooij, R. P. J. O. M., & Timmer, W. A., 2003, January. Roughness sensitivity considerations for thick rotor blade airfoils. In *ASME 2003 Wind Energy Symposium*, American Society of Mechanical Engineers. (s. 22-31)
- [4] Velte, C. M., Hansen, M. O. L., Meyer, K. E., & Fuglsang, P., 2008. Evaluation of the Performance of Vortex Generators on the DU 91-W2-250 Profile using Stereoscopic PIV. In *International Symposium on Energy, Informatics and Cybernetics: Focus Symposium in the 12th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (WMSCI 2008)*.
- [5] Barone, M., & Berg, D., 2009. Aerodynamic and aeroacoustic properties of a flatback airfoil: an update. In *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, s. 271.
- [6] Bechmann, A., Sørensen, N. N., & Zahle, F., 2011. CFD simulations of the MEXICO rotor. *Wind Energy*, 14(5), s. 677-689.
- [7] Lago, L. I., Ponta, F. L., & Otero, A. D., 2013. Analysis of alternative adaptive geometrical configurations for the NREL-5 MW wind turbine blade. *Renewable Energy*, 59, s. 13-22.
- [8] Fischer, G. R., Kipouros, T., & Savill, A. M., 2014. Multi-objective optimisation of horizontal axis wind turbine structure and energy production using aerofoil and blade properties as design variables. *Renewable Energy*, 62, s. 506-515.
- [9] Yang, Y., Li, C., Zhang, W., Yang, J., Ye, Z., Miao, W., & Ye, K., 2016. A multi-objective optimization for HAWT blades design by considering structural strength. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30(8), s. 3693-3703.
- [10] Cakmakcioglu, S. C., Sert, I. O., Tugluk, O., & Sezer-Uzol, N., 2014. 2-D and 3-D CFD investigation of NREL S826 airfoil at low Reynolds numbers. In *Journal of Physics: Conference Series*(Vol. 524, No. 1, p. 012028). IOP Publishing.
- [11] Gao, L., Zhang, H., Liu, Y., & Han, S., 2015. Effects of vortex generators on a blunt trailing-edge airfoil for wind turbines. *Renewable Energy*, 76, s. 303-311.

- [12] **Özçakmak, Ö. S., Madsen, H. A., Sørensen, N. N., Sørensen, J. N., Fischer, A., & Bak, C.**, 2018, June. Inflow Turbulence and Leading Edge Roughness Effects on Laminar-Turbulent Transition on NACA 63-418 Airfoil. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1037, No. 2, s. 022005). IOP Publishing.
- [13] **Rogowski, K., Hansen, M. O. L., Hansen, R., Piechna, J., & Lichota, P.**, 2018, June. Detached Eddy Simulation Model for the DU-91-W2-250 Airfoil. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1037, No. 2, s. 022019). IOP Publishing.
- [14] **Li, S., Zhang, L., Yang, K., Xu, J., & Li, X.**, 2018. Aerodynamic Performance of Wind Turbine Airfoil DU 91-W2-250 under Dynamic Stall. *Applied Sciences*, 8(7), s. 1111.
- [15] CFD++ Software, <http://www.metacomptech.com/index.php/features/icfd>
- [16] Pointwise Software, <https://www.pointwise.com/>
- [17] Airfoil Tools, <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca633418-il>

RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE ATMOSFERİK BUZLANMA VE GÜÇ EĞRİSİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Erdem Demir, Ferhat Bingöl

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü¹

erdemdemir@iyte.edu.tr, ferhatbingol@iyte.edu.tr

ÖZET

Rüzgar enerjisinin yaygınlaşması ile rüzgar türbinleri günümüzde çok farklı iklim koşullarında konumlandırılmakta ve bu iklim koşullarında üretim yapılmaktadır. Rüzgar potansiyelinin yüksek olduğu kuzey ülkeleri ve yüksek rakımlı sahalarda konumlandırılan türbinlerde kış mevsimlerinde gözlemlenen buzlanma, enerji üretiminin düşmesine ve ya tamamen durdurulmasına, türbinlerin mekanik olarak daha çabuk yorulmasına ve buz fırlatarak çevresindeki yapılar ve canlılar için tehlike oluşturmaktadır. Buzlanmayı önlemek için çeşitli çalışmalar sürdürülse de belirlenen standart bir yöntem henüz bulunmuş değildir. Aynı zamanda buzlanma mekanizması da henüz tam anlamı ile modellenememiş değildir. Buzlanmanın kanat yapısını değiştirerek aerodinamik özelliklerini değiştirdiği, bu nedenle olması gerekenden farklı üretim yapması türbinin güç eğrisinin değişmesine sebebiyet vermektedir. Bu çalışmada atmosferik buzlanma ve bunun türbin kanatları üzerindeki yapısı ve güç eğrisine olan etkisi 5MW NREL türbin modeli ile BEM simülasyonu kullanılarak çalışılmış ve güç eğrisinde buzlanmanın yarattığı etki incelenip, buzlanma olması muhtemel sahalarda uygulanarak daha düşük belirsizliğe sahip enerji analizleri yapılarak, daha verimli yatırımlar yapılması amaçlanmıştır.

1. GİRİŞ

Rüzgar türbinlerinin kapasite faktörleri buzlanma tarafından birkaç farklı şekilde etkilenir. Yoğun buzlanmanın olduğu yerlerde, türbinlerin yapısal bütünlüğünü korumak için tamamen kapatılması seçeneklerden biri olmaktadır. Türbinlerin tamamen kapatılması aynı zamanda üretimde tamamen durma anlamına gelmektedir. Buzlanma aynı zamanda türbin kanatlarının aerodinamik özelliklerini bozarak, geciken durma ile aşırı yüklenerek ve buz birikmesi nedeniyle kanatlarda oluşan dengesizlik ve buna bağlı olarak erken gelişen yapısal yaşlanma olarak kendini gösterir [1]. Aerodinamik özelliklerin buzlanma sebebi ile değişmesine bağlı olarak ve türbin üzerindeki kontrol elemanlarının donmasına bağlı olarak rüzgar türbinindeki güç kayıpları yıllık üretim bazında %17 lere kadar çıkabilirken bu yüzde güç katsayısında %20 ila %50 gibi değerlere ulaşabilmektedir [2]. Bu güç kayıpları buzlanma miktarına ve cinsine göre değişiklik göstermektedir.

Buzlanma soğuk iklime sahip olan bölgelerde gözlenmektedir. Soğuk iklim ise sıcaklığın uzun süre rüzgar türbinin çalışma sıcaklığının altında kaldığı bölgeler olarak adlandırılabilir. Ancak soğuk iklimlerde uzun süre sıcaklık düşük seviyelerde seyretmesine rağmen buzlanmanın gözlenmediği bölgeler olmasına rağmen daha ılıman iklimlerde yoğun buzlanmanın görülmesi sebebi ile soğuk iklim için tam bir tanım bulunmamaktadır. Bu nedenle IEA Wind Task 19 [3] tarafından tanımlanan düşük sıcaklık iklimi ve buzlanma iklimi kullanılmaktadır. Düşük sıcaklık iklimi , sıcaklığın belirli bir dönem içerisinde türbinin çalışma aralığının altında olduğu, buzlanma iklimi ise buzlanmanın gözlemlendiği iklimler için kullanılmaktadır [4].

2. Buzlanma Çeşitleri ve Nedenleri

Rüzgar türbinlerinde buzlanma iki tip sınıfta incelenebilir, bulut içi buzlanma ve yağışa bağlı buzlanma. Bulut içi buzlanma, kar tipi buzlanma¹, şeffaf buzlanma² ve ikisinin birlikte gözlemlendiği karışık buzlanma ile tanımlanırken yağışa bağlı buzlanma ise sulu kar ve yağmurun donması ile tanımlanır.

Hava sıcaklığı sıfırın altında ve saha bulut tabanının üstünde ise bulut tipi buzlanma görülür. Bulut tipi buzlanma buzlanmanın birikimi ile oluşur ve hava sıcaklığı, bağıl nem, rüzgar hızı, hava basıncı, hava yoğunluğu, sıvı su içeriği ve ortalama hacim çapı gibi atmosferik parametrelere göre değişiklik gösterir. Buzlanma üç aşamada gerçekleşir; çarpışma, toplanma ve birikme. Su damlacıkları çarpışma anında donabilir, buharlaşabilir, yavaş ya da hızlıca kanat üzerinden akabilir. Bu durumların hepsi yerel termal özelliklere ve akış dinamiklerinin durumuna göre değişiklik gösterir. Buzlanma zamana göre değişken bir olaydır.

a. Kar Tipi Buzlanma

Kar tipi buzlanma 0°C ve -40°C arasında gözlenmektedir. Buzlanma mekanizması kısaca aşırı soğumuş su damlacıklarının çarpışma anında yüzey üzerinde donarak birikimi sonucu olmaktadır. Görünüş olarak pürüzlü, opak, beyaz ve rüzgar akış yönünde büyüme eğilimi gösterirler. Genellikle düşük rüzgar hızı, düşük sıcaklık, ve düşük sıvı su içeriği olan tabaka bulutlarının olduğu durumlarda gözlenir. [5]. Kar tipi buzlanma, buz çözme metotları ile kolayca ortadan kaldırılabilir [2].

b. Şeffaf Buzlanma

Şeffaf buzlanma yüksek rüzgar hızı ve görece yüksek sıcaklık ve yüksek sıvı su içeriğinin bulunduğu durumlarda küme tipi bulutların olduğu durumlarda gözlenir. Kar tipi buzlanmada olduğunun aksine su parçacıkları çarpma anında donmayıp kanat boyunca, firar kenarı boyunca donar. Şeffaf buzlanma buz çözme metotları ile zor ortadan kalkar çünkü kar tipi buzlanmaya göre daha çok yapışma basıncı ve fiziksel özellikleri vardı.

c. Karışık Buzlanma

Karışık buzlanma basitçe her iki buzlanma tipinin de görüldüğü durumlardır. Karışık buzlanmanın görülme sebebi hızın ve hücum açısının bölgesel olarak değişik göstermesidir. Soğuk iklime sahip bölgelerde rüzgar türbinlerinin kurulumu ve kullanımı hem türbin kanatları, hem de türbin üzerinde bulunan cihazların donması sebebiyle oldukça kısıtlanmaktadır. Buzlanma sonucu teorik olarak elde edilen güç eğrisi önemli ölçüde değişmekte ve teorik güç azalmaktadır.

3. Buzlanmanın Kanat ve Türbin Üzerindeki Etkisi

Buzlanma havacılık endüstrisinde hem deneysel olarak hem nümerik olarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bunun sonucunda kanat üzerinde oluşan buzlanma kaldırma katsayısında %30 luk bir azalamaya sebep olurken sürtünme katsayısında ise %50 artışa sebep olmaktadır. Bu

¹ Rime icing (ing.)

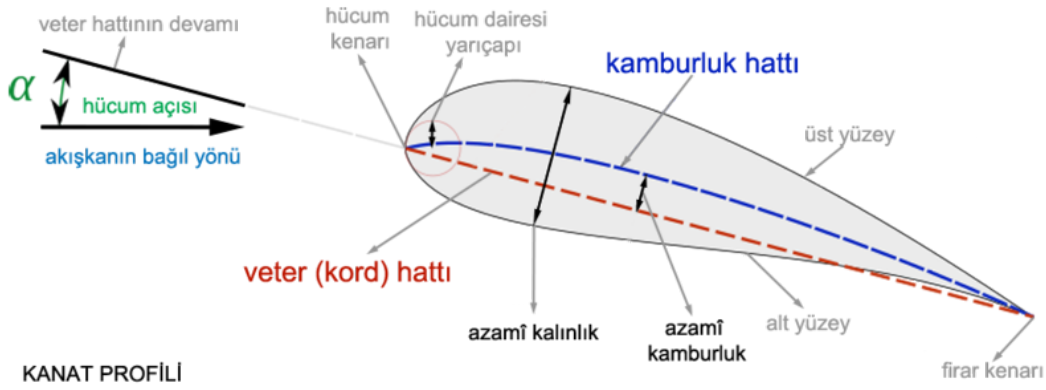
² Glaze icing(ing.)

çalışmalara göre şekillerine göre buzlanma dört gruba ayrılmıştır. Bunlar; boynuz tipi, akış boyu, pürüzlülük ve genişlik yönünde büyüyen buzlanma olarak gösterilmiştir [6]. Buzlanma tipi ve şiddeti atmosferik bir parametre olan sıvı su içeriğine bağlı olarak değişmektedir. Buzlanma hem kanat üzerinde aerodinamik özellikleri değiştirerek güç eğrisinde düşüşe yol açar hem de türbin üzerinde ki aygıtları ve kontrol mekanizmalarının hatalı çalışmasına sebebiyet vererek türbinlerin güç eğrilerinde düşüşe sebep olur. Bu etkiler bir araya getirildiği zaman yıllık üretimde %17 gibi bir düşüş gözlenebilmektedir [2]. Güç eğrisinde ki kayıp buzlanma şiddetine göre değişmektedir.

Buzlanma şekilleri deneysel olarak buzlanma fotoğrafları yardımı ile ve birikim kodu ile nümerik olarak tanımlanabilmektedir. Nümerik olarak kullanılan kodlar daha sonra gerçek buzlanmaların olduğu fotoğrafların analizi ile doğrulanmakta olup iki boyutla buzlanmanın modellenmesi için kullanılmaktadır. Daha sonra nümerik model ve fotoğrafların kombinasyonu ile üç boyutlu buzlanma profilleri elde edilmektedir. Üç boyutlu model elde edildikten sonra CFD³ hesaplamaları ile kanadın aerodinamik özellikleri elde edilir [6]. Yapılan bu çalışmaların sonucunda, buzlanma düşen hücum açısı(α) ile ve artan kanat uzunluğuna bağlı olarak artan açısal hızın artması ile artmaktadır. Ancak meteorolojik değerlerin sahip olduğu belirsizlik nedeni ile rüzgar santralleri için buzlanma tahmini ve simülasyonları oldukça zordur. Bu simülasyonlar buzlanma tahmini sonrası türbin rotorunun aerodinamik davranışlarını tespit etmek için kullanılmaktadır. Farklı kontrol mekanizmasına sahip türbinlerde buzlanmanın etkisi ve buna bağlı olarak güç üretimindeki düşüşte farklı olmaktadır. Örnek olarak hız kesme kontrollü türbinlerde buzlanma, temiz kanattan daha erken hız keseceği için türbinin üretim performansını da düşürür. Benzer şekilde değişken açılı türbinlerde de kontrol üniteleri kanat ve rotor üzerindeki yükü azaltmak için kanat açılarını değiştirir. Kanat üzerindeki buzlanma kanadın aerodinamik özelliklerini değiştirdiği için kanat açısı düzgün kontrol edilemez ve buna bağlı olarak optimum üretim değerleri yakalanamaz ve türbinin üretimi düşer ve kanat üzerindeki bu fazladan yük kanat bileşenlerinin erken yaşlanmasına da sebebiyet verir[7].

Buzlanma üzerinde yapılan çalışmalar buzlanmanın kanat üzerindeki hız ve basınç dağılımında ciddi değişimlere sebep olduğu gözlenmiştir. Hücum kenarının üst yüzeyinde pozitif hücum açısında yüksek hız bölgelerinin oluştuğu gözlenmiştir. Aynı şekilde fırrar kenarı yakınlarında üst yüzeyde re sirkülasyon bölgelerinin olduğu görülmüş ancak negatif hücum açıları için bu re sirkülasyon bölgelerinin alt yüzeye kaydığı gözlenmiştir. Aynı şekilde türbülans yoğunluğu da buz birikiminin hücum kenarının şeklinde değişime neden olup düzensiz bir şekil yarattığı için artmaktadır [1]. Kanat üzerinde buz birikiminin neden olduğu biçimsizleşmenin nümerik hesaplara göre kaldırma katsayısını pozitif hücum açıları için arttırdığı gözlenmiştir. Bu etkinin sebebi artan kanat kamburluğu ve etkin kanat veteri hattının uzamasıdır. Bu etki aynı zamanda kanadın durma hızı aralığını da artırır ancak negatif hücum açıları için ise üst yüzeyde erken akış ayrılmasına da neden olur [1]. Kanat geometrisi ve bahsi geçen terimler, Şekil 1’de örnek bir kanat üzerinde gösterilmiştir.

³ Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği (Computational Fluid Dynamics CFD)(ing.)



Şekil 1 Kanat Geometrisi [8]

4. Buzlanma ve Atmosferik Parametrelerin Etkisi

Buzlanmanın oluşması ve buzlanma şekli için farklı atmosferik parametrelerin farklı etkileri olmaktadır. Bu etkiler; hücum açısı rüzgar hızı, kanat veteri uzunluğu, kanat profil geometrisi ve kalınlığı, sıcaklık, sıvı su içeriği, ortalama hacim çapı ve bağıl nemdir.

a. Hücum Açısı

Hücum açısı buzlanmanın pozisyonunu değiştirir ve eğer sıfırdan farklıysa buzlanmanın kalınlığını azaltır. Buzlanmanın tepesi her zaman kanadın verilen hücum açısı için akış ayrılma noktasında meydana gelir.

b. Rüzgar Hızı

Rüzgar hızı da buzlanmanın geometrik profili üzerinde etkili olan bir diğer parametredir. Düşük rüzgar hızlarında buz profili parabolik ve tek tepe noktalı olurken daha yüksek rüzgar hızlarında ise profil iki tepe noktalı hale gelir. Rüzgar hızı arttıkça aynı zamanda buz kalınlığı da artar.

c. Kanat veteri Uzunluğu

Buzlanmayı etkileyen bir diğer faktör de kanat veteri hattının uzunluğudur. Kanat veteri hattı uzunluğu azaldığı zaman buzun kalınlığı da buna bağlı olarak artar. Buna ek olarak kanat veteri hattı uzunluğu ile kanat kalınlığının oranı da etkilidir, oran arttıkça buzlanmanın kalınlığı da azalmaktadır. Büyük kanat veterine sahip kanatlar, küçük olanlara göre daha az damlacık toplar. Kalın profillerin daha az damlacık toplamasının nedeni, kalın profile sahip kanat profilli yapıların daha kalın hücum kenarının olması ve daha fazla damlacığın kanadın akış hattını izlemesine neden olmaktadır. Bu etkiden dolayı da kalın profile sahip kanatlarda ince profillere göre daha az buzlanma gözlenir çünkü parçacıkların etkin çarpışma oranı düştüğü için buz birikimi de düşer. Yer çekimi ve yüzerlik etkisi göz ardı edilirse damlacıklara atalet ve sürtünme etki eder [9]. Eğer damlacık üzerinde sürtünme etkisi fazla ise, damlacık kanadın üzerinde akış hattı boyunca hareket eder. Bunun tam tersi eğer atalet etkisi yüksek ise kanadın hücum kenarına çarpar. Sürtünme ve atalet oranı ise kanat boyutuna, hava ve parçacık hızına bağlıdır [1]. Bu sonuçlar göz önüne alındığında kar tipi buzlanmanın büyük boyutlu türbinlerde küçük boyutlu türbinlere oranla, buz birikimi ve kalınlık olarak büyük kanatlarda buz birikiminin daha düşük etkinliği olduğundan dolayı daha az olduğu söylenebilir. Ayrıca küçük türbinlerde tork

büyük türbinlere oranla küçük türbinlerde daha fazla olacağı için kar tipi buzlanma büyük türbinleri daha az etkilemektedir.

d. Sıcaklık

Sıcaklık buzlanmada en önemli parametrelerden biridir. Sıcaklığın ısıl dengeye ulaştığı hızda etkin olduğu için direk olarak buzlanmanın geometrisinde etkili olmaktadır. Hava sıcaklığının 0°C ile -2°C arasında olduğu durumlarda oluşan buzlanmada iki tane tepe noktasının olduğu, ancak sıcaklığın -2°C altına düştüğü durumlarda ise buzlanmanın parabolik bir şekil aldığı gözlenmiştir [7]. Ancak farklı bir çalışma ise [10] -6°C ile -14°C arasında boynuz tipi buzlanmanın görüldüğü -20°C de ise akış hattı boyu buzlanmanın görüldüğünü belirtmiştir. -6°C ile -14°C arasında da çift tepe geometrisine sahip buzlanma gözlenmiştir. Çift tepe geometrilili buzlanmanın sebebi, -20°C de su damlacıkları çarpışma anında kanat üzerinde donarken daha yüksek sıcaklıklarda damlacıklar su filmi şeklinde hücum kenarında, çarpışma noktasında ayrılır ve konkav bir şekil oluşturarak iki tepeli geometriyi meydana getirir. Her iki durumda da biriken buz kalınlığı zamana bağlı olarak artar.

e. Ortalama Hacim Çapı ve Sıvı Su İçeriği

Buz profili herhangi bir sıvı su içeriği değeri için paraboliktir. Sıvı su içeriği arttıkça buzlanmanın kalınlığı artar ve sadece bu noktada etkisi vardır Aynı durum Ortalama hacim çapı için de geçerlidir.

f. Bağlı Nem

Bağlı nemin buzlanma profili üzerinde herhangi bir etkisi yoktur [7].

Buz yükü, ortalama hacim çapı, sıvı su içeriği ve bağlı rüzgar hızı arttıkça artar, kanat profili kalınlığı arttıkça azalır. Buz yükü için geri kalan diğer parametrelerden neredeyse bağımsız diyebiliriz.

5. Buzlanmanın Güç Eğrisi Üzerindeki Etkisi

Buzlanmanın güç eğrisi üzerindeki etkiyi gözlemlemek için NREL 5MW lık türbinin güç eğrisi Türbin BEM⁴ Simülasyonu ile çalışıldı. BEM simülasyonu, Pala Elementi Teorisi⁵ ve Momentum Teorisinin birleşimi ile oluşturulmuş bir teoridir. Bu teori sayesinde pervanede oluşan endüvi hızların hesaplanmasında kolaylıklar elde edilmiştir.

Bu çalışmada atmosferik etki olarak sadece sıcaklık göz önünde bulundurulmuştur. Normal çalışma şartlarında ve -20°C de oluşan akış hattı boyunca buzlanma geometrisi [10] kullanılmıştır. Tablo 1 de NREL 5MW için hem normal hem de buzlanmanın olduğu modellemenin özellikleri verilmiştir. Bu tabloda, NREL 5MW türbin kanadını oluşturan profillerin hangi yarıçap aralığında kullanıldığı buzlanma ve buzlanmanın olmadığı durumlar için gösterilmiştir. Türbin kanadını oluşturan profiller ise **Şekil 1, Şekil 2, Şekil 3, Şekil 4, Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7**'de gösterilmiştir.

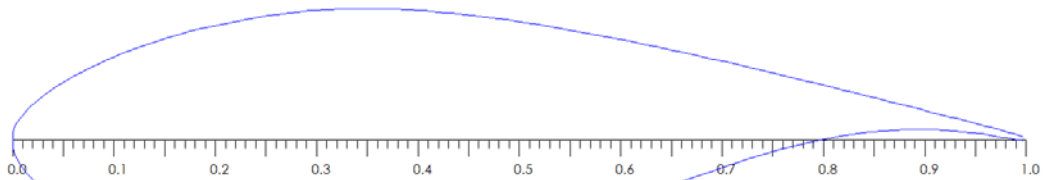
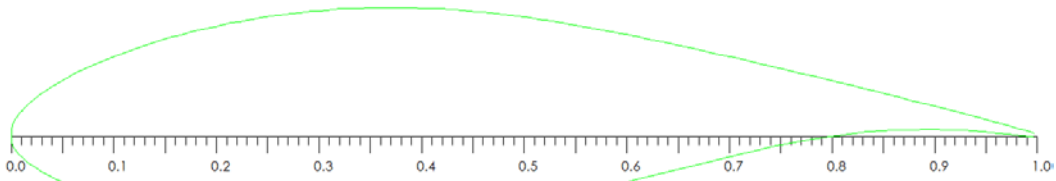
⁴ Blade Element Momentum

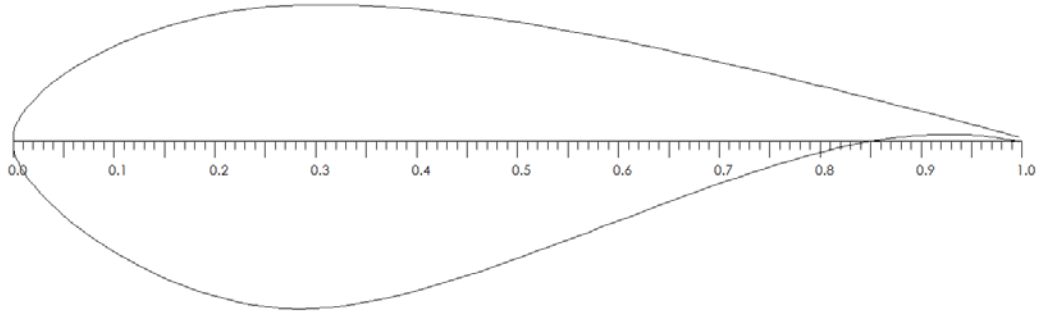
⁵ Blade Element Theory

Tablo 1. NREL 5MW Türbin Kanatları

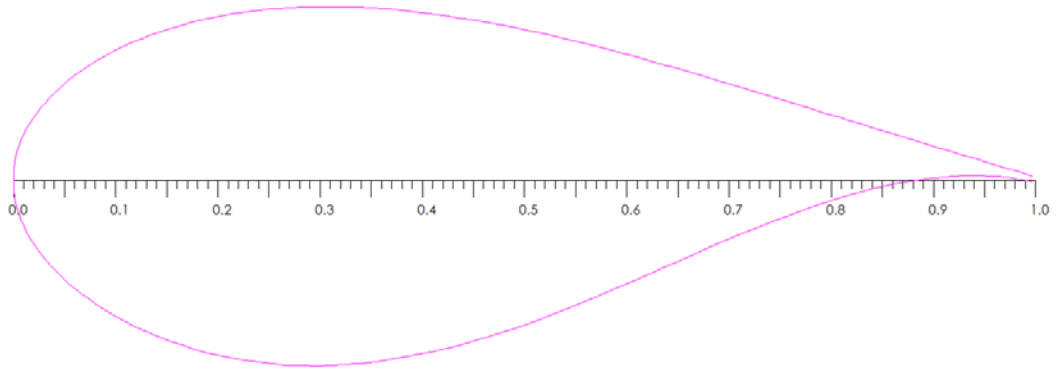
Yarıçap Pozisyonu[m]	Kanat Profil Tipi	
	Normal Şartlar	Buzlanma Durumu
0	Circular Foil 0.5	Circular Foil 0.5
1.36	Circular Foil 0.5	Circular Foil 0.5
4.10	Circular Foil 0.5	Circular Foil 0.5
6.83	Circular Foil 0.35	Circular Foil 0.35
10.25	DU99W405LM	DU99W405LM
14.35	DU99W350LM	DU99W350LM
18.45	DU99W350LM	DU99W350LM
22.55	DU97300LM	DU97300LM
26.65	DU91W2250LM	DU91W2250LM
30.75	DU91W2250LM	DU91W2250LM
34.85	DU93W210LM	DU93W210LM
38.95	DU93W210LM	DU93W210LM
43.05	NACA64618	NACA64618
47.15	NACA64618	NACA64618
51.25	NACA64618	NACA64618ICE
54.67	NACA64618	NACA64618ICE
57.4	NACA64618	NACA64618ICE
60.13	NACA64618	NACA64618ICE
61.50	NACA64618	NACA64618ICE

NREL 5MW türbine ait kanat profilleri aşağıdaki grafiklerde verilmiştir.

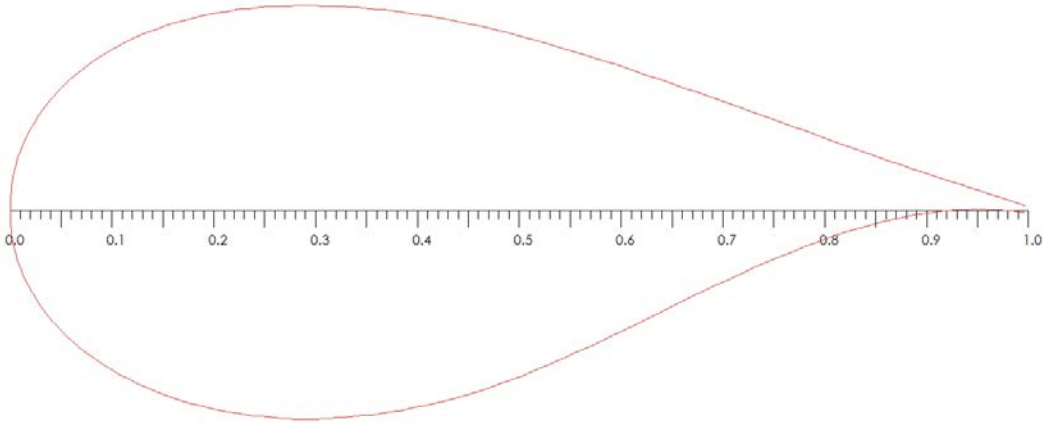
**Şekil 2.** DU91W2250LM Kanat Profili**Şekil 3.** DU93W210LM Kanat Profili



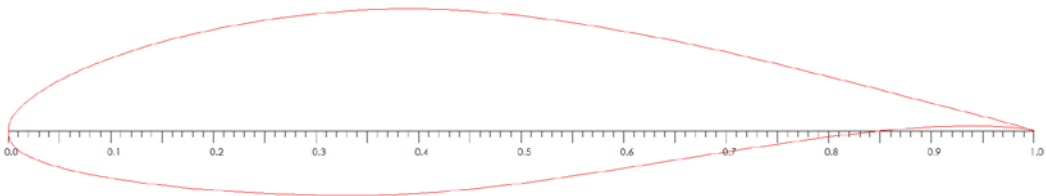
Şekil 4. DU97W300LM Kanat Profili



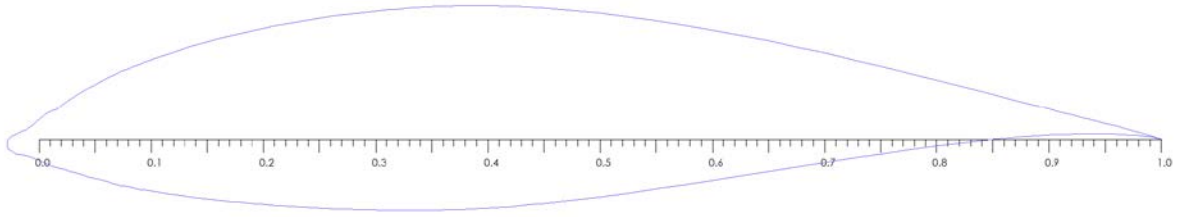
Şekil 5. DU99W350LM Kanat Profili



Şekil 6. DU99W405LM Kanat Profili

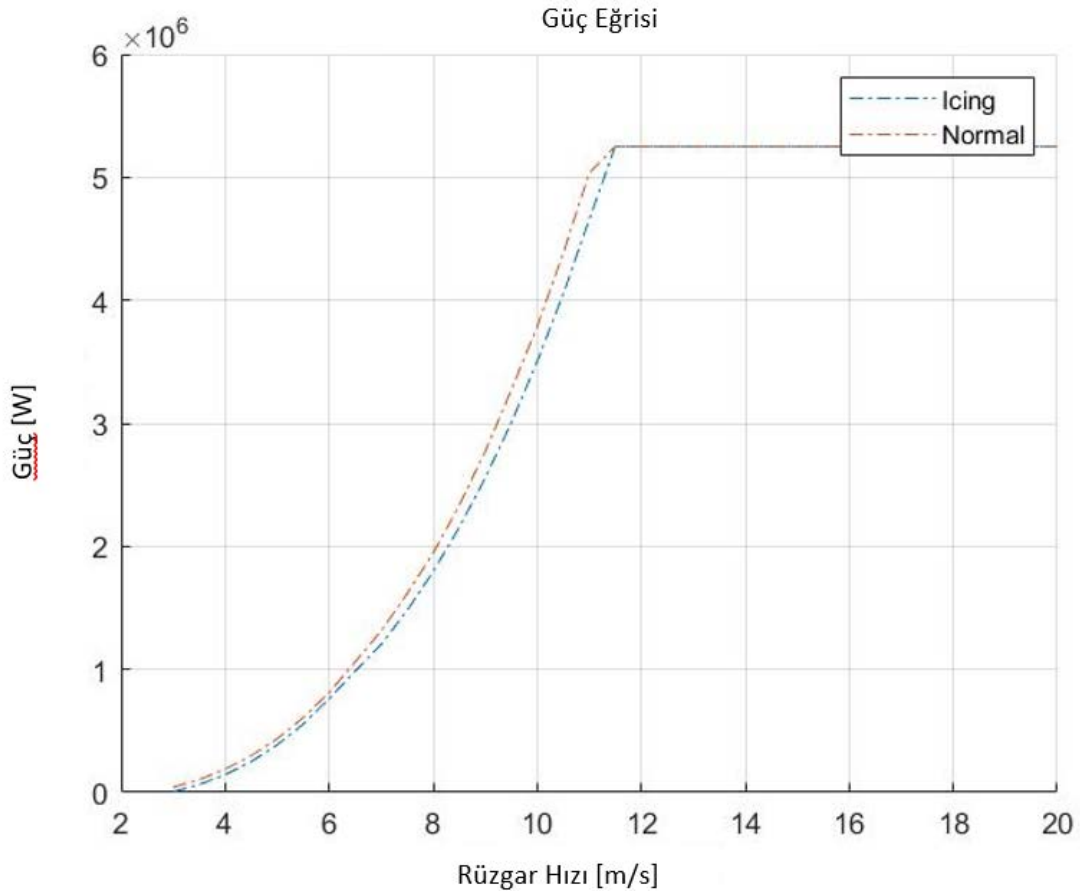


Şekil 7. NACA64618 Kanat Profili



Şekil 8. NACA64618 Buzlanma Altında Kanat Profili

Bu simülasyonda normal şartlar için NACA64618 kanat profili kullanılmıştır. Buzlanma profili için ise -10°C ve -20°C arasındaki buzlanma [7] profili kullanılmıştır. İki kanat profili için BEM simülasyonu kullanılarak güç eğrisi elde edilmiştir. Elde edilen güç eğrilerinin karşılaştırılmaları Şekil 8 de gösterilmiştir.



Şekil 9. Türbin Güç Eğrileri

6. Sonuç

Şekil 8 de görüldüğü üzere rüzgar türbinin üretim güç eğrisi, türbin kanatlarının aerodinamik özelliklerinin değişmesi ile düşmüştür. Bu simülasyonda buz birikimi sade kanadın 51.25m ve 61.50m arasında olduğu varsayılmıştır. Buzlanma etkisinin çok düşük olmasına rağmen, güç eğrisindeki düşüş dolayısı ile türbinin performansı önemli ölçüde azalmıştır. Buz yükünün daha fazla olduğu durumlarda aerodinamik bozulma daha fazla olacağı için güç eğrisinde daha büyük bir düşüş gözlenecektir. Aynı zamanda kanatların üzerindeki fazladan buz yükü kanat

üzerindeki yorgunluğu arttıracak ve türbinin erken yaşlanmasına neden olacaktır. Yüksek buzlanma durumunda aynı zamanda kanatlardan fırlatılan buz hem çevreye hem de türbine zarar verebileceği için türbini tamamen kapatmak ve üretimi durdurma seçeneği ekonomik olarak daha karlı hale gelebilmektedir. Türbinlerin tamamen durduğu dönemlerde üretim de sıfıra ineceği için yıllık enerji üretiminde büyük bir etkisi olacaktır. Dolayısı ile yıllık enerji hesaplarında bu durum da göz önünde bulundurularak güç eğrisinin buna göre güncellenmesi ve bir belirsizlik olarak hesaplara dahil edilmesi enerji analizi sonrası yapılan ekonomik modellerde daha güvenilir sonuçlar verecektir. Bunun yapılabilmesi için buzlanmanın ve buzlanmanın güç eğrisi üzerindeki etkisinin daha derinlemesine incelenerek farklı parametrelere güç eğrisi üzerinde nasıl etki yaptığının daha iyi tanımlanması, farklı senaryolar için daha uygun güç eğrileri vererek buzlanmaya bağlı enerji kayıplarında standart elde edilebilir. Bu çalışmalar sonucunda elde edilen veriler ile türbinlerin gerçek güç eğrilerinin analizi ile de buzlanmanın tespiti mümkün hale gelecektir.

Teşekkürler

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 216M505 numaralı projesi ve Avrupa Birliği, Latin Amerika ve Karayip Ülkeleri Ortak İnovasyon ve Araştırma Faaliyetleri Ağı (ERaNet-LAC) kapsamında fonlanmış olan Küçük Rüzgar Türbinlerinin Optimizasyonu ve Ticari Promosyonu - Small Wind Turbine Optimization and Market Promotion (SWTOMP) projesi içinde desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Virk, M.S., M.C. Homola, and P.J. Nicklasson, *Effect of rime ice accretion on aerodynamic characteristics of wind turbine blade profiles*. Wind Engineering, 2010. **34**(2): p. 207-218.
- [2] Yirtici, O., I.H. Tuncer, and S. Ozgen. *Ice accretion prediction on wind turbines and consequent power losses*. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. IOP Publishing.
- [3] IEA Wind Task 19. Available from: <https://community.ieawind.org/task19/home>.
- [4] Baring-Gould, E.I., *Wind Energy Workforce Development: A Roadmap to a Wind Energy Educational Infrastructure*. 2011: National Renewable Energy Laboratory.
- [5] Hudecz, A., et al., *Icing Problems of Wind Turbine Blades in Cold Climates*. 2014.
- [6] Barber, S., et al., *The impact of ice formation on wind turbine performance and aerodynamics*. Journal of Solar Energy Engineering, 2011. **133**(1): p. 011007.
- [7] Etemaddar, M., M.O.L. Hansen, and T. Moan, *Wind turbine aerodynamic response under atmospheric icing conditions*. Wind Energy, 2014. **17**(2): p. 241-265.
- [8] *Kanat Profili*. Available from: https://www.wikiwand.com/tr/Kanat_profili.
- [9] Mortensen, K., *CFD simulations of an airfoil with leading edge ice accretion*. Department of Mechanical Engineering, 2008: p. 117.
- [10] Li, Y., et al., *Temperature effect on icing distribution near blade tip of large-scale horizontal-axis wind turbine by numerical simulation*. Advances in Mechanical Engineering, 2018. **10**(11): p. 1687814018812247.

TABAKALI KOMPOZİTLERDE DÜŞÜK HIZLI DARBEYE BAĞLI HASARIN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Miraç Onur Bozkurt¹, Demirkan Çöker², Levend Parnas³

^{1,2} Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü
^{1,2} Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Rüzgâr Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi (RÜZGEM)

³ TED Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü

¹ onurboz@metu.edu.tr

² coker@metu.edu.tr

³ levend.parnas@tedu.edu.tr

ÖZET

Geleneksel malzemelere kıyasla yüksek dayanım – ağırlık oranı sunan karbon elyaf esaslı kompozit malzemelerin rüzgâr türbin kanatlarında kullanımı giderek artmaktadır. Ancak, tabakalı kompozit yapıların kalınlık yönündeki düşük mukavemetleri halen mevcut olan bir sorundur. Türbin kanatlarına dolu düşmesi, kuş çarpması ve montaj sırasında oluşan çarpmalar gibi öngörülemeyen ve kontrolü sağlanamayan düşük hızlı darbe olayları, serim yönündeki bu zayıflığı matris kırılması, tabaka ayrışması ve elyaf kopması olmak üzere üç ana hasar formunda ortaya çıkarmaktadır. Hasar mekanizmalarının çeşitliliği ve malzemenin doğrusal olmayan dinamik davranışı, darbe hasarının oluşum sekansını iyi anlamayı ve ilgili deney ve simülasyonları doğru modellemeyi gerektirmektedir.

Bu çalışmada, tek yönlü [0/90] karbon/epoksi kompozit kirişlerde düşük hızlı darbe (DHD) sonucu oluşan hasar sayısal olarak modellenmiştir. ABAQUS/Explicit'te, DHD deneylerini temsil eden 3 boyutlu bir model geliştirilmiştir. Simülasyonlar, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Matris ve elyaf hasarı mekanizmaları, Hashin hasar başlatma kriterinin kullanıldığı sürekli ortam hasar mekaniği temelli bir kompozit hasar modelinin kullanıcı tarafından yazılmış bir VUMAT altprogramı aracılığıyla programa uygulanmasıyla simüle edilmektedir. Yapışkan ara yüzler, kümelenmiş katlar arasına yapışkan elemanların yerleştirilmesiyle modellenmiştir ve delaminasyon hasarının simülasyonu için yapışkan elemanlara ikidoğrusal traksiyon-ayırılma davranışı tanımlanmıştır. Sonuçlar, hasarın ortada kümelenmiş 90° katmanları boyunca kesme çatlağı ile başladığını ve hasar oluşum sekansının ilgili literatürde sunulan deneysel sonuçlarla iyi bir uyum içinde olduğunu göstermektedir. Ayrıca, 3. boyutun çizgisel darbe olayında meydana gelen hasar şeması üzerindeki etkisi açıkça ortaya konmuştur.

1. GİRİŞ

Karbon elyaf esaslı kompozit malzemelerin rüzgâr türbini yapılarındaki kullanımı, yüksek düzlemci mukavemeti ve yüksek sertlik-ağırlık oranları gibi tercih edilir mekanik özellikleri sayesinde gitgide daha avantajlı hale gelmektedir. Buna karşın, kompozit laminatların kalınlık yönündeki düşük mukavemeti halen mevcut olan bir sorundur. Rüzgâr türbin yapılarında da gözlemlenen kuş çarpması ve dolu düşmesi gibi kontrolü sağlanamayan düşük hızlı darbe olayları bu zayıflığı ortaya çıkarmaktadır [1]. Ayrıca açık deniz rüzgâr türbinlerinin kurulumunda, kanatların vinçlerle kaldırılarak türbin göbeğine montaj edilmesi esnasında türbin kanatlarının kök bölgeleri düşük hızlarda darbeye maruz kalabilmektedir [2, 3].

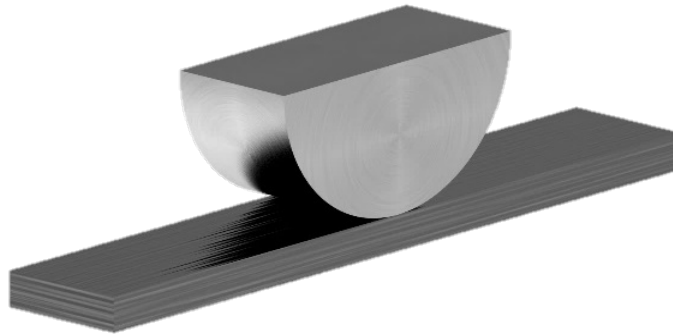
Türbin kanatlarında meydana gelen düşük hızlı darbe olayları, kompozit laminatların serim yönündeki zayıflığının üç ana hasar mekanizması biçiminde ortaya çıkmasına neden olmaktadır: matris kırılması, delaminasyon ve elyaf kopması. Hasar mekanizmalarının çeşitliliği ve

malzemenin doğrusal olmayan dinamik davranışı, darbe hasarının oluşum sekansını iyi anlamayı ve ilgili deney ve simülasyonları doğru modellemeyi gerektirmektedir. Geçmişte yapılan deneysel çalışmalarda [4, 5], hasar sürecinin matris çatlakları ile başladığı ve ardından sırasıyla delaminasyon ve elyaf kırılmaları ile devam ettiği gözlemlenmiştir. Çok yönlü kompozit laminatların mühendislik yapılarının tasarımında uygun şekilde kullanılabilmesi amacıyla, yakın dönemdeki çalışmalarda darbeye bağlı hasar mekanizmalarını doğru tahmin edecek sayısal simülasyonların modellenmesi hedeflenmiştir. Sayısal yöntemlere dayanan simülasyonlar yoluyla sanal deney düzeneklerinin geliştirildiği araştırmalara, deney sayılarının azaltılması amacıyla, ayrı bir önem verilmektedir. Lopes ve ark. [6, 7], sürekli ortam hasar mekaniği temelli kompozit katman hasarı modeli ve yapışkan bölge metodu kullanarak dağınık diziliimli laminatlardaki darbe hasarını simüle etmiştir. Daha sonra Lopes ve ark. [8, 9], simülasyonlardaki darbe hasarını daha gerçekçi şekilde ortaya koyan modeller üretmek üzere bu konudaki çalışmalarını sürdürmüşlerdir. González ve ark. [10], laboratuvar kuponlarının basma yükü altındaki kalıntı gücünün belirlenmesi amacıyla kompozit laminatların tasarımında standart olarak yapılan ağırlık düşürmeli darbe testleri ve darbe sonrası basma testlerinin ardışık simülasyonlarını gerçekleştirmiş ve her iki sanal test türünde de katman hasarı ve delaminasyonu hesaba katan bir malzeme modeli kullanmışlardır. Soto ve ark. [11] ince katmanlı laminatlardaki düşük hızlı darbe hasarını araştırmışlardır. İnce tabaka laminatlar için matris çatlama etkilerinin önemsiz olduğu, buna karşın delaminasyon ve elyaf hasarlarının baskın hasar modları olduğu sonucuna varmışlardır. Topac ve ark. [12] DHD'ye maruz kalan $[0/90]_s$ kompozit kirişlerdeki yerinde hasar sürecini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Bu çalışmada, kompozit kirişteki hasar LaRC04 başlatma kriterlerine sahip sürekli ortam hasar mekaniği temelli bir katman hasar modeli ve yapışkan bölge yöntemi temelli bir delaminasyon modeli kullanılarak simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçları, hasar başlama zamanı, yeri ve hasar modlarının etkileşimi açısından deneylerle tutarlılık göstermektedir.

Bu çalışmada, kompozitlerdeki düşük hızlı darbe hasarı süreci, karbon/epoksi tek yönlü katmanlar kullanılarak üretilmiş bir $[0_5/90_3]_s$ kiriş üzerinde incelenmiştir. Çalışmanın amacı, 2 boyutlu çizgisel darbe yöntemiyle farklı hasar mekanizmalarını gözlemlemek ve bunlar arasında bir korelasyon oluşturmaktır. Burada sunulan çalışma, yüksek doğrulukta hesaplama modeline sahip bir sanal darbe test düzeneği oluşturma yolundaki ilk adım olarak kabul edilebilir.

2. SAYISAL MODEL

Sonlu elemanlar analizinde kullanılan simülasyon tekniği ve hasar modelleri bu bölümde sunulmaktadır. Şekil 1'de görülen model iki boyutlu bir modele basitleştirilebilir gibi görünse de, deneylerde gözlemlenen boyut etkilerinin araştırmak için sonlu elemanlar modeli 3B ortamda ABAQUS/Explicit programı kullanılarak oluşturulmuştur. $[0_5/90_3]_s$ kompozit kirişte meydana gelecek darbe hasarını simüle etmek amacıyla katman içi ve katmanlar arası hasar modelleri geliştirilmiş ve hasar modelleri sonlu elemanlar analizlerinde kullanılmıştır.



Şekil 1. 2B çizgisel darbe modeli.

2.1. KATMAN İÇİ HASAR MODELİ

Kompozit katman seviyesindeki hasar mekanizmalarının simüle edilebilmesi için Maimi [13] tarafından geliştirilen sürekli ortam hasar mekaniği esaslı malzeme modeli, üzerinde bazı modifikasyonlar yapılarak kullanılmıştır. Malvern'in [14] 3 boyutlu katman tamamlayıcı serbest enerji yoğunluğu fonksiyonunun hasarlı versiyonu, hasar değişkenleri, gerilme durumu ve elastik katsayılar cinsinden ifade edilmektedir ve malzemenin denklem (1)'de verilen hasarlı esneklik tensörünü belirlemek için bu fonksiyonun türevi alınmaktadır [15]. Malzemenin mevcut elyaf, matris ve kesme hasarı seviyesi sırasıyla d_F , d_M ve d_S hasar değişkenleri ile temsil edilmektedir.

$$\underline{\underline{H}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1(1-d_F)} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2(1-d_M)} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3(1-d_M)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}(1-d_S)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}(1-d_S)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}(1-d_S)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Konstitütif modelde, malzeme davranışının hasar başlangıcına kadar elastik olduğu varsayılmaktadır. Herhangi bir modda hasar başladığında, kırılğan malzemede yumuşama meydana gelir. Fiber ve matris modlarında çekme ve basma hasarlarının başlatılması, maksimum gerilme ve 3B Hashin hasar kriterleri ile kontrol edilmektedir. Her hasar modu için 1 değerine ulaştığı andaki hasar başlangıcını öngören yükleme fonksiyonları denklem (2) ila (5)'te verilmiştir [16]. Bu denklemlerde, X_T , X_C ve Y_C , bir katmanın sırasıyla elyaf yönünde çekme, elyaf yönünde basma ve elyafa dik yönde basma yükleri altındaki mukavemetleridir. Matris kırılması ile alakalı mukavemetler geometri ve dizilime bağlı olduğu için malzeme özellikleri olması beklenmez [17]. Bu nedenle, Hashin'in matris hasarı başlatma kriterleri içinde yer alan enine gerilme, düzlem içi ve düzlem dışı uzunlamasına kesme ve enine kesme mukavemeti terimleri [17, 18] 'deki kalın gömülü katmanlar için kullanılması önerilen yerinde mukavemetlerle değiştirilmiştir: $Y_{T,is} = 1.12\sqrt{2} Y_T$, $S_{12,is} = \sqrt{2} S_{12}$, $S_{13,is} = \sqrt{2} S_{13}$ ve $S_{23,is} = \sqrt{2} S_{23}$.

- Elyaf çekme modu (eğer $\sigma_{11} > 0$)

$$\phi_{FT} = \frac{\sigma_{11}}{X_T} \quad (2)$$

- Elyaf basma modu (eğer $\sigma_{11} < 0$)

$$\phi_{FC} = \frac{-\sigma_{11}}{X_C} \quad (3)$$

- Matris çekme modu (eğer $\sigma_{22} + \sigma_{33} > 0$)

$$\phi_{MT} = \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_{T,is}} \right)^2 + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23,is}^2} + \left(\frac{\sigma_{12} + \sigma_{13}}{S_{12,is}} \right)^2 \quad (4)$$

- Matris basma modu (eğer $\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0$)

$$\phi_{MC} = \left[\left(\frac{Y_C}{2S_{23,is}} \right)^2 - 1 \right] \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})}{Y_C} + \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2S_{23,is}} \right)^2 + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23,is}^2} + \left(\frac{\sigma_{12} + \sigma_{13}}{S_{12,is}} \right)^2 \quad (5)$$

Yükleme fonksiyonu herhangi bir modda 1 değerine ulaştığında malzemenin sertliği indirgenir. Hasar görmüş bir malzemenin yüklem fonksiyonunun değerinin 1'in altına düşmesi mümkün olsa da, hasar başlangıcından dolayı malzemenin yumuşaması ilgili modda kalıcıdır ve malzemenin davranışı bozulmuş sertlik derecesinde elastiktir. Bu koşulu sağlamak için, elastik eşik parametresi ve hasar aktivasyon fonksiyonları sırasıyla denklemler (6) ve (7) 'de tanımlanmıştır [13]. Bu denklemlerde, N hasar modlarını temsil eder ve $\phi_{N,max}$, ϕ_N değerinin o zamana kadarki maksimum değeridir. R_N 'nin tanımından yola çıkarak, hasar aktivasyon fonksiyonu negatif iken, malzeme davranışının elastik alanda olduğu söylenebilir. F_N sıfır olduğunda ise hasar gelişimi meydana gelmektedir.

$$r_N = \begin{cases} 1 & \text{hasar başlangıcından önce} \\ \phi_{N,max} & \text{hasar başlangıcından sonra} \end{cases} \quad (6)$$

$$F_N = \phi_N - r_N \quad (7)$$

Hasarın gelişimi, Şekil 2'de gösterildiği gibi eşdeğer gerilme-gerinim yaklaşımı ile doğrusal bir yumuşama tepkisi şeklinde modellenmektedir. Hasarın başladığı A noktasından C noktasına kadar hasar gelişimi meydana gelir. Eğrinin altındaki alan birim hacim başına dağıtılan enerjiye karşılık gelmektedir ve $g_N = G_N^C / L^*$ olarak tanımlanır. Burada L^* sonlu elemanların karakteristik uzunluğudur. Karşılık gelen hasar modları için eşdeğer gerilme ve gerinim ifadeleri, denklemler (8) ile (11)'de görülmektedir.

- Elyaf modları

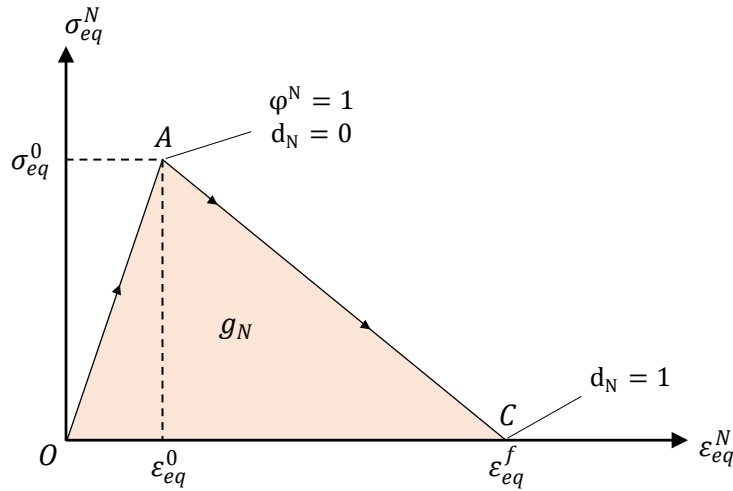
$$\sigma_{eq}^{FT,FC} = |\sigma_{11}| \quad (8)$$

$$\varepsilon_{eq}^{FT,FC} = |\varepsilon_{11}| \quad (9)$$

- Matris modları

$$\sigma_{eq}^{MT,MC} = \frac{\langle \pm \sigma_{22} \rangle \langle \pm \varepsilon_{22} \rangle + \langle \pm \sigma_{33} \rangle \langle \pm \varepsilon_{33} \rangle}{\varepsilon_{eq}} + \frac{\tau_{12}\varepsilon_{12} + \tau_{13}\varepsilon_{13} + \tau_{23}\varepsilon_{23}}{\varepsilon_{eq}} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{eq}^{MT,MC} = \sqrt{\langle \pm \varepsilon_{22} \rangle^2 + \langle \pm \varepsilon_{33} \rangle^2 + \varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{13}^2 + \varepsilon_{23}^2} \quad (11)$$



Şekil 2. Hasarın gelişimi esnasında malzemenin doğrusal yumuşama davranışı.

d_N hasar değişkeni, hasarlı malzemenin doğrusal yumuşama davranışını sağlamak amacıyla denklem (12)'de de ifade edildiği gibi elyaf ve matris hasarı modları için doğrusal olmayan doygunluk tipinde bir davranışa sahiptir. Bu ifadede, ε_{eq}^0 ve ε_{eq}^f , sırasıyla hasar başlangıcındaki ve tamamlanmış hasar anındaki eşdeğer gerinimlerdir. Kesme hasarı durumunun, dört moddaki hasar durumundan da etkilendiği varsayılmaktadır ve buna göre kesme hasarı değişkeni d_s denklem (13)'teki gibi tanımlanmaktadır. $\sigma_{11} > 0$ için $d_F = d_F^T$, $\sigma_{11} < 0$ için $d_F = d_F^C$, $\sigma_{22} + \sigma_{33} > 0$ için $d_M = d_M^T$ ve $\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0$ için $d_M = d_M^C$ olduğuna dikkat edilmelidir.

$$d_N = \frac{\varepsilon_{eq}^f (\varepsilon_{eq}^{\max} - \varepsilon_{eq}^0)}{\varepsilon_{eq}^{\max} (\varepsilon_{eq}^f - \varepsilon_{eq}^0)} \quad (12)$$

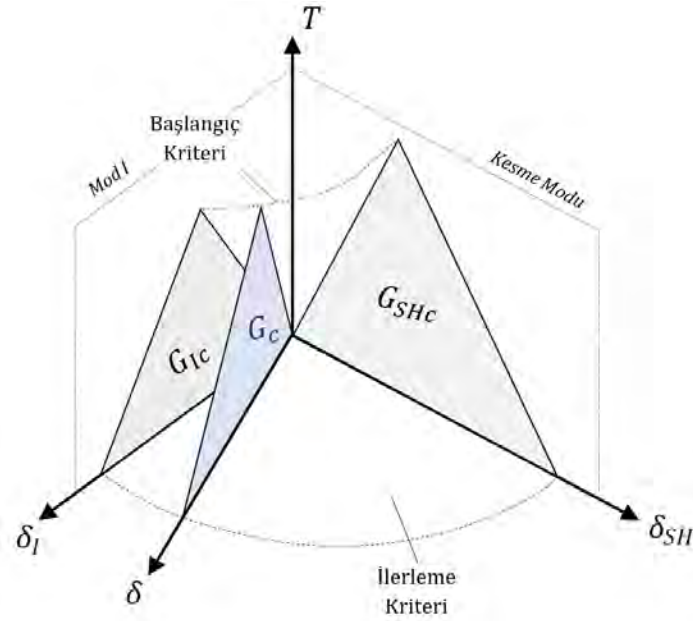
$$d_s = 1 - (1 - d_F^T)(1 - d_F^C) - (1 - d_M^T)(1 - d_M^C) \quad (13)$$

Yukarıda bahsedilen malzeme modeli ABAQUS/Explicit sonlu elemanlar çözücüsüne kullanıcı tarafından yazılmış bir VUMAT altıyordamı aracılığıyla aktarılmaktadır.

2.2. KATMANLAR ARASI HASAR MODELİ

Delaminasyon hasarını simüle etmek için, Topac ve ark.'ın [12] tutarlı deney sonuçlarına uygun olarak, kümelenmiş 0° ve 90° tabakaları arasına sıfır kalınlıkta yapışkan elemanlar yerleştirilmiştir. Şekil 3'te görülen kırılma mekanizması temelli ikidoğrusal traksiyon-ayrılma davranışı, her bir yapışkan elemana atanmıştır. Delaminasyon genellikle ara yüze etkiyen çok eksenli gerilme durumundan kaynaklandığı için, yapışkan madde davranışı modellenirken mod karışması dikkate alınmaktadır. Katmanlar arası hasarın başlangıcı, denklem (14)'te verilen ikinci dereceden nominal gerilme kriteri ile kontrol edilir. Bu denklemde, T_i ve $T_{o,i}$ ($i = I, II, III$), sırasıyla yüzeye uygulanan traksiyonlar ve karşılık gelen kırılma modları için katmanlar arası mukavemetlerdir. Mod I'de, sadece pozitif traksiyon başlangıç kriterine dahil edilir, çünkü basma yönündeki normal gerilmeler çatlağın açılmasına katkıda bulunmaz.

$$\left(\frac{\langle T_I \rangle}{T_{o,I}} \right)^2 + \left(\frac{T_{II}}{T_{o,II}} \right)^2 + \left(\frac{T_{III}}{T_{o,III}} \right)^2 = 1 \quad (14)$$

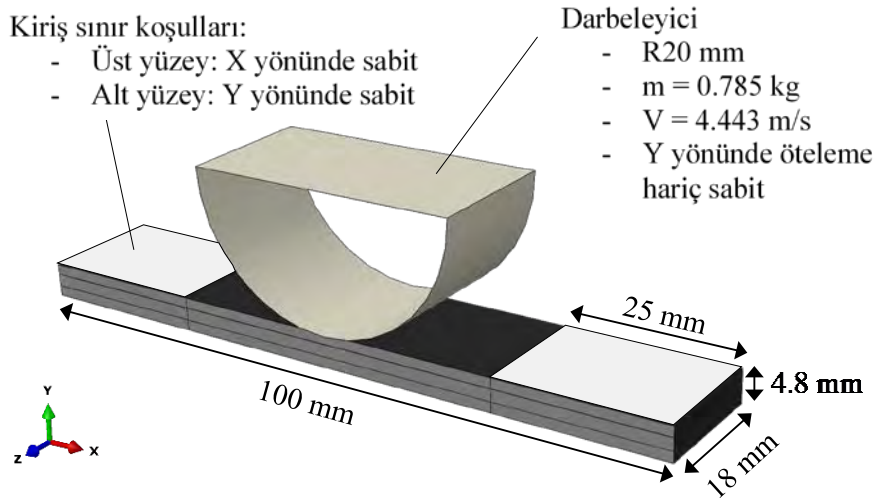


Şekil 3. Yapışkan malzemenin karışık moddaki ikidoğrusal traksiyon-ayrılma davranışı. Katmanlar arası hasar başladığında, hasarın karışık moddaki gelişiminin modellenmesinde, denklem (15)'te verilen Benzeggagh-Kenane kriteri kullanılmaktadır. Bu denklemde, G_{SH} kesme modu traksiyonları ve G_T tüm saf mod traksiyonları tarafından yapılan işlerin toplamını ifade eder. G_{SHc} , $G_{SHc} = G_{IIC} = G_{IIIC}$ olarak tanımlanmaktadır. Doğrusal yumuşama davranışı, hasar başlangıcının gerçekleştiği düzlemdeki yapışkan elemanlara atanmaktadır.

$$G_c = G_{Ic} + (G_{SHc} - G_{Ic}) \left(\frac{G_{SH}}{G_T} \right)^\eta \quad (15)$$

2.3. SONLU ELEMANLAR MODELİ

Topac ve ark. [12] çalışmasında sunulan düşük hızlı darbe deneylerini simüle etmek için ABAQUS/Explicit'te üç boyutlu sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Geometrisi Şekil 4'te gösterilen kompozit kiriş, üç boyutlu deforme olabilen bir katı olarak modellenmiştir. Kompozit kiriş, gerçekte 0.3 mm eşit kalınlığa sahip 16 tek yönlü kompozit katmandan oluşmaktadır. Modelde ise kümelenmiş katmanlar tek bir homojen kalın kat olarak kabul edilmektedir.



Şekil 4. Sonlu elemanlar modelinin geometrisi, başlangıç koşulları ve sınır koşulları.

Kiriş geometrisi, azaltılmış integrasyona sahip ve kum saati kontrolü olan (ABAQUS kütüphanesinde C3D8R) 8 düğümlü doğrusal tuğla elemanları ile düzgün bir şekilde ayrıklaştırılmıştır. Elemanlar, 0.2 x 0.2 x 0.3 mm boyutlarındadır ve her bir kompozit katmanı bir eleman ile modellenmiştir. Farklı açılı katmanların arayüzlerine eklenen yapışkan bölgeler, sıfır kalınlıkta 0.2 x 0.2 mm yapışkan elemanlardan oluşur. Kirişin katman malzemesi olarak kullanılan karbon/epoksinin mekanik ve arayüz özellikleri Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Karbon/epoksi malzemenin mekanik özellikleri

Özkütle	1590 kg/m ³
Elastik	$E_1 = 142$ GPa; $E_2 = 9.4$ GPa; $E_3 = 9.4$ GPa $\nu_{12} = 0.3$; $\nu_{13} = 0.3$; $\nu_{23} = 0.45$ $G_{12} = 5.2$ GPa; $G_{13} = 5.2$ GPa; $G_{23} = 4.2$ GPa
Mukavemet	$X_T = 1642$ MPa; $X_C = 1060$ MPa $Y_T = 66$ MPa; $Y_C = 220$ MPa $S_{12} = 75$ MPa; $S_{13} = 75$ MPa; $S_{23} = 70$ MPa;
Kırılma Tokluğu	$G_C^{FT} = 81500$ N/m; $G_C^{FC} = 106300$ N/m $G_C^{MT} = 280$ N/m; $G_C^{MC} = 1430$ N/m

Tablo 2. Karbon/epoksi malzemenin arayüz özellikleri

Arayüz Mukavemeti	$T_{o,I} = T_{o,II} = T_{o,III} = 115$ MPa
Kırılma Tokluğu	$G_{I,c} = 280$ N/m; $G_{II,c} = G_{III,c} = 860$ N/m
B-K Kriteri Sabiti	$\eta = 1.45$
Sertlik	$E_o = 5 \times 10^{14}$ N/m ³

Kompozit kirişin üst ve alt yüzeylerinde deneylere uygun olarak her bir uçtan 25 mm boyunca sınır koşulları tanımlanmıştır. Alt yüzeyin ötelenmesi X ve Y yönlerinde sınırlandırılmışken, üst yüzey, basma yükü altında Poisson etkisinden dolayı şekil değişimine müsaade etmek için sadece X yönünde sabitlenmiştir.

Yarım silindirik çelik darbeleyici, 20 mm yarıçapa ve 0.785 kg kütleyle sahip analitik rijit bir gövde olarak modellenmiştir. Darbeleyiciye, 4,43 m/s'lik bir başlangıç hızı (1 m yükseklikten serbest düşüşe karşılık gelir) verilir ve kompozit kirişin merkezinin biraz yukarısına yerleştirilir. Darbeleyicinin düşey yöndeki öteleme hareketi dışındaki tüm serbestlik dereceleri sınırlandırılmıştır.

Modelde, ABAQUS / Explicit'in genel temas algoritması kullanılarak iki farklı temas etkileşimi tanımlanmıştır: (i) darbeleyici ile kirişin üst yüzeyi arasında, (ii) kirişin içinde. Kiriş içerisinde bir temasın tanımlanmasının nedeni, bir delaminasyon hasarını takiben arayüzlerde oluşan serbest yüzeyler arasındaki temasıdır. Her iki durumda da normal yöndeki etkileşimler için sert temas tanımlanmıştır. Teğetsel hareket için, metal-kompozit ve kompozit-kompozit temas için sırasıyla sürtünme katsayıları 0.3 ve 0.5 olan Coulomb sürtünme modeli tanımlanmıştır.

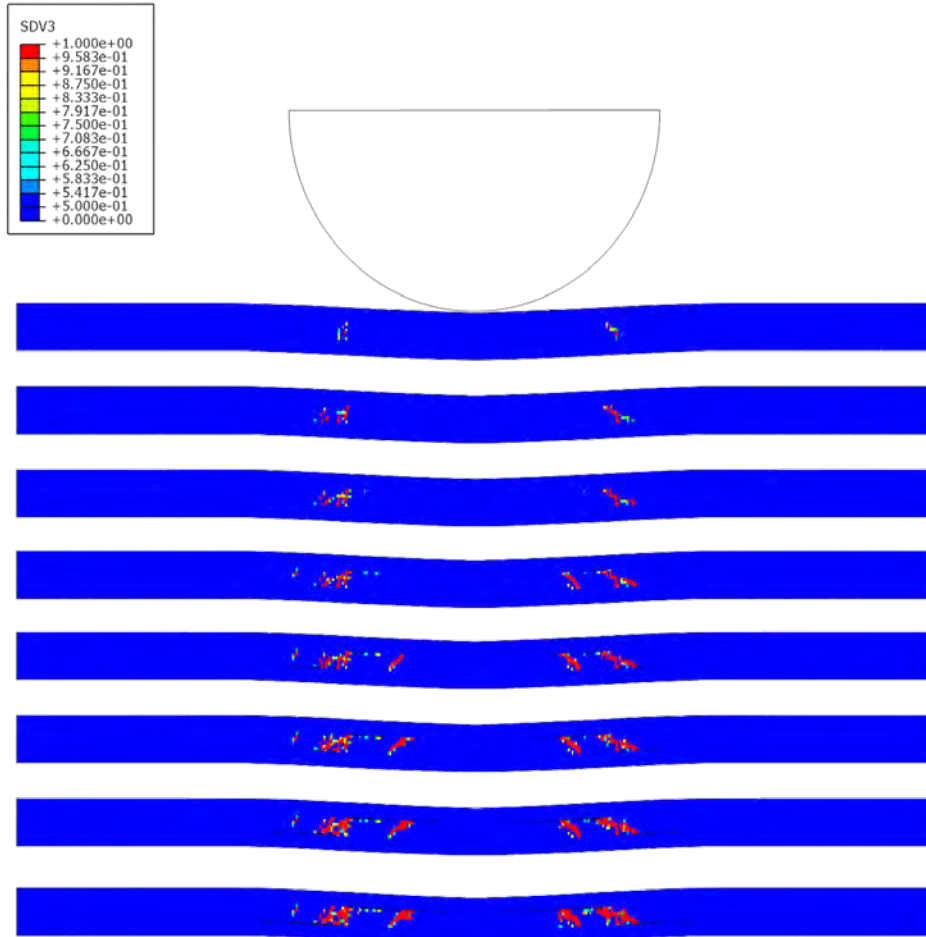
3. ANALİZ SONUÇLARI

Şekil 6'da kompozit kirişin 1 µs zaman aralığı ile alınmış sekiz ardışık görüntüsü görülmektedir. Matris çekme hasarının orta 90 ° katmanlardaki dağılımına bakarak, deneysel sonuçlarla [12] iyi bir uyum elde edildiği söylenebilir. Hasar oluşum sekansı şu şekilde özetlenebilir: Kirişin her

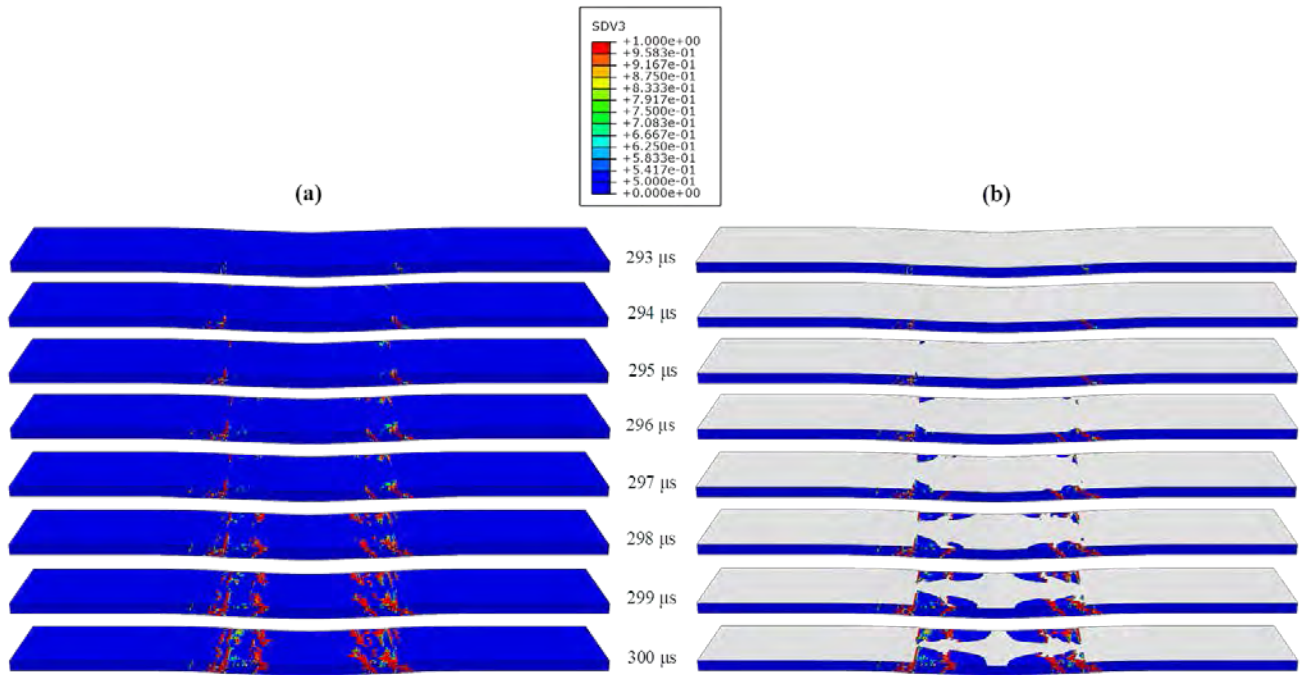
iki tarafında da kalın gömülü 90° tabakaların içinde tek bir kesme çatlağı meydana gelir, eğimli bir açıyla arayüzlere doğru büyür ve ardından üst ve alt arayüzlerin her birinde bir delaminasyon görülür. Bu ana matris çatlaklarına ek olarak, ilk hasardan sonra gerilmelerin yeniden dağıtılmasıyla ikincil çatlaklar gözlenmektedir. İkincil çatlakların bazıları, arayüzlere ulaştıklarında yeni delaminasyonlara neden olmaktadır.

Sonlu elemanlar analizinin sonuçları, geometrinin üç boyutlu uzayda modellenmesinin hem katman içi hem de katmanlar arası hasar oluşumu sekanslarını oldukça etkilediğini göstermektedir. Şekil 7a'da, kiriş içerisindeki matris hasarının, üst $[0/90]$ arayüzündeki dağılımı numune genişliği boyunca $1\ \mu\text{s}$ aralıklarla alınmış görüntülerle sunulmaktadır. Kümelenmiş 90° katmanlar içinde oluşan matris çatlaklarının, ilk olarak kirişin serbest kenarlarında oluştuğu ve kirişin ortasına doğru yayıldığı görülmektedir. Aynı zamanda, ikincil çatlaklar da serbest kenarda oluşmakta ve benzer şekilde kirişin içerisine doğru büyümektedir. Matris çatlaklarının serbest kenarda başlayıp içeri doğru yayılması, çizgisel darbe olayının iki boyutlu bir problem olarak idealleştirilmemesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Kompozit kirişin üst $[0/90]$ arayüzdeki delaminasyon oluşum sekansı, $1\ \mu\text{s}$ aralıklarla alınmış görüntülerle Şekil 7b'de sunulmaktadır. Delaminasyonların, 90° katmanlarda oluşan kesme tipi matris çatlaklarının, serbest kenarlarda arayüzlere ulaşması ile başladığı gözlemlenmektedir.



Şekil 5. $[0/90]$ karbon/epoksi kirişte darbe hasarı oluşum sekansı.



Şekil 6. (a) Matris hasarı ve (b) delaminasyonun üst [0/90] arayüzünde kiriş derinliği boyunca dağılımı.

Darbe ve kiriş arasındaki ilk temastan 295 μ s sonra, kirişin serbest kenarlarında mevcut olan 4 ana kesme çatlaklarından 2'si delaminasyon oluşturmaktadır. Bundan 1 μ s sonra, kalan iki çatlak da arayüzlere ulaşarak yeni delaminasyonları tetiklemektedir. Arayüze ulaşan matris çatlaklarının yol açtığı delaminasyonlar, ilk temastan yaklaşık 298-300 μ s sonra birleşmektedir. Sonuçlar, darbe yüküne maruz kalan kompozitlerdeki delaminasyon oluşum dizisinin karmaşık bir üç boyutlu olay olduğunu göstermektedir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, tek yönlü [0/90] karbon/epoksi kompozit kirişte düşük hızlı darbe sonucu meydana gelen hasarın oluşum süreci sayısal yöntemlerle araştırılmıştır. Üç boyutlu sonlu elemanlar analizi ABAQUS/Explicit'te gerçekleştirilmiştir.

- Hashin hasar başlatma kriterine sahip sürekli ortam hasar mekaniği temelli kompozit katman hasar modeli, ABAQUS/Explicit çözücüsüne kullanıcı tarafından yazılmış bir VUMAT alt yordamıyla başarıyla uygulandı. Bu model ile matris ve elyaf hasarı mekanizmaları simüle edildi.
- Delaminasyon hasarı, yapışkan elementlere ikidoğrusal traksiyon-ayrılma davranışının tanımlandığı yapışkan bölge modeliyle simüle edildi.
- Sonuçlar, kirişteki hasarın serbest kenarlarda, kümelenmiş 90° katmanların ortasındaki kesme çatlakları ile başladığını ve bu çatlakların [0/90] arayüzlerine doğru büyüdüğünü göstermektedir. Arayüze ulaşan her bir matris çatlakının, bir delaminasyon başlattığı görülmüştür.
- Bu sonuçlar, literatürdeki deneysel gözlemlerle [12] yüksek seviyede tutarlıdır. Bu uyum, kompozit kirişteki darbeye bağlı hasar sürecinin, Hashin hasar başlatma kriterlerine sahip üç boyutlu kompozit hasar modeli kullanılarak doğru bir şekilde simüle edildiğini göstermektedir.
- Çizgisel darbe olayında, 3B etkilerin matris hasarı ve delaminasyon oluşum sekansları üzerindeki varlığı açıkça gösterilmiştir.

Sayısal modelin daha da geliştirilmesi amacıyla, farklı ebat ve dizilimlere sahip kompozit laminatlardaki hasar oluşum süreçleri incelenecektir. Bu amaçla, kompozit kirişlerin ve

plakaların düşük hızlı darbe testi üzerine deneysel bir program geliştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, darbe hasarını test kuponlarının geometrisinden ve malzemesinden bağımsız olarak yüksek kalitede öngörebilen bir sayısal model ile sanal bir test düzeneğinin oluşturulması hedeflenmektedir.

4. TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışmayı destekleyen Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. ve ODTÜ – Rüzgâr Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi'ne (RÜZGEM) teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- [1] Ullah, H., and Silberschmidt, V. V., "Analysis of impact induced damage in composites for wind turbine blades," In Power Generation System and Renewable Energy Technologies (PGSRET). Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 2015.
- [2] Verma, A. S., Vedvik, N. P., & Gao, Z., "Numerical assessment of wind turbine blade damage due to contact/impact with tower during installation," In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 276, IOP Publishing.
- [3] Verma, A. S., Jiang, Z., Vedvik, N. P., Gao, Z., & Ren, Z., "Impact assessment of a wind turbine blade root during an offshore mating process," *Engineering Structures*, Vol. 180, 2019, pp. 205-222.
- [4] Choi, H. Y., Downs, R. J., and Chang, F. K., "A new approach toward understanding damage mechanisms and mechanics of laminated composites due to low-velocity impact: Part I—experiments," *Journal of Composite Materials*, Vol. 25, (8), 1991, pp. 992-1011.
- [5] Rechak, S., and Sun, C. T., "Optimal use of adhesive layers in reducing impact damage in composite laminates," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 9, (6), 1990, pp. 569-582.
- [6] Lopes, C., Gurdal, Z., Camanho, P., Maimi, P., and Gonzalez, E., "Simulation of low-velocity impact damage on composite laminates," 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 17th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference, California, May 2009.
- [7] Lopes, C. S., Camanho, P. P., Gürdal, Z., Maimí, P., and González, E. V., "Low-velocity impact damage on dispersed stacking sequence laminates. Part II: Numerical simulations," *Composites Science and Technology*, Vol. 69, (7-8), 2009, pp. 937-947.
- [8] Lopes, C. S., Sádaba, S. S., Camanho, P. P., and González, C., "Advanced simulation of low velocity impact on fibre reinforced laminates," 4th International Conference on Impact Loading of Lightweight Structures, Cape Town, South Africa, 2014.
- [9] Lopes, C. S., Sádaba, S., González, C., Llorca, J., and Camanho, P. P., "Physically-sound simulation of low-velocity impact on fiber reinforced laminates," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 92, 2016, pp. 3-17.
- [10] González, E. V., Maimí, P., Camanho, P. P., Turon, A., and Mayugo, J. A., "Simulation of drop-weight impact and compression after impact tests on composite laminates," *Composite Structures*, Vol. 94, (11), 2012, pp. 3364-3378.
- [11] Soto, A., González, E. V., Maimí, P., de la Escalera, F. M., de Aja, J. S., and Alvarez, E., "Low velocity impact and compression after impact simulation of thin ply laminates," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 109, 2018, pp. 413-427.
- [12] Topac, O. T., Gozluclu, B., Gurses, E., and Coker, D., "Experimental and computational study of the damage process in CFRP composite beams under low-velocity impact," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 92, 2017, pp. 167-182.
- [13] Maimí, P., Camanho, P. P., Mayugo, J. A., and Dávila, C. G., "A continuum damage model for composite laminates: Part I—Constitutive model," *Mechanics of Materials*, Vol. 39, (10), 2007, pp. 897-908.

- [14] Malvern, L. E., *Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1969.
- [15] Matzenmiller, A., Lubliner, J., and Taylor, R. L., "A constitutive model for anisotropic damage in fiber-composites," *Mechanics of materials*, Vol. 20, (2), 1995, pp. 125-152.
- [16] Hashin, Z., "Failure criteria for unidirectional fiber composites," *Journal of applied mechanics*, Vol. 47, (2), 1980, pp. 329-334.
- [17] Pinho, S. T., Darvizeh, R., Robinson, P., Schuecker, C., and Camanho, P. P., "Material and structural response of polymer-matrix fibre-reinforced composites," *Journal of Composite Materials*, Vol. 46, (19-20), 2012, pp. 2313-2341.
- [18] Pinho, S. T., Davila, C. G., Camanho, P. P., Iannucci, L., and Robinson, P., "Failure models and criteria for FRP under in-plane or three-dimensional stress states including shear non-linearity," NASA/TM-2005-213530, 2005.

ÇOKLU NOKTASAL TOPLAM YARIVARIOGRAM ALANSAL TAHMİN MODELİ GELİŞTİRİLMESİ VE SÖKE RES ÜRETİM VE İŞLETME VERİLERİNE UYGULANMASI

Dr Murat Durak¹ ve Ahmet Duran Şahin²

1: Meteoroloji Mühendisi (md@enermet.com.tr)

2: Prof Dr, İTÜ Meteoroloji Mühendisliği Bölümü (sahind@itu.edu.tr)

ÖZET

Bu makalenin konusu, Aydın İli Söke İlçesinde bulunan 30 MW kurulu güçlü rüzgar elektrik santralının (RES) işletme değişkenlerinin alansal tahmininin çoklu noktasal toplam yarivariogram alansal tahmin yapılmasıdır. Yapılan çalışmada noktasal toplam yarivariogram yöntemi geliştirilerek çoklu noktasal toplam yarivariogram (NTYV) yöntemi önerilmiştir ve incelenen değişkenlerin alansal tahmini yapılmıştır. Söke RES'te 15 adet 2 MW dişli kutulu rüzgar türbini bulunmaktadır. İncelenen ve alansal tahmini yapılan değişkenler, mesafe, rüzgar şiddeti, üretim, jeneratör sıcaklığı ve reaktif güçtür. Santral sahası düz bir ovada bulunduğundan dolayı homojen bir yapıya sahiptir. İncelenen her bir rüzgar türbin verisi %70 eğitim ve %30 test verisine ayrılmış olup; çoklu-NTYV %70'e ait saha katsayılarından elde edilen katsayılar %30 ölçülmüş veri ile edilmiştir. Daha sonra sonuçlar %30 test verisi ile karşılaştırılmıştır. Bulunan sonuçlar tahmin doğruluğunun ölçülmüş değere %90-%95 arasında yaklaştığını göstermiştir. RES projeleri için bulunan verilen tahmin aralığı oldukça iyi bir yaklaşımdır. Geliştirilen çoklu-NTYV yönteminin kıyaslanabilmesi için çoklu-regresyon yöntemi seçilmiştir ve alınan sonuçlar irdelendiğinde; çoklu-NTYV yönteminin daha başarılı sonuç verdiği gözlenmiştir. Aynı süreç 1 aylık veriler de uygulanmış olup önerilen çoklu-NTYV yönteminden daha iyi sonuçlar alınmıştır. Alansal modelleme için bütün değişkenler tek tek çıkarılarak hangi değişkenin alansal modellemeye negatif katkıda bulunduğu anlaşılmaya çalışılmıştır. Söke RES değişken çıkarılarak yapılan alansal modelleme senaryo sonuçları da verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Variogram – Çoklu Noktasal Toplam Yarivariogram – Alansal Tahmin – Rüzgar Elektrik Santrali

1. GİRİŞ

Dünyada 2018 yılı sonu itibarı ile 550.000 MW'a yakın RES kurulu gücü bulunmaktadır. Böyle büyük bir kurulu gücün üretim ve iletim sistem planlaması ve santral değişkenlerinin aralarındaki etkileşim büyük önem arz etmektedir. Alansal modelleme kavramı, jeostatistik uygulamalarda çok kullanılsa da; son yıllarda meteoroloji biliminde kullanımı gittikçe artmaktadır. Alansal modellemenin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Arazi topoğrafyasını dikkate alması,
- Sahadaki değişkenlerin modelleme sistemine dahil edilmesi,
- Alansal bilgi içermesi ve alansal yoruma izin vermesi,
- Mesafeye bağlı olarak tesir yarıçaplarının hesaplanabilmesi sayılabilir.

Noktasal Toplam Yarivariogram yöntemi (NTYV), Şen [1] tarafından geliştirilmiş bir yöntemdir. Meteorolojide ilk önceleri yağışın alansal modellemesi konusunda çalışılmıştır. Yıllık yağışın alansal modellemesi konusunda en bilinen yöntem Thieses Poligon Yöntemi'dir. Şen [2] tarafından bu yönteme izohiyet yöntemi önerisi getirilmiştir. Şen ve Habib [3] tarafından yağış verilerine uygulanmıştır. Hevesi ve ark. [4], çoklu jeostatistik yöntemlerini yağış hesaplamalarında kullanmışlardır. Şen ve Şahin [5,6] NTYV modelini rüzgar enerjisi alansal tahminleri için kullanmıştır. Hava kirliliği alanında alansal tahmin konularında çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Öztopal [7], İstanbul'un hava kirliliği yarivariogram haritalarını

oluşturmuştur. Öztopal ve Şen [8], NTYV yöntemini kullanarak İstanbul hava kirliliği verilerinin tesir yarıçaplarını hesaplamada kullanmışlardır. Tarawneh ve Şen [9], Ürdün'deki yağışların yarıvarioram tekniği ile alansal modellemesi konusunda çalışmıştır. Rüzgar enerjisi uygulamalarında da alansal modelleme ile ilgili çalışmalar artış göstermektedir. Şahin [10], yaptığı çalışmada NTYV metodolojisine zamanı da katarak alansal-zamansal modelleme gerçekleştirmiştir. Önerdiği bu yöntemleri Türkiye rüzgarlarına uygulayarak çalıştığı meteoroloji istasyonları için alan-zaman modelleri oluşturmuştur. Şahin [10], Trigonometrik Noktasal Toplam Yarıvarioram (TNTYV) yöntemini geliştirmiştir.

2. ÇALIŞMA UYGULAMA ALANI VE İNCELENEN VERİLER

Aydın İli Söke İlçesi Yenidoğan Mevkiinde bulunan 30 MW kurulu güçlü Söke Çatalbük RES projesi verileri üzerinde çalışılmıştır. Toplam 15 adet 2 MW dişli kutulu rüzgar türbini bulunmaktadır. Bu santrale ait yıllık üretim (MWh), türbinler arası mesafe (m), rüzgar şiddeti (m/s), jeneratör sıcaklığı (°C) ve reaktif güç üretimi (MWh) verileri kullanılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Söke Çatalbük RES google earth görünümü.

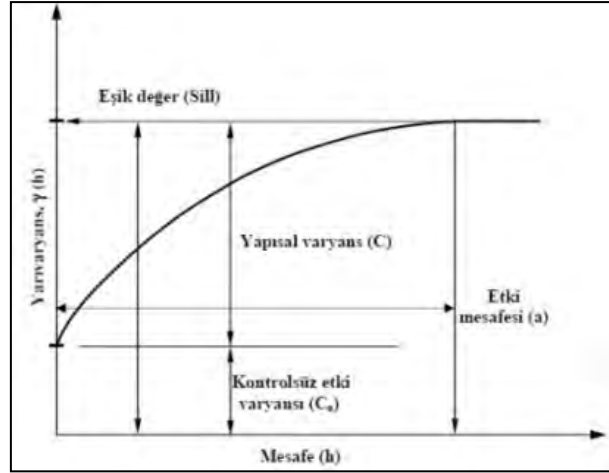
Yukarıdaki bilgiler ışığında incelenen Söke RES verilerine ait özet bilgiler aşağıdaki tabloda görülmektedir. Burada yaklaşık 4 yıllık üretim verilerinin ortalama değerleri görülmektedir. Sahada yıllık 6 m/s civarında rüzgar şiddeti olup Class III rüzgar türbinleri kullanılmıştır. Kullanılan veriler, 01.02.2012 - 31.12.2016 arasını kapsamakta olup toplam 46 aylık veridir.

Tablo 1. Söke RES özet veriler (ortalama değerler).

Türbin No	Mesafe (m)	Rüzgar Hızı (m/s)	Üretim Değeri	Jeneratör Sıcaklığı (C)	Reaktif Güç
T1	0	6,0800	633,880	75,840	29,460
T2	602	5,8100	551,360	73,320	33,780
T3	529	6,0600	620,330	76,460	28,770
T4	576	5,8600	577,300	74,460	37,460
T5	1060	6,0200	624,750	76,170	35,140
T6	946	5,8400	555,600	74,610	38,740
T7	1550	6,3200	648,860	79,200	37,700
T8	1398	5,8400	546,140	74,770	38,500
T9	1865	5,7800	549,320	75,530	35,090
T10	2086	5,9400	581,090	77,830	39,410
T11	2505	6,0000	578,540	76,390	35,810
T12	2350	5,6400	517,350	75,210	33,390
T13	2716	5,5700	516,540	74,500	29,720
T14	2888	5,7500	542,360	74,710	34,260
T15	3208	5,7800	530,230	73,790	32,640

3. YARIVARIOGRAM KAVRAMI

Yarıvariogram, incelenen değişkenin konumsal veya alansal (spatial) bağımlılığının derecesini yani noktalar arasındaki alansal bağımlılığı belirlemek için uygulanan bir analiz yöntemidir. Son yıllarda artan bir şekilde kullanılmaktadır [11]. İdeal bir yarıvariograma ait özellikler ve parametreleri aşağıdaki Şekil 2 ile görülmektedir.



Şekil 2. Yarıvariogram parametreleri.

Yarıvariogram grafiğinde, değişimin bittiği veya sabit olarak gittiği noktanın y eksenini kestiği yer eşik (sill) olarak adlandırılır. Aslında sill kavramı, y ekseninde variogramın aldığı maksimum değerdir [12]. Etki mesafesi (range, a), yarıvariogramın tepe noktasına (sill) ulaştığı “h” uzaklığıdır. Variogram değerleri, belirli bir alansal aralıktan sonra (lag mesafesi) artık değişmemeye başlar yani incelenen veriler arasında artık bir korelasyon yoktur. Variogramın yatay eksenindeki bu değer aralık (range) olarak tanımlanır. Örnekler arasında bu mesafeye kadar olan uzaklıklarda örnekler arasında bir ilişkinin (korelasyon) olduğu (birbirlerini tanımlayıcı) ve aralarında bu mesafeden daha fazla mesafe olan örneklerin birbirleri ile ilişkili olmadığı kabul edilir.

3.1 Değişkenlerin Alansal Dağılımı

Alansal dağılım veya uzaysal değişkenlik, alan değişkenlerinin temel bir özelliği olup teknik bilimlerde önemli bir yer tutar [13]. Konu ile ilgili yapılan ilk çalışmalar Matheron [14, 15] tarafından yapılmıştır. Jeostatistiğin temeli birbirine yakın konumda olan aynı değişkenin büyük bir benzerliğe sahip olduğu ve mesafe olarak uzaklaşıldıkça bu benzerliğin azaldığı ve sonunda biteceği fikrine dayanır. Bu durum olayların alansal ilişki yapısı olarak tarif edilir. Atmosferik olayların incelenmesinde kullanılan yarıvariogram

$$Yh = \sum_{i=1}^{i-n} (X_i - X_{i+h})^2 / 2n \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir. Formülde kullanılan X_i , BD'nin ölçülen değeri; X_{i+h} ise h mesafe sonraki değişkenin ölçülmüş değerini ifade etmektedir [16]. Böylelikle, h aralığındaki noktalar arasındaki değişken farklarının karelerinin toplamı alınmış olmaktadır. Nokta sayısı n olmak üzere karşılaştırılan noktaların sayısı ise n-h olmaktadır. Yukarıdaki formülden de görüleceği gibi örnek noktalar arasındaki mesafelerin sıfır ise, aslında her noktadaki değer kendisiyle karşılaştırılıyor demektir. Böylece, bütün farklar ve yarıvariogram değeri de sıfır olacaktır.

3.2 Noktasal Toplam Yarıvariogram (NTYV)

Yarıvariogramın en önemli kabullerinin başında durağanlık ve eşit mesafelere bağlı olarak alan ilişkisi gelmektedir. Burada noktasal bir ilişkiden daha çok düzgün dağılım gösteren alansal ilişkiye bakılmaktadır. Durağanlığın bulunmaması durumunda rastgele dağılı noktalar arasındaki ilişkide yarıvariogram yaklaşımı doğru sonuçlar vermemektedir. Bu hususun aşılabilmesi için Şen [1] tarafından yapılan çalışmada noktasal toplam yarıvariogram (NTYV) metodu, incelenen değişkenin durağanlığının bulunmaması ve incelenen noktaların rastgele dağılı olmasına göre nokta ile alan arasında ilişki geliştirmiştir. Kullanılan hesaplama ve kabullerin variogram temeline dayandığı NTYV, daha çok yer bilimleri çalışmalarında kullanılmış ve yine Şen [2] tarafından hava kirliliği konusunda çalışılarak atmosfer bilimlerine uygulanmıştır. X_r , referans noktası ve, $h_1, \dots, h_n$ bu referans noktası ile diğer noktalar arasındaki mesafeler olmak üzere değişim karesinin beklenen değeri,

$$E[(X_r - X_{hi})^2] \geq 0 \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

ve yarıvariogram da

$$Y(h_i) = \frac{1}{2(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_r - X_{hi})^2 \quad (3)$$

olarak yazılabilir. Mesafe ve NTYV değerlerinin birlikte kullanımına imkan tanımak ve karelerden dolayı büyük değerler alan NTYV değerlerini 0-1 arasına taşıyabilmek için verinin özellikleri aynen korunacak şekilde standartlaştırma yapılmalıdır. Standartlaştırma yapılırken için her iki veri grubunun her birisinin en büyük değerine bölünebilir. $y(h_n)$ de en büyük yarıvariogram ve h_n , ise en büyük mesafe değeri olmak üzere;

$$y_{st}(h_i) = \frac{y(h_i)}{y(h_n)} \quad i = 1, \dots, n \quad (4)$$

boyutsuz büyüklükleri tanımlanır. Bu hesaplamalarda kendisine yakın noktalarda tesir katsayısı azalacak ve en sonunda sıfır olacaktır. Bütün mesafeler gözönünde bulundurulduğunda ise, standart alan bağımlılık (SAB) fonksiyonu bulunacaktır. Tesir katsayısı w_i olmak üzere

$$(SAB)_i = w(h_{st,i}) = 1 - y_{st}(h_i) \quad (5)$$

ve bu durumda $0 \leq (SAB)_i = w(h_{st,i}) \leq 1$ olacaktır. Alan tahmin hesaplamalarında ise tesir katsayılarının veri ile beraber mesafeye bağlı olarak oluşturdukları ağırlıklı ortalamalar kullanılmaktadır. Dolayısı ile tahminlerin yapılabilmesi için;

$$A = w(h_{st,1}) + w(h_{st,2}) + \dots + w(h_{st,n}) \quad (6)$$

$$X_T = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n X_i w(h_{st,i}) \quad (7)$$

değerlerini bulunması gerekmektedir. A, tesir katsayılarının ağırlıklı ortalamaya etkisini temsil ederken, X_T ise sonuç olarak alan esaslı ağırlıklı ortalama tahmin değerini vermektedir. NTYV sürecinden sonra aşağıdaki adımlar izlenerek standartlaştırılma sağlanmıştır.

$$y_{st}(h_i) = \frac{y(h_i)}{y(h_n)} \quad i = 1, \dots, n \quad (8)$$

$$h_{st,i} = \frac{h_i}{h_n} \quad i = 1, \dots, n \quad (9)$$

$$(SBK)_i = w(h_{st,i}) = 1 - y_{st}(h_i) \quad (10)$$

Şimdiye kadar anlatılanları özetlemek gerekir ise noktasal toplam yarıvariogramın (NTYV) hesaplanabilmesi için aşağıdaki adımların izlenmesi gerekmektedir;

- i- Referans bir nokta seçilmeli ve seçilen bu nokta ile diğer noktalar arasındaki mesafeler hesaplanmalıdır. Eğer, n tane nokta varsa, mesafe sayısı da n-1 tane olacaktır. Bu noktalar küçükten büyüğe doğru sıralanmalıdır,
- ii- Seçilen referans nokta ile diğer noktalar arasındaki değerlerin farklarının karelerinin ardışık toplamalarının alınması ve yarıvariogram olabilmesi için her değer yarıya bölünmesi gerekir,
- iii- Herbir noktanın mesafe değerlerine (X ekseninde) karşılık gelen NTYV değerleri Y ekseninde işaretlenir,
- iv- Elde edilen fonksiyonun X ekseninde mesafeler ve Y ekseninde ise NTYV değerleri hesaplanmış olacaktır. Bunların nokta-alan ilişkilendirme hesaplamalarında kullanabilmek için, her bir noktadaki değerler en büyük değerlere bölünerek standart ve birimsiz hale getirilir.
- v- Objektif analiz yöntemine göre mesafeler arttıkça tesir de azalacaktır. Buna dayanarak standartlaştırılmış değerleri, 1'den çıkarılır ve en büyük değere bölünür ve SAB fonksiyonu bulunmuş olunur.
- vi- İncelenen her nokta için bulunan SAB fonksiyonunda noktalar arasındaki mesafelere göre ağırlıklı ortalamalar alınır ve alansal tahminler yapılır.

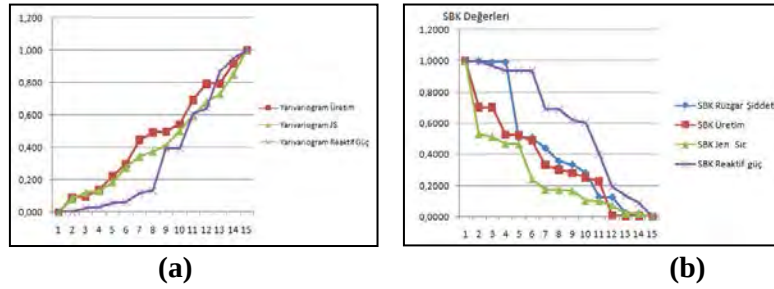
4. ÇOKLU NOKTASAL TOPLAM YARIVARIOGRAM UYGULAMASI

Tablo 2 ile yukarıda anlatılan süreç, Söke RES projesinde rastgele seçilen 10 nolu rüzgar türbinine ait rüzgar şiddeti değişkeninin NTYV ve standartlaştırma süreci ve değerleri görülmektedir.

Tablo 2. Söke 10 nolu rüzgar türbinine ait değerler rüzgar şiddeti yarıvariogram ve standartlaştırma süreci.

Türbin No	Mesafe (m)	Rüzgar Şiddeti (m/s)	Variogram Değerleri	Ardışık Toplama	Yarıvario. Değerleri	Standart Yarıvario.	Standart Mesafe	Alan Bağımlı Katsayısı	Standart RŞ Değeri
T10	0	5,895	0,0000	0,0000	0,0000	0,000	0,000	1,000	0,942
T11	425	5,951	0,0031	0,0031	0,0016	0,006	0,194	0,994	0,951
T12	451	5,600	0,0870	0,0902	0,0451	0,170	0,206	0,830	0,895
T9	465	5,748	0,0216	0,1118	0,0559	0,211	0,213	0,789	0,918
T7	563	6,260	0,1332	0,2450	0,1225	0,462	0,258	0,538	1,000
T8	721	5,760	0,0182	0,2632	0,1316	0,496	0,330	0,504	0,920
T14	852	5,697	0,0392	0,3024	0,1512	0,570	0,390	0,430	0,910
T13	869	5,517	0,1429	0,4453	0,2227	0,839	0,398	0,161	0,881
T5	1069	5,910	0,0002	0,4455	0,2228	0,840	0,489	0,160	0,944
T15	1159	5,773	0,0149	0,4604	0,2302	0,868	0,530	0,132	0,922
T6	1325	5,750	0,0210	0,4814	0,2407	0,908	0,606	0,092	0,919
T3	1560	5,970	0,0056	0,4871	0,2435	0,918	0,714	0,082	0,954
T4	1705	5,790	0,0110	0,4981	0,2490	0,939	0,780	0,061	0,925
T1	2086	5,967	0,0052	0,5033	0,2516	0,949	0,954	0,051	0,953
T2	2186	5,730	0,0272	0,5305	0,2653	1,000	1,000	0,000	0,915

Burada öncelikle türbinler mesafelere göre yakından uzağa şekilde dizilmiştir. Bütün diğer rüzgar türbinlerine ait rüzgar şiddeti değerleri, 10 nolu rüzgar türbininden çıkarılarak karesi alınarak variogram değerleri hesaplanmıştır. Sonraki adımda variogram değerlerinin ardışık toplamı hesaplanmıştır. Ardışık toplamın yarısı alınarak NTYV süreci bitirilmiştir. Tablo incelendiğinde her bir türbine ait farklı rüzgar şiddeti değerleri görülmektedir. Doğal olarak her bir türbinde, rüzgar şiddeti, jeneratör sıcaklığı, reaktif güç vb gibi değerler Micrositinge bağlı olarak değişiklikler gösterecektir. İncelenen RT10'dan uzaklaştıkça yarıvariogram değerleri de artış göstermektedir. Yarıvariogram değerleri, ardışık toplamın yarısı alındığından dolayı, sonuçların böyle çıkması doğaldır. Mesafe arttıkça 10 nolu rüzgar türbininin uzak mesafelerdeki türbinlere olan etkisinin azaldığı görülmektedir. NTYV süreci tamamlandıktan sonra verilerin ve yarıvariogram değerlerinin standartlaştırılması işlemine geçilmiştir. Burada incelenen rüzgar türbinine ait mesafe, alan bağımlılık katsayısı incelenen değişken (bu örnekte rüzgar şiddeti) ve NTYV değerleri standart hale getirilmiştir. Standartlaştırma sürecinde ölçülen değişken ve hesaplanan değerlerin, en yüksek değerine bölünmüştür. Alan bağımlılık katsayısı ise, 1 değerinden standart NTYV değerlerinin çıkarılması ile elde edilmiştir. Aşağıda verilen Şekil 3a ile Söke RES T7'e ait üretim, reaktif güç ve jeneratör sıcaklığının mesafe arasındaki yarıvariogram grafiği görülmektedir. Tipik bir yarıvariogram grafiği olup değişkenler arasında doğrusal bir ilişki olduğunu göstermektedir. Mesafe arttıkça etki azalmaktadır. Yani incelenen 7 nolu rüzgar türbininin üretim, reaktif güç ve jeneratör sıcaklığının diğer türbinlere etkisi, türbinler arasındaki mesafe arttıkça azalmaktadır. Söke RES T7'e ait rüzgar şiddeti ve üretim değişkenlerinin aynı grafik üzerinde gösterildiği Şekil 3b ile incelendiğinde, mesafe arttıkça her iki değişken için olarak alan bağımlılık katsayısının azaldığı görülmektedir.

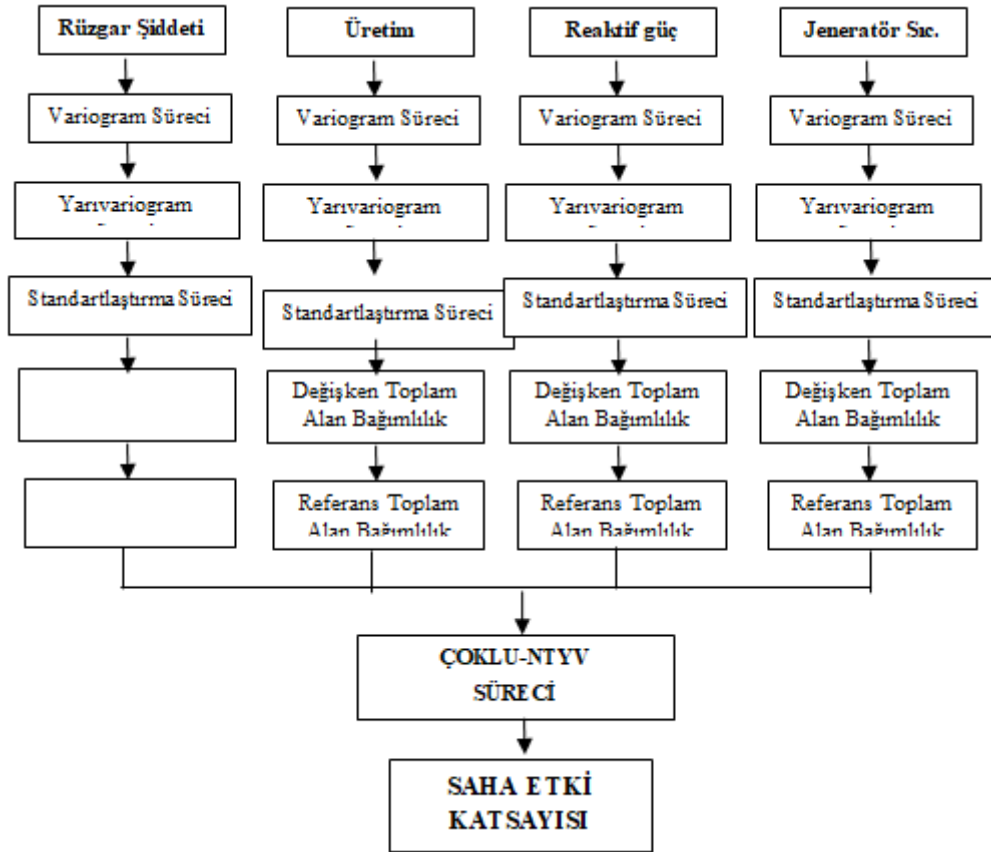


Şekil 3. Söke RES T7'e ait yarıvariogram grafiği.

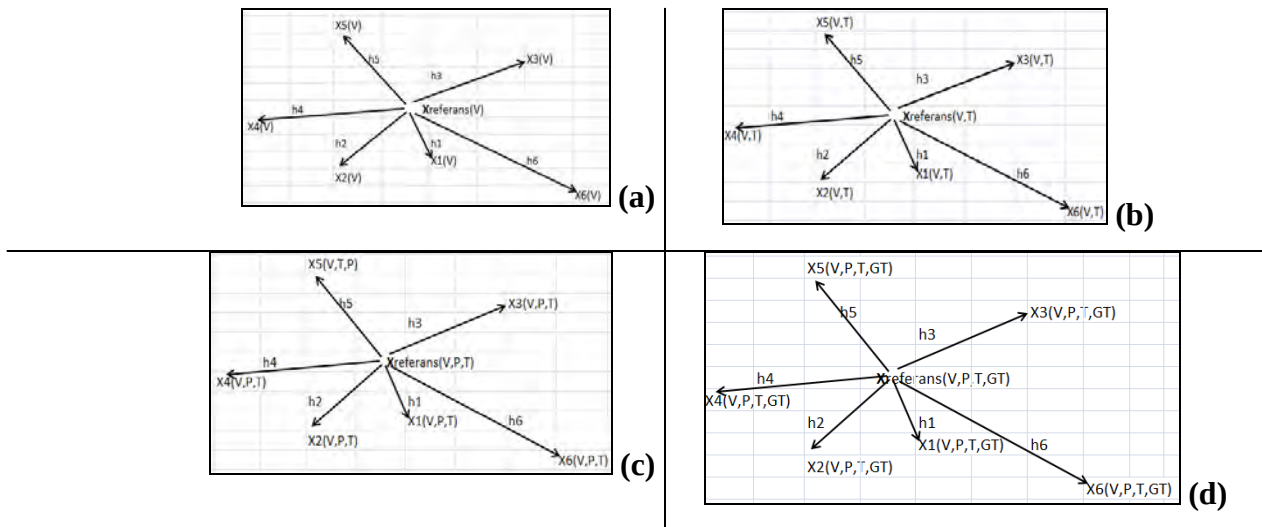
Çoklu-NTYV yönteminin ana amacı, incelenen bütün değişkenlerin kullanılarak alansal etki katsayısı geliştirilmesidir. NTYV iki nokta arasındaki ilişkiyi baz aldığından arazinin topoğrafik özellikleri hesaba katılmamaktadır. Çoklu-NTYV ile incelenen bütün değişkenler hesaba katıldığından sahanın topoğrafyası da hesaplamalara dahil edilmektedir. Yani incelenen değişken için sahayı temsil eden bir katsayı geliştirilmektedir. Aslında bulunan bu etki katsayısı, incelenen değişken için alansal tahmin katsayısıdır. İncelenen değişken için alan bağımlılık katsayısı ve incelenen değişkenin standartlaştırılmış değeri çarpılarak alan bağımlılık toplamına bölünmüştür. İncelenen rüzgar türbini için toplam alandaki diğer değişkenlerin etkisi hesaplanmış ve “**Saha Etki Katsayısı (SEK)**” bulunmuştur [18]. Çoklu-NTYV yöntemi ile yeni bir alansal tahmin yöntemi geliştirilmeye çalışılmıştır. Yani, her bir türbin ve incelenen değişken için alandaki bütün değişkenlerin de hesaba katıldığı bir “Saha Etki Katsayı” geliştirilmiştir. Şekil 4'te rüzgar şiddeti için SEK değeri adımlarını göstermektedir.

Çoklu-NTYV simülasyon için ise, bütün veri noktalarını ve mesafelerini göstererek simüle edilmeye çalışıldığı Şekil 5 incelenmelidir. Şekil 5 tek değişkenli NTYV sürecinde çoklu-NTYV sürecine geçişin aşamalarını göstermektedir. Burada X referans alınan veri noktası olmak üzere X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 ve X_6 ; referans veriden h_1, h_2, h_3, h_4, h_5 ve h_6 mesafede (yakından uzağa doğru) olan değişkenlerdir. Ayrıca, veri noktalarının alt indislerinde yer alan V, P, GT, RP sırası ile rüzgar şiddeti, üretim, jeneratör sıcaklığı ve reaktif gücü ifade ettiğini varsayalım. Şekil 5a'da görülen rüzgar şiddeti değişkeni NTYV uygulamasını anlatmaktadır. Burada iki değişken arasında bir ilişki kurulmaya çalışılmıştır; yani normal NTYV süreci görülmektedir. Şekil 5b'de rüzgar şiddeti ve sıcaklık dahil edilerek alanda iki değişkenli yani

çoklu-NTYV tekniği kullanılmaya başlanmıştır. Şekil 5c'de rüzgar şiddeti, sıcaklık ve üretim değişkenleri eklenerek 3 değişkenli çoklu-NTYV çalışması yapılmıştır. Değişken sayısı artırılarak incelenen alan daha da iyi temsil edilmektedir. Şekil 5d'de ise, rüzgar şiddeti, sıcaklık, üretim ve jeneratör sıcaklığını da içeren 4 değişkenli çoklu-NTYV sürecini göstermektedir. Şekil 5d'de sahadaki bütün değişkenler hesaplamalara dahil edilerek; hem alansal tahmin doğruluğu artırılmakta; hem de sistemdeki bütün çıktı verileri sisteme için girdi verisi olarak kullanılmaktadır. Grafiklerin büyüklükleri değişken sayısını şematize etmek için değişik yapılmıştır.



Şekil 4. Rüzgar şiddeti için çoklu-NTYV süreci basitleştirilmiş diyagramı.



Şekil 6. NTYV sürecinden çoklu-NTYV sürecine geçiş.

Tüm bu süreç uygulandığında çoklu-NTYV yöntemi ile sahadaki bütün standartlaştırılmış değişkenler; bir nevi aynı sahada üst üste çakıştırılmış değişken tabakaları gibi düşünülebilir. Şekil 5a'da NTYV yöntemi ile alanı temsil eden ağırlık sayısı 4 iken; önerilen Şekil 4d ile gösterilen çoklu-NTYV yöntemi ile sahayı temsil eden ağırlık sayısı 20'ye çıkmaktadır. İncelenen alan, daha iyi temsil edilebilme imkanına kavuşarak yüksek doğrulukta alansal tahmin edilebilme imkanı mümkün olmaktadır. Yukarıda izah edilen çoklu-NTYV sürecinin teorik-matematiksel ifadesi ilerleyen sayfalarda verilmiştir. Yapılan ilk işlem, incelenen değişkenlere yarıvariogram sürecinin uygulanmasıdır. Çoklu-NTYV sürecine geçilebilmesi için incelenen türbinlerin objektif analiz katsayıları (standartlaştırılmış değerler) hesaplanmıştır. İncelenen rüzgar türbinindeki değişkene diğer değişkenlerin etkisinin bulunması amacı ile standart alan bağımlılık ve standartlaştırılmış değerlerinin toplamı bulunmuştur. İncelenen verilerin standartlaştırılması için aşağıdaki adımlar takip edilmiştir. İlk olarak verilere Eşitlik (1) ile Eşitlik (10) arasındaki süreç uygulanmıştır.

İncelenen değişkenin toplam alan bağımlılık katsayısının hesaba katılmadığı **Referans Saha Bağımlılık Katsayısı** (SBK_{referans}) hesaplanmıştır. Örnek olarak Eşitlik 11, referans olarak rüzgar şiddeti değişkeninin (V) hesaba katılmadığı eşitliği göstermektedir:

$$SBK_{\text{referans}} = (SBK)_T + (SBK)_P + (SBK)_{GT} + (SBK)_{VB} + (SBK)_{RP} \quad (11)$$

Yukarıda eşitlikte verilen formüllerle incelenen her bir değişken için standartlaştırılmış değerler edilmiştir. Bütün değişkenlere ait SBK katsayıları toplanarak **Toplam Alan Bağımlılık Katsayısı (TAK)** bulunmuştur. Burada incelenen değişkenin de **Saha Bağımlılık Katsayısı (SBK)** eklenmiştir. TAK_{ref} ile ise, incelenen değişkenin Saha Bağımlılık Katsayısının dahil edilmediği Referans Toplam Alan Bağımlılık Katsayısı hesaplanmıştır.

$$TAK_{\text{ref}} = \sum_{i=1}^n (SBK) di \quad (12)$$

Bulunan bu değerlerden sonra Saha Etki Katsayısı (SEK) hesaplamasına geçilmiştir. SEK için aşağıdaki hesaplamalar yapılmaktadır. İzleyen sayfalarda yukarıda açıklanan sürecin matematiksel altyapısı verilmiştir. Aşağıdaki Denklem 13, rüzgar şiddeti (V) değişkeni için verilmiştir.

$$\begin{aligned} SEK_V = & \left\{ \left(\sum_{i=1}^n (T) i * \frac{\sum_{i=1}^n (SBK) Ti}{\sum_{i=1}^n (TAK_{\text{ref}} V) i} \right) + \left\{ \left(\sum_{i=1}^n (P) i * \frac{\sum_{i=1}^n (SBK) Pi}{\sum_{i=1}^n (TAK_{\text{ref}} V) i} \right) \right. \right. \\ & + \left\{ \left(\sum_{i=1}^n (GT) i * \frac{\sum_{i=1}^n (SBK) GT i}{\sum_{i=1}^n (TAK_{\text{ref}} V) i} \right) + \left\{ \left(\sum_{i=1}^n (VB) i * \frac{\sum_{i=1}^n (SBK) VB i}{\sum_{i=1}^n (TAK_{\text{ref}} V) i} \right) \right. \right. \\ & \left. \left. + \left\{ \left(\sum_{i=1}^n (RP) i * \frac{\sum_{i=1}^n (SBK) RP i}{\sum_{i=1}^n (TAK_{\text{ref}} V) i} \right) \right\} \right\} \right\} \quad (13) \end{aligned}$$

Denklem 14 ile üretim (P) değişkeni için denklem görülmektedir.

$$\begin{aligned} SEK_P = & \left\{ \left(\sum_{i=1}^n (V) i * \frac{\sum_{i=1}^n (SBK) Vi}{\sum_{i=1}^n (TAK_{\text{ref}} T) i} \right) + \left\{ \left(\sum_{i=1}^n (T) i * \frac{\sum_{i=1}^n (SBK) Ti}{\sum_{i=1}^n (TAK_{\text{ref}} T) i} \right) \right. \right. \\ & + \left\{ \left(\sum_{i=1}^n (GT) i * \frac{\sum_{i=1}^n (SBK) GT i}{\sum_{i=1}^n (TAK_{\text{ref}} T) i} \right) + \left\{ \left(\sum_{i=1}^n (VB) i * \frac{\sum_{i=1}^n (SBK) VB i}{\sum_{i=1}^n (TAK_{\text{ref}} T) i} \right) \right. \right. \\ & \left. \left. + \left\{ \left(\sum_{i=1}^n (RP) i * \frac{\sum_{i=1}^n (SBK) RP i}{\sum_{i=1}^n (TAK_{\text{ref}} T) i} \right) \right\} \right\} \right\} \quad (14) \end{aligned}$$

Jeneratör sıcaklığı ve reaktif güç için de aynı mantıkla hesaplamalar yapılmıştır.

4.1 Eğitim ve Test Verisi

Önerilen çoklu-NTYV alansal tahmin modelinin çalıştırılması için veri setlerinin eğitim ve test sürecine geçilmiştir. Bu aşamada Söke RES'te bulunan rüzgar türbinlerine ait verilerin, %70'i eğitim ve %30'u test için ikiye ayrılmıştır. %70 eğitim verisinden elde edilen SEK ile %30 test verisi ölçülmüş değerleri çarpılarak alansal tahmin sonuçları bulunmuş olunacaktır.

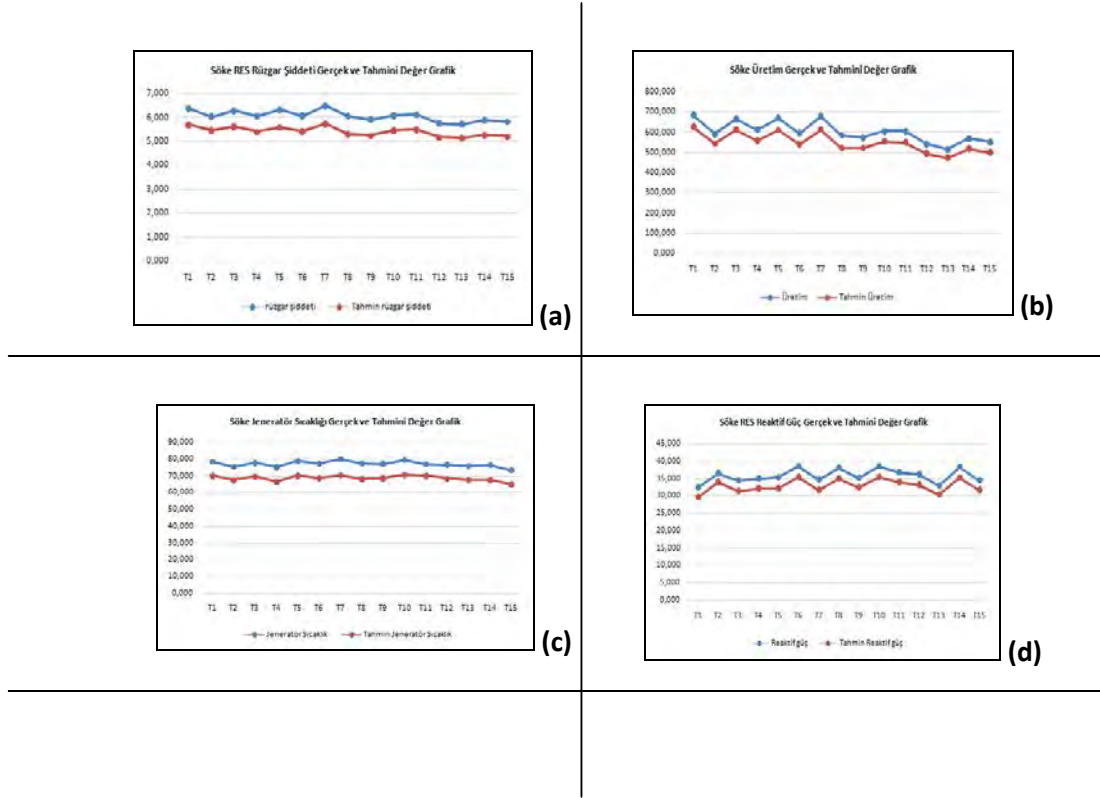
4.2 Çoklu-NTYV Alansal Tahmin Uygulama Sonuçları

Çoklu-NTYV tekniği geliştirildikten sonra incelenen parametrelerin ve RES'ten değişkenlerin alansal tahmininin yapılması sürecine geçilmiştir. Burada %70 eğitim verisine çoklu-NTYV yöntemi uygulanmış ve alansal tahmin katsayıları her bir değişken için ayrı ayrı bulunmuştur. %70 eğitim verisine uygulanan çoklu-NTYV sonuçlarından sonra elde edilen SEK (yani alansal tahmin katsayıları) görülmektedir Tablo 3 ile görülmektedir.

Tablo 3. Söke RES çoklu-NTYV tahmin katsayıları.

Türbin No	Rüzgar şiddeti	Üretim	Jeneratör Sıcaklık	Reaktif Güç
T1	0,893	0,916	0,891	0,912
T2	0,904	0,920	0,895	0,925
T3	0,896	0,919	0,894	0,913
T4	0,893	0,912	0,888	0,918
T5	0,886	0,911	0,888	0,909
T6	0,892	0,908	0,886	0,923
T7	0,887	0,904	0,879	0,914
T8	0,879	0,891	0,877	0,917
T9	0,889	0,909	0,892	0,918
T10	0,900	0,913	0,888	0,921
T11	0,896	0,909	0,909	0,921
T12	0,896	0,914	0,892	0,919
T13	0,900	0,919	0,896	0,920
T14	0,894	0,917	0,890	0,917
T15	0,895	0,912	0,889	0,916

Burada görülen katsayılar %70 eğitim verisinden elde edilmiştir. İncelenen Söke RES projesindeki türbinlere ait her bir değişken için çoklu-NTYV yöntemi ile hesaplanmış münhasır SEK değerleri bulunmuştur. Bulunan SEK değerleri %30 test verisi ile çarpılarak alansal tahminler elde edilmiştir. Gerçek (ölçülmüş) değerler ile kıyaslandığında geliştirilen çoklu-NTYV yöntemi ile oldukça iyi bir yaklaşımla alansal tahminler yapıldığı görülmüştür. Alansal tahmin aralığının %90 ile %95 başarı aralığında değiştiği görülmektedir. Yapılan alansal tahminler gerek RES üretim açısından ve gerekse de incelenen diğer değişkenler açısından oldukça başarılıdır. Çoklu-NTYV tekniği kullanılarak alandaki bütün değişkenlerin incelenen değişken üzerine etkisi araştırılmış ve oldukça tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir. Bunun sebepleri arasında proje sahasının ovada bulunması nedeni ile yükseklik farklarının olmaması, rüzgar şiddeti değerlerinin türbinler arasında büyük bir değişim göstermemesi, bölge ikliminin daha belirli ve düzenli bir yapıda olması ve verilerin düzenli bir şekilde kayıpsız olarak toplanmış olması gösterilebilir. Ayrıca Söke RES projesinde rüzgar türbinleri düz bir arazi boyunca yayılmış olduğundan dolayı alansal bağımlılık daha yüksektir. Bu durum alansal tahmin doğruluğunu da etkilemekte olup, yüksek doğrulukta sonuçlara ulaşılmasına neden olmuştur. Şekil 7 ile Söke RES projesine ait tahmin ve ölçülen değerlerin grafiği görülmektedir.

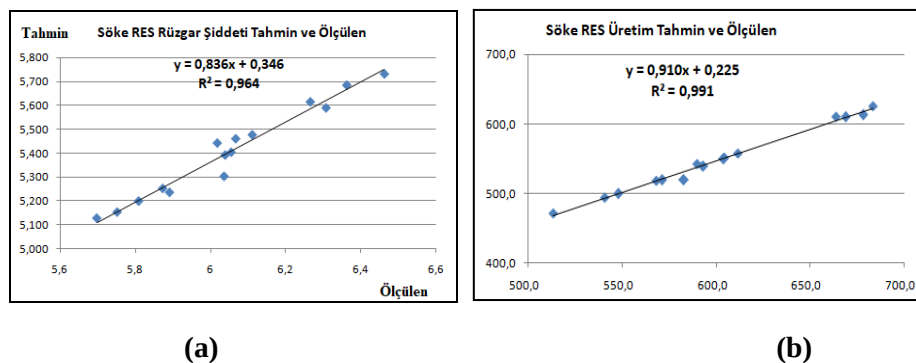


Şekil 7. Söke RES gerçek ve tahmini değerler.

Grafikler incelendiğinde tahmin sonuçlarının gerçek ölçülmüş değerler ile paralel olarak seyrettiği ve %5-%10 arasında daha düşük alansal tahminler yapıldığı görülmektedir. Oluşturulan modelde 1'den çıkarıldığı için ağırlıklar gittikçe azaldığı için alansal model sonuçları daha düşük çıkmaktadır.

4.3 Gerçek ve Tahmin Değerlerinin Saçılma Diyagramı

İncelenen RES projelerinin alansal tahmin ve ölçülen değerlere ait saçılma grafikleri çizdirilmiştir. Belirlilik katsayısı R^2 değerleri de hesaplanarak yorum ve kıyaslama yapılmıştır. Şekil 8'de Söke RES'e ait rüzgâr şiddeti (a) ve üretim (b) tahmin ve ölçülen değerlerin saçılma grafiği verilmiştir. %30 test verisine ait ölçülen rüzgâr şiddeti ile önerilen çoklu-NTYV yöntemi ile elde edilen tahminlerin verildiği saçılma grafiği, denklem ve R^2 (belirlilik katsayısı) değeri görülmektedir.



Şekil 8. Söke RES rüzgâr şiddeti ve üretim tahmin ve ölçülen saçılma grafiği.

4.4 Çoklu-NTYV Modelinin Doğrusal Çoklu-Regresyon Modeli İle Kıyaslanması

Geliştirilen çoklu-NTYV yönteminin test edilmesi amacı için verilere Doğrusal Çoklu-Regresyon yöntemi Söke RES projesine uygulanmıştır.. Söke RES toplam veriye ait çoklu-NTYV ile çoklu-regresyon değerleri Tablo 4'te görülmektedir. Söke RES projesinde yükseklik farkları olmadığından dolayı gerek çoklu-NTYV ve gerekse de çoklu regresyon modelinde çok iyi sonuçlar alınmıştır. Yarıvariogram sürecinin en önemli özelliklerinden birisi Söke RES projesinde karşımıza çıkmaktadır. Bu durum, tahmin doğruluğunu pozitif olarak etkilemekte olup, yüksek doğrulukta alansal tahmin sonuçlarına ulaşılmasına neden olmuştur. Her iki yöntem kıyaslandığında ise, önerilen çoklu-NTYV yönteminin daha başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. Çoklu-regresyon yönteminde jeneratör sıcaklığı ve reaktif güç saçılma grafiklerinin R^2 değerleri diğer değişkenlerden daha düşük çıkmıştır. Ancak üretim ve rüzgar şiddeti değişkenleri her iki yöntem de yüksek tahmin doğruluğuna sahip olup yüksek R^2 değerleri görülmektedir.

Tablo 4. Söke RES çoklu-NTYV ve çoklu regresyon değerleri.

Santral Adı	Yöntem Adı	Rüzgar Şiddeti	Üretim	Jeneratör Sıcaklığı	Reaktif Güç
Söke RES	Çoklu-NTYV	$y=0,8361x+0,3464$ $R^2 = 0,9641$	$y=0,9108x+0,2251$ $R^2 = 0,9919$	$y=0,7958x+7,2491$ $R^2 = 0,8735$	$y=0,955x-1,3379$ $R^2 = 0,995$
	Çoklu-regresyon	$y=0,899x+0,579$ $R^2 = 0,955$	$y=0,872 +70,30$ $R^2 = 0,848$	$y=0,618x+28,589$ $R^2 = 0,618$	$y=0,2x+27,382$ $R^2 = 0,256$

4.5 Bir Aylık Verilere Ait Uygulama Sonuçları

Daha önce de belirtildiği gibi, önerilen çoklu-NTYV uygulaması yaklaşık 48 aylık verilere uygulanmıştır. Uzun süreli ortalama verilerle çalışmanın yanında kısa süreli ve değişkenliği yüksek veri ile de çalışılarak önerilen yöntem, kısa süreli verilerde de denenmiştir. Söke RES için ise Mayıs 2015 verisi rastgele seçilmiştir. Söke RES üretim ve rüzgar şiddeti yüksek R^2 değerlerine sahipken; jeneratör sıcaklığı ve reaktif güç R^2 değerleri daha düşük olarak hesaplanmıştır. Söke RES Mayıs 2015 tarihine ait 1-aylık verinin çoklu-yarıvariogram ve çoklu-regresyon sonuçları kıyaslama açısından Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Söke RES 1-aylık veri kıyaslama.

Santral Adı	Yöntem Adı	Rüzgar Şiddeti	Üretim	Jeneratör Sıcaklığı	Reaktif Güç
Söke RES	Çoklu-NTYV	$y=0,882x+0,054$ $R^2 = 0,954$	$y=0,975x +41,42$ $R^2 = 0,975$	$y=0,939x+1,69$ $R^2 = 0,986$	$y=0,905x+0,332$ $R^2 = 0,995$
	Çoklu-regresyon	$y=0,842x+0,875$ $R^2 = 0,842$	$y=0,875x +59,59$ $R^2 = 0,829$	$y=0,643x+25,79$ $R^2 = 0,642$	$y=0,565x+9,900$ $R^2 = 0,565$

Toplam veri ve 1-aylık veriler incelendiğinde, toplam veri ile daha iyi tahmin yapabildiği görülmüştür.

4.6 Değişken Çıkarılarak Alansal Modelleme Sonuçları

Önerilen çoklu-NTYV ile ilgili olarak incelenen değişkenlerin çıkarılır ise alansal model tahminin daha iyi yapılabileceği de araştırılmıştır. Buradaki yöntemde incelenen değişkene ait toplam alan bağımlılık ile referans toplam alan bağımlılık değeri ile hesaplamalara dahil edilmeyen değişkenin ilgili belirtilen değerleri hariç bırakılmıştır. Söke RES projesine ait değişkenlerin çıkarılarak hesaplanan çoklu-NTYV sonuçları Tablo 6'da görülmektedir. Rüzgar şiddeti değişkeni çıkarıldığında üretim ve reaktif güç değişkenlerine ait R^2 belirlilik katsayı değerleri %1 civarı azalma gösterirken; jeneratör sıcaklığı %10 civarında düşüş göstermiştir.

Üretim değişkeninin alansal modelleme hesabına katılmadığı durumda rüzgar şiddetinin R^2 belirlilik değeri %4 civarında; jeneratör sıcaklığının ise %3 civarında azalma kaydettiği; reaktif güç değişkeni belirlilik katsayısı R^2 değerinde ise %0.5 artış görülmektedir. Üretim değişkeni çıkarıldığında her 3 değişkenin R^2 değeri düşüş göstermektedir. Reaktif güç değişkeninin hesaplamalardan muaf tutulduğu alansal modelleme senaryo sonuçlarında rüzgar şiddetinin R^2 değeri %2, üretim %2 ve jeneratör sıcaklığı ise %0.5 artış göstermiştir. Reaktif güç çıkarılarak yapılan çoklu-NTYV alansal tahmin hesaplamalarında her 3 değişkenin de R^2 değerinin arttığı görülmektedir. Jeneratör sıcaklığı değişkeninin hesaba katılmadığı durumda R^2 belirlilik değeri rüzgar şiddeti için %1 artış; üretim %1 azalma ve reaktif güç %20 düşüş göstermiştir. Söke RES değişken çıkarılarak yapılan alansal modelleme senaryo sonuçlarına göre reaktif güç çıkarıldığı durumda en yüksek tahmin doğruluğu elde edilmektedir. Üretim değişkeni çıkarıldığında ise, her üç değişkenin de tahmin doğruluğu azalmaktadır.

Tablo 6. Söke RES incelenen değişkenler çıkarılması.

Bütün Değişkenler Çoklu-NTYV Sonuçları		
Rüzgar Şiddeti	Üretim	Jeneratör Sıcaklığı
$y=0,8361x+0,3464$ $R^2 = 0,9641$	$y=0,9108x+0,2251$ $R^2 = 0,991$	$y=0,7958x+7,2491$ $R^2 = 0,8735$
		Reaktif Güç $y=0,955x-1,3379$ $R^2 = 0,995$
Rüzgar Şiddeti Hariç		
Üretim	Jeneratör Sıcaklığı	Reaktif Güç
$y=0,906x+2,301$ $R^2 = 0,987$	$y=0,774x+7,458$ $R^2 = 0,768$	$y=0,967x+2,013$ $R^2 = 0,989$
Üretim Hariç		
Rüzgar Şiddeti	Jeneratör Sıcaklık	Reaktif Güç
$y=0,886x+0,095$ $R^2 = 0,929$	$y=0,837x+4,365$ $R^2 = 0,848$	$y=0,955x-0,557$ $R^2 = 0,998$
Jeneratör Sıcaklığı Hariç		
Rüzgar Şiddeti	Üretim	Reaktif Güç
$y=0,791x+0,469$ $R^2 = 0,978$	$y=0,899x+3,029$ $R^2 = 0,988$	$y=0,768x+4,320$ $R^2 = 0,601$
Reaktif Güç Hariç		
Rüzgar Şiddeti	Jeneratör Sıcaklığı	Üretim
$y=0,835x+0,455$ $R^2 = 0,968$	$y=0,791x+8,778$ $R^2 = 0,863$	$y=0,919x+11,93$ $R^2 = 0,996$

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışma, kendi türünün ilk örneği olma özelliğini taşımaktadır. İşletmede bulunan bir RES projesi verileri kullanılarak çoklu-NTYV uygulaması denenmiştir.

Söke RES'e ait değişkenlerin çoklu-NTYV yöntemi ile incelenen değişkenler arasında ilişki bulunmuştur. Burada yapılmaya çalışılan incelenen bütün değişkenlerin kullanılarak alansal bir katsayı geliştirilmiştir. İncelenen rüzgar türbini için toplam alandaki değişkenlerin etkisi hesaplanmış ve bütün sahayı temsil eden Saha Etki Katsayısı (SEK) bulunmuştur. Bu hesaplamalar, çoklu-NTYV tekniği geliştirilerek yapılmıştır. Yani, her bir türbin ve incelenen değişken için alandaki bütün değişkenlerin de hesaba katıldığı bir SEK geliştirilmiştir ve alansal tahmin için test verisine uygulanmıştır.

Söke RES proje sahasının ovada bulunması nedeni ile yükseklik farklarının olmaması, rüzgar şiddeti değerlerinin türbinler arasında büyük bir değişim göstermemesi, bölge ikliminin daha belirli ve düzenli bir yapıda olması ve verilerin düzenli bir şekilde kayıpsız olarak toplanmış olması gösterilebilir. Ayrıca Söke RES projesinde rüzgar türbinleri düz bir arazi boyunca yayılmış olduğundan dolayı alansal bağımlılık daha yüksek olduğunu hatırlamak lazımdır. Variogram sürecinin en önemli özelliklerinden birisi Söke RES projesinde karşımıza çıkmaktadır. Bu durum, tahmin doğruluğunu pozitif olarak etkilemekte olup, yüksek doğrulukta alansal tahmin sonuçlarına ulaşılmasına neden olmuştur.

İncelenen her bir rüzgar türbin verisi %70 eğitim ve %30 test verisine ayrılmış olup çoklu-NTYV %70'e ait saha katsayılarından %30 ölçülmüş veri ile proses edilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bulunan sonuçlar tahmin doğruluğunun ölçülmüş değere %85-%95 arasında yaklaştığını göstermiştir. RES projeleri için bulunan verilen tahmin aralığı iyi bir yaklaşımdır.

Geliştirilen çoklu-NTYV yönteminin kıyaslanabilmesi için çoklu-regresyon yöntemi seçilmiştir ve alınan sonuçlar irdelendiğinde; çoklu-NTYV yönteminin daha başarılı sonuç verdiği gözlenmiştir.

Uzun veri setinin yanında 1 aylık süre için hem çoklu-NTYV; hem de çoklu-regresyon analizi yapılmıştır. 1 aylık veri ile yapılan modelleme çalışmasının sonuçları irdelendiğinde; yine geliştirilen çoklu-NTYV yönteminden daha iyi tahmin sonuçları verdiği görülmüştür.

Alansal modelleme için bütün değişkenler tek tek çıkarılarak hangi değişkenin alansal modellemeye negatif katkıda bulunduğu anlaşılmaya çalışılmıştır. Söke RES değişken çıkarılarak yapılan alansal modelleme senaryo sonuçlarına göre reaktif güç çıkarıldığı durumda en yüksek tahmin doğruluğu elde edilmektedir. Üretim değişkeni çıkarıldığında ise, her üç değişkenin de tahmin doğruluğu azalmaktadır.

6. KAYNAKLAR

- [1] **Şen Z.**, (1989). Cumulative semivariogram model of regionalized variables. *Int. J. Math. Geol.*, 21, 891.
- [2] **Şen, Z.**, (1995). Regional Air Pollution Assessment by Cumulative Semivariogram, *Atmospheric Environment*, Vol. 29. No.4, pp. 543-548.
- [3] **Şen, Z. and Habib, Z.**, (1998). Point cumulative semivariogram of areal precipitation in mountainous regions. *J. of Hydrology*, 205, pp. 81 -91.
- [4] **Hevesi, J., Flint, A. ve Istock J.** (1992). Precipitation Estimation in Mounatins Terrain Using Multi-Variate Geostatistics: Part 1 and Part 2, *Journal of Applied Meteorology*, 31, 661-668.
- [5] **Şen, Z. and Şahin, A.D.**, (1997). Regional Assessment of Wind Power in Western of Turkey by the Cumulative Semivariogram Method, *Renewable Energy*, 12, 2, 169-177.
- [6] **Şen, Z. and Şahin, A.D.**, (1998). Regional wind energy evaluation in some parts of Turkey. *Journal of Wind Engineering and Indust. Aerody.*, 37, No. 7, pp. 740-741.
- [7] **Öztopal, A.**, (1996). İstanbul İlinin Hava Kirliliği Semivariogram Haritalarının Çıkarılarak Yorumlanması. *Lisans Tezi, İTÜ Meteoroloji Mühendisliği Bölümü*, 72 sayfa.
- [8] **Öztopal, A. ve Şen, Z.**, (1999). İstanbul Hava Kirliliği Verilerinin Tesir Yarıçapları. *Tr. J. of Engineering and Environmental Science* 23. 71 – 81.
- [9] **Tarawneh, Q. ve Şen, Z.** (2003). Ürdün Yağışlarının Yarıvaryogram Modeli, *İTÜ Dergisi*, Cilt 2, Sayı 1, 80-90.
- [10] **Şahin, A.D.**, (2001). Türkiye Rüzgarlarının Alan ve Zaman Modellemesi, *İTÜ Doktora Tezi*.
- [11] **Yünsel, T.Y.**, (2007). Maden Yataklarının Jeostatistiksel Yöntemi İle Analizi ve Modellemesi, *Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi*.

- [12] **Aslantaş, P., Akyürek, Z. ve Heuvelink, G.,** (2015). Yağışın Zaman ve Mekanda Dağılımının Elde Edilmesi VII. Ulusal Hidroloji Kongresi.
- [13] **Cressie, N. A. L.,** (1993). Statistics for Spatial Data. John Willey and Sons, Inc, New York, 898 pp. 374.
- [14] **Matheron G.,** (1965). Les Variables Regionafisee's et leur Estimation, Masson, Paris, 306p.
- [15] **Matheron G.,** (1971). The theory of regionalized variables and its applications. Ecole de Mines, Fontainbleau, France.
- [16] **Davis, J. C.,** (1986). Statistics and Data Analysis in Geology, John Wiley & Sons, Inc., New York, 646 pp.
- [17] **Durak, M.,** (2018). Rüzgar Enerji Santralleri Üretim ve İşletme Değişkenlerinin Çoklu-Yarıvარიogram Yöntemi ile Alansal Tahmini, İTÜ Doktora Tezi.

KOMPOZİT RÜZGAR TÜRBİNİ KANADININ MUKAVEMET ÖZELLİKLERİNİN İLERLEMELİ HASAR ANALİZİ YARDIMIYLA İYİLEŞTİRİLMESİ

Can Muyan¹, Demirkan Çöker²

^{1,2}ODTÜ Rüzgar Enerjisi Araştırma Merkezi, Ankara
^{1,2}ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Ankara
¹can.muyan@metu.edu.tr, ²coker@metu.edu.tr

ÖZET

Rüzgar türbininin ana bileşenleri arasında bulunan kompozit kanatların uzun süreli yapısal bütünlüğü, nihai kırılmalara yol açabilecek hasar mekanizmalarının detaylı araştırılması ve anlaşılmasıyla sağlanabilir. Bu bağlamda, tam ölçekli yapısal testler, çeşitli yükleme koşullarında kanatların mekanik davranışlarını gözlemlememizi sağlar. Ancak bu testler nümerik simülasyonlarla desteklenmelidir, çünkü bu sayede hasar gelişiminin fiziksel nedeni anlaşılabilir. Bu çalışmada, ODTÜ RÜZGEM bünyesinde bulunan 5 metrelik cam elyaf takviyeli polimer rüzgar türbin kanadının sonlu elemanlar modeli ANSYS ACP ortamında oluşturulmuştur. ANSYS APDL kodu aracılığıyla, Puck kriterleri ve elastik özellikleri kötüleştirme kurallarına dayanan kanat ilerlemeli hasar analiz algoritması geliştirilmiştir. Kelebekleme yönündeki eğilme yükü altında gerçekleştirilen tam ölçekli test simülasyonunda rüzgar türbini kanadının kırılmasına neden olabilecek ana hasar mekanizmasının, spar rijitliğinin yetersizliği sonucu hücum ve firar kenarında oluşan yapışkan ayrılması olduğu görülmektedir. Yapılan analiz sonucu daha dayanıklı bir kanat tasarımı için sparın açık şapka şeklindeki kesit konstrüksiyonunun eğilmeye ve burulmaya daha dayanıklı kapalı kutu spar ile değiştirilmesi önerilmektedir.

1. GİRİŞ

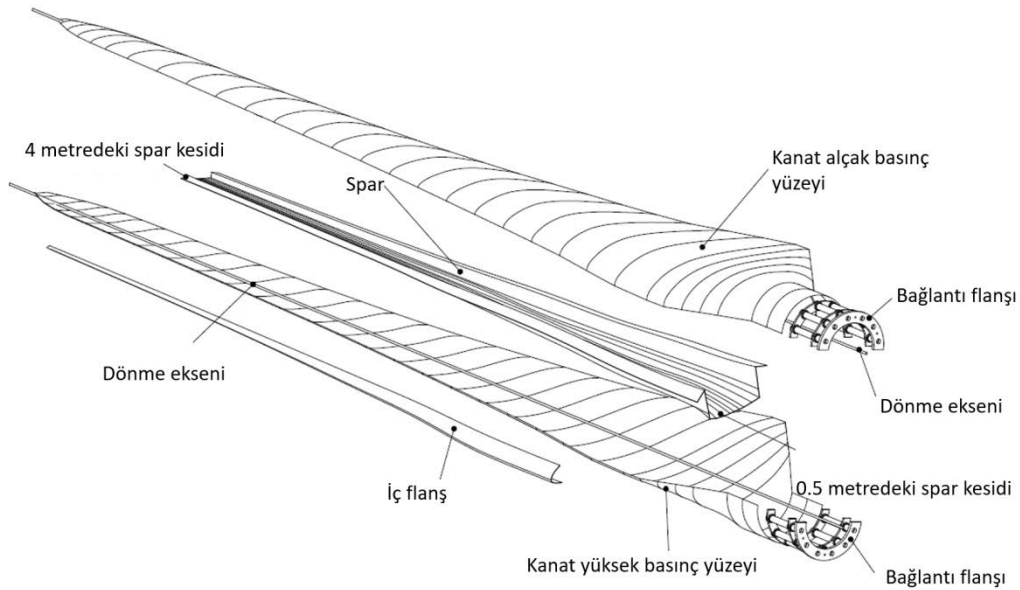
Çevre dostu ve temel yenilenebilir enerji kaynakları arasında olan rüzgar türbinleri, 20 yıllık bir kullanım ömrüne sahip olacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu nedenle, özellikle ulaşımı zor olan bölgelerde çalıştırılması planlanan rüzgar türbini bileşenlerinin yapısal güvenilirliği yüksek üretim, muayene ve onarım maliyetleri göz önüne alındığında önem arz etmektedir [1]. Kompozit kanatlar rüzgar türbinin en kritik bileşenleri arasında olup, karmaşık yüklenme durumlarına maruz kalmaktadırlar. Yeterli mekanik dayanımın sağlanması için kanatlar testlere ve/veya analizlere tabi tutulmaktadırlar. Test metodu, test makinası tasarım ve kurulum zorluğu nedeniyle oldukça maliyetlidir. Bu sebeple, Chen ve diğerleri [2] makalelerinde ilerlemeli hasar mekanizmalarının tespit edilebilmesi ve fiziksel temellerinin doğru anlaşılabilmesi için, test metodunun nümerik analiz ile desteklenmesi gerekliliği vurgulamaktadır. Ayrıca, hasar başlangıç ve nihai kırılma yükü testten önce ilerlemeli hasar modelleri kullanılarak belirlenebilir.

Literatürde kompozit kanatların yapısal davranışlarıyla ilgili pek çok çalışma mevcuttur. Örneğin Fagan ve diğerleri [3] denizaltı gelgit türbin kanadının yapısal analizini yaparken Puck fenomenolojik elyaf ve matris kırılma kriterlerinden faydalanmıştır. Böylece kanadın çeşitli yükleme durumlarında ne kadar hasar göreceğini tahmin edilebilmiştir ve dayanımı hakkına bilgi sahibi olunmuştur. Jensen ve diğerlerinin [4] çalışması 34 metre rüzgar kanadının tam ölçekli testi ve doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi ile ilgilidir. Çalışmada yükleme-deplasman eğrileri çıkartılarak nihai kırılmaya neden olabilecek hasar başlangıç noktaları belirlenmiştir. Test ve simülasyon sonuçları karşılaştırılarak aerodinamik kabukta oluşan delaminasyonun ve devamında oluşan burkulmanın ana hasar mekanizması olduğu belirlenmiştir.

Chen ve diğerleri [2] makalelerinde 52.3 metre rüzgar türbini kanadı tam ölçekli nihai kırılma testinde gözlemlenen sıralı hasar mekanizmalarını kaydettiği video görüntüleri yardımıyla açıklamıştır. Bunun yanı sıra, yeni DNV GL standartları [5] gereği aerodinamik kabukta oluşabilecek delaminasyon veya yapışkan yüzey ayrılması gibi hasarların önceden tespit edilebilmesiyle ilgili yeni bir metodoloji önermişlerdir. Ozyildiz ve diğerlerinin [6] yaptıkları çalışma ilerlemeli hasar analizinin kullanıldığı 5 metrelik RÜZGEM kanadının dayanım analizi ile ilgilidir. Bu çalışmada Puck hasar kriterleri kullanılarak doğrusal ve ilerlemeli hasar analizinin kullanıldığı doğrusal olmayan mukavemet analizleri yapılmıştır. Çalışma ilerlemeli hasar analiz tekniğinin kullanıldığı doğrusal olmayan modelin, doğrusal modele oranla kırılma mekanizmalarını daha gerçekçi gösterdiğini ortaya koymuştur.

Bu çalışmanın ana hedefi kelebekleme yönündeki aşırı yükleme altında gerçekleştirilecek tam ölçekli test sonucu kanadın nihai kırılmasına sebep olabilecek ana kırılma mekanizmasının ve/veya hasar modunun ilerlemeli hasar analizi yardımıyla tespit edilmesidir. Yapılan analiz sonuçlarının incelenmesi sonucunda kırılma başlangıç noktalarının kanadın firar kenarı, iç flanş ve hücum kenarı olduğu belirlenmiştir. Çalışmanın sonucunda kırılma mekanizmaları temel alınarak yapısal olarak daha iyileştirilmiş bir kanat tasarımı önerilmektedir.

İmalatı tamamlanmış olan kanat, RÜZGEM – ODTÜ Rüzgar Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi ile Yunanistan’ın Patras Üniversitesi bünyesinde faaliyet gösteren Core Team tarafından yürütülen proje kapsamında tasarlanmıştır [7]. Kanat 30 kW’lık nominal güce sahip 10 m/s rüzgar hızında çalışacak rüzgar türbini için tasarlanmıştır. Adı geçen kanat Şekil 1’de görüldüğü üzere beş ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlar, kanat alçak basınç yüzeyi, kanat yüksek basınç yüzeyi, iç flanş, şapka şeklindeki keside sahip spar ve bağlantı flanşıdır.



Şekil 1. 5-metre RÜZGEM kanadı montaj şeması [7].

2. METOD

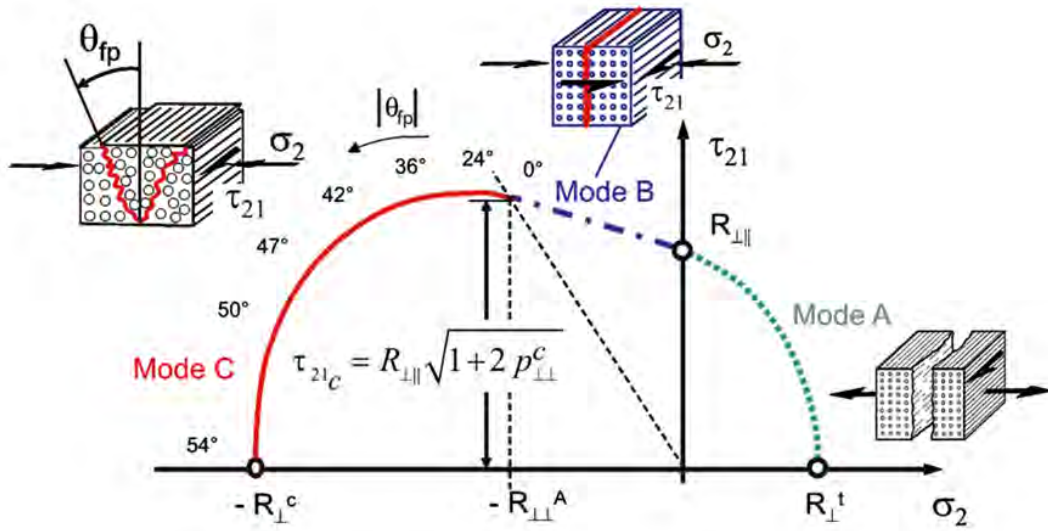
Kanadın ilerlemeli hasar analizi için aşağıda anlatılan Puck hasar kriterleri kullanılmıştır. Puck kriterleri kompozit laminatların mukavemet analizi için yaygın olarak kullanılan ve gelişmiş kriterler arasındadır [8]. Puck teorisi tabakalı laminatların yükleme altında kırılmasıyla ilgili gözlemlere dayanmaktadır. Yaptığı gözlemler sonucu Puck kompozitlerin kırılmasının gevrek malzemelerin kırılmasına benzediği sonucuna varmıştır. Bu sonuç onu Mohr Coulomb’un gevrek malzemeler için geliştirdiği hipoteze yönlendirmiştir ve teorisi bu hipoteze dayanmaktadır. Puck elyaf (FF) ve matris kırılma (IFF) modlarının ayrı ayrı incelenmesi

gerektiği üzerinde durmuştur. Bu durumda elyaf kırılması için aşağıdaki denklemler kullanılmaktadır:

$$f_{E(F)}^T = \frac{\sigma_1}{R_{\square}^t} = 1 \text{ eğer } \sigma_1 > 0 \quad (1)$$

$$f_{E(F)}^C = \frac{\sigma_1}{-R_{\square}^c} = 1 \text{ eğer } \sigma_1 < 0 \quad (2)$$

Yukarıdaki denklemlerde $f_{E(F)}^T$ ve $f_{E(F)}^C$ sırasıyla çeki ve bası gerilmeleri altında hasar indeksi olarak tanımlanmıştır. Değerleri 1'i aştığında hasar meydana geleceği sonucuna varılır. σ_1 elyaf yönündeki gerilme değeridir. $R_{\square}^t$ ve $R_{\square}^c$ ise sırasıyla laminanın elyaf yönündeki çeki ve bası dayanımını gösteren değerlerdir. İki eksenli yükleme durumunda ortaya çıkan kırılma modları aşağıda Şekil 2'de gösterilmiştir:



Şekil 2. İki eksenli yükleme altında kompozit laminada oluşan hasar diyagramı [9].

İki eksenli lamina hasar diyagramında bulunan bölgeye göre hasar indeksini hesaplamak için aşağıda uygun olan denklemlerden biri kullanılır:

$$f_{E(IFF)}^A = \left[\left(\frac{\tau_{21}}{R_{\perp\parallel}} \right)^2 + \left(1 - p_{\perp\parallel}^{(t)} \frac{R_{\perp}^t}{R_{\perp\parallel}} \right)^2 \left(\frac{\sigma_2}{R_{\perp}^t} \right)^2 \right]^{1/2} + p_{\perp\parallel}^{(t)} \frac{\sigma_2}{R_{\perp\parallel}} = 1 \text{ eğer } \sigma_2 \geq 0 \quad (3)$$

$$f_{E(IFF)}^B = \frac{1}{R_{\perp\parallel}} \left\{ \left[(\tau_{21})^2 + (p_{\perp\parallel}^{(c)} \sigma_2)^2 \right]^{1/2} + p_{\perp\parallel}^{(c)} \sigma_2 \right\} = 1 \text{ eğer } \begin{cases} \sigma_2 < 0 \\ \left| \frac{\sigma_2}{\tau_{21}} \right| \leq \frac{R_{\perp}^A}{\tau_{21C}} \end{cases} \quad (4)$$

$$f_{E(IFF)}^C = \left[\left(\frac{\tau_{21}}{2(1 + p_{\perp\parallel}^{(-)}) R_{\perp\parallel}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{R_{\perp}^c} \right)^2 \right] \frac{R_{\perp}^c}{(-\sigma_2)} = 1 \text{ eğer } \begin{cases} \sigma_2 < 0 \\ \left| \frac{\sigma_2}{\tau_{21}} \right| \geq \frac{R_{\perp}^A}{\tau_{21C}} \end{cases} \quad (5)$$

Yukarıdaki denklemlerde $p_{\perp\perp}^{(t)}$, $p_{\perp\perp}^{(c)}$ ve $p_{\perp\perp}^{(c)}$ hasar diyagramında eğimi belirleyen parametrelerdir. σ_2 matris yönündeki gerilme değeri olup, $R_{\perp}^t$ ve $R_{\perp}^c$ sırasıyla laminanın elyafa dik yöndeki çeki ve bası mukavemet değerleridir. Kayma gerilmesi ve kayma mukavemeti sırasıyla τ_{12} ve $R_{\perp}$ ile gösterilmiştir. Eğer hasar endeksi 1'i geçerse hasar meydana gelir. Mod A çeki ve kayma gerilmeleri sonucu oluşan kırılma modudur. Mod B ise bası ve kayma gerilmeleri altında oluşur. Mod C daha ileri derece bası ve kayma gerilmeleri sonucu oluşabilecek tehlikeli bir kırılma modu olup, nihai kırılmayı tetikleyebilir.

İlgili Puck denklemleri kullanılarak tespit edilen kırılma modlarına bağlı uygulanması gereken malzemenin elastik özelliklerini kötüleştirme kuralları aşağıdaki Çizelge 1'de özetlenmiştir. Çizelgede E_2 matris elastisite modülü olup, G_{21} elyaf-matris düzlemindeki kayma modülü ve ν_{21} aynı düzlemdeki Poisson oranıdır.

Çizelge 1. Kırılma moduna bağlı olarak elastik özellikleri kötüleştirme kuralları

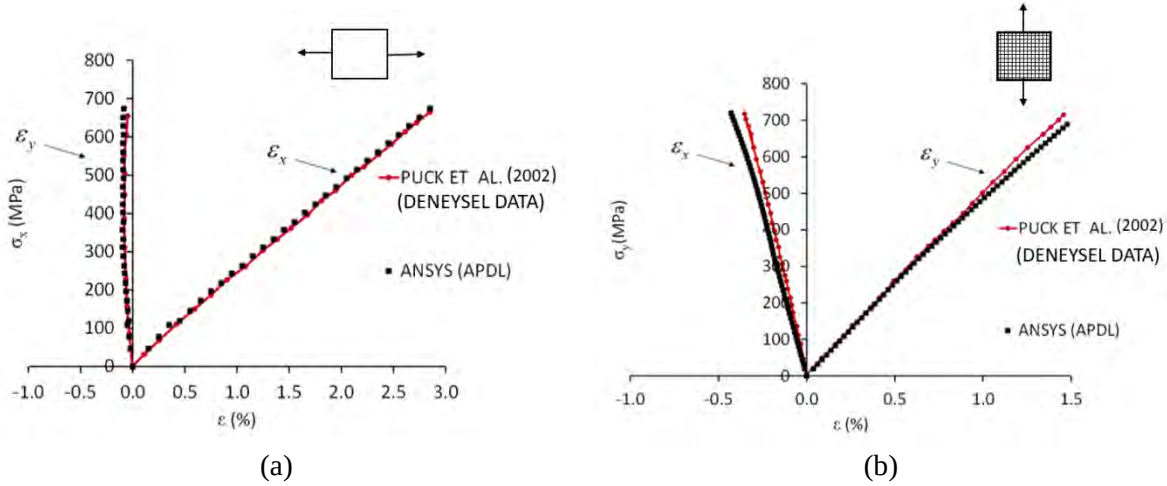
Kırılma Modu	Elastik özellikleri kötüleştirme kuralı
FF (çeki/bası) veya 3 ya da daha fazla lamina görülen IFF(C)	Laminat'ın kırılması
IFF (A)	$E_2 = \eta \cdot E_2$ $G_{21} = \eta \cdot G_{21}$ $\nu_{21} = \eta \cdot \nu_{21}$
IFF (B)	$E_2 = \eta \cdot E_2$ $G_{21} = \eta \cdot G_{21}$ $\nu_{21} = \eta \cdot \nu_{21}$
IFF (C)	$E_2 = 0.1 \cdot E_2$ $G_{21} = 0.1 \cdot G_{21}$ $\nu_{21} = 0.1 \cdot \nu_{21}$

Yukarıda çizelgede kullanılan elastik özellikleri kötüleştirme katsayısı aşağıdaki bağıntıdan hesaplanır:

$$\eta = \frac{1 - \eta_r}{1 + c(f_{E(IFF)} - 1)^{\xi}} + \eta_r \quad (6)$$

Yukarıdaki bağıntıda c, η_r ve ξ , [10]'da tavsiye edilen malzeme değerlerine uygun olarak alınır. Kompozit laminatın sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan ilerlemeli hasar analizi ANSYS Parametric Design Language (APDL) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen algoritmaya göre öncelikle ANSYS kodlama dili kullanılarak laminatı oluşturan her bir elemanın her bir katmanına farklı malzeme numaraları verilir. Bu adım gereklidir, çünkü ilerlemeli analiz sırasında elemanların farklı laminalarına farklı elastik özellikleri kötüleştirme kuralları uygulanır. Daha sonra, kelebekleme yönündeki aşırı yük sonlu elemanlar modeline aşamalı olarak uygulanır ve statik analiz gerçekleştirilir. Analiz sonrası aşamada gerilme değerleri okunur. Okunan gerilme değerleri elyaf, FF (1)-(2) ve matris, IFF(3), (4), (5) Puck kırılma kriterlerine konularak hasar endeksleri hesaplanır. Çizelge 1'deki kurallara göre herhangi bir laminanın hasar görüp görmediği kontrol edilir. Eğer eleman seviyesinde elyaf kırılması ya da üç veya daha fazla katmanda IFF (C) görülecek olursa, laminatı oluşturan elemanın tamamen hasar gördüğü sonucuna varılır ve bu elemanın mukavemeti sıfırlanır. Eğer IFF (A) ya da IFF (B) veya üçten az katmanda IFF (C) saptanırsa, bu durumda kademeli kötüleştirme kuralları uygulanır. Malzeme modeli yeni elastik özelliklere göre güncellenir ve yük aşamalı olarak artırılarak analize devam edilir. Yük artışı analiz sonucu yakınsamayınca kadar sürdürülür.

Eğer analiz sonucu yakınsamaz ise kanadın nihai hasara uğradığı sonucuna varılır ve analiz durur. Herhangi bir kötüleştirme kurallarına göre matris ya da elyaf hasara uğramadığı sürece yük artırılır ve analize devam edilir. Hazırlanmış olan APDL kodu ile tek eksenli çeki yükü altındaki $[0/90]_s$ cam elyaf takviyeli polimer MY750 laminat ve karbon elyaf takviyeli $[0/\pm 45/90]_s$ polimer AS4 3501-6 laminatın gerilme-gerinim davranışı simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçlarının deney sonuçlarıyla karşılaştırılması Şekil 3’de görülmektedir. Şekilden deney sonuçları ile simülasyon sonuçlarının uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3. APDL kodun ilerlemeli hasar analizi yardımıyla doğrulanması (a) $[0/90]_s$ MY750 cam elyaf takviyeli laminat tek eksenli σ_x yükü altında (b) $[0/\pm 45/90]_s$ AS4 3501-6 karbon elyaf takviyeli laminat tek eksenli σ_y yükü altında[11].

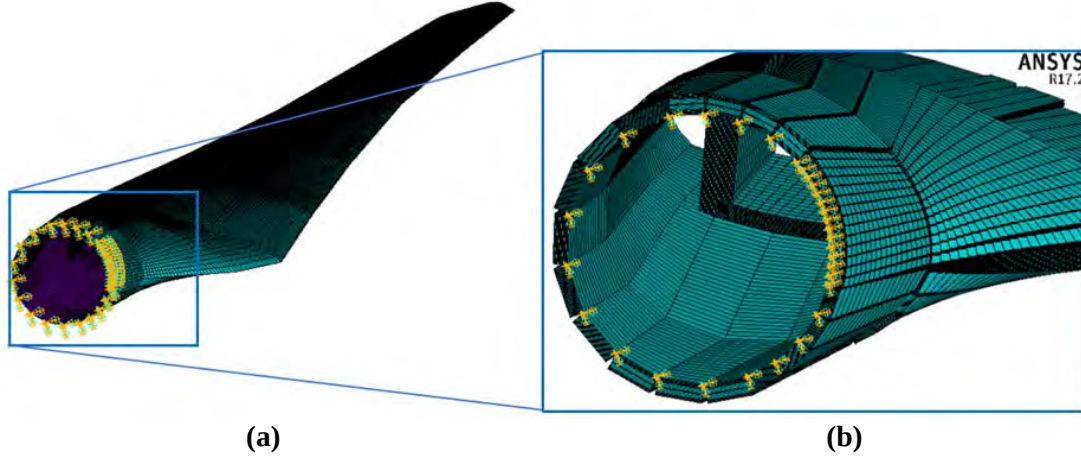
2. SONLU ELEMENLAR MODELİ

Kanadın aerodinamik tasarım detaylarından veter uzunluğu, burulma açısı gibi bilgileri içeren teknik resimler Patras Üniversitesi’nden Core Team tarafından sağlanmıştır. Teknik resimlerden kanadın üç boyutlu katı modeli NX 10.0 ortamında oluşturulmuştur. Çizelge 2’de kanadın malzeme özellikleri ve statik analiz için mukavemet değerleri listelenmiştir. Çizelgedeki malzeme mukavemet değerleri GL 2005 standartlarında [12] öngörülen emniyet katsayıları kullanılarak hesaplanmıştır. Kanadın mukavemetine önemli bir etkisi olmadığından jel kaplama, CSM 300 kaplama ve Divinycell H45 köpük, kanat sonlu elemanlar modeline koyulmamıştır.

Çizelge 2. RÜZGEM kanadı statik analizi için malzeme özellikleri ve mukavemet değerleri

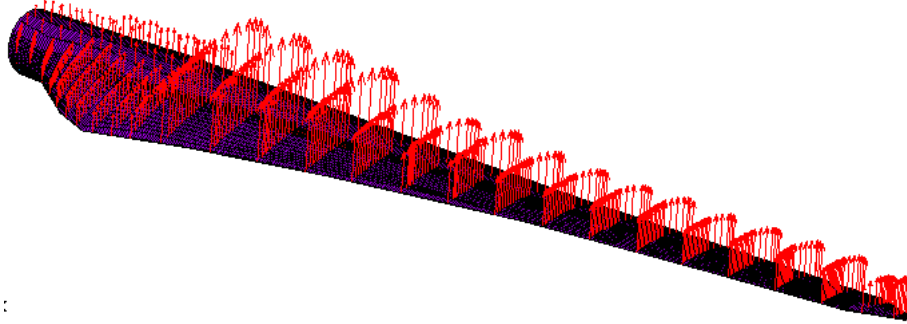
Malzeme Özellikleri		Tek yönlü lamina	Çelik	Jel kaplama	CSM 300	Divinycell H45
Yoğunluk, ρ	[kg/mm ³]	1896	7850	1200	1896	200
Kalınlık, h	[mm]	0.716	5.3	0.9	0.358	5 veya 10
E_1	[GPa]	24.84	210	3.98	9.14	55×10^{-3}
E_2	[GPa]	9.14				55×10^{-3}
ν_{12}		0.29	0.3	0.34	0.29	0.4
G_{12}	[GPa]	2.38				15×10^{-3}
$R_{\square}^t$	[MPa]	191.73	581.8	35.29	16.86	1.4
$R_{\square}^c$	[MPa]	101.16				0.6
$R_{\perp}^t$	[MPa]	16.86				1.4
$R_{\perp}^c$	[MPa]	50.41				0.6
$R_{\perp \square}$	[MPa]	11.29				0.56

Kanat malzeme modeli ANSYS ACP programı yardımıyla 20.013 adet iki boyutlu elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Aşağıdaki Şekil 4’de kanadın sanal ortamda yapılan tam ölçekli test simülasyonunda kullanılan sonlu elemanlar modeli ve sınır koşulları görülmektedir. Kanadın kök kısmı ankastre bir şekilde sabitlenmiştir. Şekil 4b’de iki boyutlu elemanların temsili kalınlıkları görülmektedir.

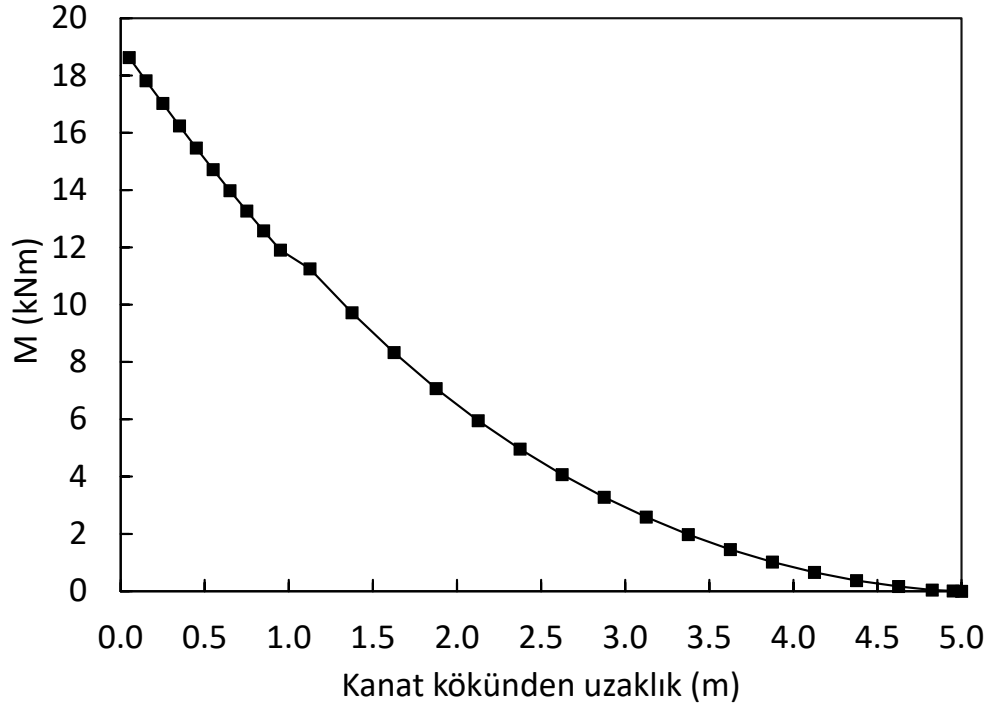


Şekil 4. Kanat sonlu elemanlar modeli (a) sınır koşulları (b) kanat kök bölgesi detayı.

Tam ölçekli kanat mukavemet testi için kullanılan kelebekleme yönündeki yük dağılımı Philippidis ve Roukis tarafından hazırlanan teknik rapordan [7] alınmış olup, Şekil 5’de gösterilmektedir. Kelebekleme yönündeki yük dağılımında kullanılan emniyet katsayıları IEC 61400-23 uluslararası standartlarına [13] uygun şekilde seçilmiştir. Şekil 6’da ise yük dağılımının kanat üzerinde doğurduğu moment diyagramı görülmektedir. IEC 61400-23 uluslararası standartlarına göre uygulanan yük kanat tamamen kırılana kadar aşamalı olarak artırılmaktadır.



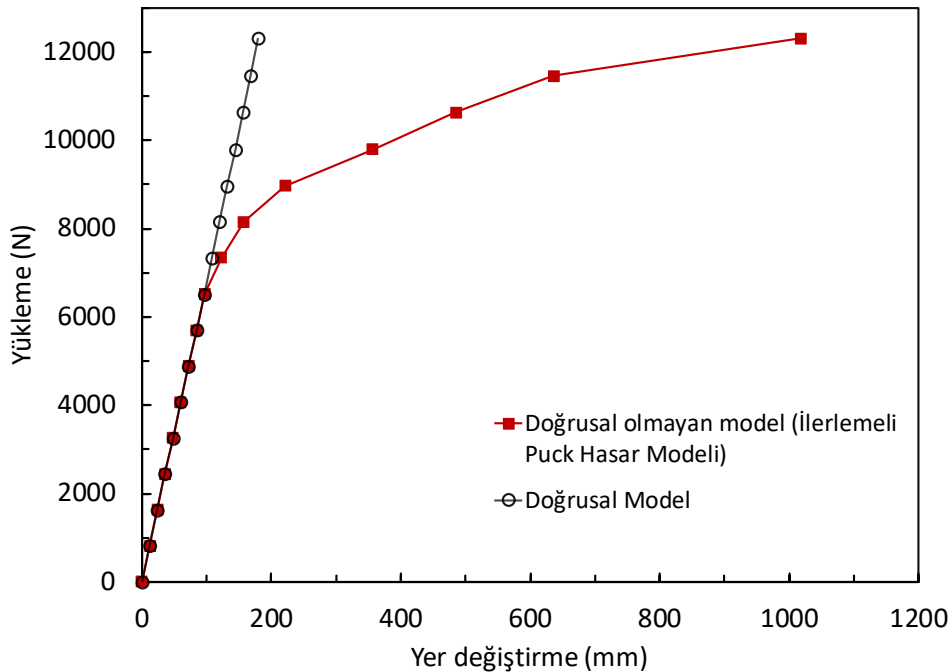
Şekil 5. Kanat sonlu elemanlar modeline kelebekleme yönündeki aşırı dış yük uygulaması.



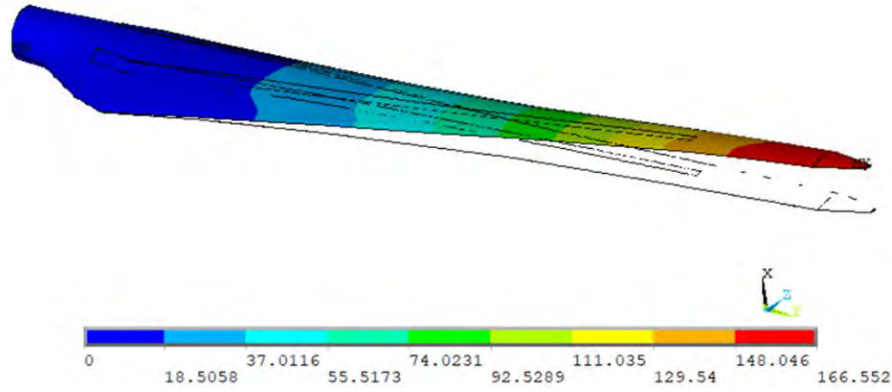
Şekil 6. Sonlu elemanlar modelinde kanat boyunca aşırı dış yük uygulaması sonucu oluşan eğilme momenti.

2. SONUÇLAR

Şekil 7’de doğrusal ve doğrusal olmayan sonlu elemanlar modeli kullanılarak çıkarılan yükleme yer değiştirme grafiği görülmektedir. Doğrusal olmayan modelde Puck hasar kriterleri kullanılarak ilerlemeli hasar analiz yapılmıştır. Grafikte kanat deplasmanının kelebekleme yönündeki aşırı yüklemenin %80’ninden sonra doğrusal olmayan değişimi görülmektedir. Şekil 8’de ise 1.5 kat artırılmış ölçekte %100 yükleme altında kanadın deforme olmuş şekli vardır.

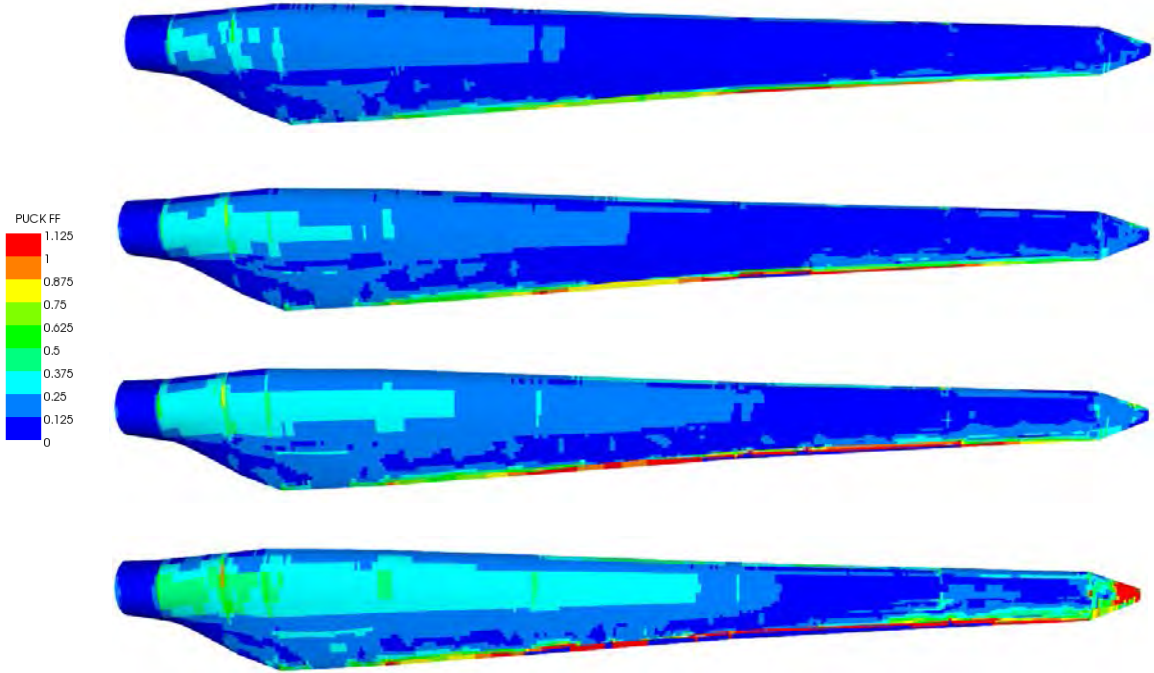


Şekil 7. Doğrusal ve doğrusal olmayan model kullanılarak çıkarılan kanat yük-yer değiştirme eğrisi.

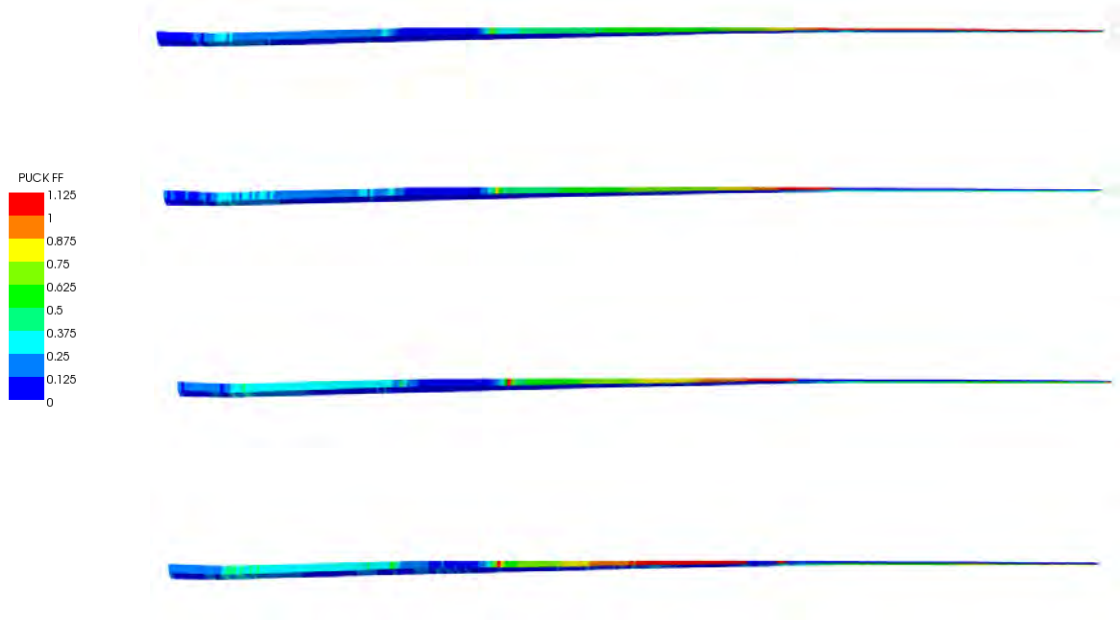


Şekil 8. RÜZGEM kanadının deforme olmamış ve kelebekleme yönünde aşırı yükleme altında deforme olmuş şekli (deformasyon şekli için ölçek x1.5).

Kelebekleme yönünde aşırı yükleme sonucu kanadın en fazla hasara maruz kalan bileşenleri alçak basınç yüzeyi ve iç flanş olduğundan Şekil 9 ve Şekil 10'da yalnızca adı geçen bileşenlerin üzerindeki hasarlar gösterilmiştir. Sonlu elemanlar modelindeki elemanların yük taşıma özelliklerini sıfırlayan hasar modu olan elyaf kırılma modunun dağılımı şekillerde gözlemlenmektedir. Resimlerde bir sonraki iterasyonda kötüleştirmeye uğrayacak elemanlar kırmızı renkte, elyaf ya da Mod C (IFF C) matris kırılması sonucu yük taşımayan elemanlar ise lacivert renkte görülmektedir. Bu sonuçlara göre hasar başlangıcı alçak basınç yüzeyi firar kenarı ve hücum kenarındaki iç flanş olarak görülmektedir. Bu bölgelerde delaminasyon beklenmektedir. Şekilde Puck hasar kriteri ile kelebekleme yönünde aşırı yüklemenin 80%, 90%, 100% ve 110%'u durumunda elyaf kırılma modu (FF) kontürleri görülmektedir.

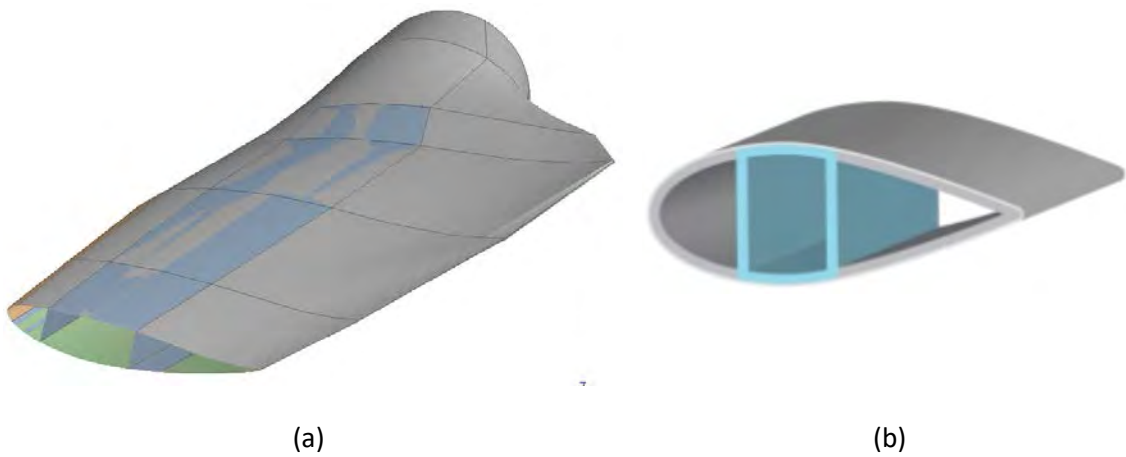


Şekil 9. Puck hasar kriterleri ile kelebekleme yönünde aşırı yüklemenin 80%, 90%, 100% ve 110%'u durumunda kanat alçak basınç yüzeyindeki elyaf kırılma modu (FF) kontürleri.



Şekil 10. Puck hasar kriterleri ile kelebekleme yönünde aşırı yüklemenin 80%, 90%, 100% ve 110%'u durumunda iç flanş üzerindeki elyaf kırılma modu (FF) kontürleri.

Bu sonuçlara göre, yeni kanat tasarımında kanadın kelebekleme yönünde yükleme durumu için dayanıklılığının artırılabilmesi için eğilme momentine direnci artırılmalıdır. Bu nedenle kanadın eğilme ve burulma yüklerini taşıyan ana yapı elemanı olan sparın mukavemet özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, Şekil 11'de görüldüğü üzere kanat sparının güncel şapka şeklindeki kesit yapısı yerine, eğilme ve burulmaya daha dayanıklı yeni tasarımı için kutu şeklindeki kesit geometrisi önerilmektedir.



Şekil 11. Kanat sparının (a) güncel şapka şeklindeki kesit yapısı (b) sparın yeni tasarımı için tavsiye edilen kutu kiriş şeklindeki kesit geometrisi.

Beş metrelik ODTÜ RÜZGEM kanadının mukavemet analizinden çıkarılabilecek en önemli sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Kanat kelebekleme yönünde aşırı yüklemenin %80'ine maruz kaldığında doğrusal olmayan davranış göstermektedir ve ileri derecede deformasyon göstermeye başlamaktadır.
2. Ana hasar mekanizmasının kanadın firar ve hücum kenarlarında oluşması beklenen delaminasyon olduğu düşünülmektedir. Delaminasyon hasar modunun simüle edilebilmesi için iki boyutlu elemanlar yerine, kalınlık boyunca gerilme dağılımı gösterebilecek üç boyutlu elemanların kullanılması gerekmektedir.
3. Ana hasar mekanizmasının tespit edilmesi sonucu kanat tasarımında sparın açık şapka şeklindeki kesit geometrisinin kutu kiriş şeklinde modifiye edilmesi önerilmektedir. Ardından tam ölçekli kanat test simülasyonu IEC 64100-23 standardına göre tekrarlanmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] **Holmes, J. W., Sørensen, B. F., Brøndsted P.**, 2007. Reliability of wind turbine blades: an overview of materials testing, *Wind Power Shanghai*.
- [2] **Chen, X., Zhao, X., Xu, J.**, 2016. Revisiting the structural collapse of a 52.3 m composite wind turbine blade in a full-scale bending test. *Wind Energy* 20 s. 1111-1127.
- [3] **Fagan, E.M., Kennedy, C.R., Leen, S.B., Goggins J.**, 2016. Damage mechanics-based design methodology for tidal current turbine composite blades. *Renewable Energy* 97 358-372
- [4] **Jensen, F.M., Falzon, B.G., Ankersen, J., Stang, H.**, 2006. Structural testing and numerical simulation of a 34 m composite wind turbine blade. *Composite Structures* 76 p 52
- [5] **DNV GL Standard DNV GL-ST-0376**, Edition December 2015. Rotor Blades for Wind Turbines, DNV GL.
- [6] **Ozyildiz, M., Muyan, C., Coker, D.**, 2018. Strength Analysis of a Composite Turbine Blade Using Puck Failure Criteria, *Journal of Physics: Conf. Series* 1037.
- [7] **Philippidis, T. P., Roukis, G. A.** 2013. Structure design report of a METUWIND small rotor blade. Confidential Interim Report.
- [8] **Knops, M.**, 2008. *Analysis of failure in fiber polymer laminates the theory of Alfred Puck*. Springer-Verlag, Berlin. ISBN 978-3-540-75764-1.
- [9] **Puck, A., Mannigel, M.**, 2007. Physically based non-linear stress-strain relations for the inter-fibre fracture analysis of FRP laminates, *Composites Science and Technology*. 67 s 1955-1967.
- [10] **Knops, M., Bögle, C.**, 2006. Gradual failure process in fiber/polymer laminates, *Composite Materials Reliability and Life Prediction of Composite Structures*. 66 s 616-625.
- [11] **Puck, A., Schürmann, H.**, 2002. Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models, *Composites Science and Technology*. 62 s. 1633-1662.
- [12] **Germanischer Lloyd Guidelines**, Edition 2015. *Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines*.
- [13] **IEC 61400-23 2002 Wind Turbines – Part 23 Full-Scale Structural Testing of Rotor Blades**

KÜRESEL RÜZGAR ATLASI VALİDASYONU: TÜRKİYE ÖRNEĞİ

Yüksel Kalay¹, Ferhat Bingöl²

^{1,2} İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü

¹yukselkalay@iyte.edu.tr, ²ferhatbingol@iyte.edu.tr

ÖZET

Rüzgar enerjisine olan yatırımların hem küresel hem de yerel ölçekte artmasıyla birlikte fizibilite çalışmaları büyük önem kazanmıştır. Fizibilite çalışmalarına destek olması sebebiyle Danimarka Teknik Üniversitesi tarafından hazırlanmış olan Global Wind Atlas - Küresel Rüzgar Atlası gün geçtikçe önem kazanmakta ve yatırımın yapılacağı alan için ön bilgi sağlayabilmektedir. Atlas yayınlanmadan önce dünya genelinde bir çok alanda doğruluğu test edilmiştir. Bu çalışmada da Küresel Rüzgar Atlası kullanılarak Türkiye örneği incelenmiş, veri farklı alanlarda doğruluk tespitine tabi tutulmuştur. Üç farklı bölgede yer alan ticari amaçlı kurulan ölçüm direklerinden alınan veriler kullanılarak atlas doğruluğu değerlendirilmiştir. Modelleme aracı olarak Rüzgar Atlası Metodolojisini içeren WASP yazılımı kullanılmıştır. Çalışma, hem büyük hem de küçük yatırımcıların atlastan yararlanarak doğru karar ve yorumlar ortaya çıkarabilmesi için büyük önem arz etmektedir.

1. GİRİŞ

Güvenilir bir rüzgar enerjisi yatırımı için en önemli şartlardan biri, yatırım yapılacak bölgede rüzgar potansiyelinin doğru tespit edilmesidir. Bu amaçla bilinen klasik ölçüm yöntemleri kullanılabilir. Bunlardan en bilineni yatırım yapılacak bölgede uygun bir noktaya meteorolojik ölçüm direği kurulmasıdır. Meteorolojik ölçüm direği kurmak yerine lidar, sodar gibi uzaktan ölçüm yöntemlerinin kullanılması da dünya genelinde oldukça yaygındır. Ancak bilinen tüm ölçüm yöntemleri yatırım için ekstra maliyet yaratmaktadır. Klasik ölçüm yöntemlerine başvurmadan, bölgenin kabaca rüzgar potansiyeli tahminini yapabilmek için geniş arazileri (ör: bölge, ülke, kıta vb.) nümerik rüzgar atlaslarıyla modellemek ve bu verileri kullanmak günümüzde en çok tercih edilen yöntemdir. Yatırımcıya zaman kazandırması yanında, ölçüm için dikilmesi zorunlu direğin nereye dikilmesi gerektiği konusunda en iyi tahmini yapmaya yarayabilir.

Bu amaçla, küresel ve yerel ölçekte birçok nümerik rüzgar atlası çalışması mevcuttur. Bu sebeple geliştirilen Avrupa Rüzgar Atlası (1989)[1], Rusya Rüzgar Atlası (2000)[2], Mısır Rüzgar Atlası (2006)[3], Güney Afrika Orta-Ölçek Rüzgar Atlası (2008)[4], Finlandiya Rüzgar Atlası (2009)[5], Küresel Rüzgar Atlası (2015-2018 ve 2019)[6] önemli çalışmalardan bazılarıdır. Genellikle meteorolojik ölçüm noktalarından alınan veriler yardımıyla doğruluk testi yapılabilir. Ölçüm noktalarından yararlanmak dışında daha birçok farklı metotla doğruluğu test etmek mümkündür. Örneğin, Mısır Rüzgar Atlası için 30 dan fazla ölçüm noktası kullanılarak doğruluk test edilmeye çalışılmıştır [3]. Güney Afrika Orta-Ölçek Rüzgar Atlası doğruluk testi için 17 farklı meteoroloji istasyonu kullanılmıştır [4]. Finlandiya için üretilen rüzgar atlası 20 den fazla noktada test edilmiştir [5]. Tüm dünya için üretilen Küresel Rüzgar Atlası ise 43 farklı noktada test edilmiştir [6]. Mümkün olduğunca fazla noktada test edilmiş olmalarına rağmen rüzgar atlaslarının güvenilirliği bölgeden bölgeye, ülkeden ülkeye değişiklik gösterir. Kısacası farklı arazi yapılarında ve farklı yüksekliklerde rüzgar atlaslarının doğruluğu değişmektedir. Bu çalışmada Küresel Rüzgar Atlası'nın doğruluğu Türkiye için 3 farklı ölçüm noktasından yararlanılarak, farklı yüksekliklerde test edilmiştir.

2. ÇALIŞMA SAHALARI VE VERİ SETLERİ

Atlasın doğruluğu için üç farklı bölgede yer alan ticari amaçla kurulan ölçüm direklerinden yararlanılmıştır. Bir adet Marmara Bölgesi'nde (Direk-1), 1 adet Ege Bölgesi'nde (Direk-2) ve 1 adet Akdeniz Bölgesi'nde (Direk-3) yer alan ölçüm direkleri çalışmada yer almaktadır. Direkler Türkiye'nin rüzgar enerji yatırımının yüzde 70'inden fazlasını ihtiva eden bu üç bölgeden özellikle seçilmiştir. Kullanılan ölçüm direklerine ait genel bilgi aşağıda Tablo 1'de paylaşılmıştır.

Tablo 1. Çalışmada Kullanılan Ölçüm Direkleri

	Marmara (Direk-1)	Ege (Direk-2)	Akdeniz (Direk-3)
Deniz Seviyesinden Yükseklik	340 m	1053 m	1640 m
Ölçüm Yüksekliği	86 m	80 m	86 m
Ölçüm Süresi	1 yıl, kayıpsız	1 yıl, kayıpsız	1 yıl, kayıpsız
RIX¹	9.2% Orta engebeli	42.7% Çok engebeli	3.8% Düz

¹ Ruggedness Index (Engebelilik İndeksi) WASP yazılımı geliştiricileri tarafından kullanıla sunulmuş bir indekisleme yöntemidir. Konu hakkındaki detaylı bilgi yazılımın yardım dosyalarında bulunmaktadır.

Çalışmada ölçüm direklerinden elde edilen rüzgar verileri dışında topografya verileri de kullanılmıştır. Ölçüm direği merkez nokta alınarak 5km x 5km'lik bir çalışma alanı oluşturulmuştur. WASP Map Editor yazılımı aracılığıyla, Küresel Rüzgar Atlasında kullanılan yükselti ve pürüzlülük haritaları çalışma alanları için oluşturulmuş olup ve aynen kullanılmıştır. Bu haritalar, WASP modelinde hem atlasların oluşturulması hem de araziye ait bilgilerin toplanmasında gereklidir.

Çalışmada kullanılan ölçüm direklerinden Direk-1, Marmara Bölgesinde deniz seviyesinden 340 metre yükseklikte yer almaktadır. Direk üzerinde 86 metrede yer alan ölçüm cihazlarından yararlanılarak, rüzgar hızı ve yönü verileri kullanılmıştır. Veri kaybının yaşanmadığı bir yıllık ölçüm verisi çalışmaya dahil edilmiştir. Ölçüm sahası etrafında herhangi bir yerleşim alanı bulunmamakta olup, çalışma alanı içerisinde minimum ve maksimum pürüzlülük değerleri sırasıyla 0.005 metre ve 1.5 metredir. Minimum ve maksimum yükseklik değerleri ise sırayla 0 metre ve 400 metredir. Oluşturulan topografya haritasına göre, sahaya ait RIX değeri %9.2 olarak hesaplanmıştır. Bu değer %5 den fazla olması, sahanın karmaşıklığının arttığını göstermektedir.

Ölçüm direklerinden Direk-2 ise Ege Bölgesinde 1054 metre yükseklikte yer almaktadır. 80 metrede yer alan ölçüm cihazları kullanılarak rüzgar hız ve yön verisi elde edilmiştir. Yine ölçümün sürekli olarak sağlandığı, kayıpların olmadığı bir yıllık veri çalışmada kullanılmıştır. Ölçüm sahası etrafında doğal bitki örtüsü olan makiler dışında yerleşim alanları gibi büyük engeller bulunmamaktadır. Çalışma alanının içerisinde pürüzlülük değerleri 0.05 metreden 1.5 metreye kadar değişmekte olup, minimum yükselti 100 metre ve maksimum yükselti 1380 metredir. Çalışma alanının engebelerini ve koşullarını belirlemek amacıyla hesaplanan, engedelilik indeksi %42.7 olarak hesaplanmıştır. Marmara Bölgesi'ndeki çalışma alanıyla kıyaslandığında, bu alanın kompleks arazi koşullarına sahip olduğunu söylenebilir.

Çalışmada kullanılan üçüncü bir diğer ölçüm direği Direk-3 de Akdeniz bölgesinde 1640 metrede yer almaktadır. 86 metrede ölçümü yapılan rüzgar hız ve yön verileri kullanılmıştır. Yine ölçüm kayıplarının olmadığı 1 yıllık süreçte toplanan veri setinden yararlanılmıştır. Ölçüm sahası etrafında herhangi bir engel bulunmamakla beraber, alan bitki örtüsünden yoksun çıplak bir araziye sahiptir. Pürüzlülük değerleri 0.005 metreden 1.5 metreye kadar değişirken, yükselti değerleri 280 metreden 1640 metreye kadar değişiklik göstermektedir. Sahanın engedelilik indeksi %3.8 olarak belirlenmiş olup, bu değer çalışılan diğer iki sahaya karşılaştırma yapıldığında oldukça küçüktür. Çalışma alanının kompleks olmayan bir arazi yapısına sahip olduğunu gösterir.

3. METOT VE HESAPLAMALARI

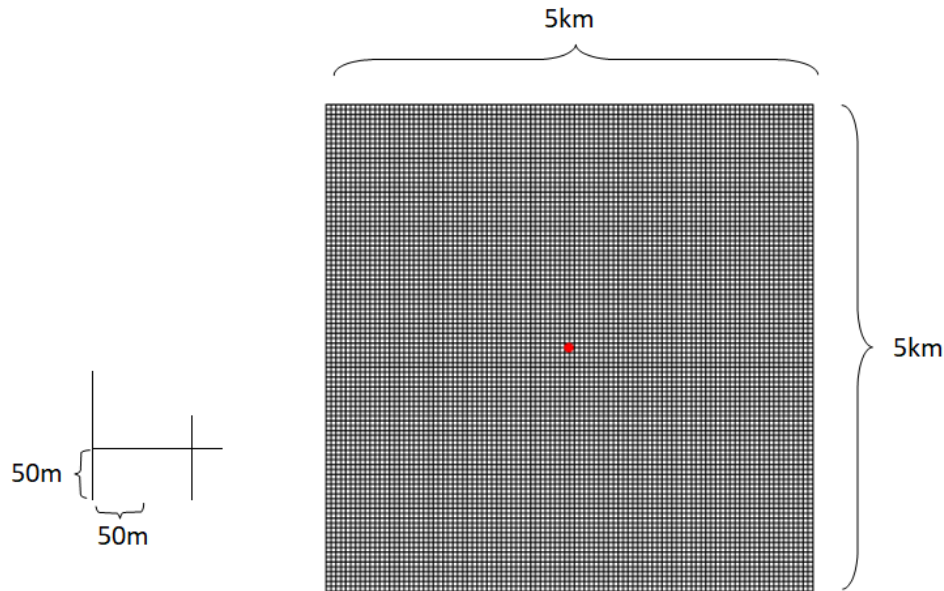
Küresel Rüzgar Atlası doğruluğu test edilirken dört farklı yöntem kullanılmıştır[6]. Bu çalışmada ölçüm direği verisi ve bu noktaya en yakın olan Küresel Rüzgar Atlası verisi kullanılarak oluşturulan rüzgar atlasları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma rüzgar gücü yoğunluğu, rüzgar hızı, Weibull A ve k parametreleri üzerinden yapılmıştır. Weibull parametrelerini içeren dağılım denklemi ve rüzgar gücü yoğunluğu denklemi aşağıda verilmiştir [7,8].

$$f(v) = \frac{k}{A} \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{A}\right)^k\right) \quad (1)$$

v = rüzgar hızı (m/s), k = Weibull şekil parametresi (birimsiz), A = Weibull ölçek parametresi (m/s)

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2)$$

P = güç yoğunluğu (W/m^2), ρ = hava yoğunluğu (kg/m^3), A = tarama alanı (m^2), v = rüzgar hızı (m/s).

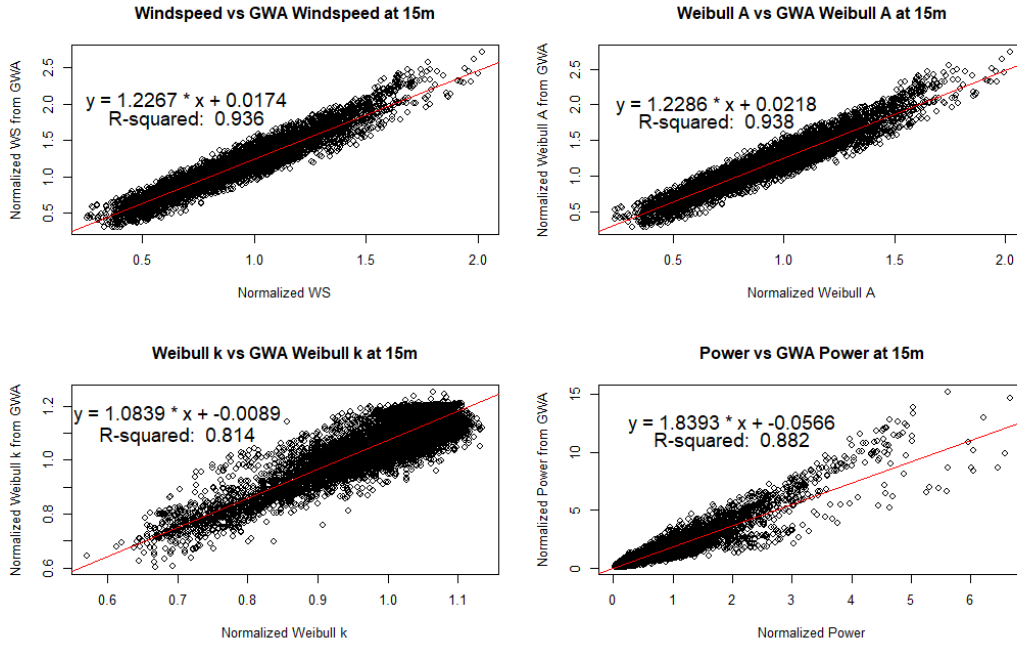


Şekil 1. Hesaplama için yapılan bölümlenme. 5km x 5km'lik alanın için 50m x 50m hücrelere bölünmüş ve ölçüm direği haritanın tam ortasında yer almaktadır.

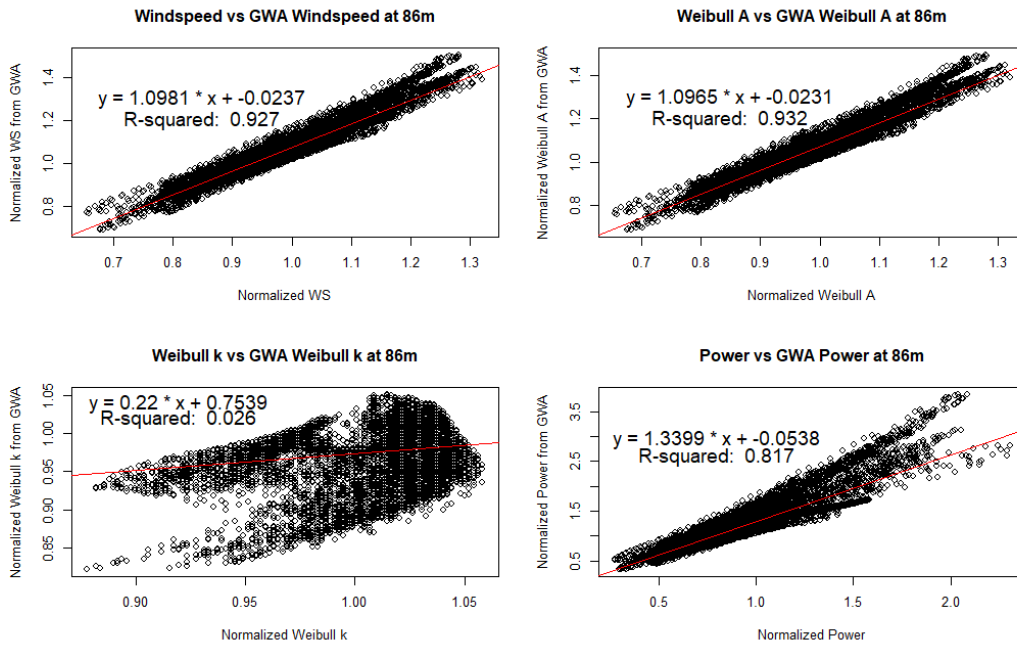
İlk olarak ölçüm direklerinden elde edilen veri setleriyle WAsP 12.2 modelinden yararlanarak geliştirilmiş rüzgar iklimi elde edilmiştir. Ardından ölçüm direğine en yakın noktadan Küresel Rüzgar Atlasına ait geliştirilmiş rüzgar iklimi dosyası indirilmiştir. Her iki iklim dosyası ve oluşturulan topografya haritaları kullanılarak 15 metre, 100 metre dahil olmak üzere ve ayrıca ölçüm yüksekliklerinde rüzgar atlasları oluşturulmuştur. Çalışmalar 5 km x 5km lik alan içerisinde 50 metre çözünürlükte ve toplamda 10000 hesap hücresi ile yürütülmüştür (Şekil 1). Atlaslar karşılaştırılarak aralarında lineer denklemler oluşturulmuş ve R^2 değerleri incelenmiştir. Hesaplanan değerler ortalamalarına bölünerek normalize edilmiştir.

İlk olarak Marmara bölgesinde bulunan Direk-1 kullanılarak atlaslar arasında rüzgar gücü, rüzgar hızı, A ve k parametreleri ilişkisi incelenmiştir. Ölçüm direği ve ona en yakın Küresel Rüzgar Atlası noktası arasında yaklaşık 4 kilometre mesafe bulunmaktadır. Atlaslar 15 metre,

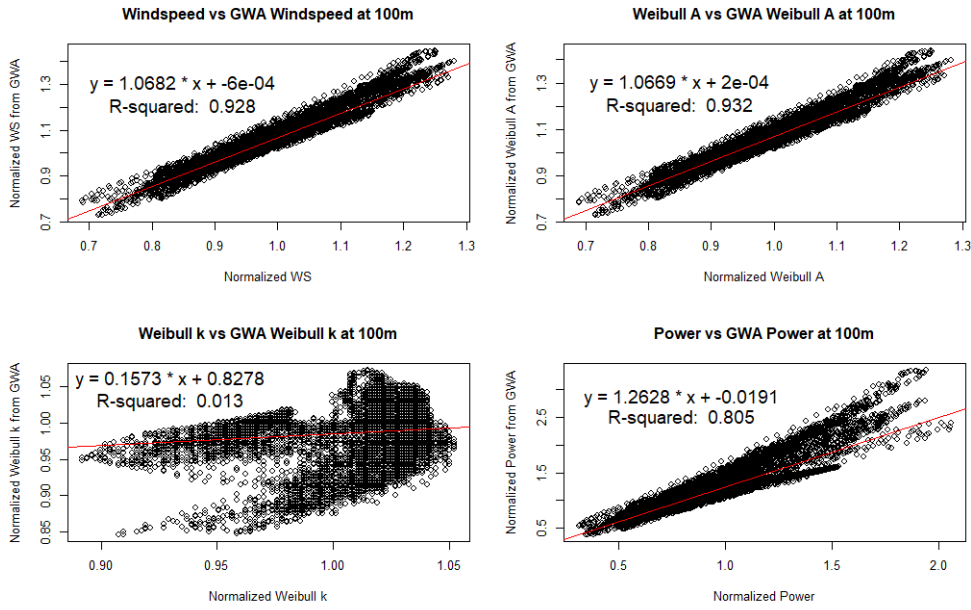
86 metre (ölçüm yüksekliği) ve 100 metre olmak üzere oluşturulmuş ve rüzgar hızı, rüzgar gücü yoğunluğu, Weibull A ve k parametreleri üzerinden karşılaştırma yapılmıştır. Şekil 2-3-4'de seçilen parametreler arasındaki ilişki ve oluşturulan lineer denklemler sırasıyla 15m, 86m ve 100m olmak üzere yer almaktadır.



Şekil 2. 15 metrede oluşturulan atlasların karşılaştırılması (Direk-1)

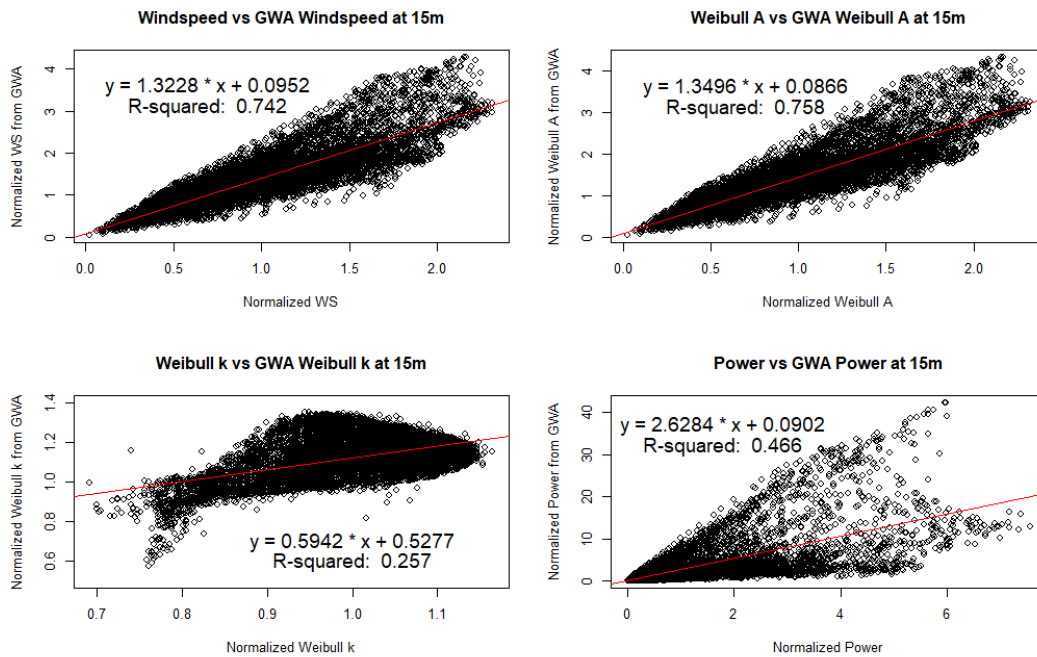


Şekil 3. 86 metrede (ölçüm yük.) oluşturulan atlasların karşılaştırılması (Direk-1)

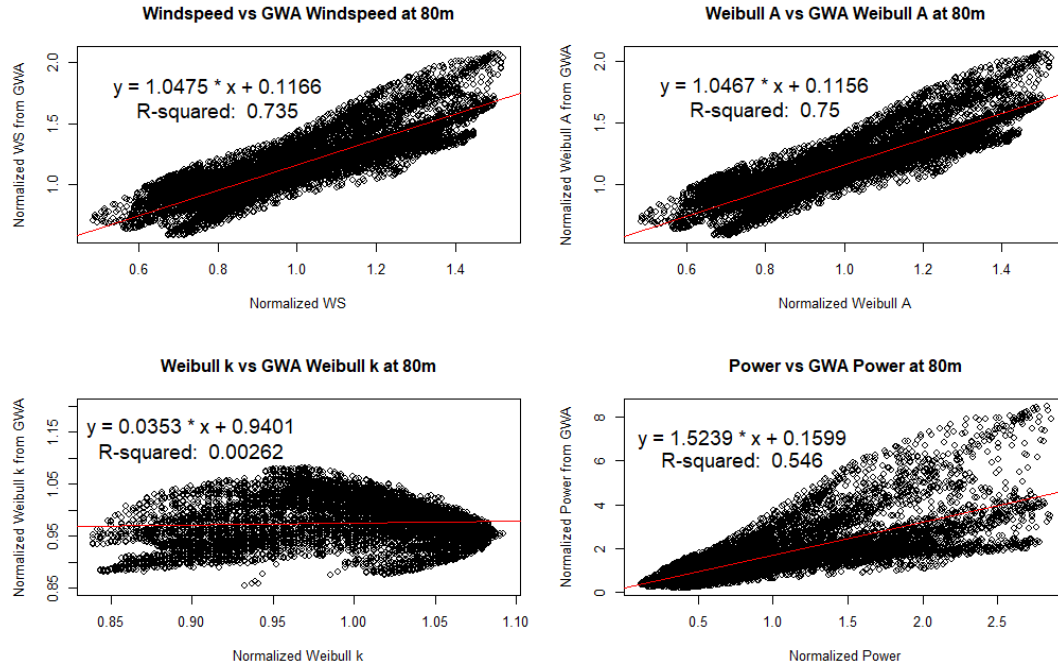


Şekil 4. 100 metrede oluşturulan atlasların karşılaştırılması (Direk-1)

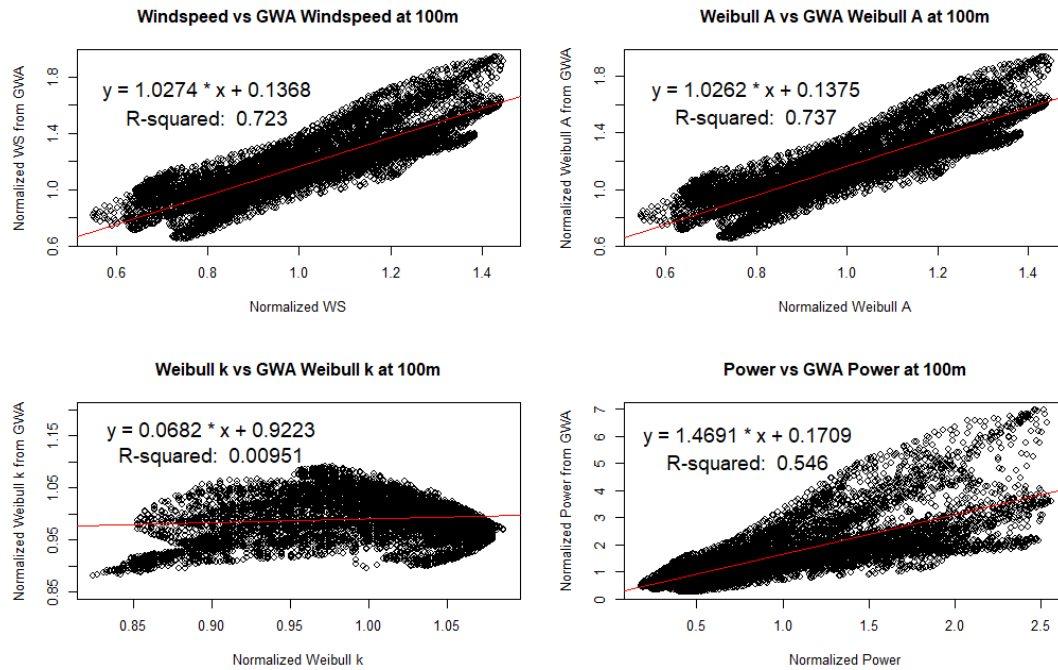
Aynı yöntem Ege ve Akdeniz Bölgesi'nde yer alan ölçüm direkleri Direk-2 ve Direk-3 için de uygulanmış ve yine rüzgar hızı, rüzgar gücü yoğunluğu, Weibull A ve k parametreleri farklı yüksekliklerde oluşturulan atlaslarda karşılaştırılmıştır. Ege Bölgesi'nde yer alan Direk-2 için 15 metre, 80 metre (ölçüm yüksekliği), ve 100 metrede atlaslar üretilmiştir. Akdeniz Bölgesi'ndeki Direk-3 için 15 metre, 86 metre (ölçüm yüksekliği) ve 100 metrede atlaslar üretilmiştir. Ölçüm direklerine en yakın Küresel Rüzgar Atlası noktası, Direk-2 için yaklaşık 3.78 km iken, Direk-3 için 4.05 km mesafedir. Şekil 5-6-7'de Ege Bölgesi'ndeki Direk-2 ye ait çalışma sonuçları paylaşılmıştır. Şekil 8-9-10'da ise Akdeniz Bölgesi'ndeki Direk-3 e ait çalışma sonuçları yer almaktadır.



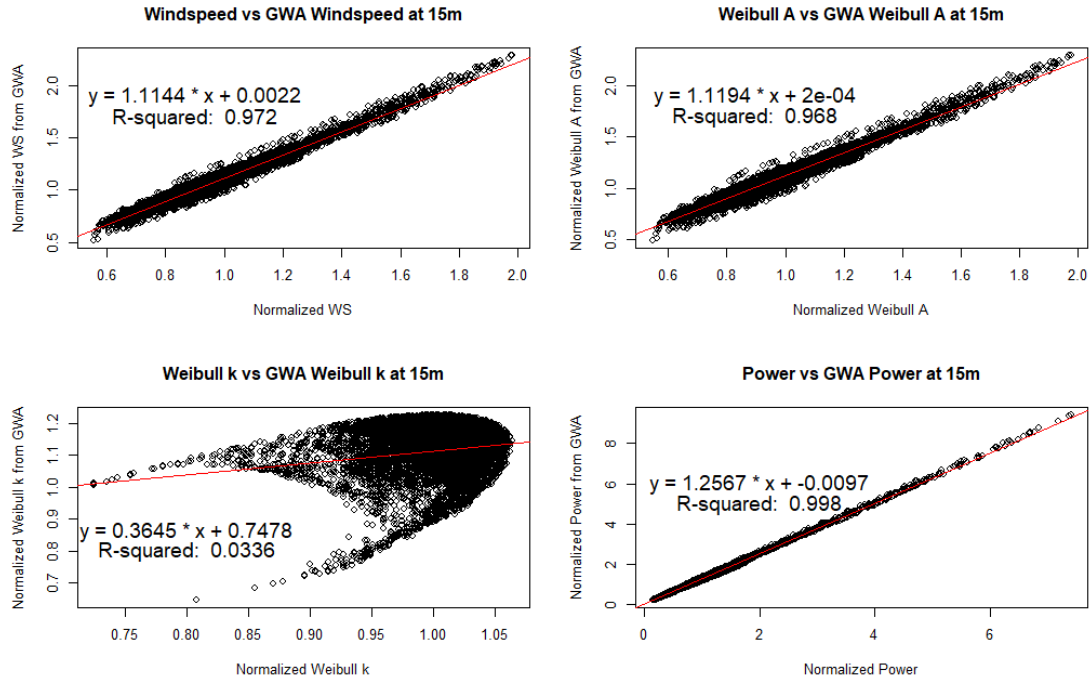
Şekil 5. 15 metrede oluşturulan atlasların karşılaştırılması (Direk-2)



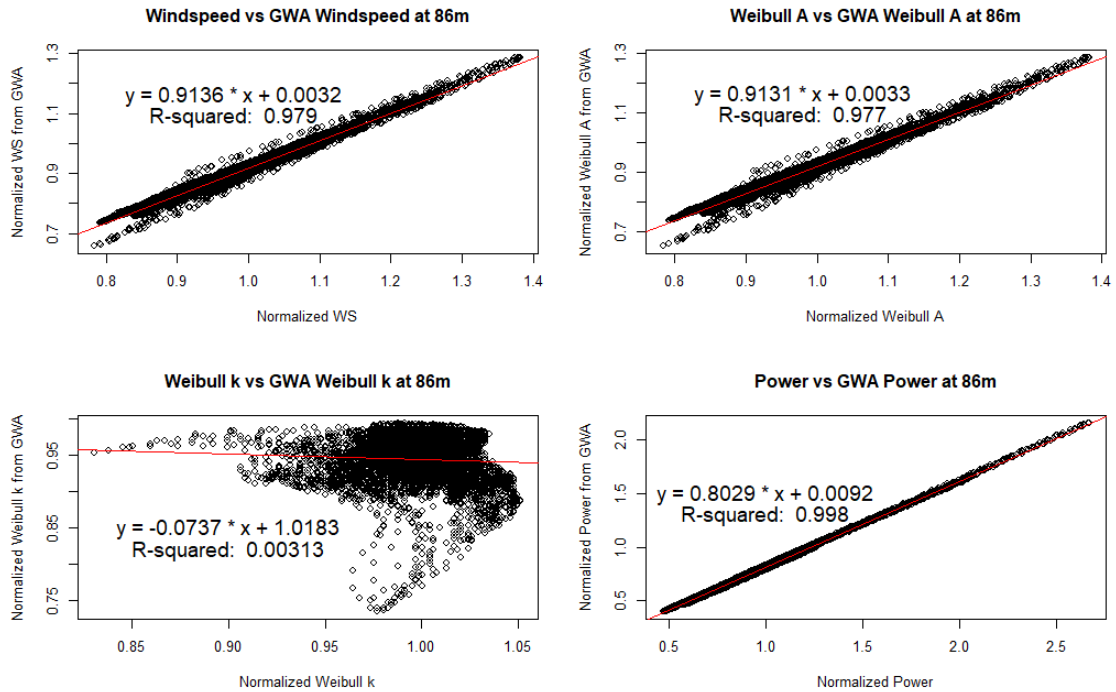
Şekil 6. 80 metrede (ölçüm yük.) oluşturulan atlasların karşılaştırılması (Direk-2)



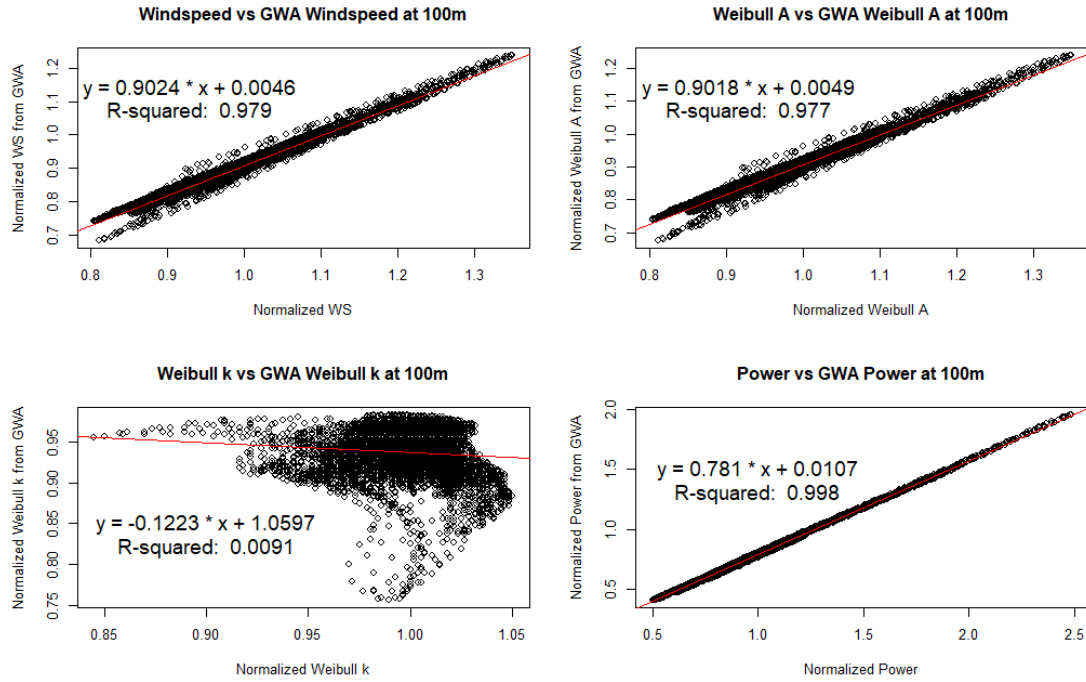
Şekil 7. 100 metrede oluşturulan atlasların karşılaştırılması (Direk-2)



Şekil 8. 15 metrede oluşturulan atlasların karşılaştırılması (Direk-3)



Şekil 9. 86 metrede (ölçüm yüks.) oluşturulan atlasların karşılaştırılması (Direk-3)



Şekil 10. 100 metrede oluşturulan atlasların karşılaştırılması (Direk-3)

3 farklı bölgedeki çalışmaya ait grafikler incelendiğinde genellikle rüzgar hızı, rüzgar gücü yoğunluğu ve Weibull A parametreleri arasında bir uyum olduğu ancak Weibull k parametresi için bu uyumun oldukça zayıf olduğu açıkça görülmektedir.

4. SONUÇ

Üç farklı bölgede, üç farklı ölçüm direğiyle Küresel Rüzgar Atlası'nın doğruluğu test edilmiştir. Üç farklı çalışma alanı da farklı engebelilik değerlerine sahiptir yani tüm çalışma alanlarının arazi yapısı farklıdır. Karmaşık arazi yapısına göre büyükten küçüğe sıralama yaparsak; Ege Bölgesi'ndeki Direk-2, Marmara Bölgesi'ndeki Direk-1 ve Akdeniz Bölgesi'ndeki Direk-3 çalışma alanı olacaktır. Bu durumda engebelilik indeksi en yüksek olan Direk-2 deki sonuçların diğerlerine göre tutarsız olduğu gözlenmiştir. Tüm çalışmaya ait sonuçlar Tablo 2'de yer almaktadır. Weibull k parametresi hemen hemen tüm sahalar ve yüksekliklerde uyum göstermemektedir. Sadece 15m yüksekliklerde belki kabul edilebilir seviyede olsa dahi, tutarsızlığı açıkça gözlenmektedir. Ayrıca Weibull-k, Direk-3'e ait engebelilik değeri oldukça düşük ve rüzgar hızı, rüzgar gücü yoğunluğu ve Weibull A parametreleri arasında uyum oldukça fazladır. Bu çalışma alanı için güç yoğunluğuna göre R^2 değeri %97 den fazladır. Ancak Direk-2 ye ait sonuçlar incelendiğinde R^2 değerinin oldukça düştüğü gözlenmiştir. Bu düşüşün temel sebebi arazinin yapısının karmaşık hale gelmesi olarak düşünülebilir. Buna göre, Küresel Rüzgar Atlası'nın arazinin karmaşık yapıda olmadığı alanlarda oldukça tutarlı olduğunu görebiliriz. Çalışmanın daha fazla noktada tekrar edilmesi atlasının güvenilirliği konusunda daha fazla bilgi verecektir ancak küçük yatırımcılar, saha koşullarını göz önüne alarak fizibilite çalışmalarında rahatlıkla Küresel Rüzgar Atlası'ndan yararlanabilir.

Tablo 2. Karşılaştırma tablosu. 15m ve 100m seçilmiş yükseklikler olup, ara yükseklik ölçüm yüksekliğidir.

Direk	z [m]	U [m/sn]			A [m/sn]			k [-]			Güç Yoğunluğu [W/m ²]		
		Eğim	Ofset	R ²	Eğim	Ofset	R ²	Eğim	Ofset	R ²	Eğim	Ofset	R ²
1	15	1.2267	0.0174	0.936	1.2286	0.0218	0.938	1.0839	-0.0089	0.814	1.8393	-0.0566	0.882
	86	1.0981	-0.0237	0.927	1.0965	-0.0231	0.932	0.2200	0.7539	0.026	1.3399	-0.0538	0.817
	100	1.0682	-0.0006	0.928	1.0669	0.0002	0.932	0.1573	0.8278	0.013	1.2628	-0.0191	0.805
2	15	1.3228	0.0952	0.742	1.3496	0.0866	0.758	0.5942	0.5277	0.257	2.6284	0.0902	0.466
	80	1.0475	0.1166	0.735	1.0467	0.1156	0.750	0.0353	0.9401	0.003	1.5239	0.1599	0.546
	100	1.0274	0.1368	0.723	1.0262	0.1375	0.737	0.0682	0.9223	0.010	1.4691	0.1709	0.546
3	15	1.1144	0.0022	0.972	1.1194	0.0002	0.968	0.3645	0.7478	0.034	1.2560	-0.0097	0.998
	86	0.9136	0.0032	0.979	0.9131	0.0033	0.977	-0.0737	1.0183	0.003	0.8029	0.0092	0.998
	100	0.9024	0.0046	0.979	0.9018	0.0049	0.977	-0.1233	1.0597	0.009	0.7810	0.0107	0.998

TEŞEKKÜRLER

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 216M505 numaralı projesi ve Avrupa Birliği, Latin Amerika ve Karayip Ülkeleri Ortak İnovasyon ve Araştırma Faaliyetleri Ağı (ERaNet-LAC) kapsamında fonlanmış olan Küçük Rüzgâr Türbinlerinin Optimizasyonu ve Ticari Promosyonu - Small Wind Turbine Optimization and Market Promotion (SWTOMP) projesi içinde desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Troen, I., & Lundtang Petersen, E. 1989. European Wind Atlas. Roskilde: Risø National Laboratory.
- [2] Starkov, A.N., L. Landberg, P.P. Bezroukikh and M.M. Borisenko. 2000. Russian Wind Atlas. Russian-Danish Institute for Energy Efficiency, Moscow; Risø National Laboratory, Roskilde. 551 pp. ISBN 5-7542-0067-6.
- [3] Mortensen, N. G., Said Said, U., & Badger, J. 2006. *Wind Atlas for Egypt*. In Proceedings of the Third Middle East-North Africa Renewable Energy Conference
- [4] Hahmann, A. N., Lennard, C., Badger, J., Vincent, C. L., Kelly, M. C., Volker, P. J. H., Refslund, J. 2015. *Mesoscale modeling for the Wind Atlas of South Africa (WASA) project*. DTU Wind Energy.
- [5] Tammelin, B., Vihma, T., Atlaskin, E., Badger, J., Fortelius, C., Gregow, H., Horttanainen, M., Hyvönen, R., Kilpinen, J., Latikka, J., Ljungberg, K., Mortensen, N.G., Niemelä, S., Ruosteenoja, K., Salonen, K., Suomi, I. & Venäläinen, A. 2013. *Production of the Finnish Wind Atlas*. Wind Energy, vol. 16, s. 19-35.
- [6] Mortensen, N. G. , Davis, N. , Badger, J. , & Hahmann, A. N. 2017. *Global Wind Atlas – validation and uncertainty*.
- [7] < <https://wind-data.ch/tools/weibull.php> >, 28.08.2019
- [8] < <https://www.raeng.org.uk/publications/other/23-wind-turbine> >, 28.08.2019

RÜZGÂR ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ EMÜLASYON SİSTEMİ

Siamak Pourkeivannour, H. Bülent Ertan²

¹ODTÜ-RÜZGEM, ²ATILIM Üniversitesi

¹siamak.pourkeivannour@metu.edu.tr, ²bulent.ertan@atilim.edu.tr

ÖZET

Rüzgâr enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren sistemleri incelemek için, gerçek zamanlı emülatöre sahip olmak büyük önem taşımaktadır. Yeni bir türbin tasarımı veya yeni bir jeneratörün davranışı gerçekçi koşullar altında test edilmelidir. Benzer şekilde yeni bir kontrol algoritması da gerçekçi koşullar altında test edilmelidir. Rüzgâr enerjisi dönüşüm emülatörü kontrollü koşullar altında bu testleri mümkün kılar. Bu bildiride, ODTÜ Rüzgâr araştırmaları Merkezinde geliştirilen rüzgâr-elektrik enerjisi dönüşümünü emüle eden “yazılım içinde donanım” (YİD) ekipmanı tanıtılmaktadır. Bu sistemde, bilgisayarda bir türbin modeli oluşturulur. Tanımlı veya kaydedilmiş bir rüzgâr rejimi girdiyi oluşturmaktadır. Türbin modeli yazılımından elde edilen şaft momenti ve hızı, bir elektrik motorunu süren sürücüye referans olacak şekilde gönderilerek motor şaftının rüzgâr türbini şaftı ile aynı davranışı göstermesi sağlanmaktadır. Bu şaft çıkışına, sahada kullanılacak alternatör ve diğer ekipmanlar bağlanabilir. Bu sistem sayesinde, sahada yakalanması zor olan rüzgâr koşullarının veya arıza koşullarının, gerçek sistemde kullanılarak, donanım ve yazılımlarının test edilmesi sağlanmış olunur. Sistem üzerinde yapılan deneylerle emülatörün maksimum güç noktası algoritması performansının hassasiyeti de gösterilmiştir.

1. GİRİŞ

Dünyada enerji talebi sürekli artmaktadır. Bu durum fosil enerji kaynakları için büyük bir yük oluşturmaktadır. Ayrıca fosil yakıtların ısıtma ve elektrik üretimi için kullanılması küresel ısınmaya yol açtığı bilinmektedir. Küresel ısınma dünyamız ve insanlık için önemli bir tehdit oluşturmaktadır. Sonuç olarak yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak enerji ihtiyacımızı karşılamak çok önemli bir konuya dönüşmüştür. Yenilenebilir enerji dönüşüm teknolojileri arasında; güneş enerjisini elektrik enerjisine ve rüzgâr enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren teknolojiler, enerji ihtiyacının önemli bir bölümünü karşılama anlamında umut vadetmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji elde edilmesi ve onların kullanılması sırasında kimi belirsizlikler ve yeni aşılması gereken zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Tüketicie sağlanan enerjinin güvenliğinden ve kalitesinden ödün vermemek için, tüketici talebinin karşılanması ve yönetilmesi aşamasında yeni çözümler bulunması gerekmektedir. Bu nedenle talebin karşılanması, güvenlik ve kalitenin sağlanması için kapsamlı araştırmaların yapılması gerekmektedir. Bundan hareketle, çalışma koşullarını simüle edilebilecek ortamların oluşturulması çok önemlidir. Böyle tip bir ortam, enerji dengesini ve kalitesini korumak için kontrol stratejilerini test etmek için kullanılabilir. Yeni geliştirilen donanım ve yazılım tedarik stratejileri gerçekçi bir ortamda test edilebilir. Bunun yanında sahada yakalanması zor olan ve ekipmana zarar verebilecek çalışma koşulları, test ortamında oluşturulabilir ve bu koşullar kişilerin kontrolü ile oluşturulabilir. Ayrıca bu koşulları yönetmek için geliştirilmiş donanım ve yazılım test edilebilir.

İspanya, Almanya, Danimarka ve Hollanda gibi Avrupa ülkelerinde, tam ölçekli “Yazılım İçinde Donanım” (YİD) deney ortamları mevcuttur. Literatür incelendiğinde, rüzgâr-elektrik enerjisi dönüşüm sistemlerinin test edilmesi için YİD emülatörlerinin çeşitli yönlerine

odaklanan çok sayıda makale bulunduğu ve bu tür emülatörlerin rüzgâr enerjisi dönüşümünün çeşitli yönlerini araştırmak için kullanıldığı görülmektedir [1-10].

Bu bildiride, ODTÜ-RUZGEM araştırma merkezinde geliştirilen, rüzgar-elektrik enerjisi dönüştürücü sistemlerini araştırabilecek, “Yazılım İçinde Donanım” (YİD) emülatörü tanıtılmaktadır. Sistem performansının gerçekçiliğini göstermek için sistemin değişken rüzgar hızlarında, maksimum güç noktasını bulma algoritmasının (MPPT) performansını gösteren bazı deney sonuçları da sunulmuştur. Bu sistemin, tam ölçekli test ortamı için gerekli donanımı ve yazılımı geliştirmek için kullanılması planlanmaktadır. Bu sistem çeşitli enerji üretim birimlerinin, depolama tesislerinin ve tüketicilerden oluşan karmaşık akıllı şebekelerin sorunlarının araştırılması için de kullanılabilir.

YİD ortamında, testler gerçek zamanlı olarak gerçekleştirildiğinden, doğru bir ölçüm donanımının kurulması önemlidir. Veriler gerçek zamanlı olarak kaydedilmeli ve daha sonra verilerin işlenmesi kolay olmalıdır. Sistem aynı zamanda kullanıcı dostu olmalıdır. Bir test koşulu oluşturmak zaman alıcı olmamalıdır. Ayrıca, test sistemini oluşturan çeşitli donanımlar; örneğin jeneratörler, dönüştürücüler, dişli kutusu vb., test ortamının farklı koşullara uyandırabilmesi için esnek bir yapıya sahip olacak şekilde bir araya getirilmelidir.

Arsu edilen diğer bir unsur da rüzgar enerjisi dönüştürücü sisteminin, hem şebekeye bağlı hem de şebekeden izole (ada) işletme modunda çalışabilmesidir. Bu yazıda açıklanan ortam, tüm bu gereklilikleri karşılayabilir niteliktedir. Aşağıdaki bölümlerde, bu sistemin tasarımı ve gerçekleştirilmesinde belirlenen hedeflere nasıl ulaşıldığı açıklanmaktadır.

Test ortamının güç değeri bu çalışmada düşük tutulmuştur. Ancak, bu YİD sistemi için geliştirilen yazılım ve donanım daha büyük ölçekli sistemlere kolaylıkla uygulanabilir. Ayrıca, ölçeklendirme yoluyla, daha büyük güçteki sistemlerin davranışları, geliştirilen emülatör üzerinde çalışılmasını da mümkündür [11].

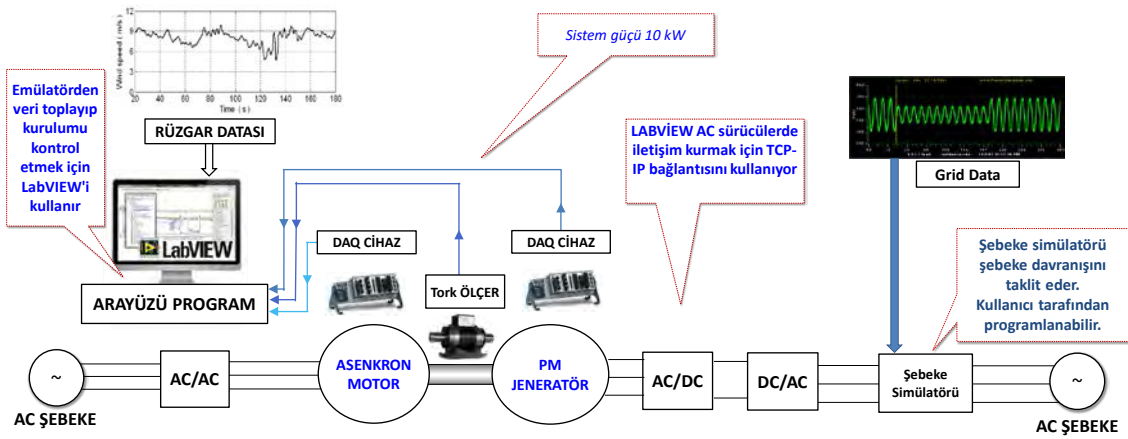
2. YAZILIM İÇİNDE DONANIM ORTAMININ TEMEL ÖZELLİKLERİ

Rüzgâr enerjisi sistemlerinin test edilmesinde asıl zorluk, belirli bir çalışma koşulundaki performansı test edilebilmek için, istenen rüzgâr koşullarına erişmektir. İstenilen zamanda doğru rüzgâr mevcudiyetine sahip olmak imkânsızdır. Ayrıca, rüzgârın olduğu yerlerde, test koşulları genellikle uygun değildir. Bu olumsuzluklara alternatif olarak, rüzgâr türbini istenen koşulların yaratılabileceği bir rüzgâr tüneline çalıştırılabilir. Türbinin güç değeri arttıkça, çok büyük ve çok pahalı bir rüzgâr tüneline ihtiyaç olduğu gözden kaçırılmamalıdır. Bunu akılda tutarak ve gerçekçi çalışma koşullarına ulaşmak için; Şekil 1’de şematik olarak gösterilen “yazılım içinde donanım” tabanlı emülatör geliştirilmiştir. Sistem bileşenleri, sensörleri ve ana bilgisayara geri bildirim ve veri sağlayan unsurlar Şekil 1’de verilen diyagramda görülmektedir.

Sistemin ana bileşenleri aşağıda kısaca açıklanmıştır.

- Ana bilgisayar

Bu birim, zamana göre rüzgâr hızı verilerini alır ve rüzgâr türbini için tork referansın değeri hesaplar. Bu bilgisayarın bünyesinde kurulu bir maksimum güç noktası izleme (MPPT) algoritması vardır. Bu algoritma türbinin bu durumda çalışmasını sağlar. Türbinden alınabilen maksimum gücü hesaplar ve “Şebekeye bağlı dönüştürücü”, bu gücün şebekeye aktarılması için gereken referans sinyallerini üretir ve gönderir. Ayrıca, veri toplama sisteminden ölçülen değerleri toplar ve depolar.



Şekil 1. Rüzgâr-Elektrik Enerjisi Dönüşümü Emülatörünün Şematik Diyagramı

- Rüzgâr Türbini Emülatörü

Bu birim dönüştürücülerden ve bir endüksiyon motorundan oluşur. Dönüştürücüler, “ana bilgisayar” dan tork referansını alır motoru sürer (Şekil 2’de sağ tarafta) **milinde** istenen torku üretir. Şaft hızı (türbin şaft hızı), mil üzerindeki yük tarafından belirlenir. MPPT algoritması daha önce de belirtildiği gibi, ana bilgisayarda çalışır ve gride bağlı alternatörün yükünü ayarlamaktan sorumludur, böylece motor şaftı, maksimum güç üretmek için öngörülen türbin hızında döner. Rüzgâr türbinini benzeyen motor, 8 kutuplu bir asenkron motordur. Motor şaftına istendiğinde bir şanzıman bağlanabilir. Bu amaçla Şekil-2’de görülebileceği gibi sistemin olduğu masa 3 parçalı olacak şekilde tasarlanmıştır ve farklı ayak yüksekliğine sahiptir bu sayede dişli kutusunun veya alternatörün bağlanmasına imkan sağlar.

- Tork ve hız ölçüm bileşeni

Şaft hızını ve torku ölçer ve bu bilgileri veri toplama sistemi (DAQ) ve ana bilgisayara gönderir. “Ana bilgisayar” bu bilgiyi MPPT algoritmasını yürütmek için kullanır.

- Alternatör

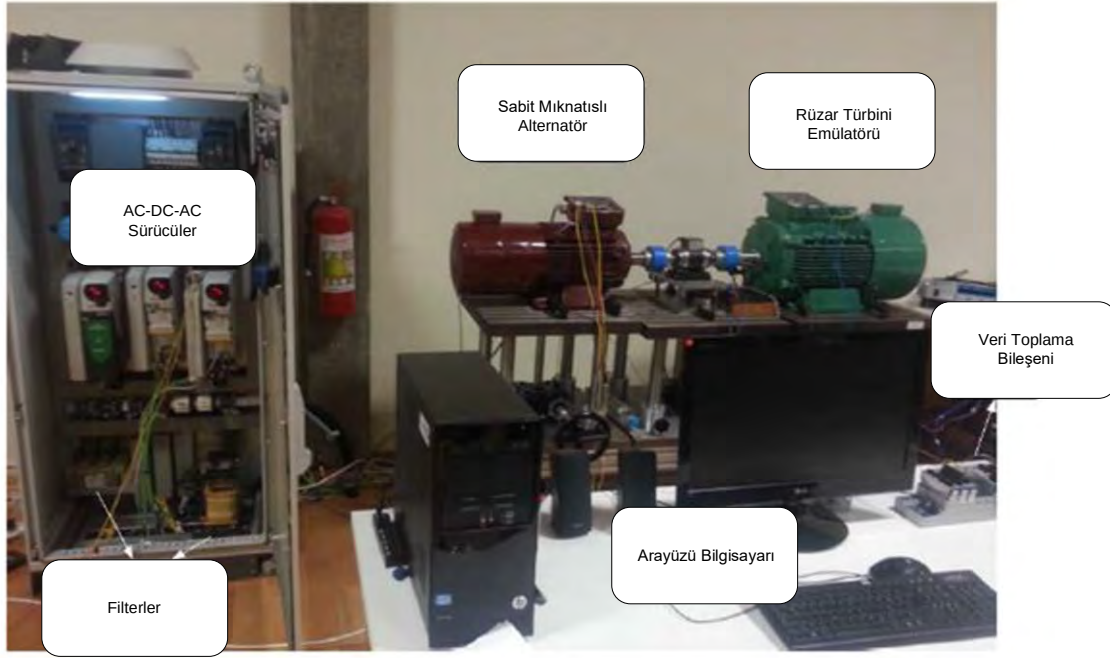
Gerçek ortamda kullanılan alternatör, türbini temsil etmekte olan şafta bağlanarak test edilebilir. Bu alternatör değişken-frekans, değişken-voltaj çıkışı üretir. Şekil 2’de görülebileceği gibi, sistemin kurulduğu masanın, bağımsız olarak yüksekliği ayarlanabilen üç bölümü, farklı çaplara sahip alternatörlerin sisteme bağlanmasına uygundur. Bu nedenle, 140 mm çapında, doğrudan tahrikli jeneratör bir alternatör bile türbin miline bağlanabilir.

- Çıkış dönüştürücü aşaması

Bu aşama arka arkaya olacak şekilde iki dönüştürücüden oluşur. İlk dönüştürücü alternatörün değişken voltaj, değişken frekans çıkışını alır ve sabit voltaj (DA bara) oluşturur. Bu DA bara şebekeye bağlı invertör aşamasını besler. Şebekeye bağlı invertör, ana bilgisayardan gelen güç ve reaktif güç kontrol sinyalleri tarafından kontrol edilir. Dönüştürücünün çıkışı, bir dizi filtre vasıtasıyla 3 fazlı bir şebekeye bağlıdır. Bu filtreler standartlarda belirtilen harmonik seviyelerde, enerjinin şebekeye aktarılmasını sağlar.

- Veri toplama bileşeni

Bu cihaz verileri alır (motor gerilimi ve akımı, alternatör gerilimi ve akımı, şebeke gerilimi ve akımı, ayrıca DA bara gerilimi, mil torku ve hızı gibi). Bu birim ana bilgisayarla iletişim kurulabilmesinin yanı sıra, analog veya sayısal veri alabilir. Burada sınırlı alan nedeniyle iletişim ortamı tartışılmamıştır.



Şekil 2. Laboratuvarda Kurulan Rüzgar-Elektrik Dönüşüm Emülatörünün Görünümü

Bu donanım tüm sistemi kontrol eden bir yazılım tarafından yönetilmektedir. Ana bilgisayarda yüklü olan kullanıcı arayüzünü, kullanıcının uygun koşullarını seçmesine izin verir. İlk veri olarak, türbin karakteristiğini tanımlayan parametreler girilir (türbin yarıçapı, kanat ayar özelliği, hava yoğunluğu vb.). Bu yazılımın diğer önemli özellikleri aşağıdaki bölümde açıklanmıştır.

3. SİSTEMİN YAZILIM ÖZELLİKLERİ

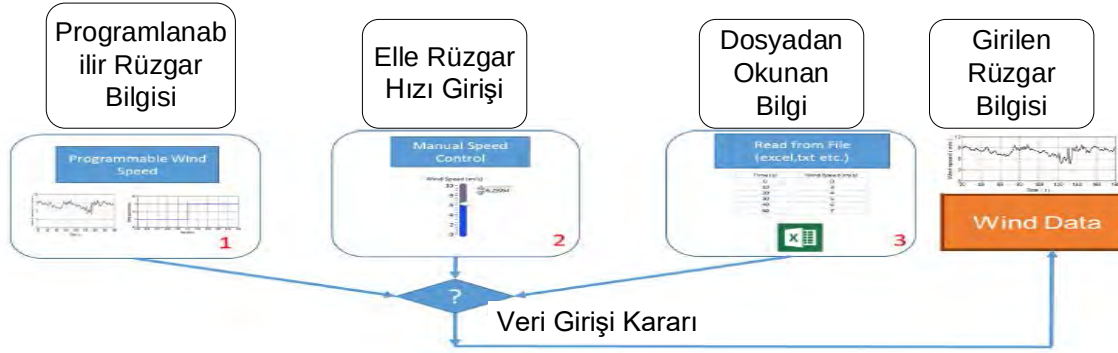
Bu bölümde “Yazılım İçinde Donanım” (YID) rüzgâr-elektrik enerjisi dönüşüm sisteminin, bazı yönleri sunulmuştur. Bu sistemde kullanılan yazılımın önemli bileşenleri aşağıda verilmiştir.

- Rüzgâr verisi giriş bileşeni
- Rüzgâr türbini modeli bileşeni
- MPPT algoritması bileşeni
- Kullanıcı arayüzü bileşeni
- Veri işleme bileşeni

Bu bölümde, emülatörün esnekliğini, geliştirilen ve herhangi bir türbinin özelliklerini kullanarak nasıl modellenebileceğini göstermek için sadece yukarıda belirtilen ilk iki bileşene odaklanılmıştır.

Rüzgâr Verisi Giriş Bileşeni

Bu modül kullanıcının sisteme belirli bir rüzgâr profili girmesini sağlar. Bu veri ölçümler üzerinden elde edilebilir veya kullanıcı tarafından belirli bir çalışma koşulunu incelemek için oluşturulabilir. Şekil 3'te verilen akış şemasında gösterildiği gibi, üç veri girişi modu vardır.



Şekil 3. Rüzgâr Verisi Giriş Bileşeninin Blok Şeması

- Zamana karşı rüzgâr hızı bir fonksiyon olarak girilebilir.
- Rüzgâr hızı ekranda farenin imleci ile istenildiği gibi kontrol edilebilir.
- Zamana karşı rüzgâr hızı, bilgisayarda depolanan bir Excel dosyasından veya metin dosyasından girilebilir.

Kullanıcı verinin örnekleme sayısını seçebilir. Sistem, rüzgâr hızının başka bir rüzgâr hızı bilgisi girilene kadar sabit kaldığını varsayar. Rüzgâr hızı girildikten sonra, rüzgâr türbini modülü, türbinin mevcut yük ile çalışacağı torku hesaplar ve çalışması için türbini temsil eden asenkron motor sürücüsüne tork referans değeri gönderir. Daha sonra MPPT modülü gride enerji aktaran dönüştürücüye referans çıkış gücü miktarının iletir. Böylece motor şaft hızını ayarlar, alternatörün şaft hızı ve çıkış gerilimi ile akım verileri ana bilgisayara geri bildirilir. Bu sayede MPPT algoritması istenen çalışma durumuna ulaşmak için bir sonraki şaft hızını tahmin eder ve verilen rüzgâr hızında maksimum enerjinin şebekeye aktarılmasını sağlar.

Türbin-kanat açısı başlangıçta 0 derece olarak ayarlanır. Sistem denetleme yazılımı, kanat açısını gerektiğinde türbin modelinde değişiklik yaparak, ayarlayabilir olmasını ve türbinin istenen koşulda çalışmasını sağlar.

4. RÜZGAR TÜRBİNİ MODEL BİLEŞENİ

“Rüzgâr türbini model” bileşeni, emülatörde rüzgâr türbini benzeten endüksiyon motorunu kontrol eden dönüştürücü için tork referansını hesaplar. Torku hesaplamak için o andaki rüzgâr hızından yararlanıp türbin milindeki güç belirlenir. Türbinin ürettiği güç Denklem (1) 'de verilmiştir.

$$P_t = 0.5 \rho C_p(\lambda, \beta) A v^3 \quad (1)$$

A : kanatın süpürdüğü alan (m^2), ρ : havanın yoğunluğu (kg/m^3), v : rüzgâr hızı (m/s), R : türbin kanadının yarıçapı (m), ω_r : şaftın açısal hızı (rad/s), C_p : güç katsayısı, β : kanat açısı λ : Kanat ucu hız oranı (TSR) ve λ şu şekilde hesaplanabilir: $(\omega_r * R) / v$.

C_p , türbin gücünün rüzgâr gücüne oranı olarak tanımlanır. C_p , iki parametreye bağlı fonksiyondur; Kanat ucu hız oranı (λ) ve kanat açısı (β). Bu nedenle, rüzgâr hızı verileri elde edildikten sonra, türbin şaftında mevcut güç Denklem 1'den hesaplanır. Aslında gerçek güç çeşitli kayıplar nedeni ile hesaplanan değerden biraz daha düşüktür ve bu oluşturulan modelde bu kayıplar dikkate alınmaktadır. Bu unsur belirli bir türbin için kullanıcı tarafından ayarlanabilir.

Verilen bir rüzgâr hızı için maksimum güç noktası izleme (MPPT) algoritmasından hesaplanan türbinin maksimum güç çıkışına karşı gelen bir şaft hızı vardır. Bu hız değeri, sistemden

maksimum güç elde etmek için türbinin çalışmasında gerekli olan hız değeridir. Bu hız değerinden türbinin üreteceği moment Denklem 1'den kolayca hesaplanabilir.

Ancak, türbin gücünün hesaplanmasında kulenin gölge etkisi ve farklı yüksekliklerde değişen rüzgâr hızından kaynaklanan moment salınımları da etkindir. Geliştirilen modelde bu etkilerin her ikisi de referans torkun hesaplanmasında dikkate alınmaktadır.

Rüzgâr türbini modelinden hesaplanan moment değeri, rüzgâr türbinini temsil eden elektrik motoru için referans sinyali üretir. Bu sinyal Modbus üzerinden motoru süren vektör kontrollü dönüştürücüye gönderir. Hesaplanan türbin momenti türbinin maksimum güç noktasında üretebileceği momenti belirler. Bu bilgiden üretilen referans sinyali ise gride bağlı evirgecin referans sinyali oluşturur.

Referans torkunun, hızının hesaplanması, bu bilgilerin motor sürücüyeye aktarılması ve sürücünün referans sinyaline tepkisi yaklaşık 1 mili saniye sürmektedir. Bu nedenle, rüzgâr veri girişini daha hızlı güncellemek anlamlı değildir. Burada yapılan uygulamada rüzgâr verisinin 50 ms civarında güncellenmesi önerilmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, bu noktadan itibaren MPPT algoritması girilen rüzgâr hızına göre emülatörü kontrol etmeye başlar.

Bir sonraki bölümde emülatör üzerinde yapılan bazı deneylerin sonuçları verilmektedir. Bu deneylerde türbin üreticisinin sağladığı karakteristik özelliklerden yararlanılarak belirlenen maksimum güç noktasına ulaşmak için emülatörün değişen rüzgâr hızına karşı tepkisi incelenmektedir.

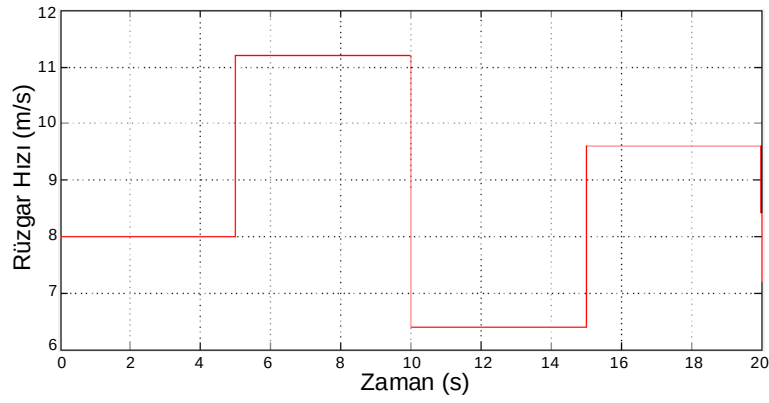
5. DENEYLER

Bu bölümde, emülatör sistemi üzerinde yapılan testlerden birinin sonuçları gösterilmiştir. Sistem belirli bir rüzgâr hızı için maksimum güç çıkışını elde edebilmektedir. Bu test sırasında sabit mıknatıslı jeneratör türbin şaftını temsil eden endüksiyon motorunun şaftına doğrudan bağlıdır. Bu nedenle, şaft hızı, gerçek türbin için 75 rpm yerine 750 rpm'dir. Bununla birlikte, bunun MPPT algoritmasının test edilmesinde önemi yoktur.

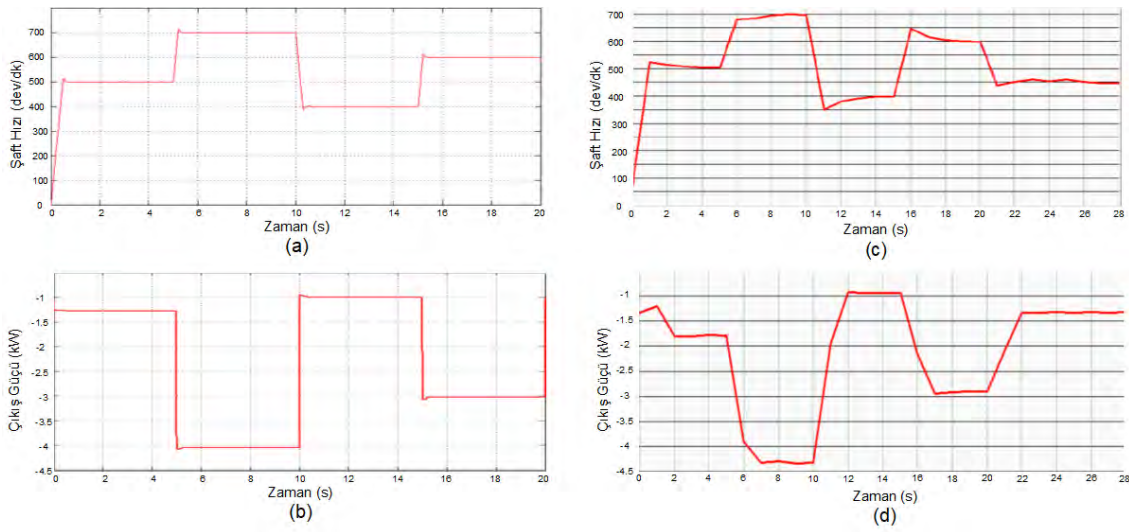
Şekil 4'te gösterilen rüzgâr hızı profili, ana bilgisayara rüzgâr verisi olarak girilmiştir. İzlenebileceği gibi ilk rüzgâr hızı 8 m/s'dir ve 5 saniye boyunca sabit kalır ve daha sonra 11,2 m/s'ye çıkar, ardından 6,4 m/s ve 9,6 m/s değerlerinde her biri 5 saniye olacak şekilde sabit kalır. MPPT algoritması ve emülatör sistemi düzgün bir şekilde çalışıyorsa, emülatörün şaftının hızı, her rüzgâr hızı için türbinden maksimum güç aktarma koşulunu sağlamak için MPPT algoritması tarafından otomatik olarak değişmektedir. Bunu yapabilmek için, daha önce sözü edildiği gibi denetleyici, sistemin şebekeye aktardığı gücü ayarlar.

Şekil - 5a ve 5b'de, her bir rüzgâr hızı ve buna karşılık gelen türbinin maksimum güç noktasındaki güç çıkışı izlenebilir. Emülatör sisteminden ölçülen değerler, Şekil - 5c ve 5d'de verilmiştir.

Bu sonuçlar incelendiğinde, emülatörün beklenen güç çıkışını % 5'in altında bir hata payı ile gözlemlenmektedir. Ayrıca emülatörün beklenen güç çıkışında önemli bir salınım gözlenmemektedir. Beklenildiği gibi her rüzgâr hızı için emülatör sisteminde, istenen çalışma durumuna ulaşmada gecikmeler vardır. Bu gecikmeler iletişim için geçen zaman ve ayrıca çeşitli PI kontrolörlerinin etkilerinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 1. Emülatöre Uygulanan Rüzgâr Hızı Profili



Şekil 2. (a) ve (b) Beklenen Şaft Hızı ve Şaftın Çıkış Gücü. (c) ve (d) Ölçülen Şaft Hızı ve Şaftın Çıkış Gücü

Sistem denetim yazılımının parametreleri ayarlanarak sistem performansı iyileştirilebilir.

6. SONUÇ

Bu yazıda ODTÜ-RÜZGEM laboratuvarları tarafından geliştirilen rüzgar-elektrik enerjisi dönüşüm sistemi araştırmaları için kullanılması planlanan “yazılım içinde donanım” sisteminin temel özellikleri açıklanmıştır. Bildiride sunulan deney sonuçları türbinin maksimum güç noktasını çok iyi izleyebildiğini göstermektedir. Yazarlar, sistemin şebekeye bağlı ve ada modunda çalışmasını incelemek ve simülasyon koşullarını iyileştirmek için araştırmalarını sürdürmektedir. Bu çalışmalar başka bir bildirinin konusu olacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma ODTÜ Rüzgâr Enerjisi Merkezi (RÜZGEM) tarafından desteklenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **N. Muntean, L. Tutulea, D. Petrila, and O. Pelan**, "Hardware in the loop wind turbine emulator," *Int. Aegean Conf. Electr. Mach. Power Electron. ACEMP 2011 Electromotion 2011 Jt. Conf.*, no. September, pp. 53–58, 2013.
- [2] **I. Munteanu, A. I. Bratcu, S. Bacha, D. Roye, J. Guiraud**, "Hardware-in-the-Loop-based Simulator for a Class of Variable-speed Wind Energy Conversion Systems: Design and Performance Assessment," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 25, no. 2, pp. 564–576, June 2010.
- [3] **P. K. Banerjee and M. Arifujjaman**, "Development of a test-rig for large scale wind turbine emulation," in *Proc. Int. Conf. Electr. Comput. Eng. (ICECE'10)*, Dec. 2010, pp. 159–162.
- [4] **J. Mushi, K. Han, G. Chen, and J. Daozhuo**, "Design and implementation of wind turbine imitation system for direct drive permanent magnet synchronous generator using dc motor," in *Proc. IEEE Int. Conf. Sustain. Power Gener. Supply*, Apr. 2009, pp. 1–6.
- [5] **J. Li, B. Zhou, and H. Guo**, "Hardware-in-loop simulation of wind turbine based on BLDCM," in *Proc. World Non-Grid-Connected Wind Power Energy Conf. (WNWEC'09)*, Sep. 2009, pp. 1–5.
- [6] **R. I. Ovando, J. Aguayo, and M. Cotorogea**, "Emulation of a low power wind turbine with a dc motor in Matlab/Simulink," in *Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, Jun. 2007, pp. 859–864.
- [7] **M. Arifujjaman, M. Iqbal, and J. Quaicoe**, "An isolated small wind turbine emulator," in *Proc. IEEE Can. Conf. Electr. Comput. Eng.*, May 2006, pp. 1854–1857.
- [8] **H. Li, M. Steurer, K.L. Shi, S. Woodruff, D. Zhang**, "Development of a Unified Design, Test, and Research Platform for Wind Energy Systems Based on Hardware-in-the-Loop Real-Time Simulation," *IEEE Trans. Ind. Elect.*, vol. 53, no. 4, pp. 1144–1151, Aug. 2006.
- [9] **S. Song, B. Jeong, H. Lee, J. Kim, J. Oh, G. Venkataramanan**, "Emulation of Output Characteristics of Rotor Blade Using Hardware-In-Loop Wind Turbine Simulator," in *Proc. IEEE APEC*, Mar. 6–10, 2005, vol. 3, pp. 1791–1796.
- [10] **H. Kojabadi, L. Chang, and T. Boutot**, "Development of a novel wind turbine simulator for wind energy conversion systems using an inverter-controlled induction motor," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 19, no. 3, pp. 547–552, Sep. 2004.
- [11] **S. Pourkeivannour, H. B. Ertan**, "Accurate scale modeling for the dynamic behavior of a large wind turbine on a Wind Turbine Emulator," *VI. European Conference on Renewable Energies. ECRES*, Istanbul, Sep, 2018, pp. 53–58, 2013.

YATAY EKSENLİ RÜZGAR TÜRBİNLERİ İÇİN GÜRBÜZ TASARIM YÖNTEMİ

A. Hazal Altuğ Yalçın¹, Doç. Dr. İlkey Yavrucuk², Prof. Dr. Oğuz Uzol³

¹Rüzgem, ODTÜ, ²Rüzgem, ODTÜ, ³Rüzgem, ODTÜ
¹haltug@metu.edu.tr, ²ilkay.yavrucuk@ae.metu.edu.tr, ³uzol@metu.edu.tr

ÖZET

Gürbüz tasarım, kontrol edemediğimiz değişkenlerden çok etkilenmeyen tasarımıdır ve rüzgarın stokastik yapısı dolayısıyla rüzgar türbinleri için önemlidir. Bu makalede enerji maliyetini düşürebilmek için yatay eksenli rüzgar türbinlerinin tasarımında kullanılmak üzere Gürbüz Tasarım Simülasyonu yöntemi anlatılmıştır.

Bu yöntemde öncelikle uygun tasarım değişkenleri ve geçerli oldukları aralıklar seçilir. Sonrasında deney tasarımları yöntemi uygulanarak tasarım uzayının incelenmesini kolaylaştırır. Enerji maliyetini en çok etkileyen değişkenlerden bir alt küme oluşturularak eleme işlemi gerçekleştirilir. Hedefimiz için belirleyici olan değişkenler hedefi tanımlayan bir tepki yüzeyi denklemi oluşturmak için kullanılır. Kontrol edilemeyen tasarım değişkenlerinin performansa istatistiksel etkisinin hesaplanabilmesi için Monte Carlo simülasyonları kullanılır. Bu simülasyonların sonuçları kullanılarak enerji maliyetini düşürme olasılığı ve kontrol değişkenleri arasındaki ilişkiyi gösteren yeni bir tepki yüzeyi denklemi oluşturulur. Böylece kontrol edilebilen parametrelerle oynayarak enerji maliyetini düşürme olasılığı en yükseğe çekilebilir.

Gürbüz tasarım simülasyonu yöntemi büyük tasarım uzayının düşük hesaplama maliyeti ile incelenmesini sağlar. Sonuç olarak da hedefe ulaşma olasılığını hesaplayarak tasarımı gürlüğü değişkenlerine duyarız kılar.

1. GİRİŞ

Çeşitli tasarım hedeflerini dikkate alarak türbin konfigürasyonunu seçmek ve ana bileşenleri boyutlandırmak rüzgar türbini tasarımının bir parçasıdır. Tasarım hedeflerine örnek olarak yüksek performans, daha düşük yapısal yükler ve daha düşük maliyet örnekler olarak gösterilebilir. Yaygın olarak kullanılan tasarım yöntemlerinden birisi karar bazlı tasarım prosedürüdür. Bu yöntemde her tasarım kararı tek tek ele alınır ancak tasarım kararları aslında birbirlerini etkiledikleri için optimum tasarıma ulaşmak kolay değildir [1].

Rüzgar enerjisine olan talepteki artış, rüzgar türbini tasarım optimizasyonunun önemini arttırmıştır. Bu optimizasyon sürecinde çeşitli maddi ve fiziksel kısıtlamalar dikkate alınmalıdır [2]. Rüzgarın stokastik yapısı, optimizasyon sürecinde belirsizliğin önemini artırır [3]. Bu belirsizliğe karşı tasarımda güvenlik faktörlerinin kullanılması yaygın bir yoldur. Fakat, bu durum tasarımı daha tutucu hale getirilir.

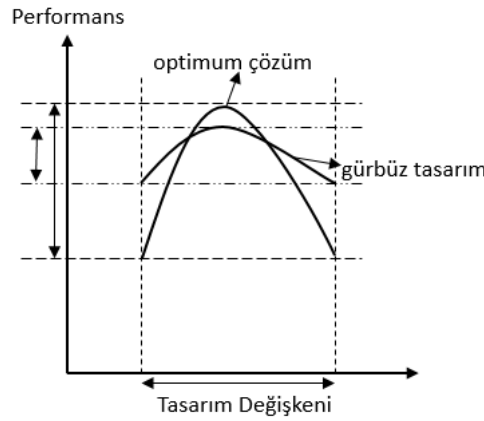
Yakın zamanda yapılan bir çalışma, deterministik optimizasyon yöntemlerinin rüzgarın içerdiği belirsizlikten ötürü rüzgar türbinleri için elverişli olmadığını belirtmiştir [4]. Gürbüz tasarım (robust design), rüzgardaki belirsizliğin performans üzerindeki etkisini azaltmak için etkili bir yöntemdir. Gürbüz tasarım yöntemleri otomotiv, havacılık ve medikal endüstride de kullanılmaktadır [5].

Günümüzde rüzgar türbini tasarımına entegre bir yaklaşım eksikliği vardır [6]. Daha iyi makineler tasarlamak için güvenilir ve çok disiplinli tasarım araçlarına ihtiyaç duyulmaktadır [7].

Makalenin bundan sonraki bölümlerinde ilk olarak gürbüz tasarımının optimizasyondan farkı ve gürbüz tasarım yönteminin avantajı anlatılacaktır. Sonra ise bu yöntemi uygulamak için kullanılan temel metodlarla ilgili bilgi verilecek ve yöntemin uygulama adımları açıklanacaktır. Son olarak ise elde edilen ön sonuçlar gösterilecektir.

2. GÜRBÜZ TASARIM SİMÜLASYONU

Bir tasarım optimize edildiği zaman her bir amaç için tasarım alanından bir nokta seçilir. Tasarım değişkenlerindeki bir değişiklik ya da tasarımın farklı bir operasyon noktasında çalışması performansı, tepkiyi, bilmediğimiz bir noktaya taşıyabilir. Gürbüz tasarımda ise hedef, hedeflenen performansın oynamalardan etkilenmemesidir. Optimizasyon ve gürbüz tasarım için bir örnek Şekil 1 de gösterilmiştir.



Şekil 1. Optimizasyon ve gürbüz tasarım arasındaki farklara örnek

Taguchi'ye göre gürbüz tasarımın amacı; sadece performans hedeflerine ulaşmaya çalışmak değil aynı zamanda performanstaki değişimi en aza indirerek ürün ve sürecin kalitesinin artırılmasıdır [8]. Gürbüz tasarımda kontrol edilebilen tasarım değişkenlerinin seçimiyle tasarımın tepkileri kontrol edilemeyen tasarım değişkenlerinden ve gürültüden etkilenmez hale getirilir [9].

Gürbüz tasarım simülasyonu yöntemi havacılık sistemleri tasarımında kullanılmak üzere Marvis ve çalışma ekibi tarafından önerilmiştir [10]. Bu yöntem seçilen bir performans hedefini belirsizlik parametrelerinden oluşan bir olasılık fonksiyonu olarak incelememizi sağlar.

Gürbüz tasarım simülasyonunda, tüm alt sistemler aynı anda ele alınır. Müşteri memnuniyeti, değerlendirme kriterlerini en üst düzeye çıkararak sağlanırken, tasarımsal ve çevresel kısıtlamalar da dikkate alınır. Sadece bir tasarım noktası için elde edilen optimum değer, tasarım noktasının dışındaki performansı da sağlayabilmek adına değişebilir.

2.1. GÜRBÜZ TASARIM SİMÜLASYONU YÖNTEMİNDE KULLANILAN METODLAR

Gürbüz tasarım simülasyonu yöntemi bazen istatistikte de kullanılan metodlardan faydalanır. Bunların başlıcaları şu şekildedir;

Deney Tasarımları (DT): Tasarım uzayını büyütmek, tasarımın performansının en yüksek olduğu noktayı bulma şansını artırır. Ancak tasarım uzayını büyütmek, tüm tasarım olasılıklarını incelemek için gerekecek hesaplama maliyetini de yükseltecektir. DT (design of experiment, DOE) yönteminin amacı tasarım uzayındaki uygun noktaları seçerek hesaplama maliyetini düşürmektir. Böylece tasarım uzayındaki tüm noktaların incelenmesi yerine yalnızca seçilmiş belli başlı noktalar incelenir. Bu noktaların yerleri, kullanılan deney tasarımları yöntemine göre değişir [11]. DT yöntemi kullanılarak seçilen tasarım noktalarının incelenmesi tasarım çıktısı ve tasarım parametreleri arasında ilişki kurmak için yeterli olmaktadır.

Tepki Yüzeyi Denklemi (TYD): Tepki yüzeyi denklemi (response surface equation), girdiler ve çıktılar arasındaki ilişkiyi gösteren çok boyutlu bir polinomdur [12]. DT metoduyla elde edilen girdi ve çıktı verileri kullanılarak oluşturulur. Tepki yüzeyi, tasarımcının girdi verileri için tanımladığı tasarım uzayının tek bir denkleme indirgeyerek daha düşük hesaplama maliyeti ile analizini sağlar [13]. Denklem 1 örnek bir TYD'nin nasıl formülize edildiğini gösterir.

$$TYD = a + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k c_i x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k d_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

Bu denklemde a, b, c ve d sabit katsayılar, x tasarım parametresi ve k kaç adet tasarım parametresi olduğudur.

Ön Eleme: Ön eleme (screening), tasarımın hedefi için önem arz etmeyen değişkenlerin elenmesiyle tasarım parametresi uzayını küçültmeye yarar. Tasarım değişkenleri geçerlilik aralıkları boyunca değiştirilirken tasarımın nasıl etkilendiği takip edilir. Tasarım sonuçlarının duyarsız olduğu parametreler elenirken sadece tasarım üzerinde etkileri fazla olan parametreler kullanılır.

Monte Carlo Simülasyonları: Monte Carlo Simülasyonları tasarım performansının istatistiksel dağılımını bulmak için kullanılır. Bu yöntem sayesinde tasarım parametrelerindeki belirsizliğin tasarım üzerindeki etkisi olasılık dağılımı olarak incelenebilir [14]. Monte Carlo Simülasyonları esnasında çokça simülasyon koşulu ve tepki yüzeyi denklemi olmadan bu yöntemi kullanmak hesaplama maliyeti açısından oldukça elverişsizdir.

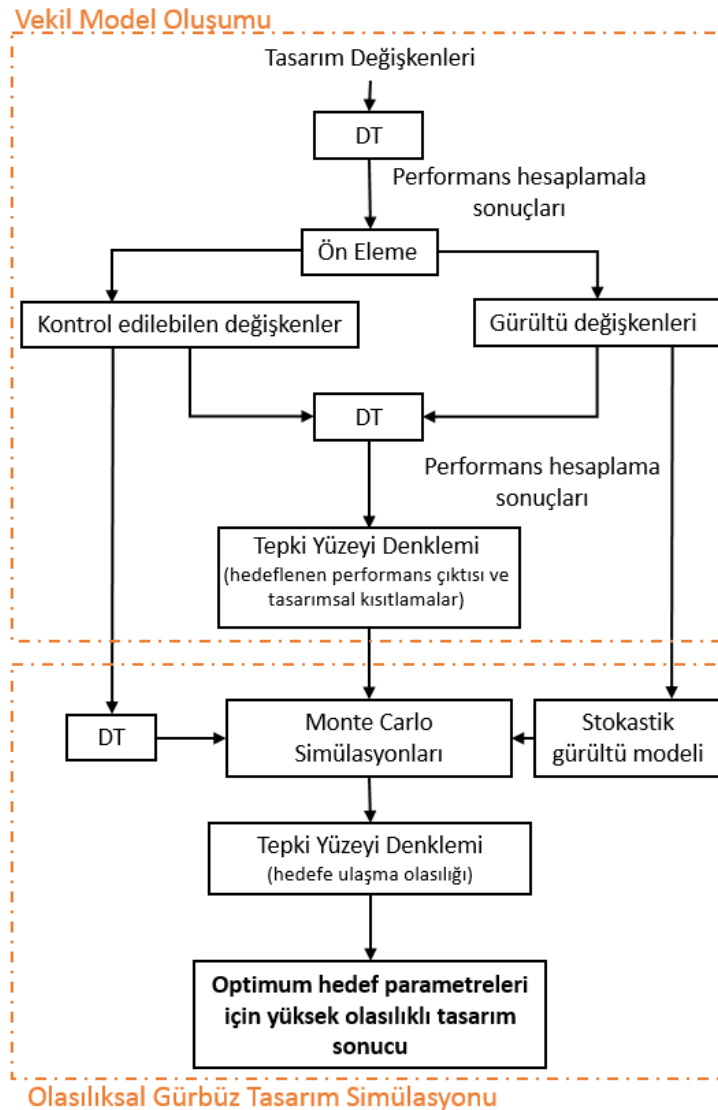
2.2 GÜRBÜZ TASARIM SİMÜLASYONU YÖNTEMİNİN ADIMLARI

Gürbüz tasarım simülasyonunda ilk olarak tasarımda kullanılacak tasarım parametreleri ve onların tasarım aralıkları seçilir. DT yöntemi kullanılarak çeşitli tasarım konfigürasyonlarını veren bir tablo elde edilir ve bu tablodaki her bir konfigürasyon, bir performans yazılımı yardımı ile incelenir. Elde edilen performans sonuçları ve tasarım konfigürasyonları incelenerek bir ön eleme işlemi gerçekleştirilir. Burada amaç, hedef olarak seçilen performans çıktısı üzerinde etkisi olan tasarım parametrelerinden bir alt küme oluşturmak ve bu kümenin dışında kalan tasarım parametrelerini elyerek tasarım uzayını küçültmektir. Bu andan itibaren tasarım parametresi olarak yalnızca ön elemeyi geçen parametreler kullanılır.

Yeni bir DT oluşturulur ve bu veriler kullanılarak performans çıktısı ve her bir tasarımsal kısıtlama için ayrı ayrı TYD oluşturulur. Artık tasarım parametreleri ve performans çıktısı arasındaki ilişki tek bir denkleme indirgenmiştir ve tasarım uzayını incelemek için bu denklem kullanılacaktır. Tasarım parametreleri kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen parametreler olarak iki sınıfa ayrılır. TYD kullanılarak kontrol edilebilen parametrelerin kontrol edilemeyen parametreler üzerindeki etkileri incelenir ve kontrol parametreleri ile oynanarak performans çıktısının ortalaması hedeflenen değere yaklaştırılır. Gerektiği durumlarda gürültü parametrelerinin etkisini azaltmak için performanstan bir miktar fedakarlık yapılabilir.

Sadece kontrol edilebilen parametreler kullanılarak son bir DT oluşturulur. Kontrol edilemeyen parametreler için ise olasılık dağılımları seçilir. Bu dağılımların seçimi ya geçmiş davranışları dikkate alınarak ya da parametrelerin alacağı değerler ile ilgili genel beklentiler göz önünde bulundurularak yapılabilir. DT tablosundaki her bir kontrol edilebilen değişken konfigürasyonu için Monte Carlo simülasyonları yapılır. Bu simülasyonlar gürültü değişkenlerinin olasılık dağılımları dikkate alınarak ayarlanır. Çıktılar kullanılarak hedefin histogram grafiği oluşturulur ve bu grafiğe standart sürekli olasılık yoğunluk fonksiyonu (pdf) ve kümülatif yoğunluk fonksiyonu (cdf) tanımlanır. Kümülatif yoğunluk fonksiyonları performans çıktısının hedeflenenden daha düşük ya da daha yüksek değer alma olasılığını gösterir. Bu olasılıklar kullanılarak kontrol edilebilen parametreler cinsinden bir TYD oluşturulur. Bu TYD kontrol edilebilen tasarım parametreleri ile hedeflenen performansa ulaşma olasılığı arasındaki ilişkiyi temsil eder. Bu denklem sayesinde hedefe ulaşma olasılığını maksimize eden tasarım parametreleri konfigürasyonu bulunabilir. Bu konfigürasyonun tasarımsal kısıtlamaları sağlamanın da kontrol edilmesi gerekmektedir.

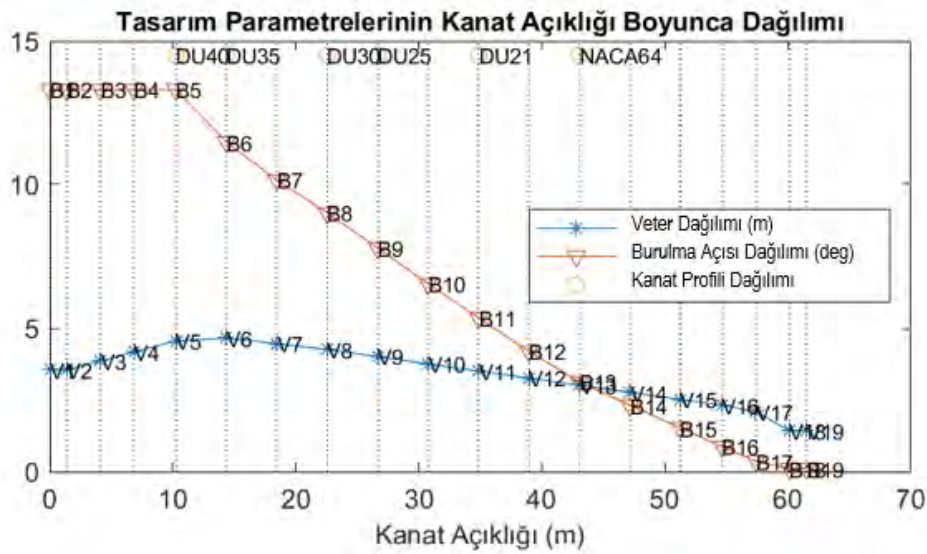
Sürecin sonunda hedeflenen değerden daha yüksek (ya da isteğe göre düşük) bir çıktı elde etme olasılığını maximize eden ve bunu yaparken tasarımsal kısıtlamaları da dikkate alan gürbüz bir tasarım elde edilmiştir. Gürbüz tasarım simülasyonu yöntemi “Tasarımım hedefe ulaşıyor mu?” sorusuna istatistiksel olarak yanıt verir. Bütün süreç Şekil 2’de blok diyagram kullanılarak özetlenmiştir.



Şekil 2. Gürbüz tasarım simülasyonu yöntemi

3. ÖN SONUÇLAR

NREL 5MW yatay eksenli rüzgar türbini tasarımının referansı olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada tasarım parametreleri bıçak geometrisini tanımlayan veter dağılımı, burulma açısı dağılımı ve kanat profilinin kalınlık-veter oranı olarak seçilmiştir. Veter ve burulma açısı parametreleri NREL 5MW rüzgar türbini için 19 farklı kanat açıklığı noktasında tanımlıdır. Bu sebeple her iki dağılım, 19 farklı kanat açıklığı noktasında tanımlanmış veter ve burulma açısı olarak kabul edilmiştir. Ayrıca bu türbinde silindirik olmayan 6 farklı kanat profili kullanılmış olduğu için kanat profili kalınlık-veter oranı 6 noktada değiştirilmiştir. Böylece 19 adet veter, 19 adet burulma açısı ve 6 adet kanat profili kalınlık-veter oranı olmak üzere toplamda 44 adet tasarım parametresi vardır. Bu parametrelerin bir bıçak üzerindeki dağılımı Şekil 3'te görülmektedir.



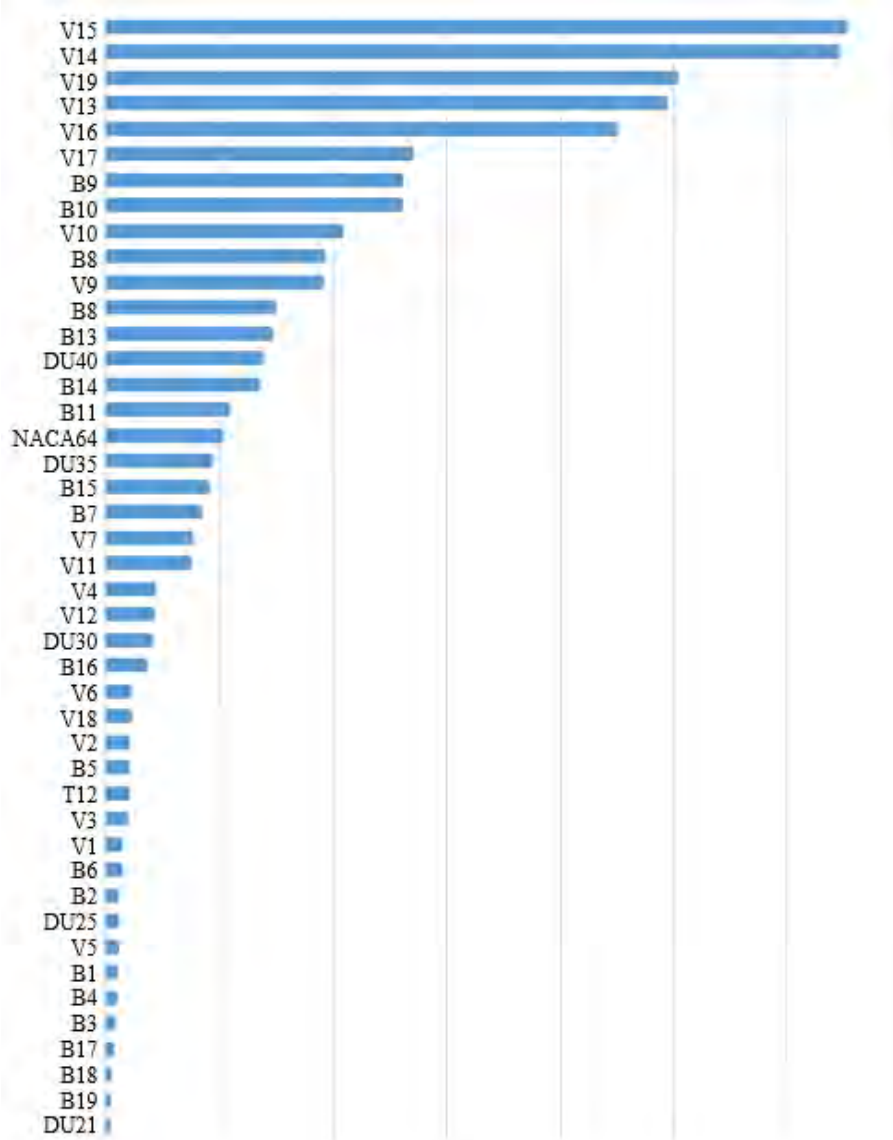
Şekil 3. Tasarım parametrelerinin kanat boyunca dağılımı

Güç çıktısını maksimize etmek tasarım hedefi olarak seçilmiştir. Güç çıktıları, oluşturulan DT konfigürasyonları için çok disiplinli aeroelastik bir hesaplama programı olan FAST kullanılarak hesaplanmıştır [16]. Hesaplamalar farklı türbülanslarda ve ortalama rüzgar hızı 11m/s olan rüzgar alanında yapılmıştır. 11 m/s rüzgar hızı güç çıktısının nominal değere ulaştığı rüzgar hızına (11.2 m/s) çok yakındır.

Eğer tasarım parametrelerinin iki seviyedeki tüm konfigürasyonlarının güç çıktısı üzerindeki etkileri incelenmek istenseydi 2^{44} adet simülasyon yapılması gerekirdi. Bu sayıyı azaltmak için "Fractional Factorial DT" yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemden üç ve daha fazla parametrenin etkileşimleri göz ardı edilmiştir. Bu yöntem yapılması gereken deney sayısını $128+1=129$ a kadar düşürür. 128 deney tasarım parametrelerinin minimum ve maximum noktalarında, geriye kalan 1 deney ise tam orta noktada yapılmıştır. Orta noktada yapılan simülasyonun amacı parametrelerin kuadratik etkisini de gözlemleyebilmektir. Orta nokta olarak referans tasarım olan NREL 5MW değerleri kullanılmıştır. Tasarım parametrelerinin minimum ve maksimum noktaları ise veter ve burulma açısı için referans değerlerinden $\pm 5\%$ ve kanat profili kalınlık-veter oranı için referans değerlerinden $\pm 3\%$ oynanarak hesaplanmıştır. DT tablosu istatistiksel hesaplama yazılımı olan JMP kullanılarak oluşturulmuştur [15].

Elde edilen güç çıktıları türbülansdan dolayı salınımlıdır. Her bir DT konfigürasyonu için bu salınımların ortalaması alınmıştır. Alınan sonuçlar analiz edilerek parametrelerin güç üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Parametrelerin güç üzerindeki bireysel etkisini gözlemlemek için Pareto grafiği kullanılmıştır. Praeto grafiğinde, tasarım parametrelerinin güç çıktısı üzerindeki bireysel etkileri çubuklar olarak ifade edilir. Çubuklar ne kadar uzunsa değişkenin çıktı üzerindeki etkisi o kadar çoktur [17]. Düşük türbülanslı bir rüzgar alanında güç çıktısı için elde edilen Pareto grafiği Şekil 4'te gösterilmiştir. Bu grafiğe bakarak güç çıktısını en çok kanat açıklığının ucuna doğru olan veter parametrelerinin etkilediği görülmektedir.



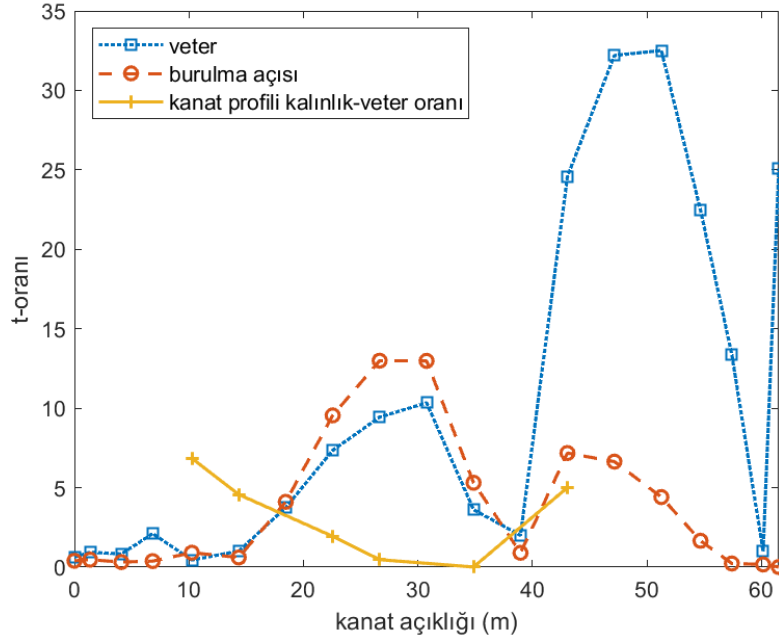
Şekil 4. Güç çıktısı için tasarım değişkenlerinin Pareto grafiği

Pareto grafiğindeki çubukların uzunluğu t-oranı hesaplaması ile çizilir. Parametrenin estimasyon değerinin standart hataya oranı t-oranını verir [18]. Denklem 2 de t-oranının nasıl hesaplandığı gösterilmiştir. Bu oran ne kadar büyükse tasarım parametresinin çıktı üzerindeki etkisi de o kadar büyüktür.

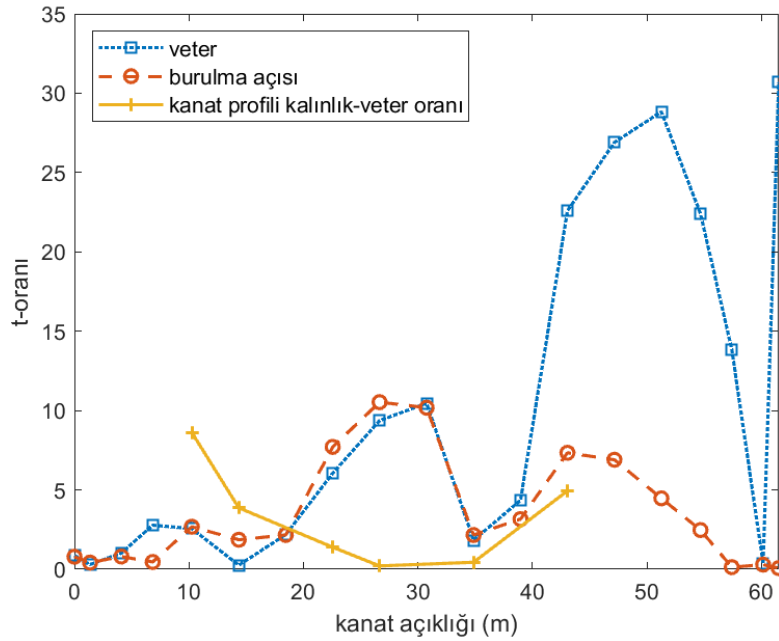
$$t_{\hat{\beta}} = \frac{\hat{\beta}}{s/\sqrt{n}} \quad (2)$$

Bu denklemde $\hat{\beta}$, β parametresinin tahmin edilen değeri, s popülasyonun standart hatası ve n popülasyon büyüklüğüdür.

Önemli parametrelerin kanat üzerindeki dağılımını görselleştirebilmek adına veter, burulma açısı ve kanat profili kalınlık-veter oranı parametrelerinin t-oranı değerleri kanat açıklığı boyunca çizilmiştir. Şekil 5 ve Şekil 6 tasarım değişkenlerinin güç çıktısı üzerindeki etkisini farklı türbülans değerlerinde göstermektedir. Bu şekillere bakarak parametrelerin güç çıktısı üzerindeki etkisinin türbülansa göre değiştiği ancak önemli parametre alt kümesinin türbülansın etkilenmediği sonucunu çıkarabiliriz.



Şekil 5. Tasarım parametrelerinin %5 türbülans için güç çıktısı üzerindeki etkileri



Şekil 6. Tasarım parametrelerinin %20 türbülans için güç çıktısı üzerindeki etkileri

Elde edilen sonuçlara bakarak kanat açıklığının ortasından itibaren veter parametrelerinin güç çıktısı üzerinde etkili olduğu sonucuna varabiliriz.

Ön eleme Pareto Prensibi kullanılarak yapılabilir. Bu prensibe göre performanstaki değişimin %80'i, tasarım parametrelerinin %20'ine bağlıdır [17]. Buradan yola çıkarak 8 ya da 9 parametre seçilmesi gerekmektedir.

Düşük türbülanslı durum için, Şekil 4'te gösterilen pareto grafiğine bakarak ön elemeyen geçen tasarım parametreleri V15, V14, V19, V13, V16, V17, B9 ve B10 olarak listelenebilir. B10 ve V10 (Pareto sıralamasında 8. ve 9. parametreler) arasındaki t-oranı arasında bir kopma olduğu için 8 parametrenin kullanılmasına karar verilmiştir. Böylece güç çıktısını en çok etkileyen 8 parametre seçilmiş ve parametre sayısı 44'ten 8'e düşürülmüştür. Bundan sonraki adımlarda bu 8 parametreyi kullanarak tasarıma devam edilecektir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada Gürbüz Tasarım Simülasyonu yönteminin yatay eksenli rüzgar türbinleri tasarımında kullanımı önerilmiştir. Gürbüz Tasarım Simülasyonu yöntemi DT , ön eleme ve TYD gibi metodları kullanarak büyük bir tasarım uzayını düşük hesaplama maliyetleri ile inceler. Tasarım boyunca, çevresel ve tasarımlar kısıtlamalar göz önünde bulundurulur. Bu yöntemle tasarımın gürültü değişkenlerinden etkilenmesi minimuma indirilmektedir. Tasarımın sonucu standart bir optimizasyondan farklı olarak hedefe ulaşma olasılığı olarak hesaplanır.

Ön sonuçlar olarak DT oluşturulmuş ve veter, burulma açısı ve kanat profili veter-kalınlık oranları dağılımını temsil eden tasarım parametreleri arasında ön eleme yapılmıştır. Yapılan bu ön eleme sonucunda ilk başta 44 olarak belirlenen tasarım parametresi sayısı 6 adet veter ve 2 adet burulma açısı parametresi olmak üzere 8'e düşürülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] **Rekuc, S. J.** 2005. *Eliminating design alternatives under interval-based uncertainty*. Doktora tezi, Georgia Institute of Technology.
- [2] **Chehour, A., Younes, R., Ilincă, A., ve Perron, J.** 2015. *Review of performance optimization techniques applied to wind turbines*. Applied Energy 142 ,s. 361-388.
- [3] **Ning, S. A., Damiani, R., ve Moriarty, P. J.** 2014. *Objectives and constraints for wind turbine optimization*. Journal of Solar Energy Engineering 136, 4, 041010.
- [4] **Yang, H., ve Zhu, Y.** 2015. *Robust design optimization of supporting structure of off-shore wind turbine*. Journal of Marine Science and Technology 20, 4, s. 689-702.
- [5] **Bektas, E., Broermann, K., Pe_canac, G., Rzepka, S., Silber, C., ve Wunderle, B.** 2017. *Robust design optimization: On methodology and short review*. In Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE), 18th International Conference on 2017, IEEE, s. 1-7.
- [6] **Van Kuik, G., ve Peinke, J.** 2016. *Long-term research challenges in wind energy-A research agenda by the european academy of wind energy*, vol. 6. Springer.
- [7] **Bortolotti, P., Bottasso, C. L., ve Croce, A.** 2016. *Combined preliminary-detailed design of wind turbines*. Wind Energy Science 1, 1-71.
- [8] **Lin, Y.** 2004. *An efficient robust concept exploration method and sequential exploratory experimental design*. PhD thesis, Georgia Institute of Technology.
- [9] **Taguchi, G.** 1986. *Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes*. Tech. Rep.

- [10] **Mavris, D., Bandte, O., ve Schrage, D.** 1996. *Application of probabilistic methods for the determination of an economically robust hsc configuration*. 6. Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization (1996), s. 4090.
- [11] **DeLaurentis, D. A., Mavris, D. N., Schrage, D. P.,** 1996. *System synthesis in preliminary aircraft design using statistical methods*. 8/13 September 1996, 20th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, Sorrento, İtalya.
- [12] **Gunst, R. F.,** 1996. *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*.
- [13] **Unal, R., Stanley, D. O., Joyner, C. R.** 1994. *Parametric model building and design optimization using response surface methods*. Journal of Parametrics 14, 1994, s. 81-96.
- [14] **Mavris, D. N., Bandte, O., ve DeLaurentis, D. A.**1999. *Robust design simulation: a probabilistic approach to multidisciplinary design* . Journal of Aircraft 36, 1 ,1999, s. 298-307.
- [15] **Institute, S.** *JMP 8 User Guide*. SAS Institute, 2009.
- [16] **Jonkman, J. M., ve Buhl Jr, M. L.** 2005. *Fast user's guide-updated august 2005*. Tech. rep., National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO.
- [17] **Hines, W. W., Montgomery, D. C., ve Borror, D. M. G. C. M.** 2008. *Probability and statistics in engineering*. John Wiley & Sons.
- [18] **Box, G. E., Hunter, W. G., Hunter, J. S.** *Statistics for experimenters*

YARASALAR VE RESLER ÖZELİNDE YATIRIMIN VE ÇEVRENİN SÜRDÜRÜLEBİLİR DENGESİ NASIL SAĞLANABİLİR?

Tarkan Yorulmaz

Çankırı Karatekin Üniversitesi, Yapraklı Meslek Yüksekokulu, Ormancılık Bölümü,
Avcılık ve Yaban Hayatı Programı
¹tyorulmaz@karatekin.edu.tr

ÖZET

Türkiye'de giderek artan RES sahaları ile birlikte RESlerin yaban hayatına olan etkileri ve yaban hayvanlarının RES sahaları ile ilişkileri dikkat çeken bir konu haline gelmektedir. Yaban hayatının gizemli türleri olan yarasalar kuşlardan farklı olarak memeli canlılardır. Sadece gece uçabilen bu türler böcekler üzerinden beslendikleri için ekolojik dengenin vazgeçilmez unsurları olarak ülkemizde ve dünyada koruma altındadırlar. Yarasalar dünyada ve ülkemizde RES sahalarında özellikle kurulum sonrasında en çok dikkat edilen canlılar haline gelmiştir. Avrupa'da türbin yarasa çarpışma vakaları, RESler ve yarasa ilişkisinin nasıl tespit edileceği, sorunlara uygun çözüm önerileri her yıl güncellenerek Birleşmiş Milletlere bağlı olarak çalışan EUROBATS tarafından kayıt altına alınmakta ve ilan edilmektedir. Rüzgar türbinlerinin yarasalarla ilişkisi üzerine ülkemizde henüz kurumsal düzeyde bir çalışma bulunmamaktadır. Ülkemizde bu alanda çalışma yapan ve uzmanlık alanı doğrudan yarasa olan çok az sayıda yetişmiş araştırmacı bulunmaktadır. Yarasaların az çalışılmış olması, RESler ve yarasalarla ilgili kurumsal düzeyde risk haritasının, veri tabanının ve tedbir skalasının olmayışı çoğu zaman RES yatırımcılarının izin süreçlerinin tıkanmasına, izleme, etki değerlendirme tespiti, koruma çalışmaları gibi maliyet kalemlerinin artmasına ve çevreciler ile karşı karşıya gelmelerine yol açmaktadır. Bu bildiride dünyadan ve ülkemizden RES sahalarında yarasa etki değerlendirmesi çalışmalarına bazı örnekler verilecektir. Bu örneklerde RES faaliyeti ile yarasaların yaşamı arasında sürdürülebilir dengenin kurulabileceğine dair uygulamalar aktarılacaktır. Böylece yerinde yapılacak basit bazı tedbirlerin yatırımcıyı doğru yönlendirerek ve yarasaların zarar görmesinin de önüne geçerek sürdürülebilirlik ilkesi hem yatırım hem de doğa koruma açısından birlikte sağlanabileceği aktarılacaktır. Bu örnekler üzerinden ülkemizde giderek artan RES sahalarında daha az ve yerinde bir maliyetle daha etkin yarasa koruma ve daha verimli enerji üretimi ilkesinin yakalanabileceğinin gösterilmesi amaçlanmaktadır.

1. GİRİŞ

Fosil yakınlının çevreye olan olumsuz etkileri, yüksek maliyetleri ve iklim değişikliği nedeniyle rüzgâr enerji sektörü gün geçtikçe dünyada hızla yayılmaktadır (1,2). Rüzgar enerjisi yenilenebilir olması, emisyon üretmemesi ve su kullanmaması bakımından da tercih sebebidir (3). Ancak dünya genelinde rüzgar enerji tesislerinden kaynaklı giderek artan oranda yarasa ölümleri kaydedilmektedir (2-5). Kuzay Amerika'da 2000-2011 yılları arasında rüzgar türbinlerinden kaynaklı kümülatif yarasa ölümlerinin 650.000 ila 1.3 milyondan fazla bir seviyeye ulaştığı tahmin edilmektedir (6). Avrupa'da yarasalar ve kuşların rüzgar enerji türbinleri ile olan ilişkisi son 25 yıldır yaygınlaşmakta dikkat çeken bir konu haline gelmektedir. Kuşlarla başlayan rüzgar türbini ilişkisi RES Projelerinin kurulum öncesi ve kurulum sonrasında, göç esnasında ve beslenme sırasında yarasaları da konu etmeye başlamıştır. Rüzgar enerji santrallerinde çarpışma sonucu ölen kuş ve yarasa verileri dünyada 1972 yılından itibaren Avustralya (7), ABD ve Kanada (6, 8-10) ve Kuzey Avrupa'da (1) yapılmaktadır. Avrupa'da rüzgar türbinlerinin yol açtığı yarasa ölümleriyle ilgili veriler EUROBATS Intersessional Working Group (AAVV 2010) ve Dürr and Bach (11) and Dürr (12) tarafından her yıl güncellenmektedir. Kanada ve Amerika'da yapılan bir başka çalışmada ise rüzgar türbin

hızının yarasalar üzerine olan etkisi araştırılmış ve 6 m/s'nin üzerindeki hızlarda yarasa ölümlerinin %85 oranında azaldığı görülmüştür (1).

Türkiye’de bu yarasalar ve rüzgar türbinleri ile ilgili ilk bilimsel çalışmalara göre ise yarasa aktivitesini etkileyen en önemli unsurların başında bitki örtüsü ile rüzgar hızı gelmektedir. Bölgedeki rüzgar hızının 7 m/s'nin üzerinde yarasa aktivitesinin neredeyse durduğu tespit edilmiştir (13)

Yarasaların rüzgar türbinlerinden daha çok aktif oldukları Ağustos-Eylül dönemi arasında etkilendiği ve ölümlerin daha fazla olduğu araştırmalar sonucunda ortaya konmuştur. İlkbahar aylarında ise en düşük etkinin olduğu tespit edilmiştir (1, 5, 7). Rüzgar türbin kanatlarının dönüşünden kaynaklı olan etrafındaki ani hava basıncı düşüşü, yarasaların akciğerlerini patlattığı kanıtlanmış ve bu durum “Barotravma Sendromu” olarak literatüre geçmiştir (3).

Dünya’da ve ülkemizde de Rüzgar enerji santrallerinde yarasaların türbinlere çarpma sonucu ölümleri devam etmektedir. Bu çalışmanın amacı yarasa ölümlerini azaltmak ve RES özelinde yatırımın yarasalar üzerindeki etkisini azaltarak bir denge halinde sürdürülebilirliğini sağlamak amacıyla etkin ve uygulanabilir önerilerde bulunmaktır. Bu amaçla dünya genelinde uygulanan bilimsel yöntemler derlenerek Ülkemizde yaptığımız saha çalışmalarından somut veriler dikkate alınarak rüzgar enerji türbinleri, RES sahaları ve yarasalar hakkında nihai bir değerlendirmeye varılmıştır.

2. YARASA ÖLÜMLERİNİ ARTTIRAN FAKTÖRLER

Dünyada RES sahalarında yapılan çalışmalarda rastlanan yarasa ölümleri ile ilgili ortaya çıkış nedenleri, farklı açılardan ele alınmış ve bu konuda pek çok bilimsel çalışma yapılmıştır (1-7). Bu çalışmada RES özelinde yarasaların ölümüne sebep olan faktörler 4 gruba ayrılmıştır.

- 1-RES sahası ve türbinlerden kaynaklı faktörler
- 2-Yarasaların yıllık döngüleri ve ekolojik özelliklerinden kaynaklı faktörler
- 3-RES işletmesinin izin süreçlerinden kaynaklı faktörler
- 4-Uzman donanımı ve yaklaşımından kaynaklı faktörler

2.1. RES sahası ve türbinlerden kaynaklı faktörler

Bu çalışmaların sonuçlarını değerlendirdiğimizde RES sahası açısından yarasa ölümlerini arttıran birçok faktör sayılmıştır (2). Bunlar;

1. Rüzgar hızının 6 m/s ‘den az olması,
2. Türbin pervanesinden kaynaklanan ani basınç azalması,
3. Türbinin bulunduğu alanın şartları (Orman içi veya kenarı, mağaraya yakınlığı),
4. Türbinin böcek çekici özelliği (motor sıcaklığından dolayı ve beyaz renkte olması),
5. Türbinin ürettiği sesin yarasanın yön bulma yeteneğini bozabilmesi,
6. Türbin kulesinin yarasalara yuva olma özelliği taşıyabilmesi,
7. Türbinlere yerleştirilen ışıkların yarasayı çekebilme özelliği,

Bunlara ilave olarak EUROBATS’e göre türbin yerleşimlerine ve türbin çalışma durumlarına göre etkiler sınıflandırılmıştır (Çizelge 1-2).

Çizelge 1. Bach ve Rahmel (14)'e göre rüzgar türbinlerinin yerleşimine göre en önemli etkiler, şu şekilde verilmiştir.

TÜRBİN YERLEŞİMİNE GÖRE ETKİLER		
Etki	Yaz Dönemi	Göç Sürecinde
İletişim yolları ve yapıların inşası sırasında beslenme habitatlarının kaybolması	Yerine göre düşük seviyeden orta seviye değişen etkiler	Düşük seviyede etki
İletişim yolları ve yapıların inşası sırasında tüneme yerlerinin kaybolması	Yerine göre ve türün bulunduğu yere göre muhtemelen yüksek seviyeden daha yüksek seviyeye doğru artan bir etki	Yüksek seviyeden daha yüksek seviyeye doğru artan bir etki

Çizelge 2. Bach ve Rahmel (14)'e göre rüzgar türbinlerinin, çalışmasıyla ilgili en önemli potansiyel etkileri şu şekilde verilmiştir.

ÇALIŞAN TURBİN SAHASIYLA İLGİLİ ETKİLER		
Etki	Yaz Dönemi	Göç Sürecinde
Yarasa uçuş güzergahlarının değişmesi veya yok olması	Orta Etki	Düşük seviyede etki
Ölümler	Düşük seviyeden yüksek seviyeye değişen etki (Türe göre değişim göstermekte)	Yüksek seviyeden daha yüksek seviyeye doğru artan bir etki

Yukarıda çeşitli araştırmalarda konu edilen ve yarasa ölümlerini arttıran faktörlerin yanında bu çalışmada ülkemizde pek çok sahada karşılaşılan ve RES sahasından kaynaklı yarasa ölümlerini arttıran faktörler şu şekilde sınıflandırılmıştır;

1. Türbin noktalarındaki sürekli ve yüksek ışıklandırma yapılması,
2. Şalt sahasının türbin kümelerinin yakınında ve merkezinde olması
3. Türbin noktasının orman sınırına mesafesinin 200 m'den daha yakın olması
4. Türbin temelini bir kot farklı oluşturacak şekilde yerleştirilmesi
5. Türbin yakınlarına yerleşim yeri, ağaçlandırma vb. yarasa çekici özellikte yapıların yerleştirilmesi

2.2. Yarasaların yıllık döngüleri ve ekolojik özelliklerinden kaynaklı faktörler

Yarasalar yıl içinde kış mevsimini (Kasım-Mart) uykuda geçiren diğer dönemlerde (Nisan-Ekim) sadece gece aktif olan memeli canlılardır. Yarasalar ağırlıklı olarak sivrisinek, gece uçan böceklerle beslenmekte ve doğada bu böcekleri dengeleyerek önemli hizmetler sunmaktadır. RES sahaslarında yarasaların etkisi anlaşılmak istediğinde bu bilgi dikkate alınmak zorundadır.

RES sahasından kaynaklı faktörlerin yanında yarasaların yaşam döngüleri, beslenme ve tüneme davranışları ve bazı biyolojik özelliklerinden kaynaklı rüzgar türbinlerinde yarasa ölümlerini arttıran unsurlar vardır;

Rüzgar enerji santrallerinde yarasalardan kaynaklı ölümleri arttıran faktörler (2);

1. Yarasaların hareket halindeki pervaneleri belirlemekte zorlanması,
2. Ağustos-Eylül ayları arasında yarasaların aktivitesinin artması
3. Bazı yarasa türlerinin (*Pipistrellus*, *Hypsugo* ve *Myotis sp.*) yavaş ve fazla manevra yaparak uçuş özelliğine sahip olması

Bu özellikler dışında EUROBATS de yarası türlerini RES sahalarındaki risk durumlarına göre sınıflandırmıştır (Çizelge 3)

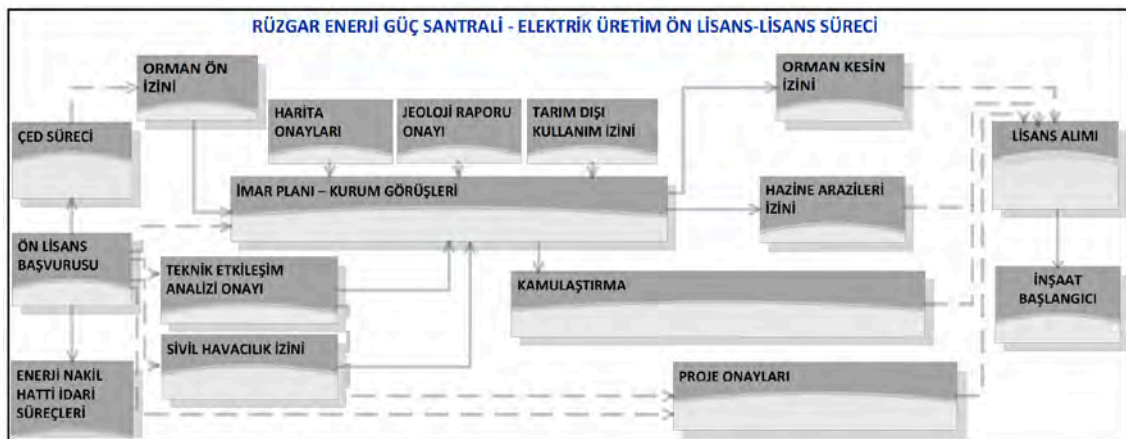
Çizelge 3. Avrupa ve Akdeniz yarası türleri için rüzgar türbinleri ile çarpışma riski seviyesi (mikro- ve küçük rüzgar türbinleri hariç) EUROBATS uygulamaları. (2014 Eylül bilgisi) (14)

Yüksek Risk	OrtaSeviyede Risk	DüşükSeviye Risk	Bilinmiyor
<i>Nyctalus spp.</i>	<i>Eptesicus spp.</i>	<i>Myotis spp.</i>	<i>Rousettus aegyptiacus</i>
<i>Pipistrellus spp.</i>	<i>Barbastella spp.</i>	<i>Plecotus spp.</i>	<i>Taphozous nudiventris</i>
<i>Vespertilio murinus</i>	<i>Myotis dasycneme*</i>	<i>Rhinolophus spp.</i>	<i>Otonycteris hemprichii</i>
<i>Hypsugo savii</i>			<i>Miniopterus pallidus</i>
<i>Miniopterus schreibersii</i>			
<i>Tadarida teniotis</i>			

2.3. İlgili Kurum ve Kuruluşlar ve süreçlerden kaynaklı faktörler

Türkiye’de enerji ihtiyacının yüksek olmasından dolayı RES yatırımı bir ülke stratejisi olarak desteklenmektedir. RES yatırımlarının maliyetlerinin yüksek ve lisanslama/izin süreçlerinin zahmetli olması yatırımcıyı maliyet ve zaman açısından yıpratmaktadır. Yukarıda bahsedilen bütün faktörlerin dışında tamda bu yorucu süreçlerin içinde yarasaların bir sorun olarak konu edilmesi yatırımcı ve bu yatırımları destekleyenler açısından itici hale getirmektedir (Şekil 1).

Ülkemizde Rüzgar santrallerinin izin süreçlerinde Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Tabiat Varlıklarını Koruma Genel Müdürlüğü, Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Doğa Koruma ve Milli Parklar Genel Müdürlüğünden ve fon sağlayan yabancı finans kaynaklarından istenen yarası etki değerlendirme raporları, yarası izleme raporları kapsamında, Rüzgar enerjisi işletmelerinin yarasalar üzerindeki etki düzeylerini tespit etmek ve bu etkiyi minimize etmek amacıyla “yarası uzmanlarından” incelemeler yapması ve çözüm önerilerinde bulunması istenmektedir.



Şekil 1. RES santrallerinde ön lisans ve lisans süreçlerini gösteren şema

Yukarıdaki şemada da görüldüğü şekliyle sahada yarası türlerinin varlığını, yada önemli bir yarası tüneme noktası olup olmadığını anlayabilecek bir imkan vermeksizin izin süreçleri ve RES sahasının inşaat süreci ilerleyebilmektedir. Türkiye’de çoğu durumda RES sahalarında yarası izlemesi 2 ana aşamada yürütülmektedir.

- 1-EDR yada ÇED olarak ifade edilen ve inşaat öncesi duruma ait genellikle 2 günü aşmayan bir çalışmadır. Bu çalışma Çevre Şehircilik Bakanlığı ve Tarım ve Orman Bakanlığı tarafından istenen bir rapor olmaktadır. Ancak bu süreçte türbin konumları belirlenmiş ve o konumlar için işlemler tamamlanmış durumdadır.
- İzleme olarak ifade edilen, İnşaat başladığında ve/veya operasyonel döneme ait yarasa izleme sürecidir. Bu süreç Tarım ve Orman Bakanlığı, Doğa Koruma ve Milli Parklar Genel Müdürlüğünden istenen ve herhangi bir teknik şartnamesi olmayan izleme talepleridir. Bu aşamada araştırma günleri RES işletmesinin kapasitesinden, türbin sayısından, bulunduğu sahanın coğrafik, iklimsel ve ekolojik özelliğinden bağımsız çoğu zaman donanımı bulunmayan bir uzmanın talebi doğrultusunda talep edilmektedir.

Bu süreçlerden bağımsız olarak da kurumların ve ilgili kuruluşların iletişiminden ve bilgi eksikliğinden kaynaklı faktörler de mevcuttur;

- İlgili kurum kuruluşlar ile uzmanlar arasında iletişim olmayışı: Birbirinin ne yaptığını neden yaptığını farkında olmadan ancak sonuçları birbirini olumlu yada olumsuz etkileyebilen sürecin iletişimden kopuk yürütülmesi.
- Lisanslama öncesi doğaya dair risklerin dikkate alınmasına dair yeterli bilginin sağlanmamış olması: Sonradan ortaya çıkan sorunların çözümünde uygulama zorluğu, zaman ve ekonomik kayıp ortaya çıkması
- Kümülatif etki değerlendirme bilgisine sahip olmadan çevresel etki sorumluluğunu alandaki bir proje üzerine yüklenme: Birden fazla ve farklı projenin olduğu bir alanda sadece bir tanesi üzerindeki etkiye yoğunlaşma
- Bakanlık ve ilgili kurumlarda yaban hayatı ve izlenmesi konusunda uzman kişilerin bulunmayışı. Sahaya ait olmayan, ve hatta yarasalara ait olmayan verilerle bir tespit yapıldığını fark edecek kişilerin denetim süreçlerinde yer almaması
- RES sahalarında yarasaların kış uykusunda olduğu dönemlerde çok kısa süreli ancak sorumluluk etkisi yüksek EDR veya izleme istenmesi: Bu aşamada fark edilmeyen büyük bir sorunun RES sahasının faaliyet aşamasında yapılan bir izlemede görülmesi ve yatırımcıya ön göremediği maliyet ve fiziksel sorunlar oluşturmaması.

2.4. Uzman donanımı ve yaklaşımından kaynaklı faktörler

- Arazi çalışması yapılmadan raporların hazırlanması (Sahanın gerçek zamanlı durumunu bilmeden masa başında sadece literatür bilgilerine dayanarak raporlar hazırlamak)
- Arazi çalışmalarının ilgili uzmanlar tarafından yapılmaması-Uzmanlığı olmadığı halde maddi kaygılarla ÇED ve EDR projelerinde yer alma isteği (Bir böcek uzmanının Entomolog'un-Yarasa değerlendirme raporu yazması).
- Tür teşhislerinin özensiz yapılması (Afganistandaki endemik bir türü Türkiye'den kaydetmek)
- Proje sahasının habitat özelliğine uygun olmayan bölgesel türlerin alanda yaşayabileceğinin belirtilmesi (Dağdaki RES sahasına-su samuru kaydı verilmesi)
- Sorunun ve uygun çözüm önerisinin doğru tespit edilmeyişi (Bu proje olmaz durdurulsun....yada...sorun yoktur herşey yolunda!)
- Çalışmaya ve proje sahasının özelliklerine uygun arazi çalışma sürelerinin belirlenmemesi (6 türbinlik sahada 8 gün arazi çalışması programlanırken 60 türbinlik sahaya 5 günlük program yapılması)
- Sahanın etkisini yansıtacak düzeyde yarasa tespit ve izleme çalışması yürütecek kabiliyeti olmayan kişilerin uzman olarak rapor hazırlaması
- Yarasalar ve RES sahaları arasındaki ilişkiyi konu eden bilimsel çalışmaların ülkemizde yok denecek kadar az olması

3. Değerlendirme

Bu aşamaya kadar Ülkemizde RES sahalarında yarasaların olumsuz etkilenmesini sağlayan faktörler sıralanmıştır. Bu faktörler kimi zaman başlı başına bir RES işletmesinde göze çarparken kimi zaman faktörlerin çoğu aynı anda bir sahada kendini gösterebilmektedir. Bu faktörler doğru ve zamanında tespit edildiğinde RES ve yarasa arasındaki ilişki yatırımcı açısından bir sorun olmaktan çıkarılabilecekken doğal dengenin korunması yönünde çok etkili adımlar atılmış olacaktır.

RES sahalarında yarasaların Türbinlerden olumsuz olarak etkilenmesinin önlenmesi veya etkisinin azaltılması amacıyla yukarıda ifade edilen faktörler dikkate alınarak bazı öneriler sunulmaktadır

Kurumlar ve Süreçlerle ilgili Öneriler

1. Lisanslanan veya lisanslanacak saha ile ilgili sorumluluğu olan bakanlıkların bir ön tarama yaptırması ve yatırımcının bir olumsuz sürprizle karşılaşmasının önüne geçilmesi sağlanabilir.
2. Lisanslanan sahada Türbin ve şalt sahasının konumlarını belirlemeye yönelik onaylar ÇED sonrasına bırakılabilir. Böylece Türbin konumları belirlendikten sonra geçilen süreçlerden sonra yarasaların ölümünden yada bir mağaranın sahada bulunmasından sonra zaruri bir türbin değişikliğinden doğacak maliyet ve süre kayıplarının önüne geçilmiş olacaktır.
3. Yatırımcının sahasında yarasa korumaya yönelik alacağı tedbirler ve bilimsel çalışmaları desteklemesine karşılık bazı vergilerde indirim ve muafiyet sağlanabilir. Böylece RES sahalarında yarasa korunma çalışmalarının bilimsel düzeyde yapılması sağlanmış olacak hem de yatırımcı bu faaliyetinden dolayı maddi bir külfetle karşılaşmayacaktır. Bu çalışmalardan elde edilecek bilgilerle de yatırımcı sahasını daha etkin olarak doğaya barışık bir biçimde işletebilecektir.

RES sahası ve türbinlerle ilgili öneriler

1. Res sahalarında Şalt sahasının türbin kümelerinden en az 1 km uzakta ve mümkünse daha düşük kotta olacak şekilde planlamak.
2. Türbinlerin orman sınırına enaz 200 m mesafede yer almasını sağlamak
3. Türbin yerleri kazıldığında Türbine 200 m mesafede üzerinde sık ağaç yapısı olan bir tepe bulunmamasını sağlamak (Mümkünse çevresi ile aynı yükseklikte yada daha yüksek tepede bir türbin kaidesi oluşturmak).
4. Türbin yapılarında gece daimi ışıklandırmadan kaçınmak.
5. Türbin konumlarını göl, bataklık dere, sulak alan, sazlık düzlüklere 5km mesafeden daha fazla yaklaştırmaktan kaçınmak (Bu eğer mecburi bir durum ise faaliyet aşamasındaki yarasalar üzerine etkisi incelenip yarasa kovucu sistemler veya operasyonel modifikasyonlar denenerek çözüm üretilebilir).

Yukarıdaki öneriler dikkate alınarak oluşturulmuş bir RES sahasında yarasa ölümleri oldukça azalacak veya hiç olmayacaktır. Ancak bu tedbirlere rağmen belli dönemlerde belli türbinler ile ilgili bir risk tespit edildiğinde.

- 1- İlgili türbin veya türbinlere yarasa kovucu sistemleri kurularak % 50 ye varan bir uzaklaştırma başarısı elde edilebilir.

- 2- Sahaya 5 km yakın ve daha düşük kotta bir alana (Vadiye) basit bir sulak ve sazlık alan oluşturularak yarasalar için alternatif ilgi çekici bir beslenme alanı yaratılabilir. Bu durumda yarasalar yüksek rüzgarlı alanı değil bu yeni beslenme alanını tercih edecektir.
- 3- Risk tespit edilen türbin veya türbinlerde sadece riskin tespit edildiği aylarda, sadece geceleri ve sadece rüzgar hızının 6 m/sn nin altında olduğu zamanlarda türbin elektrik üretme başlangıç hızını 5 m/sn 'den başlayacak şekilde (Cut-in speed) ayarlanabilir. Bu düzenleme yarasa ölümlerinde %60-90 oranında bir azalma sağlarken yatırımcıya % 0.8-1 oranında bir kayba mal olacaktır.

Yarasa izleme dönemleri ile ilgili öneriler

1. *Arazi Çalışması Zamanı:* Yarasalar Nisan-Ekim ayları arasında geceleri faaldirler. Bu sebeple çalışmalar genellikle yarasaların yoğun olarak aktif oldukları ve göç yaptıkları Nisan-Ekim ayları arasında odaklanmalıdır. Bu tarihler ilgili bölgenin iklimsel verilerine bağlı olarak değiştirilebilir. Ortalama sıcaklığı 15 °C 'nin üzerinde seyretmeye başladığında (Bölgeye göre) yarasa çalışmalarına başlamak için uygun kabul edilmektedir.
2. *Çalışma Süresi:* Nisan- Ekim ayları içinde en az 4 arazi dönemi sahadan yarasa verisi alınmalıdır. Gebelik Dönemi: Nisan-Mayıs, Yavrulama Dönemi :Haziran-Temmuz Çiftleşme Dönemi: Ağustos-Eylül (En fazla aktif oldukları dönem); Kışlama dönemi: Ekim-Aralık (Özellikle kış mevsimi sıcaklıkları 15 C derece civarında olan kıyı bölgelerinde)

Her dönem içinde yapılması gereken arazi süreleri alanın coğrafik durumuna, türbin sayısına ve uzmanın görüşüne bağlı olarak değiştirilebilir.

Bu dönemleri içermeyen yarasa izleme raporlarında saha hakkında yeterli bilgi sahibi olunamayacağından yapılacak öneride etkili olmayacak hem doğaya zararlı hem de yatırımcı açısından maliyet ve zaman kaybına yol açmış olacaktır.

Uzmanlarla ilgili öneriler

RES sahalarında yarasalarla ilgili hazırlanması istenen raporlarda en az dikkat edilen hususlardan biride uzmanın uzmanlığına dair yeterlilik belgesi veya yeterlilik durumudur. Yurtdışı finans destek kuruluşlarına hazırlanacak olan raporlarda ilgili uzmanın enaz 5-8 yıllık bir yarasa izleme saha tecrübesi aranmaktadır (Senior-Junior expert). Ülkemizde hazırlanan raporlarda ise yarasa konusunda uzmanlıkla ilgili nadiren yüksek lisans vurgusu yapılmaktadır. Ancak eğitim süreçlerinin tamamında sadece böcek, kuş, amfibi yada sürüngen çalışmış yarasa konusundaki uzmanlığı olmayan biyoloji veya orman mühendisliği mezunları bu sahalarda yarasa etki değerlendirme raporları hazırlamaktadır. Bu durum sahada bilimsel yada literatüre uymayan şekilde sahadan veri alma, aldığı veriyi yanlış ve eksik veya kimi zaman abartılı yorumlamaya yol açmaktadır. Sahadaki türler yanlış teşhis edilmekte dolayısı ile sahanın hangi yarasa türleri üzerinde etkisi olduğu anlaşılamamaktadır. Korunma önceliği olan tür sahada yokken yanlışlıkla var yazılabilir yada varken yok. Bu durum yatırımcının karşısına öngöremediği ağır tedbirler alınmasına yol açabilir. Bu gerekçelerle

1. RES sahalarında yarasa izlemesi yapacak olan uzmanın yüksek lisans ve/ya doktorasını yarasalar üzerinde ve sahada yaptığını tescillemesi aranmalıdır.
2. Yarasa uzmanı yatırımcının ilgili personeline en az bir kez çalışma metodu ve sonuçları hakkında bir bilgilendirme yapması istenmelidir.
3. Uzmanın sahada geçirdiği günler ve saatler şantiye görevlilerince imza altına alınmalıdır.
4. Uzmanın kullandığı cihazların uluslar arası yarasa kuruluşlarınca kabul durumu sorgulanmalıdır.

4. Sonuç

Dünyada yatırımın devamlılığını ve doğal dengenin korunmasını amaçlayan pek çok bilimsel çalışma mevcuttur ve devam etmektedir (EUROBATS). Türkiye’de ise bu amacı taşıyan bilimsel çalışmalar yatırımcılar ve ilgili kurumlar tarafından henüz destek görmemektedir. Türkiye’deki yatırım ihtiyacının karşılanması, daha doğa dostu yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının teşvik edilmesi süreçlerinde RES yatırımcısına bir sorun olarak görünen yarasaların korunmasını amaçlayan çalışmaların artması gerekmektedir. Böylece Yatırımcı açısından sorunu önceden görebilen, yerinde ve yeterince tedbir alınmasını sağlayan bilgilere ulaşılabacaktır. Yatırımcı daha az maliyet, daha kolay izin alma süreçleri ve daha etkin çözümlere kavuşurken yarasalar daha az etki ile ekosistemdeki hizmetlerini yaban hayatındaki dengede kalarak yürütebileceklerdir. Böylece hem insan hem de doğa kazanacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Arnett E.B., Schirmacher M., Huso M.M.P., Hayes J.P. 2009.** Effectiveness of Changing Wind Turbine Cut-in Speed to Reduce Bat Fatalities at Wind Facilities. Annual Report Prepared for the Batsand Wind Energy Cooperativeand the Pennsylvania Game Commission.
- [2] **Arnett E.B. (Ed.) 2005.** Relation ships between bat sandwind turbines in Pennsylvania and West Virginia: an assessment of bat fatality search protocols, patterns of fatality, and behavi oralinte ractions with wind turbines.
- [3] **Anonymous, 2007.** A final reportsubmittedtotheBatsandWindEnergyCooperative. Bat Conservation International, Austin, Texas, USA. Availablefrom: <http://www.batcon.org/wind/BWEC2004finalreport.pdf>.. [1 May 2007].
- [4] **Vincenzo F., Osvaldolocasciulli, Christianasoccini, Eliaforlizzi, 2011.** Post Construction Monitoring Of Wind Farms: First Records Of Direct Impact On Bats InItaly. Hystrix It. J. Mamm. (n.s.) 22(1): 199-203
- [5] **Lekuona J.M. 2001.** Uso del espaciopor la avifauna y control de la mortalidad de aves y murcielagos en losparqueseolicos de Navarradurante un cicloannual. Direccion General de MedioAmbiente, Gobierno de Navarra. Oregon. March 2003. Tech. Rept. preparedfor West Inc.,Cheyenne 17 pp.
- [6] **Erickson W.P.,Gritski B., Kronner K. 2003.** Nine CanyonWindPower Project Avianand Bat Monitoring Report, September 2002 - August 2003. Technical reportsubmittedtoEnergyNorthwestandthe Nine Canyon Technical AdvisoryCommittee.
- [7] **Hall L.S.,Richards G.C. 1972.** Notes on Tadaridaaustralis(Chiroptera: Molossidae). Aust. Mammal. 1:46.
- [8] **Johnson G.D.,Erickson W.P., Strickland M.D., Shepherd M.F., Shepherd D.A. 2000.** AvianMonitoringStudies at theBuffaloRidgeWind Resource Area, Minnesota: Results of a 4-year study. Technical Report preparedby WEST, Inc. forNorthernStatesPowerCo., Minneapolis, MN. 212 pp.
- [9] **Johnson G.D.,Erickson W., White J., Mckinney R. 2003.** Avianand bat mortalityduringthefirstyear of operation at theKlondike. Phase I Wind Project, ShermanCounty,
- [10] **Kerns J, Kerlinger P. 2004.** A study of birdand bat collisionfatalities at theMountaineerWindEnergy Center, TuckerCounty, West Virginia. Annualreportfor 2003. CurryandKerlinger, LLC, McLean, Virginia, USA. Availablefrom: <http://www.batcon.org/windliterature>. [1 September 2007].
- [11] **Dürr T. 2007.** DiebundesweiteKarteizurDokumentationvonFledermausverlusten an Windenergieanlagen – einRückblickauf 5 JahreDatenerfassung. Nyctalus (N.F.) 12(2/3): 108-114.

- [12] **Durr, T., And L. Bach. 2004.** Bat deat hsand wind turbines—a review of currentknowledge, and of thein formation available in the data base for Germany. Bremer Beitragefur Naturkundeund Naturschutz 7:253–264. [InGerman.]
- [13] **Yorulmaz, T., Yetkin, D., Arslan, N., Erdoğan, A. 2016.** Türkiye Yarasalarında Aktivite Yoğunluğunun Sıcaklık, Rüzgar Hızı, Yükseklik ve Bitki Örtüsü ile ilişkisinin Belirlenmesi. 23. Ulusal Biyoloji Kongresi. Gaziantep Üniversitesi. Özet kitabı. 217 s.
- [14] **Rodrigues L., Bach L., Dubourg-Savage M.-J., Goodwin J., Harbusch C., 2008.** Guidelines forconsideration of bats in wind farm project, EUROBATS Publication Series No. 3 (English version).UNEP/EUROBATS Secretariat, Bonn, Germany, 51 pp.

RÜZGAR ENERJİ SEKTÖRÜNDE MESLEKİ EĞİTİMİN DURUMU VE GELİŞTİRİLMESİ

Ali Batuhan Ateşşönmez
Ege Üniversitesi-Güneş Enerjisi Anabilim Dalı
Enerji Teknolojisi
batuhan.atessonmez@enercon.de

Özet

2009 yılında Intellegent Energy Europe tarafından yayınlanan raporda rüzgâr enerji sektöründe nitelikli personel bulmanın zorluğu ve gerekli nitelikleri sağlayacak yeterli eğitim programının olmaması durumunda ilerleyen yıllarda karşılaşılabilecek sorunlarla ilgili bir projeksiyon yapılmıştır. Buna göre özellikle işletme ve bakım personeli olarak rüzgâr sektöründe çalışan nitelikli personel açığı olacağı ve sektörün teknolojik gelişmesini takip edecek teknik uzmanlık programlarının geliştirilmesi gerektiği bulgularına erişilmiştir. Rüzgâr enerji sektöründe işletmeci ve üretici olarak faaliyet gösteren şirketlerle yapılan görüşmelerde belirtilen diğer bir problem, teknik personel yetiştiren eğitim kurumlarının çok farklı programlar uygulaması ve rüzgâr enerji sektörüne uygun programların yetersiz olması, ayrıca bu programların Avrupa yeterlilik çerçevesine uygun olarak diğer Avrupa ülkelerinde denkliklerinin kolay sağlanamaması olarak belirtmişlerdir. Mesleki Yeterlilik Kurumu Rüzgâr Güç Sistemleri ulusal meslek standardı için, yukarıdaki bulgular dikkate alınarak sektöre uygun olarak eğitim programlarını geliştirmek ve bu programın sektör temsilcileri ve kurumları tarafından kabul edilir ve uygulanabilir olması gerekmektedir. Bu araştırmanın amacı, rüzgâr enerji sektöründe teknik personel olarak işe başlayacak kişilerin, ihtiyaç duyduğu eğitim programlarını aşağıdaki hususlara dikkat ederek hazırlanması ve MYK Rüzgâr Güç Personeli mesleki yeterliliklerinin ve meslek standartlarının aşağıda belirtilen noktalara göre geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

- Rüzgâr enerji sektörü temsilcilerinin talep ettiği eğitimlerin karşılanması
- Farklı faaliyet alanları için temel eğitimlerin belirlenmesi
- Eğitim içeriklerinin standartlaştırılması, uygun yönetmelik ve normlara göre düzenlenmesi
- Avrupa yeterlilik çerçevesine uygun olarak uluslararası kabul edilmiş eğitim programı ve içeriğinin oluşturulması

1. GİRİŞ

Türkiye’de rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üretmeye yönelik ilk ciddi adım 1998 yılında İzmir- Alaçatı’da kurulan, 3 adet 500 kW’lık rüzgâr enerji santrali ile başlamaktadır. Yine aynı yıl İzmir-Alaçatı’da kurulan 12 adet rüzgar türbini / toplam 7.2 MW rüzgar santrali ve 2000 yılında Bozcaada’da kurulan 17 adet rüzgar türbini / toplam 10.2 MW rüzgar santrali ile devam etmiştir, bu tarihten itibaren 2006 yılına kadar, ülkemizde 2002 yılında İzmir serbest bölgesinde kurulan rüzgar türbini kanat fabrikası dışında rüzgar sektöründe ciddi bir adım atılmamıştır. 2005 yılında yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili yasa meclis genel kurulunda kabul edildikten sonra 2006 yılından günümüze kadar rüzgâr enerjisi ve diğer yenilenebilir enerji yatırımları hızla artarak devam etmiştir.

Türkiye, 2018 yılı itibarıyla 7.369 MW kurulu rüzgâr enerjisine sahiptir. Bu rakam Türkiye’nin rüzgâr potansiyelinin halen çok az bir kısmını oluşturmaktadır. Türkiye’de yer seviyesinden 50 metre yükseklikte ve 7,5 m/s üzeri rüzgâr hızlarına sahip alanlarda kilometrekare başına 5 MW gücünde rüzgâr santrali kurulabileceği kabul edilmiştir. Bu kabuller ışığında, orta-ölçekli sayısal hava tahmin modeli ve mikro-ölçekli rüzgâr akış modeli kullanılarak üretilen rüzgâr kaynak bilgilerinin verildiği Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) hazırlanmıştır. Buna göre Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyeli 48.000 MW olarak belirlenmiştir. Bu potansiyele karşılık gelen toplam alan Türkiye yüz ölçümünün %1,30’una denk gelmektedir¹.

Türkiye’de rüzgâr enerji santrallerinin elektrik üretimindeki payına bakıldığında ortalama yıllık üretimin %6,78’lik bir oran rüzgâr enerji santrallerinden sağlanmaktadır. Mevcut rüzgâr santrallerine ek olarak kurulacak ve lisansı verilmiş projelere bakıldığında toplam kapasite 10.000 MW’a çıkartılacaktır. Türkiye’nin 2023 enerji hedefleri strateji belgesinde 2023 yılına kadar rüzgar enerjisi kurulu gücünün 20.000 MW’a çıkarılması hedeflenmektedir. 2018 yılında elektrik üretiminin, %37,3’ü kömürden, %29,8’i doğal gazdan, %19,8’i hidrolik enerjiden, %6,6’sı rüzgârdan, %2,6’sı güneşten, %2,5’i jeotermal enerjiden, ve %1,4’ü diğer kaynaklardan elde edilmiştir². Yenilenebilir enerjinin 2018 yılında elektrik üretimindeki oranı %33 oran ile 2023 yılına konulan hedefi %30 oran ile geçmiştir.

Yıllar için rüzgâr enerji yatırımlarının artması ile paralel olarak rüzgâr sektöründeki istihdam da aynı oranda artmaktadır. Rüzgar türbin üreticileri ve türbinleri için komponent üreticilerinin, rüzgar sektöründeki direk istihdam pastasının en büyük payını almaktadırlar (%59), direk istihdama ek olarak, rüzgar enerji sektörü aynı zamanda ilgili sektörlerde de dolaylı olarak istihdamı etkilemektedir. Rüzgar türbini üreticileri ve komponent üreticilerinde çalışanlar dışında geri kalan yüzde 41’lik payı, rüzgar santral proje geliştirme, montaj, inşaat ve nakliye, bakım ve işletme çalışanlar ile rüzgar enerji ile ilgili danışmanlık, finans, elektrik iletim ve dağıtım çalışanları oluşturmaktadır³. Aşağıdaki Tablo 1’de rüzgar enerji sektöründeki farklı alanlardaki istihdam oranları verilmiştir.

Tablo 1. Rüzgâr Enerji Sektöründe Farklı Alanlardaki İstihdam Oranı

Rüzgâr Enerji Sektöründe İstihdam Alanları	İstihdam Oranları (%)
Rüzgâr Türbin Üretimi	%37
Komponent/Parça Üretimi	%22
Rüzgâr Santrali Projelendirme	%16
Montaj, İşletme ve Bakım	%11
Elektrik İletim/Dağıtım	%9
Danışmanlık	%3
Ar&Ge / Üniversite Çalışmaları	%1
Finans	%0,3
Diğerleri	%0,7
TOPLAM	%100

Güncel olarak Türkiye’de direk ve dolaylı olarak rüzgâr sektörünün sağladığı istihdam rakamı 14.000’in üzerindedir. Rüzgâr enerji santrallerinin istihdam oranlarını, geleneksel elektrik üretim santralleri ile karşılaştırıldığında daha yüksek bir istihdam oranı olduğu görülmektedir. Bu rakam yerli üretimin teşvik edilmesi ile ivmelenerek artması beklenmektedir.

EWEA tarafından yapılan bir çalışma, her yıl inşa edilen MW türbin başına istihdam dağılımını ve toplam işletmeye geçen türbinler için MW başına istihdam dağılımını aşağıdaki tabloda (bkz. Tablo 2) vermiştir⁴.

Tablo 2. Rüzgar Santrali Kurulum ve İşletme Aşamalarında İstihdam Oranları

Alt Sektörler	Yıllık MW başına istihdam oranı (%)	Kurulu MW başına istihdam oranı (%)
Rüzgâr Türbin Üretimi	%50	-
Türbin Komponent/Parça Üretimi	%33	-
Montaj	%8	-
İşletme ve Bakım	-	%82,5
Diğer Direk İstihdam	%8,7	%17,5

Türbinlerin ortalama güçlerinin artması ve imalatla daha az insan gücünün kullanılması gibi faktörler göz önüne alındığında önümüzdeki 10 yıllık süreçte MW/yıllık istihdam sayısının azalması veya sabit kalması beklenirken, türbin sayılarının artması ve giderek yaşlanmaları durumunda işletme ve bakım için gerekli nitelikli iş gücünün artması beklenmektedir. Bu oranların deniz üstü ve karasal rüzgâr enerji santralleri için farklı olacaktır. Şu anda ülkemizde deniz üstü rüzgâr santralleri inşa edilmemiştir fakat önümüzdeki yıllarda üretim lisansı verilmesi planlanmaktadır. Deniz üstü rüzgâr santrallerinin bakım ve işletmesi için gerekli personel sayısı, karasal rüzgâr santrallerine göre daha fazladır.

Rüzgâr enerji sektöründe nitelikli personel bulmanın zor olması ve gerekli nitelikleri sağlayacak yeterli eğitim programının olmaması ilerleyen yıllarda rüzgâr sektörü için ciddi bir sorun olacağı açıktır. Özellikle işletme ve bakım personeli olarak rüzgâr sektöründe çalışan nitelikli personel açığı olacaktır ve mevcut çalışanlar için de sektörün teknolojik gelişmesini takip edecek teknik uzmanlık programlarının geliştirilmesi gerekmektedir. Rüzgâr enerji sektöründe işletmeciler ve üretici olarak faaliyet gösteren şirketlerle yapılan görüşmelerde belirtilen diğer bir problem, teknik personel yetiştiren eğitim kurumlarının çok farklı programlar uygulaması ve rüzgâr enerji sektörüne uygun programların yetersiz olması, ayrıca bu programların hem üreticilerin verdikleri eğitim programlarına hem de mesleki eğitim olarak Avrupa yeterlilik çerçevesine uygun olarak diğer Avrupa ülkelerinde denkliklerinin kolay sağlanamaması olarak belirtmişlerdir.

1.1. Araştırma Problemi

Ülkemizde ekonomik refahın sağlanması ve toplumsal gelişimin ivme kazanması açısından üretim etkenlerini: bilim, teknoloji ve yetişmiş insan gücünün nitelik ve nicelik bakımından sürekli olarak geliştirilmesi gerekmektedir. Özellikle yetişmiş insan gücünün oluşturulması genel olarak güçlü mesleki eğitim alt yapısıyla ya da iş gücünün ithali ile sağlanabilmektedir. Ancak iş gücünün ithal edilmesinden kaynaklanacak büyük sıkıntılar nedeniyle ülkeler kendi iş gücünü oluşturmak için mesleki eğitim sistemlerini yeniden yapılandırma yoluna gitmektedirler⁵

Özellikle gelişmekte olan ülkelerde hızla büyüyen endüstrilerin ihtiyaç duyduğu insan kaynağı ile lisans eğitimini tamamlayan bireylerin beklentilerinin uyuşmaması nedeniyle genç nüfus düzeyinde işsizlik oranları artmaktadır (Almeida, Behrman ve Robalino, 2012). Meslekî ve teknik eğitim, endüstrinin beklentilerine göre şekillendirilebilen yapısı ve uygulamaya dayalı eğitimi ile bu uyumsuzluğa karşı eğitim alanında atılmış önemli adımlardan biridir. Bu nedenle meslekî ve teknik eğitim, ihtiyaç duyan herkesin erişimine açık olmalı, bireylere ilgi ve yetenekleri doğrultusunda çağın şartlarına uygun bilgi, beceri ve yetkinlikleri kazandırmalı, bireylerin girişimcilik, ekip çalışması, karar verebilme, sorun çözebilme özelliklerini desteklemeli, ulusal ve uluslararası alanda tanınırlığını ve hareketliliğini sağlamalı ve bireyleri değişen sosyal ve ekonomik koşullara uyum sağlayabilen dinamik bir yapıda yetiştirmeli ve geliştirmelidir (Meslekî ve Teknik Eğitim Strateji Belgesi ve Eylem Planı, 2014).

Meslekî ve teknik eğitimin amacı; sosyal ve ekonomik sektörler ile iş birliği içinde ulusal ve uluslararası meslekî yeterliliğe, meslek ahlâkına ve meslekî değerlere sahip, yenilikçi, girişimci, üretken, ekonomiye değer katan ehil iş gücü yetiştirmektir. Eğitim-öğretim kurumlarında sunulan hizmetlerin Millî Eğitim Bakanlığı (MEB) tarafından belirlenen amaç ve hedefler doğrultusunda, kaliteli ve verimli olarak yerine getirilmesinde okul/kurumların kurumsal performansları belirleyici olmaktadır. Meslekî ve teknik ortaöğretim kurumlarının amaçlarına ulaşma düzeylerinin ve eksiklerinin belirlenmesi, MEB'in geribildirim alması ve geleceğe yönelik doğru kararlar alınması için gereklidir⁶.

2023 hedefleri ile uyumlu bir sistem oluşturulması için meslekî ve teknik eğitime yönelik var olan toplumsal algıyı değiştirmeyi hedefleyen, öğrencilerin meslekî ilgi ve yeteneklerini tespit eden ve çocuklar ile ailelerini bu doğrultuda yönlendiren, akademik ders yoğunluğunun

azaltıldığı, meslekî ders içeriklerinin güncellendiği, öğretmenlerin iş başında eğitim olanaklarının artırıldığı, ulusal ve uluslararası sektör ve kamu finansal kaynaklarının kullanımı yoluyla okulların alt yapı ve donanımının hızla değişen ve gelişen teknolojiyle uyumlu hale getirildiği, mezunlarına istihdamda öncelik sağlayan ve farklı ücret politikalarının uygulandığı, sektörün meslekî ve teknik eğitim süreçlerinde daha fazla yer aldığı, sektör liderleri ile iş birliği imkânlarının artırıldığı, ulusal ve uluslararası düzeyde sektörel iş birliği protokolleri ve iyi uygulama modeli olabilecek projelerin hayata geçirildiği, mezunlarının kendi alanlarında yükseköğretime geçişlerini sağlayacak bütünlük bir yapının kurulması planlanmaktadır⁷.

1.2. Araştırmanın Amacı

Bu araştırmanın amacı, rüzgâr sektörünün ihtiyaç duyduğu mesleki ve teknik eğitimin çerçevesini oluşturmak, hazırlanacak ve uygulanacak eğitim programının hem rüzgâr sektörü hem de kamu kuruluşları tarafından ulusal ve uluslararası düzeyde kabul edilir olması amaçlanmaktadır. Mevcut eğitim programları değerlendirilip, eğitimlerin farklı eğitim modelleri üzerinde esnek yapıda ve sektörün ihtiyaçlarına cevap verecek şekilde belirlenmesidir. Bu çalışmanın yapıldığı tarihten sonra zamanın ihtiyaçlarına göre eğitim modüllerinin belirlenen modeller üzerinden geliştirilebilir ve değiştirilebilir olması amaçlanmaktadır.

1.3. Araştırmanın Önemi

Bu araştırmanın önemi, rüzgâr sektörüne yönelik olarak meslek standartlarının ve yeterliliklerinin geliştirilmesi ve buna yönelik eğitim programının belirlenmesidir. Sektör temsilcileri tarafından aranan yeterliliklerin ve eğitimlerin “Mesleki Yeterlilik Kurumu” çerçevesi içerisinde personele sağlanması oldukça önemlidir. Farklı ve çeşitli eğitim programlarının kesişim kümesi olan temel eğitim modülleri ve sektörün genel olarak talep ettiği eğitimlerin, meslek standardı olarak belirlenmesi ve Avrupa Yeterlilik Çerçevesi kapsamında uluslararası geçerliliğe sahip olması, hem ulusal hem de uluslararası alanda sektörde mesleki yeterliliğinin kanıtlanması ve tekrarlanmak zorunda kalan benzer eğitimlerin engellenmesi ve sektörün gereksinimlerinin karşılanması hem çalışan hem de sektör temsilcileri için büyük kolaylık ve avantaj sağlayacağı kesindir.

Mesleki ve Teknik Eğitimin Öncelikleri

- İhtiyaç doğrultusunda nitelikli iş gücü yetiştirmek,
- Meslekî ve teknik eğitimi katılımcı bir anlayışla yönetmek,
- Mezunların üretime katılacak şekilde yetişmesini sağlamak,
- Meslekî ve teknik eğitim sistemini sürekli geliştirmek ve kalitesini yükseltmek.
- İş piyasasının ihtiyaçlarına göre modüler öğretim programları hazırlamak,
- Ekonomide verimlilik ve rekabet gücünün artırılması için eğitimin sosyal ve sektörel entegrasyonunu sağlamak,
- Bireylere bir mesleğin gerektirdiği bilgi ve becerilerin yanı sıra değişime uyum sağlaması için ihtiyaç duyulan yetkinlikleri kazandırmak,
- Dijitalleşme süreciyle birlikte belirli alanlarda bireylere bilgi ve iletişim teknolojilerinde temel yetkinliklerin yanı sıra üst düzey becerileri de kazandırmak,
- Öğrencileri millî kültürümüzün temeli olan ahilik anlayışıyla ve bu anlayışa özgü iş ahlakı değerleriyle yetiştirmek,
- Meslekî ve teknik eğitim ile insan odaklı kalkınmanın sağlanmasında etkin yer almak,
- Sektörün dijital dönüşümü çerçevesinde yeni iş alanlarının oluşturulması ve istihdamın artırılmasında rol oynayan girişimcilik anlayışının kazandırılması⁸.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Mesleki Yeterlilik Kurumu

Mesleki Yeterlilik Kurumu (MYK), Avrupa Birliği ile uyumlu, ulusal yeterlilik sistemini kurmak ve işletmek üzere 21.09.2006 tarihinde 5544 sayılı Mesleki Yeterlilik Kurumu Kanunu ile kuruldu. Çalışma ve sosyal güvenlik bakanlığının ilgili kuruluşu olan MYK'nın ana hedefi eğitim-istihdam uyumunu sağlayarak nitelikli insan kaynağının oluşmasına öncülük etmek ve uluslararası arenada tanınan etkin bir aktör olmaktır. Kamu, işçi, işveren ve meslek kuruluşları MYK'nın yönetiminde aktif olarak yer almaktadır. Kurum tüm faaliyetlerini bu kesimlerin ortak karar ve katılımıyla gerçekleştirir. En üst karar organları olan genel kurul ve yönetim kurulunda kamu ve sosyal kesimler eşit düzeyde temsil edilir. Kurumun temel görevi Avrupa birliği ile uyumlu ulusal yeterlilik sistemini kurmak ve işletmektir. Ulusal yeterlilik sistemi, ulusal meslek standartlarının ve yeterliliklerinin hazırlanması ve uygulanması için gerekli yetkilendirme, denetim, sınav ve belgelendirmeyi kapsayan kural ve faaliyetlerin bütünüdür. MYK, Avrupa Yeterlilikler Çerçevesi ile uyumlu Türkiye Yeterlilikler Çerçevesini oluşturmakla görevlidir. Kurum, Avrupa yeterlilikler çerçevesi ulusal koordinasyon noktası olarak ülkemizi temsil eder. İş dünyasının tüm kesimlerini yakından ilgilendiren ulusal yeterlilik sistemi, kamu kurumları, sivil toplum kuruluşları ve eğitim kurumlarının katkıları ile zenginleşerek, Türkiye'deki yeterliliklerin uluslararası arenada tanınmasını sağlayacaktır. Ulusal meslek standartları, yeterlilikler ölçme değerlendirme ve belgelendirme faaliyetleri ulusal yeterlilik sisteminin başlıca unsurlarıdır⁹.

2.1.1. Ulusal Yeterlilik Çerçeveleri ve Avrupa Yeterlilik Çerçevesi

Ulusal yeterlilik çerçevesi(UYÇ), ülkede var olan yeterliliklerin belirlenmesi, tanımlanması, belli ölçütlere göre sınıflandırıp, karşılaştırılması için gerekli seviyelerin kullanılmasını sağlayan ilke ve kuralları tanımlar. Ulusal yeterlilik çerçevesi, mevcut yeterliliklerin sınıflandırılması için bir referans çerçevesi, yeni yeterlilikler için kaynak, mevcut eğitim programlarının geliştirilmesi için dayanak, yeterliliklerin tanınması için araç olarak kullanılmaktadır. Birçok farklı ülkenin ulusal yeterlilik çerçevesi kullanması sayesinde, farklı ülkelerin UYÇ'leri arasında karşılaştırma yapılabilmesi ve birbirleri ile ilişkilendirmesi gerekmektedir. Bu sebeple, UYÇ'lerin karşılaştırmasını yapabilmek ve farklı ülkelerin UYÇ'leri arasında bağlantı yapabilmek için üst çerçeveler geliştirilmiştir. Avrupa'da uluslararası referanslama sistemleri kapsamında "Hayat Boyu Öğrenme için Avrupa Yeterlilik Çerçevesi (AYÇ)" ve "Avrupa Yükseköğretim Alanı Yeterlilik Çerçevesi" (AYA-YÇ) olmak üzere iki üst çerçeve bulunmaktadır.

Avrupa yeterlilik çerçevesi, Avrupa Parlamentosu ve Avrupa Konseyi tarafından 23 Nisan 2008 tarihinde 2008/C 111/01 sayılı Tavsiye Kararıyla kabul edilmiştir. AYÇ, Avrupa'daki yeterliliklerin şeffaflığının sağlanması, yeterliliklerin farklı ülkeler arasında taşınmasının teşvik edilmesi, yeterliliklerin tanınması ve farklı UYÇ'ler arasında karşılaştırma yapılabilmesi için bir üst çerçeve görevi görmektedir. AYÇ'nin temelini; bilgi, beceri ve yetkinliklerin tanımlandığı sekiz seviye oluşturmaktadır. AYÇ Tavsiye Kararına katılım sağlayan 36 ülke, UYÇ'lerini AYÇ ile ilişkilendirmeyi ve Tavsiye Kararında sunulan uygulama takvimine uymayı taahhüt etmiştir. Ayrıca bu ülkeler, UYÇ'leri ile AYÇ arasındaki ilişkileri koordine edecek ulusal koordinasyon noktaları belirlemiştir. Ülkemizin AYÇ Ulusal Koordinasyon Noktası olan "Meslekî Yeterlilik Kurumu", 2008 yılı Aralık ayından itibaren AYÇ Danışma Grubunda ülkemizi temsil etmektedir¹⁰.

2.2. Türkiye Yeterlilikler Çerçevesi

Türkiye Yeterlilikler Çerçevesi (TYÇ); Avrupa Yeterlilikler Çerçevesi (AYÇ) ile uyumlu olacak şekilde tasarlanan; ilk, orta ve yükseköğretim dâhil, meslekî, genel ve akademik eğitim ve öğretim programları ve diğer öğrenme yollarıyla kazanılan tüm yeterlilik esaslarını gösteren

ulusal yeterlilikler çerçevesidir. TYÇ, ülkemizde eğitim ve öğretim sistemi içerisinde bütün öğrenme ortamlarında ve çeşitli seviyelerde kazanılan kalite güvencesi sağlanmış tüm yeterlilikleri kapsamaktadır¹⁰.

2.2.1. Eğitim Öğretim ve Yeterlilik Sistemlerinin Mevcut Durumu

Türkiye’deki eğitim sistemi eğitim gereksinimlerini karşılamak için bütünlüklü bir yapıda tasarlanmış olup okul öncesi eğitimi, ilköğretim, ortaöğretim ve yükseköğretim kurumlarında sunulan “örgün eğitim ve öğretim” ile hayat boyu öğrenme kapsamında sunulan “yaygın eğitim ve öğretim” olarak iki farklı seçenekten oluşmaktadır. Hem örgün hem de yaygın eğitim ve öğretimde uzaktan eğitim ve açık öğretim seçenekleri bulunmaktadır

- Örgün Eğitim ve Öğretim

Örgün eğitim; okul öncesi, ilköğretim, ortaöğretim ve yükseköğretim kurumlarını kapsamaktadır. Örgün eğitim ve öğretim içerisinde yer alan ve okul öncesi eğitimi takip eden 12 yıllık zorunlu eğitim süreçleri aşağıda yer almaktadır.

İlköğretim

- İlkokul (4 yıl)
- Ortaokul (4 yıl)

Ortaöğretim

- Lise (4 yıl)
- Millî Eğitim Bakanlığının (MEB) eğitim ve öğretim kurumları ile MEB’e bağlı özel ve diğer kurumlar tarafından sunulan,
- Genel ortaöğretim
- Meslekî ve teknik ortaöğretim
- Genel ve meslekî eğitimi birlikte sunan ortaöğretim programları bulunmaktadır.

Yükseköğretim

Türkiye’de yükseköğretim, Yükseköğretim Kurulu (YÖK) tarafından koordine edilen ve yükseköğretim kurumları tarafından ortaöğretim sonrasında sağlanan tüm akademik ve meslekî eğitim ve öğretimi kapsamaktadır.

Yaygın Eğitim ve Öğretim

Yaygın eğitim ve öğretim, çeşitli süre ve düzeylerde hayat boyu yapılan, MEB tarafından koordine edilen kamu kurumlarınca veya özel ve gönüllü kuruluşlarca sunulan eğitim, öğretim, üretim, rehberlik ve uygulama etkinliklerinin tümünü kapsamaktadır. Yeterliliklerin geliştirilmesi, yeni meslek kazandırma, hobileri geliştirme ve kişisel gelişim gibi amaçlarla sunulan kısa dönemli ve ek eğitimler de yaygın eğitim ve öğretimin kapsamındadır.

Çıraklık Sistemi

İlköğretilimi veya zorunlu ortaokulu tamamlayan bireylere yönelik teorik ve iş yerinde uygulamalı eğitim sunan, kalfalık, ustalık ve usta öğreticilik belgelerine götüren eğitim programlarını kapsamaktadır.

Meslekî Eğitim ve Öğretim

İşletmeler tarafından veya işletmelerle iş birliği içinde verilen iş veya kariyer gelişimi ile ilgili bütün eğitimleri kapsamaktadır.

MYK, ulusal ve uluslararası meslek standartlarını temel alarak, teknik ve meslekî alanlarda ulusal yeterliliklerin esaslarını belirlemek; denetim, ölçme ve değerlendirme, belgelendirme ve sertifikalandırmaya ilişkin etkinlikleri yürütmek için gerekli ulusal yeterlilik sistemini kurmak, işletmek ve Türkiye Yeterlilikler Çerçevesiyle ilgili çalışmaların yürütülmesini sağlamak amacıyla kurulmuştur.

MYK, ulusal yeterliliklere ilişkin ölçme, değerlendirme ve belgelendirme faaliyetlerini yürütmek üzere TS EN ISO/IEC 17024 standardına göre akredite edilmiş ve diğer gerekli ölçütleri karşılayan kuruluşları “Yetkilendirilmiş Belgelendirme Kuruluşu” olarak yetkilendirmektedir. Söz konusu kuruluşlar tarafından ulusal yeterliliklere dayalı olarak yürütülen ölçme ve değerlendirme işlemlerinin sonucunda başarılı olan adaylara ilgili ulusal yeterlilik kapsamında MYK Meslekî Yeterlilik Belgesi düzenlenmektedir¹⁰.

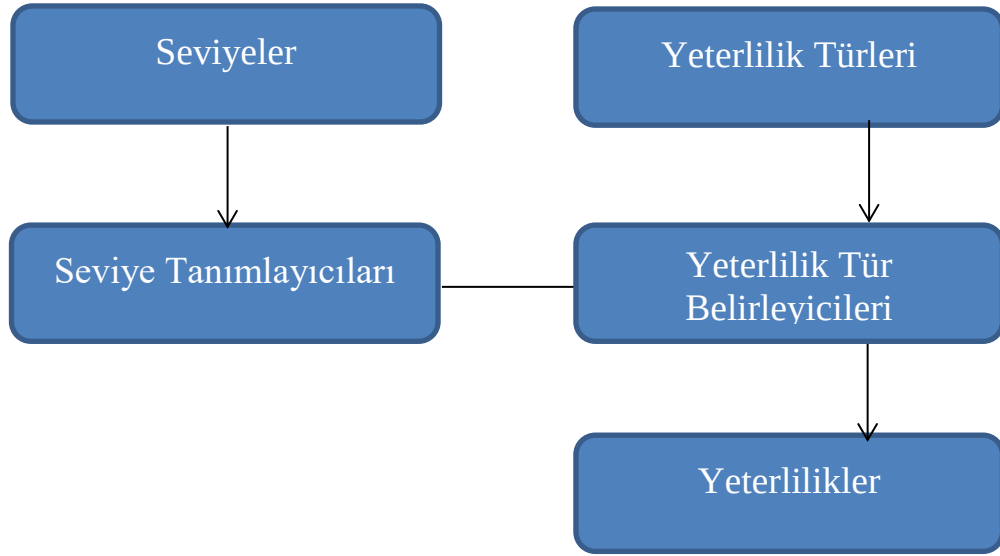
2.3. Türkiye Yeterlilikler Çerçevesinin Yapısal Özellikleri

Türkiye Yeterlilikler Çerçevesi (TYÇ), Türkiye’deki yeterliliklerin sınıflandırılmasını sağlayan bütünleşik tek bir yapı olarak, kalite güvencesi sağlanmış ilköğretim, ortaöğretim ve yükseköğretim dâhil, tüm eğitim ve öğretim programları ve diğer öğrenme yollarıyla kazanılan tüm yeterlilikleri kapsayacak şekilde tasarlanmıştır. TYÇ, Millî Eğitim Bakanlığının (MEB) sorumlu olduğu yeterlilikler, Meslekî Yeterlilik Kurumu (MYK) sorumluluğundaki yeterlilikler, Yükseköğretim Kurulu (YÖK) koordinasyonu ve denetiminde sunulan yükseköğretim yeterlilikleri başta olmak üzere diğer sorumlu kurumların sorumlu olduğu yeterlilikleri de içermektedir. Ülkemiz iş piyasasında şu anda var olan ve gelecekte gereksinim duyulacak birçok meslekî yeterlilik, TYÇ kapsamında yer alacaktır. TYÇ’de, MEB ve MYK’nın yeterlilik sistemleri ile Türkiye Yükseköğretim Yeterlilikler Çerçevesi (TYYYÇ) yer almaktadır.

Ülkemizde birbirinden oldukça farklı, eğitim ve iş dünyasında yaygın olarak bilinen ve kullanılan yeterlilikler bulunmaktadır. Bunun yanı sıra MYK sorumluluğunda, uluslararası eğilimler ve AYÇ yaklaşımıyla uyumlu ulusal yeterlilikler geliştirilmektedir. Farklı yaklaşımlarla hazırlanmış olan yeterlilikleri aynı çerçeve içerisine dâhil etme ve tek bir yapı oluşturma hedefi, TYÇ’nin tasarımıyla ilgili önemli güçlükler neden olmuştur. Söz konusu güçlükler TYÇ için belirlenmiş olan hedeflere ulaşılmasını sağlayacak biçimde TYÇ tasarımı göz önünde bulundurulmuştur. TYÇ, uygulama sürecinde;

- a) Yeni yeterliliklerin geliştirilmesi,
- b) Önceki öğrenmelerin tanınması,
- c) Yeterlilikler arası yatay ve dikey geçiş olanaklarının belirlenmesi,
- ç) Yeterliliklerin uluslararası kıyaslanabilirliğinin sağlanması imkânı sunacaktır.

TYÇ, her düzeydeki tanımlı ve sıralı okul eğitiminin yanı sıra iş yerlerinde veya diğer yaygın ve serbest öğrenme ortamlarında deneyime dayalı öğrenme ve bağımsız bireysel öğrenme sonucu elde edilen bütün yeterlilikleri kapsayacak biçimde tasarlanmıştır. TYÇ özel gereksinimli bireylerin öğrenme kazanımlarının uygun biçimde tanınmasını sağlayacak yeterliliklerinin geliştirilmesine de olanak sağlamaktadır¹⁰.



Şekil 1. Türkiye Yeterlilikler Çerçevesi Yapısının Temel Araçları

2.3.1. Seviyeler ve Seviye Tanımlayıcıları

TYÇ, sekiz (8) seviyeden meydana gelen bir yapıda tasarlanmıştır. TYÇ'de her seviye, söz konusu seviyedeki yeterliliklerin sahip olduğu ortak öğrenme kazanımlarına göre tanımlanmıştır. Her seviyeyi bilgi, beceri ve yetkinlikler açısından tanımlayan öğrenme kazanımlarına ilişkin tanımlar dizisi seviye tanımlayıcısı olarak adlandırılmakta ve seviye tanımlayıcılar TYÇ'nin çekirdeğini oluşturmaktadır. Seviye tanımlayıcıları, TYÇ içerisindeki diğer tüm yapı ve araçlar için temel sağlamaktadır.

TYÇ'de, 1. seviye yeterlilikleri, temel görevleri yerine getirme yeterliliklerini tanımlarken 8. seviye yeterlilikleri çalışma ve öğrenme alanına yenilik getirme, ortaya çıkan yeni ve karmaşık problemleri farklı alanlardaki yaklaşım ve yöntemleri kullanarak çözme yeterliliğini tanımlamaktadır. TYÇ seviye tanımlayıcıları aşağıda sunulmaktadır¹⁰.

Tablo 3. Türkiye Yeterlilik Çerçevesi Seviye Tanımlayıcıları

Bilgi TYÇ kapsamında "bilgi"; bir çalışma veya öğrenme alanı ile ilgili gerçeklerin, ilkelerin, teorilerin ve uygulamaların anlaşılmasını içeren kuramsal ve/veya olgusal bilgi olarak tanımlanmıştır.		
Beceri TYÇ kapsamında "beceri"; bir çalışma veya öğrenme alanında edinilen mantıksal, sezgisel ve yaratıcı düşünme ile el becerisi, yöntem, materyal, araç ve gereçleri kullanabilmeyi gerektiren "bilgiyi kullanma" ve "problem çözme" olarak tanımlanmıştır.		
Yetkinlik TYÇ kapsamında "yetkinlik"; bilgi ve becerilerin bir çalışma veya öğrenme ortamında sorumluluk alarak ve/veya özerk çalışma göstererek kullanılması, öğrenme gereksinimlerinin belirlenmesi ve karşılanması, toplumsal ve etik meselelerin ve sorumlulukların dikkate alınması olarak tanımlanmıştır.		
1. Seviye	Bilgi	Kendisi ve çevresine ilişkin genel bilgiye sahip olma
	Beceri	Basit görevleri yerine getirmek için gerekli temel beceriye sahip olma
	Yetkinlik	Basit görevleri rehberlik ve gözetim altında gerçekleştirme
2. Seviye	Bilgi	Bir iş veya öğrenme alanına ait başlangıç düzeyinde olgusal bilgiye sahip olma

	Beceri	Görevleri yerine getirmek ve olası basit sorunları çözmek için gerekli bilgiyi kullanma temel becerisine sahip olma
	Yetkinlik	Basit görevleri gözetim altında sınırlı özerklik ile gerçekleştirme Hayat boyu öğrenme yaklaşımı kapsamında öğrenme ihtiyaçlarının farkında olma
3. Seviye	Bilgi	Bir iş veya öğrenme alanına ait başlangıç düzeyinde kuramsal, orta düzeyde olgusal bilgiye sahip olma
	Beceri	Görevleri yerine getirmek ve problem çözmek için, gerekli veri, yöntem ve araç-gereçleri seçip kullanma becerisine sahip olma
	Yetkinlik	Görevleri yerine getirmede sorumluluk alma değişen şartları dikkate alarak görevi tamamlama hayat boyu öğrenme yaklaşımı kapsamında öğrenme ihtiyaçlarını rehberlik eşliğinde belirleme ve karşılama
4. Seviye	Bilgi	Bir iş veya öğrenme alanına ait orta düzeyde kuramsal ve işlemsel, orta düzeyin üzerinde olgusal bilgiye sahip olma
	Beceri	Bir iş veya öğrenme alanına özgü iş ve işlemleri yerine getirmek ve sorunlara çözüm üretmek amacıyla bilişsel ve uygulamalı becerilere sahip olma
	Yetkinlik	Öngörülebilir, ancak değişime açık ortamlarda, görevleri tamamlamak için tam sorumluluk alma. Başkalarının yürüttüğü sıradan görevlerin gözetimini yapma, bu görevlerin değerlendirilmesinde ve iyileştirilmesinde sınırlı sorumluluk alma. Hayat boyu öğrenme yaklaşımı kapsamında öğrenme ihtiyaçlarını karşılama ve rehberlik eşliğinde ileriye yönelik öğrenme hedeflerini belirleme. Bir iş veya öğrenme alanındaki bilgi, beceri, tutum ve davranışlar ile etik meseleler ve toplumsal sorunların ilişkisi konusunda farkındalığa sahip olma
5. Seviye	Bilgi	Bir iş veya öğrenme alanının sınırlarının farkında olarak, bu alana özgü, kapsamlı, kuramsal ve olgusal bilgilere sahip olma
	Beceri	Sınırları belirlenmiş soyut ve somut sorunlara yaratıcı çözümler geliştirmede gerekli, kapsamlı, bilişsel ve uygulamalı becerilere sahip olma
	Yetkinlik	Öngörülemeyen değişikliklerin olduğu ortamlarda yönetim ve gözetim görevi yapma. Kendisinin ve başkalarının başarımlarını değerlendirme ve geliştirme. Projelerin yönetimi dâhil iş veya öğrenme ortamlarında işleme dair etkileşimde bulunma. Bir iş veya öğrenme alanına yönelik hayat boyu öğrenme yaklaşımının kapsamına ve bu kapsamın örgün ve yaygın eğitim ile serbest öğrenme yollarıyla ilişkisi konusunda genel farkındalığa sahip olma. Bir iş veya öğrenme alanındaki bilgi, beceri, tutum ve davranışlar ile toplumsal ve etik meseleler ve sorumluluklar ilişkisinin farkında olma
6. Seviye	Bilgi	Bir iş veya öğrenme alanında sorgulayıcı bakış açısını kapsayacak şekilde ileri düzeyde kuramsal, metodolojik ve olgusal bilgiye sahip olma
	Beceri	Uzmanlık gerektiren bir iş veya öğrenme alanında, karmaşık ve öngörülemeyen sorunları çözmek için gerekli, uzmanlık ve yenilik niteliği gösteren ileri düzeyde becerilere sahip olma
	Yetkinlik	Öngörülemeyen iş veya öğrenme ortamlarında sorumluluk alarak karar verme ve bu ortamlarda karmaşık teknik veya meslekî faaliyet veya projeleri yönetme Kişilerin ve grupların meslekî gelişiminin yönetiminde sorumluluk alma. Bir iş veya öğrenme alanına yönelik hayat boyu öğrenme yaklaşımının kavramları, politikaları, araçlarının uygulaması ve bunların örgün ve yaygın eğitim ile serbest öğrenme yollarıyla ilişkisi konusunda deneyim sahibi olma Bir iş veya öğrenme değerlendirmesinde bulunurken toplumsal ve etik değerlerin farkında olma

7. Seviye	Bilgi	Bir iş veya öğrenme alanında, özgün fikirlerin ve/veya araştırmanın temelini oluşturan ve bir kısmı en ileri düzeydeki ihtisas bilgisine sahip olma. Alanındaki ve alanının ilişkili olduğu değişik alanların ara yüzündeki bilgi meselelerinde sorgulayıcı yaklaşıma sahip olma
	Beceri	Bir iş veya öğrenme alanında yeni bilgi ve yöntemleri geliştirmek ve farklı alanlardan bilgiyi bütünleştirmek için yürütülen araştırma ve/veya yenilik faaliyetlerinde sorun çözmede ileri düzeyde beceriye sahip olma. İleri araştırma işlemlerinin kavranılması, tasarlanması, uygulanması ve uyarlanması yapma becerisine ekip üyesi veya kısmen özerk olarak sahip olma
	Yetkinlik	Öngörülemeyen, karmaşık ve yeni stratejik yaklaşımlar gerektiren iş veya öğrenme ortamlarını yönetme ve dönüştürme Karmaşık bir ortamda değişimi yönetme tecrübesine sahip olma Meslekî bilgi ve uygulamaya katkı yapmak ve/veya takımların stratejik başarımlar düzeyini değerlendirmek için sorumluluk alma Bir iş veya öğrenme alanına ve alanlar arasındaki ara yüz bilgisine yönelik hayat boyu öğrenme yaklaşımının kavram, politika, araçlar ve uygulaması ve bunların örgün ve yaygın eğitim ile serbest öğrenme yollarıyla ilişkisi konusunda liderlik yapma Bir iş veya öğrenme alanında, toplumsal ve etik meseleleri ve sorumlulukları dikkate alarak bilgiyi bütünleştirme ve yargıda bulunma
8. Seviye	Bilgi	Bir iş veya öğrenme alanındaki kuram, uygulama, yöntem ve tekniklerin en ileri düzeydeki sistematik bilgisine ve sorgulayıcı analiz yapacak kapasiteye sahip olma Bir iş veya öğrenme alanıyla ilişkili olarak farklı iş veya öğrenme alanlarında en ileri düzeydeki arayüz bilgisine sahip olma
	Beceri	Bir iş veya öğrenme alanındaki en ileri düzeydeki araştırma ve/veya yenilikte kritik sorunları çözmek, mevcut bilgiyi veya meslekî uygulamayı genişletmek ve yeniden tanımlamak için sentez ve değerlendirmeyi de kapsayan en ileri düzeydeki bilgi, yöntem ve teknikleri kullanmayı gerektiren uzmanlaşmış becerilere sahip olma. İleri araştırma süreçlerinin kavranılması, tasarlanması, uygulanması ve uyarlanmasını yapma becerisine özerk olarak sahip olma. Alanında ortaya çıkan, farklı alanlardaki yöntem ve yaklaşımların kullanımını da gerektiren yeni ve karmaşık sorunları çözme becerisine sahip olma
	Yetkinlik	Güçlü bir yetkinlik, yenilik, özerklik, bilimsel ve meslekî tutarlılığa sahip olma ve araştırma dâhil iş veya öğrenme ortamlarındaki en ileri seviyedeki yeni fikirlerin ve süreçlerin geliştirilmesinde yetkin olduğunu gösterme Bir iş veya öğrenme alanındaki mevcut bilgi veya meslekî uygulamanın yeniden tanımlanmasına veya genişletilmesine imkân veren yeni ve özgün yaklaşımların geliştirilmesinde liderlik yapma Bir iş veya öğrenme alanına ve alanlar arasındaki arayüz bilgisine yönelik hayat boyu öğrenme yaklaşımının öngörülme, karmaşık ve yenilik gerektiren ortamlarda geliştirilmesine, örgün ve yaygın eğitim ile serbest öğrenme yollarıyla desteklenmesine ilişkin konularda özgün politika ve uygulamalar geliştirme Bir iş veya öğrenme alanında, toplumsal ve etik meseleleri ve sorumlulukları dikkate alarak yeni bilgi üretme

2.3.2. Yeterlilik Türleri

TYÇ geliştirme sürecinde yapılan incelemelerde, sadece seviye yapısı kullanılmasının etkili bir sınıflandırma yapılmasını güçleştireceği öngörülerek seviye yapısının yanı sıra çeşitli yeterlilik türlerinin belirlenmesine ve kullanılmasına karar verilmiştir. TYÇ’de yer alması öngörülen ve ülkemizdeki eğitim, öğretim ve yeterlilik sistemlerinde var olan başlıca yeterlilik türleri 2. tabloda sınıflandırılmış ve geçici olarak seviyelendirilmiştir. Tabloda sunulan türler dışında

eğitim, öğretim ve yeterlilik sistemlerinde başka yeterlilik türleri de bulunmaktadır.²⁰ TYÇ uygulama sürecinde yeterlilik türleri daha detaylı bir çalışma sonucunda belirlenecek, öğrenme kazanımlarına dayalı olarak tanımlanmış ve kalite güvencesi sağlanmış olan yeterlilikler uygun seviyelere yerleştirilecektir.

TYÇ’de yer alacak yeterlilik türleri, “yeterlilik türü belirleyici”leri kullanılarak tanımlanmaktadır.¹⁰.

Tablo 4. Başlıca TYÇ Yeterlilik Türleri

TYÇ Seviyesi	Yeterlilik Türü	Sorumlu Kurum
1	Okul Öncesi Katılım Belgesi	MEB
2	İlkokul Öğrenim Belgesi	MEB
	2. Seviye Mesleki Yeterlilik Belgesi	MYK
3	Ortaokul Öğrenim Belgesi	MEB
	Kalfalık Belgesi	MEB
	3. Seviye Mesleki Yeterlilik Belgesi	MYK
4	Ustalık Belgesi	MEB
	Mesleki ve Teknik Eğitim Lise Diploması	MEB
	Lise Diploması	MEB
	4. Seviye Mesleki Yeterlilik Belgesi	MYK
5	Ön Lisans Diploması (Akademik)	YÖK
	Ön Lisans Diploması (Mesleki)	YÖK
	5. Seviye Mesleki Yeterlilik Belgesi	MYK
6	Lisans Diploması	YÖK
	6. Seviye Mesleki Yeterlilik Belgesi	MYK
7	Yüksek Lisans Diploması (Tezli)	YÖK
	Yüksek Lisans Diploması (Tezsiz)	YÖK
	7. Seviye Mesleki Yeterlilik Belgesi	MYK
8	Doktora Diploması (Doktora, Sanatta Yeterlilik/Doktora ve Tıpta Uzmanlık)	YÖK
	8. Seviye Mesleki Yeterlilik Belgesi	MYK

2.3.3. Yeterlilik Türlerinin Sınıflandırılması

TYÇ’nin kalite güvencesi sağlanmış tüm yeterlilikleri kapsamı hedeflendiği için kredi değerleri, işlev ve amaçları açısından farklılıklar gösteren yeterlilik türlerinin sınıflandırılması gereksinimi ortaya çıkmıştır. Bu gereksinim doğrultusunda yeterlilik türlerinin yeterlilik kategorileri kullanılarak sınıflandırılması uygun görülmüştür. TYÇ için belirlenen yeterlilik kategorileri şunlardır:

a) Ana yeterlilikler, genellikle tanımlanmış bir öğrenme veya çalışma alanındaki öğrenme kazanımlarının değerlendirilmesi süreci sonunda edinilen geniş kapsamlı yeterliliklerdir. Ana yeterlilikler, bir öğrenme sürecinin, öğretim programının veya meslekî eğitimin tamamlandığını göstermektedir. Örneğin; meslekî ve teknik ortaöğretim süreci sonunda elde edilen “Meslekî ve Teknik Ortaöğretim Diploması”, hayat boyu öğrenme sürecinde edinilen “Ustalık Belgesi” ve “Meslekî Yeterlilik Belgesi” veya lisans öğrenimi sonunda elde edilen “İktisat Diploması” “ana yeterlilik”tir.

b) Destekleyici yeterlilikler, önceden kazanılan bir ana yeterliliğe ek olarak edinilen öğrenme kazanımlarının değerlendirilmesi sonucu belgelendirilen yeterliliklerdir. Bu yeterlilikler bilgi veya becerilerin güncellenmesi, yenilenmesi veya sürekli meslekî gelişim ile ilgili olup bu yeterliliklerin kazanılabilmesi için mutlaka bir ana yeterliliğe sahip olunması gerekmektedir. Örneğin; herhangi bir alanda lisans derecesine ek olarak edinilen “İş ve Meslek Danışmanlığı Meslekî Yeterlilik Belgesi” veya “Ustalık Belgesi”ne ek olarak edinilen “Usta Öğreticilik” yeterliliği “destekleyici yeterlilik”tir.

c) Birim yeterlilikler, ana yeterliliğin bir kısmına karşılık gelen öğrenme kazanımlarının kazanılması sonucu belgelendirilen yeterliliklerdir. Birim yeterlilikler, modüler öğrenme programları ile ilişkilendirilebilir. Örneğin; meslekî ve teknik ortaöğretim yiyecek-içecek hizmetleri alanı mutfak dalında bulunan “Aşçılık” programı sonunda elde edilen “Meslekî ve Teknik Ortaöğretim Diploması” bir ana yeterliliktir. Bu diploma programı kapsamında yer alan “Soğuk Mutfak Aşçılığı” ve “Sıcak Mutfak Aşçılığı” gibi programların sonucunda kazanılan ve belgelendirilen öğrenme kazanımları “birim yeterlilik”tir.

ç) Özel amaçlı yeterlilikler, başka bir yeterliliğe bağlı olmayan ancak kendi içerisinde bütünlüğü ve tek başına kullanımı (meslek icra etme, iş yeri açma ve benzeri gibi) olan öğrenme kazanımlarının belgelendirilmesi sonucunda elde edilen yeterliliklerdir. Bu yeterlilikler, ana yeterliliklere göre daha az sayıda öğrenme kazanımına sahip olmakla birlikte bir mesleği icra etmek için yeterlidir. Örneğin; inşaat sektöründe “Silindir Operatörü Meslekî Yeterlilik Belgesi” veya bilişim sektöründe “Bilgisayar Donanım Elemanı Meslekî Yeterlilik Belgesi” “özel amaçlı yeterlilik”tir. TYÇ’de kullanılan yeterlilik kategorileri arasındaki ilişkileri gösteren şekil aşağıda sunulmaktadır.

Yeterlilik türü belirleyicisi; her bir yeterlilik türü içerisinde yer alan yeterliliklere özgü ortak özellikleri tanımlamaktadır. Yeterlilik türü belirleyicileri, sorumlu kurumlar tarafından seviye tanımlayıcıları temelinde sorumlu oldukları yeterliliklerin tanımlanması ve yeni yeterliliklerin geliştirilmesinde asgari özellikler olarak esas alınacaktır.



Şekil 2. Yeterlilik Kategorileri Arası İlişkiler

TYÇ uygulama sürecinde sorumlu kurumlar birbirinden farklı amaç ve işlevlere sahip yeterliliklerin ait olduğu kategorileri yeterlilik türü belirleyicilerinde tanımlayacaktır¹⁰.

2.3.4. Seviyelerin ve Yeterlilik Türlerinin İlişkisi

TYÇ’nin yapısı iki temel bileşenden oluşmaktadır. Bunlar, sekiz (8) seviyeli yapı ve yeterlilik türleridir. 8 seviyeli yapı, TYÇ’nin temelini oluştururken seviye tanımlayıcıları 8 seviyeli yapının tanımlayıcı bileşenidir. Seviye tanımlayıcıları, göreceli olarak genel, kısa ve öz tanımlamalar olup belirli bir öğrenme veya çalışma ortamından tamamen bağımsızdır. Yeterlilik türleri ise, birbirinden önemli ölçüde farklı yeterliliklerin aynı seviyeye yerleştirilmesine olanak

sunan araçlardır. Ayrıca yeterlilik türleri, ileride yeni yeterliliklerin geliştirilmesi için gerekli zemini sağlayacaktır. Yeterlilik türü belirleyicilerinin öğrenme kazanımlarını oluşturmak için seviye tanımlayıcıları detaylandırılır ve zenginleştirilir. Dolayısıyla, yeterlilik türü belirleyicileri, seviye tanımlayıcılarına göre daha kapsamlı ve ayrıntılıdır¹⁰.

Tablo 5. Türkiye Yeterlilikler Çerçevesi Yeterlilik Türleri, Öngörülen Seviyeleri ve Sorumlu Kurumlar

8	Yükseköğretim Kurumu	Doktora Diploması (Doktora, Sanatta Yeterlilik /Doktora ve Tıpta Uzmanlık)			Mesleki Yeterlilik Kurumu	8. Seviye Mesleki Yeterlilik Kurumu
7		Yüksek Lisans Diploması (Tezli/Tezsiz)				7. Seviye Mesleki Yeterlilik Kurumu
6		Lisans Diploması				6. Seviye Mesleki Yeterlilik Kurumu
5		Ön Lisans Diploması (akademik/Mesleki)				5. Seviye Mesleki Yeterlilik Kurumu
4	Milli Eğitim Bakanlığı	Lise Diploması	Mesleki ve Teknik Eğitim Lise Diploması	Ustalık Belgesi		4. Seviye Mesleki Yeterlilik Kurumu
3		Ortaokul Öğrenim Belgesi		Kalfalık Belgesi		3. Seviye Mesleki Yeterlilik Kurumu
2		İlkokul Öğrenim Belgesi				2. Seviye Mesleki Yeterlilik Kurumu
1		Okul Öncesi Katılım Belgesi				

2.4. Rüzgar sektöründe faaliyet gösteren eğitim kurumları

2.4.1. Global Wind Organization (GWO)

Global Wind Organisation (GWO), rüzgâr türbin üreticilerinin ve türbin işletmecilerinin, iş güvenliğini ve kazaların engellenmesi amacıyla, üyeler arasında iş birliği ve güvenlik eğitimlerinin standartlaşması için kurulan kâr amacı gütmeyen bir kuruluştur. GWO, iş sağlığı ve güvenliği programı diğer programlar ile benzeşmekte, farklı olarak off-shore türbin çalışanları için denizde hayatta kalma modüllü eklenmiştir. GWO eğitim modülleri genel anlamda, güvenli çalışmayı ve bazı türbin parçalarının nasıl çalıştığı, bunlarda ölçüm ve bakım konularına odaklanmaktadır. Spesifik üretici veya işletmeci bazında olmayan eğitimler hem genel uygulama ve hem de güvenli çalışma yapılmasına yönelik olarak, sektörün tüm temsilcileri tarafından kabul edilir ve aranan bir program olmuştur. GWO eğitim programları incelendiğinde yine bir Avrupa Birliği projesi olan SKILLWIND'e benzer yapı kullandığı görülüyor fakat SKILLWIND programında rüzgar türbinin tüm parçaları genel anlamda tanıtılmakta, nasıl çalıştıkları, ana parçaları, devreleri ve operasyonları gösterilmektedir.

Tablo 6. Global Wind Organization Özet Tablosu

Eğitim Kurumu	Amaç	Yapı	İçerik
GWO	Rüzgar sektörü için standart güvenlik ve teknik eğitim oluşturmak	Eğitim modülleri rüzgar türbini için temel güvenlik, mekanik, elektrik ve hidrolik sistemler olarak ayrılmıştır.	- Temel Güvenlik Eğitimi - Mekanik Eğitimi - Elektrik Eğitimi - Hidrolik Eğitimi

2.4.2. WindSkill

Windskill projesi (2006-2009), rüzgâr enerji sektöründe ihtiyaç duyulan nitelikleri, Avrupa Kalifikasyon yapısına uygun bir şekilde karşılanması için eğitim içeriği oluşturan ilk projedir. Hem on-shore hem de off-shore için işletme ve bakım konularına odaklanılmıştır.

Projenin amacı; rüzgar enerji eğitim ağı oluşturmak, Avrupa yeterlilik çerçevesini geliştirmek, bu çerçevede modüler eğitim programları geliştirmek, pilot eğitim programlarını uygulamak ve uygulanabilir olup olmadığını kontrol etmek, sürekli eğitim programlarının geliştirilmesi ve programlara entegre edilebilmesi için güncel teknolojilerinin izlenmesi ve geliştirilme amacı içerir

Tablo 7. WindSkill Özet Tablosu

Eğitim Kurumu	Amaç	Yapı	İçerik
WindSkill	Rüzgar sektörü için Avrupa yeterlilik çerçevesini geliştirmek	Eğitim modülleri teknik kriterlere göre yapılandırılmıştır	- Montaj -Elektrik Sistem Bakım ve Muayene - Mekanik Sistem Bakım ve Muayene - Hidrolik Sistem Bakım ve Muayene - Güvenlik Sistemi Bakım ve Muayene - Rotor Kanadı Muayene - Rotor Kanadı Tamir - Arıza Giderme - Yangınla Mücadele - Yüksekte Çalışma ve Kurtarma - Çevre Bilinç ve Koruma - İş Sağlığı ve Güvenliği - Rüzgar Enerji Sistemleri

2.4.3. Danish Wind Academy (DWPA)

Danish Wind Power Academy (DWPA), büyük rüzgâr türbin yatırımcılarına ve üreticilerine, eğitim ve servis hizmeti vermek amacıyla 2004 yılında kurulmuştur. Hem türbin işletmecilerinin hem de servis sağlayıcı şirketlerin uzman teknik çalışanlarına geniş çaplı eğitim programları sağlamaktadır. Eğitim kursları genel olarak ana üreticilerin penceresinden bakarak planlanmıştır ve bazı üreticilerin özelleştirilmiş bakım programlarını içermektedir. Rüzgâr endüstrisi için temel eğitim programı dikkate alındığında, piyasadaki iki büyük türbin üreticisi olan Vestas ve Siemens türbinlerinde kullanılan jeneratör, kontrol sistemi, sensörlere odaklanmıştır. Arıza arama ve çözme gibi konularda yine bu iki firmanın sistemine yöneliktir. Geri kalan modüller ise genel teknik eğitimleri ve diğer programlar ile karşılaştırılabilir konuları içermektedir.

Tablo 8. Danish Wind Academy (DWPA) Özet Tablosu

Eğitim Kurumu	Amaç	Yapı	İçerik
Danish Wind Power Academy	Türbinde işletme ve bakım için çalışacak personele temel eğitimleri sağlamak	Eğitim içerikleri farklı türbin üreticilerine göre düzenlenmiştir	- Güvenlik Eğitimleri - Rüzgar Türbin Tipleri - Bakım Programları - Kanatlar - Dişli Kutusu - Soğutma Sistemleri - Hidrolik Sistemler - Ölçümler ve cihazlar - Elektrik Devreleri - Kontrol Sistemleri ve İşletme - Sensörler - Arıza Çözme

2.4.4. BZEE

BZEE, 2000 yılında Almanya'da rüzgâr enerji sektöründeki nitelikli personel açığını gidermeye yönelik olarak kurulmuştur. Bugünlerden 29 farklı lokasyonda, üretim, montaj, devreye alma, işletme ve bakım konularında konusunun uzmanı kalifiye teknisyenler yetiştirmeye yönelik çok farklı eğitim programları düzenlemektedir.

BZEE eğitim programları oldukça geniş ve bazıları özellikle sektörün uzmanlarına yönelik hazırlanmıştır. Modüler eğitim kursları rüzgâr sektöründe farklı alanlarda uzmanlaşmış kişilere yönelik olarak bulunabilir.

İş güvenliği ve sağlığı programında yer alan İlk Yardım, Yüksekte Çalışma, Yangınla Mücadele, Tahliye ve Kurtarma operasyonu hemen hemen tüm eğitimlerde aynı veya çok benzer içeriklere sahip.

Fakat BZEE'nin aşağıdaki modüllerinde ana farklılıklar bulunmakta;

- Hidrolik; Hidrolik sistem eğitim modülünde türbinlerde kullanılan her bir parçanın tanıtımı, montaj ve bakım noktalarını içermektedir.
- Rotor Kanatları; rotor Kanat eğitim modülünde, BZEE Akademi genel yaklaşım ve tanıtımdan ziyade oldukça spesifik noktalara değinmektedir.
- Nakliye ve Taşıma; Transport eğitim modülü, bakım ve montaj süreçlerinde forklift, tır, vinç kullanım ehliyetlerini sağlanması için oluşturulmuş. Her eğitim programında yer almayan bu modül, türbin büyüklüğüne göre programın düzenlenmesi gerekir.
- Operasyon yönetimi ve destek; Operasyon yönetimi ve destek programı, rüzgâr enerji sektörüne özel bir program olmadığından, herhangi bir değerlendirme yapılmamıştır.

Tablo 9. BZEE Özet Tablosu

Eğitim Kurumu	Amaç	Yapı	İçerik
BZEE	Avrupa yeterlilik çerçevesine uyumlu esnek program oluşturmak ve kişiselleştirilebilir program uygulamak	Eğitim modülleri, hem bakım veya montaj işine göre hem de on-shore, off-shore rüzgar türbinlerine göre yapılandırılmıştır.	- Güvenlik Eğitimleri - Rüzgar Türbin Elektronik - Rüzgar Türbin Mekanik - Hidrolikler - Rotor Kanatları - Nakliye ve Taşıma - Rüzgar Türbin Teknolojisi - Deniz üstü operasyonlar - İşletme Yönetimi

2.4.5. SkillWind

SKILLWIND projesinin amacı, temel eğitim modülleri geliştirerek, hem rüzgâr sektörün ihtiyaç duyduğu ve açık olarak gördüğü noktalarda eğitim programları ile doldurmak hem de eğitim kursları standartlaştırarak farklı sektörlerden gelen çalışanların rüzgar sektörüne geçişini kolaylaştırmak. Benzer şekilde GWO, SKILLWIND modelini kullanarak, eğitilen öğrencilerin sertifikasyonunu sağlamakta ve tüm temsilciler tarafından katılımcıların seviyesi veya öğrenimleri tanımlanabilmektedir. Bazı üretici ve servis sağlayıcılar kendi eğitim programları konusunda ısrarcılar, SKILLWIND projesinin yaklaşımı, genel konsept, spesifik türbinler için farklı eğitim kursları ve bazı komponentler (kanat ve konvertör gibi) için uzmanlık eğitimlerinin detaylarda farklılaşmasıdır.

Tablo 10. SkillWind Özet Tablosu

Eğitim Kurumu	Amaç	Yapı	İçerik
SkillWind	Bakım eğitimlerini standart hale getirmek ve geliştirmek amacıyla eğitim programı ve uygulama geliştirmek	Eğitim modülleri özelleştirilebilir şekilde, blok olarak yapılandırılmıştır.	- Güvenlik Eğitimleri (GWO) - Rüzgar Enerji Sistemleri - Montaj ve Kurulum - Rüzgar Türbinlerine Özgü Bakım - Koruyucu Bakım - Düzeltici Bakım - Kestirimci Bakım - Kanat Muayene ve Tamir - Konvertör Tamir - YG ve OG Bakım

3. RÜZGAR GÜÇ SİSTEMLERİ PERSONELİ

3.1. Türkiye Rüzgar Enerjisi Sektöründeki Faaliyetler

Ülkemizde giderek artan bir şekilde rüzgâr enerji santrallerinin kurulması ve yeni yatırımların yapılması, bu sektörde üretim, projelendirme, kurulum ve işletme alanlarında hızlı bir şekilde istihdam artmaktadır. Bu alanlar incelendiğinde meslek eğitiminin en fazla ihtiyaç duyulduğu alan olarak montaj ve işletme alanı olduğu görülmektedir.

Türkiye’de rüzgâr santrallerinin ortalama yaşına bakıldığında oldukça düşük olduğu ve bu sebeple ilerleyen yıllarda, santrallerin verimli ve sağlıklı tutabilmek için bu alanda yetiştirilecek personel eğitimleri gerekmektedir. Aynı şekilde Türkiye’deki rüzgâr enerjisi için yapılan projeksiyona bakıldığında montaj faaliyetlerinde çalışacak personelinde ciddi anlamda ihtiyaç olacağı açıktır. Yerli üretimin teşvik edilmesi ile beraber doğrudan ve dolaylı olarak rüzgar üretiminde de faaliyetler artmaktadır, bu anlamda üretim alanında da mesleki eğitimin ihtiyacı olacaktır bu çalışmada rüzgar türbin ve parçası için üretim faaliyetlerinin mesleki eğitimleri diğer benzer sektördeki üretim alanlarından farklı görülmemiştir ör. Türbin ana parçalarının üretimi, metal sektöründeki üretim ile neredeyse farkı yoktur aynı şekilde kompozit üretimi ile rüzgar türbin kanat üretimi birbirlerine çok benzemektedir. Bu yüzden bu alandaki eğitim programları farklı bir çalışmanın konusu olabilir. Buna rağmen bu üretim parçalarının işletmedeki tamir veya değişimi için gerek duyulan bilgiler yine bu üretim alanlarındaki kurumlar ile iş birliği ile sağlanmalıdır.

Projelendirme aşaması ise, rüzgâr santrallerinin kurulmadan öncesi ve kurulum aşamasında, satış ve pazarlama, finans, rüzgâr verilerinin toplanması, analizi, inşaat, elektrik altyapı işlemleri vb. faaliyetleri kapsamaktadır. Bu alanlar için eğitim genel olarak hem lisans hem de lisansüstü seviyelerde gerçekleştirilmektedir.

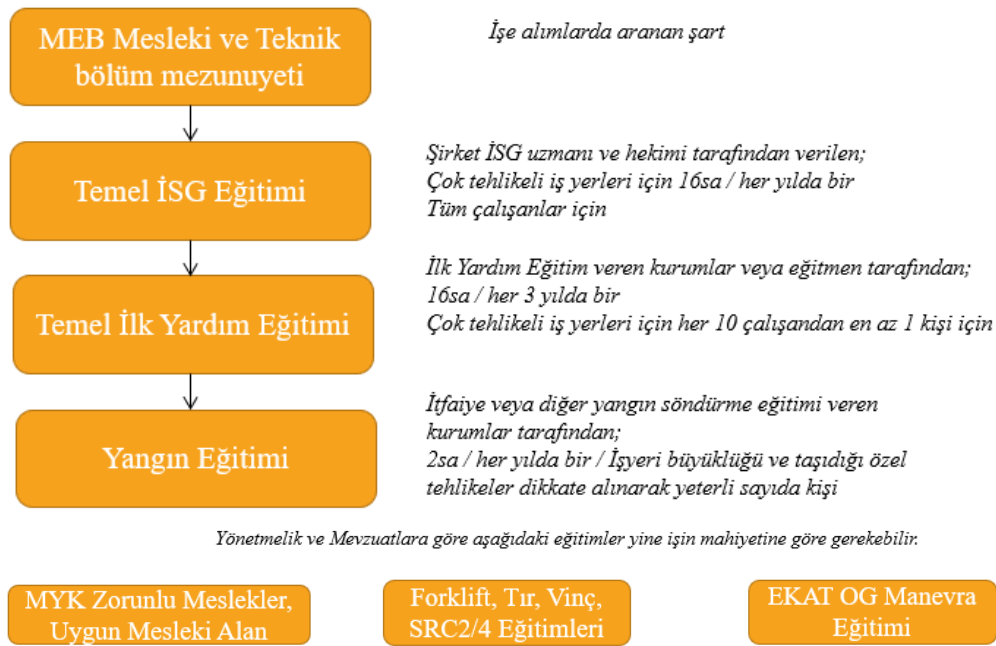
3.2. Rüzgar Enerji Sistemleri Personeli

Bu çalışmada geliştirilmek istenen mesleki eğitim programı, rüzgâr enerji sektöründe kurulum ve işletme alanında faaliyet gösterecek personeli kapsamaktadır. Kurulum faaliyetlerinin bir bölümü projelendirme aşamasının içerisine girse de bu çalışmada bahsedilen rüzgâr enerji türbinlerinin montaj, şebeke bağlantı ve devreye alma işlemleridir. İşletme faaliyetleri ise türbinlerin güvenli ve sağlıklı çalışmasını kapsayan, koruyucu bakım, düzeltici bakım, kestirici bakım, arıza arama, muayyene ve tamir konularını kapsamaktadır. Kurulum ve işletme alanlarındaki eğitim modelleri tartışma bölümünde ayrıntılı olarak irdelenecektir.

3.3. Türkiye’de Rüzgar Enerjisi Eğitimleri

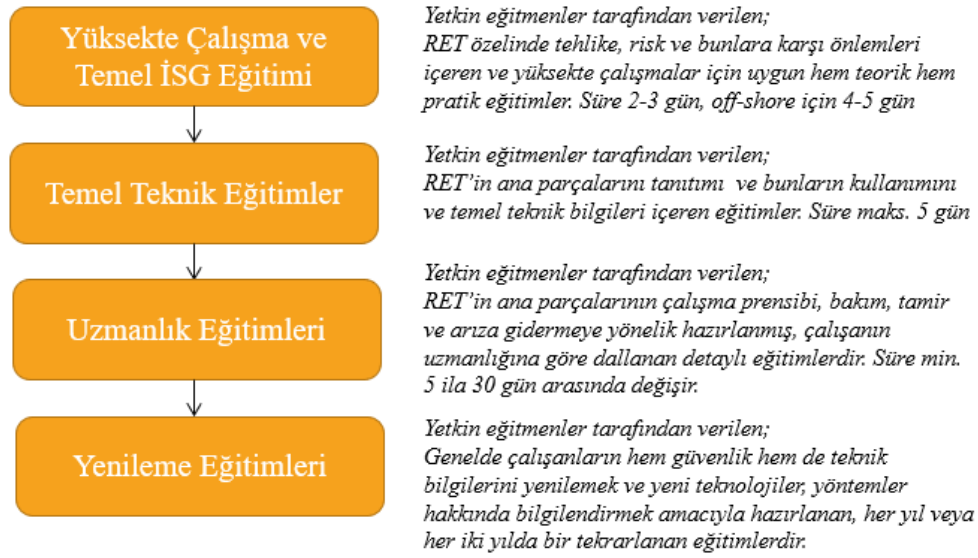
Türkiye’de rüzgâr enerji sektöründe çalışan bakım, onarım ve montaj personelinin eğitimleri incelendiğinde, sektörün gerekli niteliğe sahip personeli bulmakta zorluk çektiği anlaşılmaktadır. Personelin meslek eğitimini tamamladığı üniversite, meslek okulu veya meslek eğitimi veren diğer okullardan aldıkları eğitimlerin, rüzgâr sektörü için yetersiz kalmaktadır. Bu sebeple rüzgâr sektöründe işe başlayan personel genel olarak şirket içi veya bazı özel kurumlar tarafından ek eğitimler ile nitelik açığı giderilmeye çalışılmaktadır. Her şirketin veya özel kurumların kendine göre düzenlediği eğitim programı ve sertifikasyon ayrı olduğu için çoğunlukla personelin iş değiştirmesi veya aynı sektörde farklı bir şirkette geçmesi durumunda bu eğitimlerin sertifikasyonları kabul edilmemekte ve benzer eğitimleri farklı düzende tekrardan almak durumunda kalmaktadır. Bu hem zaman hem de kaynakların israfı anlamına gelmektedir. Bu anlamda benzer veya aynı eğitim programının farklı belgelendirilmesi, iki konuda sorun yaratmaktadır. İlk olarak personelin edindiği meslek eğitimlerinin rüzgâr sektörü için yetersiz olmasından ötürü edindiği diploma kanunlara göre ağır ve tehlikeli işlerde çalışması için aranmaktadır fakat teknik anlamda rüzgâr enerjisinde yapabileceği görevler için yetersiz kalabilmektedir, bunun yanı sıra meslek okullarında verilen temel bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır. Mesleki eğitime ek olarak rüzgâr sektörü için özelleştirilmiş programlar uygulanmaktadır. Aşağıda şemada (bkz. şema 3) örnek olarak rüzgâr enerji sektöründe bakım, onarım ve montaj personeli için işe başlayan bir çalışanın örnek bir eğitim süresi görülebilir.

Birinci grup olarak sınıflandıracağımız eğitimler, Türkiye’deki yönetmelik ve mevzuatlara uygun işe alımda aranan mesleki eğitimler ve ek olarak gerekli diğer eğitimlerdir.



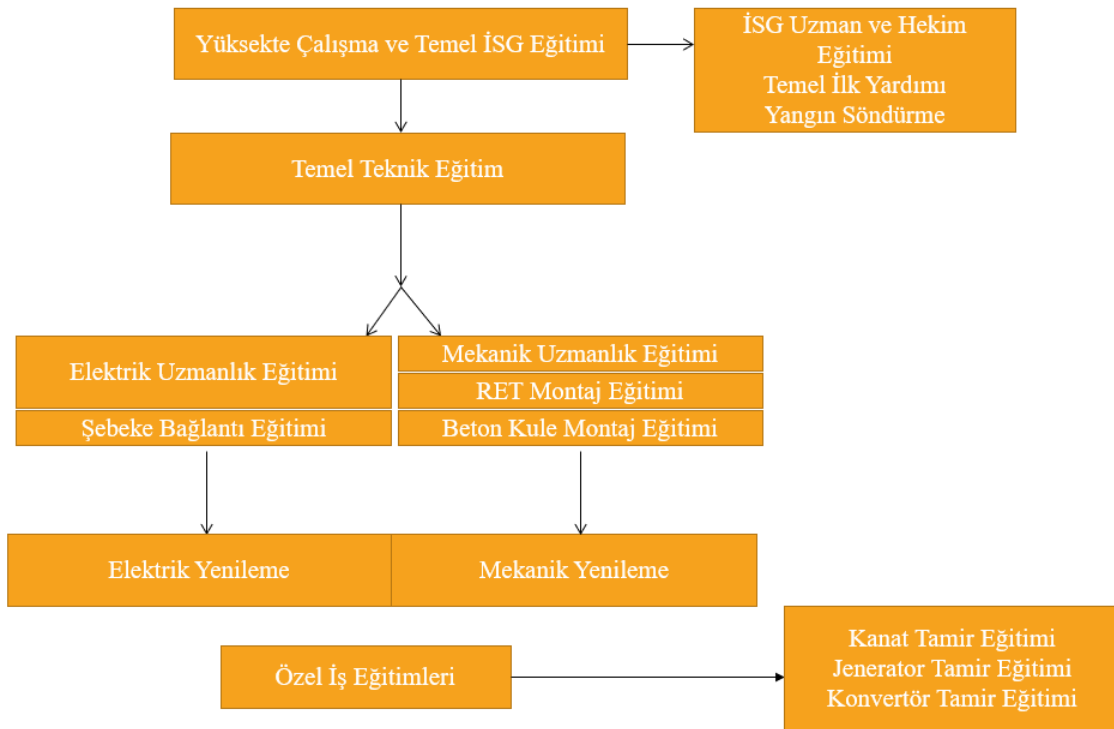
Şekil 1. Türkiye’de Rüzgâr Sektöründe Yönetmelik ve Mevzuatlara Uygun Gerçekleştirilen Eğitimler

İkinci grup olarak mesleki eğitime ek olarak, rüzgâr sektörüne özgü iş başı eğitimi olarak söyleyebileceğimiz, genelde şirketlerin kendileri tarafından veya harici bir kurum tarafından verilen, hem rüzgâr türbinlerine uyarlanmış mesleki eğitimleri hem de rüzgâr türbinine ait özel eğitimleri içeren eğitimler bulunuyor.



Şekil 2. Rüzgâr Sektörüne Özgü Ek Eğitimler

Bu ikinci sınıf eğitimler yine çalışanın faaliyet alına göre özelleştirilebilir, rüzgâr türbinlerine ait temel güvenlik ve teknik eğitimler sonrasında çalışanın mesleğine veya çalışma alanına göre uzmanlık eğitimleri gerçekleştirilir bu uzmanlık eğitimleri temel meslek bilgilerini içerdiği gibi ana hedef temel mesleki bilgiye sahip çalışana rüzgâr türbinlerine ait teknik uzmanlığın sağlanmasıdır. Bunun dışında rüzgâr sektöründe özel işler içinde ek eğitimler düzenlenir bunlar türbin özelinde veya daha çok özel tamir gerektiren işler için bu özel eğitimler gerçekleştirilir.



Şekil 3. Rüzgâr Enerji Türbini Personeli İçin Eğitim Programı

Üçüncü olarak sınıflandıracağımız eğitimler ise yönetsel veya destekleyici nitelikte olan ve genelde harici kurumlardan alınan eğitimler bulunuyor. Bu eğitimler meslek eğitiminden ayrı olarak çalışılan pozisyona veya çalışanın eksik olduğu yönleri güçlendirmek için yapılan eğitimler bulunmaktadır.



Şekil 4. Kişiy ve İşe Özgü Destekleyici Eğitimler

Tüm sektör temsilcilerinin kabul ettiği ortak bir eğitim programı ve sertifikasyon sayesinde, sektörde işletmelerin ayrı ayrı bu eğitimleri sağlamak yerine ortak olarak belgelendirilmiş eğitim programı ile zaman ve kaynak tasarrufu sağlanacaktır.

Rüzgâr sektörüne yönelik olarak meslek standartlarının ve yeterliliklerinin belirlenmesi ve buna yönelik eğitim programının geliştirilmesiyle, sektör temsilcileri tarafından aranan yeterliliklerin ve eğitimlerin MYK çerçevesi içerisinde personele sağlanması oldukça önemlidir. Farklı ve çeşitli programlarının kesişim kümesi olan temel eğitim modülleri ve sektörün genel olarak talep ettiği eğitimlerin, meslek standardı olarak belirlenmesi ve Avrupa Yeterlilik Çerçevesi kapsamında uluslararası geçerliliğe sahip olması, hem ulusal hem de uluslararası alanda sektörde mesleki yeterliliğinin kanıtlanması ve tekrarlanmak zorunda kalan benzer eğitimlerin engellenmesi ve sektörün gereksinimlerinin karşılanması hem çalışan hem de sektör temsilcileri için büyük kolaylık ve avantaj sağlayacağı kesindir.

3.4. Rüzgâr Güç Sistemleri Personeli Yeterlilikleri

Bu bölümde rüzgâr güç sistem personelinin mesleğini icra ederken kendilerinden beklenen görevler, işlemler yapabilmeleri için hangi yeterliliklere sahip olmaları gerektiği yer almaktadır. Bu yeterliliklerin belirlenmesi rüzgâr güç sistemleri personelinin değerlendirilmesinde ve niteliklerinin ölçülmesinde ve bu niteliklerin kazandırılmasında oldukça önemlidir. Rüzgâr güç sistemleri personelinin mesleğini icra ederken ihtiyaç duyacağı yeterlilikleri ve bu yeterliliklerin kazandırılması için gerekli eğitimleri üç farklı başlık altında toplayabiliriz.

1- Temel Güvenlik ve Teknik Eğitim

Temel bilgi olan bu eğitimde, katılımcılar, iş güvenliği, işçi sağlığı, yüksekte çalışma ve rüzgâr türbinlerinin temelleri, elektrik ve mekanik alanlarında eğitim alırlar. Bu eğitimin amacı diğer üst seviye eğitimler için bir temel oluşturmastır. Temel eğitimde herhangi bir seçmeli ders olmayıp, rüzgâr enerji sistemleri teknisyeni eğitiminde her seviye için zorunlu eğitimleri içermektedir.

2- Uzmanlık Alan Eğitimleri

İkinci seviye alan eğitimleri için birinci seviye temel eğitimleri başarı ile tamamlamış olması katılımcılardan aranmaktadır. İkinci seviye eğitim içerisinde teknik alanlara göre teknisyenlerin uzmanlaşması için seçmeli konular yer alır. Bu uzmanlık alanları Elektrik – Elektronik ve Mekanik-Hidrolik olmak üzeri iki ana uzmanlık alanına ayrılmıştır. Eğitimi alan katılımcılar uzmanlık alanları ile ilgili daha detaylı olarak eğitim görür ve pratik uygulamalarla teorik bilgisini pekiştirir.

3- Özellikli Eğitimler

Üçüncü seviyedeki eğitimleri katılımcının çalıştığı kuruma, yapılacak işe, uzmanlık gerektiren uygulamalar gibi tamamen özelleştirilmiş bir eğitim modülüdür. Eğitim programı özel kurumlar tarafından kendilerine özgü geliştirilebilir. Katılımcılar sektörde tecrübe kazanmış ve artık özel uygulamalar veya görevler ile kendilerini mesleklerinde ilerletmeyen isteyen teknik personeldir.

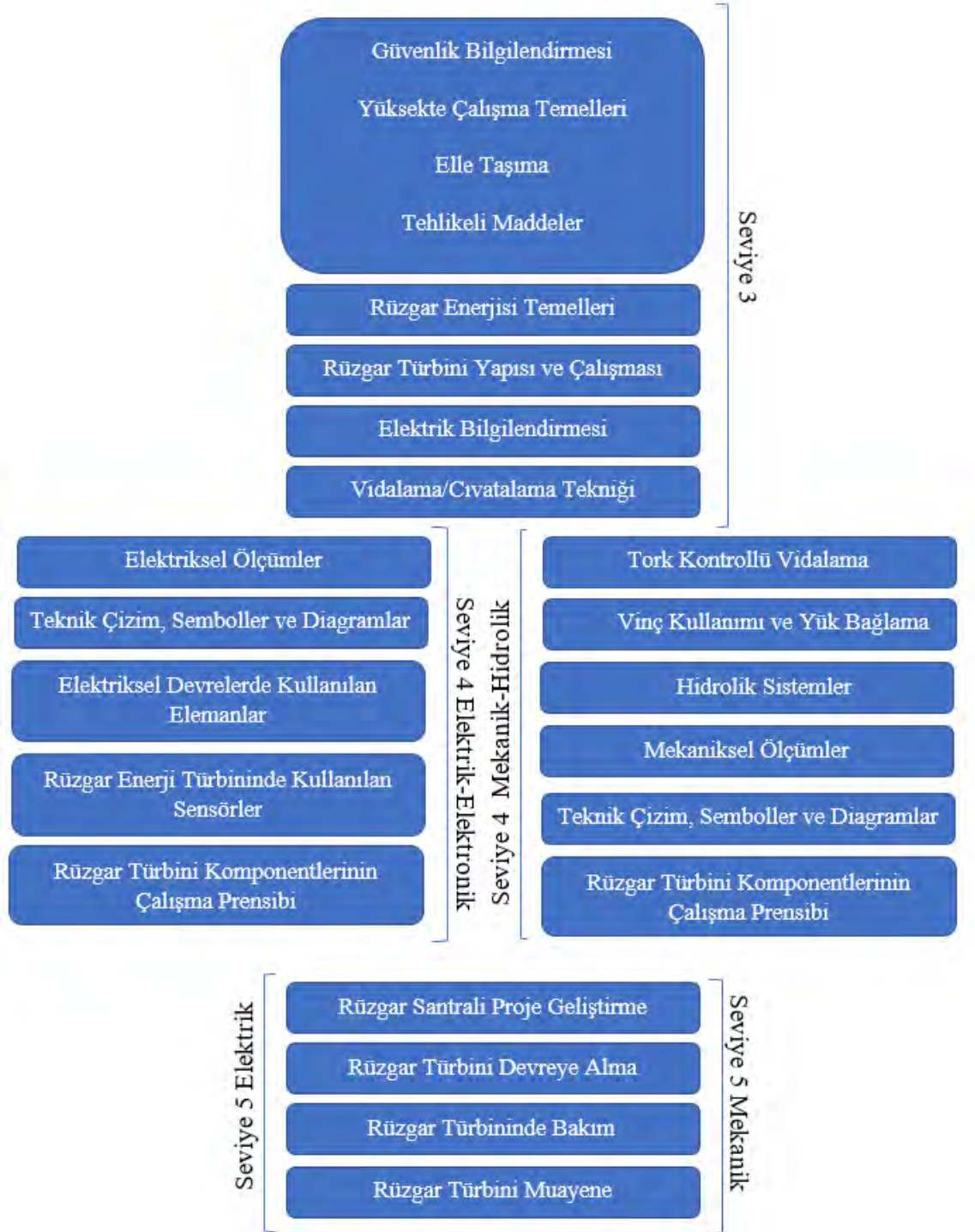
Bu başlıkların dışında mesleki gelişim, yeni teknolojilerin takibi, bilgi teknolojileri gibi alanlarda personelin ihtiyaç duyduğu eğitimlerde bu eğitim programlarına ek olarak farklı zamanlarda uygulanabilir.

Rüzgâr sektöründe çalışan bakım, onarım ve montaj personeline verilen eğitimler dikkate alınarak hazırlanan aşağıdaki örnek eğitim ve yeterlilik modüllerinde (bkz. Şekil 5), mesleğin seviyeleri AYÇ'de yer alan seviyeler kullanılmıştır. Burada hem mesleğin yapılmasında karşılaşılan zorluk ve karmaşıklık durumları dikkate alınmış hem de genel olarak kabul görmüş eğitim modülleri kullanılarak seviyelere karar verilmiştir. Seviye 5 kısmında yer alan özellikli eğitimlerin alınmasına ek olarak çalışan seviye 3 ve seviye 4 kısımlarında yer alan eğitim konularına da başarıyla tamamlamış olması gerekmektedir, aynı şekilde seviye 4 kısmında yer alan uzmanlık alan eğitimlerini alan çalışan aynı zamanda seviye 3 konularında başarıyla tamamlamış olması gerekmektedir. Bu eğitim modülleri aynı zamanda mesleğin yeterliliklerini de belirlediği için başarı ölçütlerine göre yapılan teorik ve pratik sınavlardan başarılı olan çalışanlarda bu modüllerden başarılı kabul edilecektir. Böylece bilgi ve mesleki tecrübesi olan çalışan bilgi sahibi olduğu konularda tekrardan eğitim alması gerekmeyecektir. Bununla beraber ulusal ve uluslararası kabul edilecek sertifika programlarından başarılı olmuş ve bunu belgeleyen çalışanların da bu yeterliliklere sahip olduğu varsayılabilir. Hangi kurumun hangi sertifika programının geçerli olacağı ile ilgili çalışma, Mesleki Yeterlilik Kurumu tarafından belirlenen akreditasyon süreçleri takip edilebilir.

Seviye 3 eğitim modülleri içerisinde herhangi bir seçmeli modül bulunmamaktadır, temel güvenlik ve teknik eğitim olarak geçen bu seviyede tüm diğer seviyeler için zorunlu modüllerden oluşmaktadır. Bu eğitim modüllerinin hedefi, rüzgâr sektöründe çalışacak personelin, genel iş güvenliği ve sağlığı konularına ek olarak rüzgâr türbinlerine özgü yüksekte çalışma, rüzgâr enerjisi ve rüzgâr türbinlerinin yapısına göre düzenlenmiş teknik konularında yeterlilik kazanmasıdır.

Seviye 4 eğitim modülleri içerisinde seçmeli konular bulunmaktadır, örnek olarak verdiğimi tabloda bu seçmeli bölümler elektrik veya mekanik, hidrolik konuları olarak sınıflandırılmıştır. Seçilen alanda uzmanlaşmış personele verilecek belgede yine bu konular ve eğitim modülleri belirtilecektir. Seçmeli bölümlerin hangi eğitim konularını içereceği veya hangi türbin tipinde veya faaliyet alanında uzmanlaşacağı ile ilgili farklı modeller veya seçenekler üzerinde tartışma bölümünde ayrıca durulmuştur.

Seviye 5 eğitimi özellikli eğitimler olup işletmeciye ve üreticiye göre özelleştirilebilir modüllerden oluşmaktadır. Bu eğitim modüllerinin hazırlanması ve uygulanmasında işletmeci ve üreticiler ile sıkı bir iş birliği gerekmektedir.



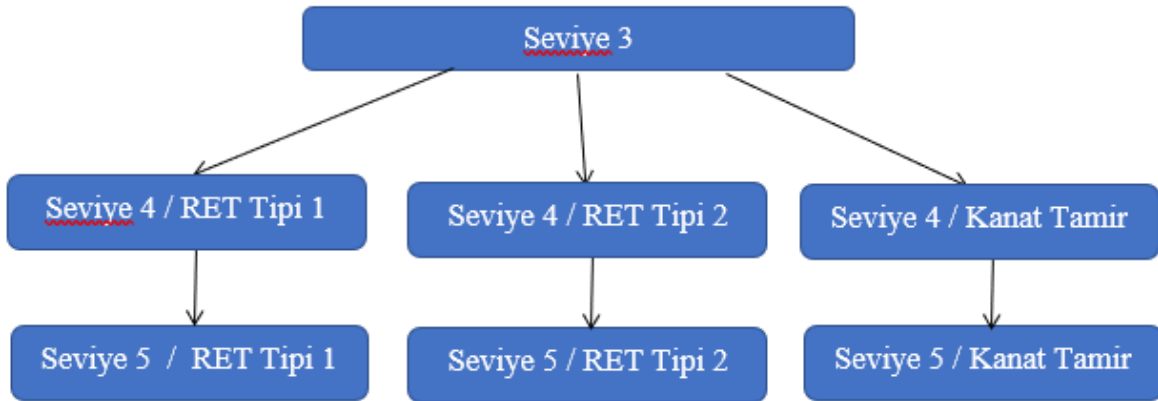
Şekil 5. Rüzgâr Enerji Türbini Personeli için Örnek Eğitim Modülleri ve Yeterlilikler

4. TARTIŞMA

Bu üç farklı eğitim seviyeleri için farklı modeller kullanılabilir, bunlar sektör temsilcileri ve uygulama bakımından avantaj ve dezavantajlarına bakılarak karar verilebilir. Önerdiğimiz eğitim modellerinde sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü seviyedeki eğitimler tamamlanması gösterilmiştir fakat birinci seviye hariç diğer seviyelerde katılımcının farklı uzmanlık alanlarında farklı konulara yönelmesi mümkün olmaktadır. Eğitim modelleri ve çeşitliliği artırılabilir gibi birden fazla model beraber kullanılabilir veya birleştirilebilir.

Model 1:

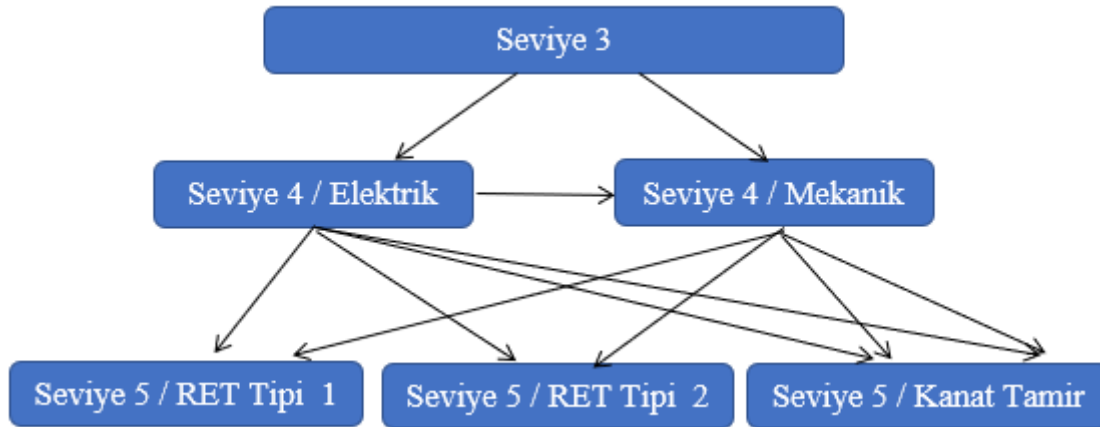
Bu eğitim modelinde birinci seviye temel eğitimlerini tamamlayan katılımcı, ikinci seviye için çalışma yapacağı bir rüzgâr enerji türbin tipine göre eğitim programı seçebilir veya çalışma yapacağı özel bir uygulama alanında eğitim programı seçebilir. Üçüncü seviyede yine aynı şekilde eğitim programını bir rüzgâr enerji türbin tipine göre eğitim programını seçebilir. Bu programda seçtiği rüzgâr enerji türbinine özel bakım, muayene veya montaj alanlarında uzmanlık kazanabilir.



Şekil 6. Seviyeler Arası Geçiş Eğitim Modeli 1

Model 2:

Bu eğitim modelinde birinci seviye temel eğitimlerini tamamlayan katılımcı, ikinci seviye için uzmanlık alanına göre eğitim programı seçebilir. Üçüncü seviyede bir rüzgâr enerji türbin tipine göre eğitim programını seçebilir. Bu programda seçtiği rüzgâr enerji türbinine özel bakım, muayene veya montaj alanlarında uzmanlık kazanabilir.



Şekil 7. Seviyeler Arası Geçiş Eğitim Modeli 2

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Rüzgâr enerji sektöründe, özellikle bakım, onarım ve montaj alanlarında uzman personel açığı olacağı gözükmemektedir. Fakat bu açığı kapatacak olan eğitim kurumları ortak bir merkezde toplanmamaktadır ve birbirlerinden ayrı olarak farklı kurumlardan ve yurtdışı eğitim kurumlarından bu eğitimler uygulanmaktadır.

Türkiye’de tehlikeli ve çok tehlikeli mesleklerde çalışanların MYK Mesleki Yeterlilik Belgesine sahip olması zorunlu hale getirilmiş ve ülkemizde verilecek tüm mesleki ve teknik eğitimin MYK tarafından yayımlanan ulusal meslek standartlarına göre verilmesi yasal zorunluluk haline getirilmiştir¹¹. Bu sebeple oluşturulacak eğitim programı ve eğitim kurumunun MYK çerçevesi içerisinde oluşturulmalıdır, aynı zamanda MYK tarafından verilecek yeterlilik belgesinin ulusal ve uluslararası mesleki eğitim olarak kabul edilmelidir. “Global Wind Organisation” (GWO) gibi kurumların verdikleri eğitim ve sertifikalar sektörde tüm kuruluşlar tarafından kabul edilir bir belgedir ve uluslararası geçerliliği bulunmaktadır. MYK tarafından verilecek belgelerin, rüzgar sektörü için kabul edilebilirliğinin sağlanması için tüm kamu ve özel katılımcıların katkı sağlaması, ilgili kurumlarla (GWO vs.) işbirliği sağlanması ve farklı kurumlar tarafından da MYK belgelerinin geçerliliğinin sağlanması, sektörü yasalarla zorunlu olduğu için alınan eğitim ve sertifikalar ile teknik olarak gerekli olduğu için alınan eğitim ve sertifikalar ayırımından kurtaracaktır. Aynı zamanda hem zaman hem de kaynak tasarrufu sağlanmış olacaktır.

2023 hedefleri ile uyumlu bir sistem oluşturulması için meslekî ve teknik eğitime yönelik var olan toplumsal algıyı değiştirmeyi hedefleyen, öğrencilerin meslekî ilgi ve yeteneklerini tespit eden, akademik ders yoğunluğunun azaltıldığı, meslekî ders içeriklerinin güncellendiği, öğretmenlerin iş başında eğitim olanaklarının artırıldığı, ulusal ve uluslararası sektör ve kamu finansal kaynaklarının kullanımı yoluyla okulların alt yapı ve donanımının hızla değişen ve gelişen teknolojiyle uyumlu hale getirildiği, mezunlarına istihdamda öncelik sağlayan ve farklı ücret politikalarının uygulandığı, sektörün meslekî ve teknik eğitim süreçlerinde daha fazla yer aldığı, sektör liderleri ile iş birliği imkânlarının artırıldığı, ulusal ve uluslararası düzeyde sektörel iş birliği protokolleri ve iyi uygulama modeli olabilecek projelerin hayata geçirildiği, mezunlarının kendi alanlarında yükseköğretime geçişlerini sağlayacak bütünsel bir yapının kurulması planlanmaktadır¹².

KAYNAKLAR

- [1] <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Ruzgar>
- [2] <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Elektrik>
- [3] http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/Wind_at_work.pdf
- [4] Works wanted tpwind
- [5] Gök, İ., Şimşek, M., 2006, “Mesleki Teknik Eğitimde Politika ve Stratejiler”, AB Kopenhag Süreci ve Maastricht Bildirgesi Açısından Türkiye’de Mesleki Öğretim ve Eğitim Bekleyen Zorluklar Uluslararası Konferansı, Demircioğlu Matbaacılık, Ankara, ISBN: 975-11-2707-6
- [6] “Meslekî ve Teknik Ortaöğretimde Kurumsal Dış Değerlendirme Raporu”, Eğitim Analiz ve Değerlendirme Raporları Serisi No:2 Kasım 2018
- [7] “Türkiye’de Meslekî ve Teknik Eğitimin Görünümü”, Eğitim Analiz ve Değerlendirme Raporları Serisi No:2 Kasım 2018
- [8] “Türkiye’de Meslekî ve Teknik Eğitimin Görünümü”, Eğitim Analiz ve Değerlendirme Raporları Serisi No:2 Kasım 2018
- [9] https://myk.gov.tr/index.php?option=com_content&view=article&id=2399
- [10] Türkiye Yeterlilikler Çerçevesine Dair Tebliğ Eki (Tebliğ No:2015/1)
- [11] <https://www.myk.gov.tr/index.php/en/kurumsal/tarihce>
- [12] “Türkiye’de Meslekî ve Teknik Eğitimin Görünümü”, Eğitim Analiz ve Değerlendirme Raporları Serisi No:2 Kasım 2018

ÇOK-ROTORLU RÜZGAR TÜRBİN SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ

B. Kıvanç Deneçli¹, Mutlu Boztepe²

¹Türkerler Holding, ²Ege Ü. Müh. Fak. Elk.-Elo. Müh. Blm.

¹bkivanc.denecli@turkerler.com, ²mutlu.boztepe@ege.edu.tr

ÖZET

Rüzgar enerjisi sektörünün gelişimine bakıldığında rüzgar türbinlerinin anma güçlerinin sürekli arttığı gözlenmektedir. 5 yıl öncesine kadar 1 MW kurulu güce sahip rüzgar türbinleri yerini bugün 3-7 MW'lık türbinlere bırakmıştır. Yakın gelecekte 10 MW ve üstü güçlerde rüzgar türbinlerinin olması beklenmektedir. Rüzgâr türbininde elde edilen güç türbin kanatlarının taradığı alanla doğru orantılıdır. Bu da talep edilen güçlere erişebilmek için rotor kanatlarının da aynı oranda artması anlamına gelmektedir. Bu durum türbinlerde gürültü, ürün maliyeti, servis maliyeti gibi sorunları ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle tek rotorlu sistemlerde kanat uzunluğu arttırılamadığından ar-ge çalışmaları daha az kanat uzunlukları ile daha yüksek enerji elde edebilecek yenilikçi rüzgâr türbinleri arayışına yönelmektedir. Bu amaçla çok rotorlu rüzgar türbinleri üzerindeki çalışmalar artmıştır. Bu bildiride çok-rotorlu rüzgâr türbinlerinin elektro-mekanik sistemleri incelenmekte ve tarihten günümüze çok rotorlu rüzgar türbinlerinin gelişimi, bu konudaki gelişmeler ve son teknoloji ürünler hakkında bilgiler verilmektedir.

1. GİRİŞ

Dünya enerji tüketimini karşılamakta yenilenebilir enerjilerin payı her geçen gün artmaktadır. Yenilenebilir enerji çeşitlerinden rüzgâra dayalı enerji üretimi ise yeni teknolojiler ile desteklenerek artan verimliliği, ihtiyaç duyduğu yatay alan azlığı ve nispeten düşük maliyetleri ile artarak yaygınlaşmaya devam etmektedir. Ne var ki dünyanın duyduğu enerji ihtiyacına paralel olarak daha yüksek anma gücüne sahip rüzgâr türbinlerine olan talep devam etmektedir. 5 yıl öncesine kadar 1 MW kurulu güce sahip rüzgar türbinleri yerini artık 3-7 MW'lık türbinlere bırakmıştır. Ar-ge çalışmaları ve talepler gösteriyor ki 20MW'lık rüzgar türbin üretimleri önümüzdeki yıllarda kaçınılmaz tercih olacaktır.[1]

Rüzgâr türbininde elde edilen güç türbin kanatlarının taradığı alanla doğru orantılıdır. Bu da talep edilen güçlere erişebilmek için rotor kanatlarının da aynı oranda artması anlamına gelmektedir. Rotorun taradığı alanın artması, yani rotor kanatlarının uzunluklarının artması gürültü, ürün maliyeti, servis maliyeti gibi sorunları ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle tek rotorlu sistem ile kanat uzunluğunu arttırmak yerine, daha kısa kanat uzunlukları ile birden fazla rotoru sahip ve yüksek enerji üretebilen yenilikçi rüzgâr türbinlerine yönelik arge çalışmaları başlamıştır [2]. Günümüzde yeni teknolojilerle bu konu Vestas firması tarafından kullanılmaya başlanmış ve 2018 yılında 4 rotorlu bir türbin (4RV29) tasarlayarak ölçme ve deneme çalışmalarına başlanmıştır. Vestas'ın yapmış olduğu simülasyon ve saha ölçümlerinde tekli rotora sahip türbine göre 4RV29 modelinin daha fazla güç ürettiği ve bu farkın nedeni ise en çok; kanat uzunluğu daha az olan 4RV29 modelinin daha az rüzgar kesme işlemi yaptığı için yarattığı türbülansın daha az olması sonucuna varılmıştır [2].

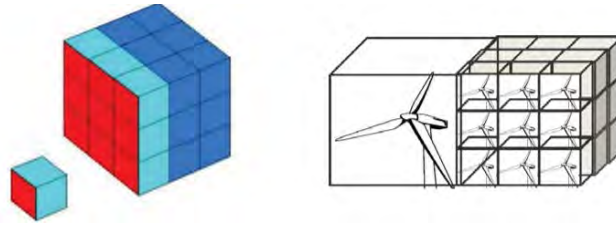
Bu bildiride çok-rotorlu rüzgâr türbinlerinin elektro-mekanik sistemleri incelenecektir. Tarihten günümüze çok rotorlu rüzgar türbinlerinin gelişimi, bu konudaki gelişmeler ve son teknoloji ürünleri incelenecektir.

2. ÇOK-ROTORLU RÜZGAR TÜRBİNLERİ

Göltenbott, yaptığı bir çalışmada [3] Şekil 1’de görülen türbin ölçeklendirilmesi modelini kullanarak tek-rotorlu ve çok-rotorlu türbinlerin toplam kütleleri arasındaki ilişkiyi şu şekilde ifade etmiştir;

$$m = \frac{1}{\sqrt{n}}M \quad (1)$$

Burada küçük rotorun kütlesi “m”, büyük rotorun kütlesi M ve küçük rotorların sayısı “n” olmaktadır. Görüleceği üzere rotor sayısı arttıkça kütle azalmaktadır. Dolayısı ile maliyet de düşmektedir. [3]



Şekil-1 [3]

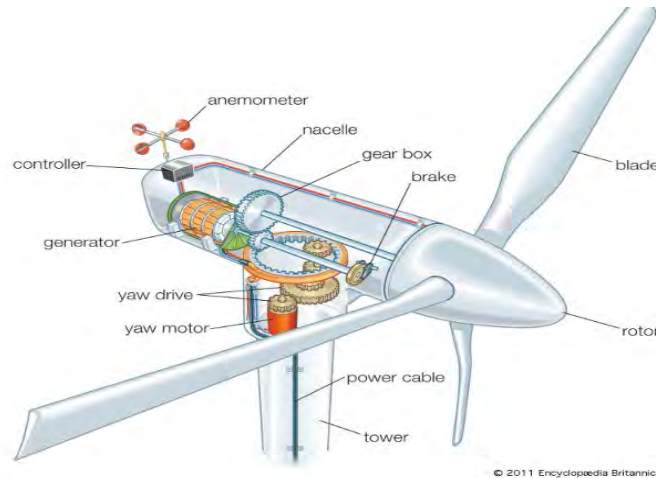
Çok-rotorlu sistemin sağladığı diğer avantajlar maddeler halinde şu şekilde özetlenebilir:

Pitch Sistemi:

Geleneksel 3 kanatlı rüzgâr türbinlerinde bulunan pitch sistemi çok-rotorlu rüzgâr türbinlerinde olmayacaktır. Pitch sistemi, pitch motor ve rüzgârın şiddetine göre dönme hızını ve torku ayarlayabilme yeteneğine sahip kontrol sistemini içerir. Pitch sistemi Şekil-2’te görülen klasik 3 kanatlı rüzgâr türbinlerinin en fazla arıza kaynaklı duruş nedenlerinden biridir.

Dişli Kutusu:

Klasik 3 kanatlı rüzgâr türbinlerinde en sık karşılaşılan bir başka arıza nedenli duruş sebebi de dişli kutusudur. Dişli kutusu rotorun dönme hızını, jeneratör dönme hızı talebine göre ayarlar. Dişli kutusunda kullanılan yağın işlevini sorunsuz yerine getirebilmesi için yağ pompalama sistemi kullanılmaktadır. Çok-rotorlu sistemlerde dişli kutusu olmayacağı için bu sorunlar ortadan kalkmaktadır.



Şekil-2 [7]

Yaw sistemi:

Klasik 3-kanatlı rüzgâr türbinlerinde türbinin yönünü rüzgâra doğru çeviren yaw sistemi kullanılmaktadır. Bu sistemde rüzgâr türbininin büyüklüğü ve dolayısı ile ağırlığı arttıkça kullanılan motor sayısı da artmaktadır. Yaw sistemi de ayrıca kontrol sistemine ihtiyaç duyar. Sistem büyüdükçe kontrol sistemi de karmaşıklaşacaktır.

Literatürde çok değişik modeller üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Şekil-3'ten görüleceği üzere yapılan çalışmalarda tasarımlar benzerlik göstermektedir. Şekil-3(h) NASA tarafından modellenen 7 rotorlu modellemedir[1].



a. Hermann Honnef's Wind Turbine



b. Three rotor Array Wind Turbine



c. Four rotor Array Wind Turbine



d. Three rotor Array Wind Turbine



e. Windship multi-rotor Wind Turbine



f. Four Rotor Array Wind Turbine



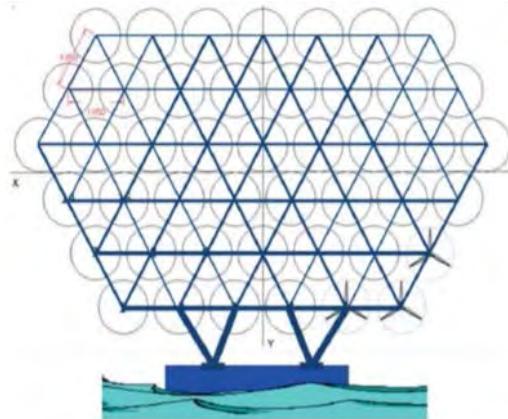
g. Octopus Wind Tech. 250MW Wind Turbine



h. Seven Rotor Array Wind Turbine

Şekil-3 [1]

Bir başka çalışma ise Şekil 4'te görüleceği üzere Avrupa Birliği tarafından finanse edilen InnWind projesi kapsamında her biri 41 metre çapında olan 444kW'lık 45 rotorun bir araya gelerek oluşturduğu toplam 20MW'lık kurulu güce sahip olan çok rotorlu türbindir. Bu çalışmada net ağırlık kazancı %16 olurken maliyet kazancı ise %15 olmuştur. [3].



Şekil-4 [3]

Kyushu Üniversitesinden Uli Göltzenbott'un Prof. Yuji Ohya danışmanlığında yaptığı deneysel çalışmada, rüzgâr tüneli oluşturup, diffüzer arttırılmış rüzgâr türbinleri (DAWT) kullanarak bazı sonuçlar elde etmiştir. Bu çalışma sonucunda çoklu rotor sistemde (MRS), DAWT kullanmanın güç çıktısında çok büyük bir potansiyeli olacağını bunun yanı sıra maliyetleri de azaltacağını savunmuştur. Bu çalışma kapsamında Aralık 2014'te 1kW lık 3 adet toplamda 3 kW kurulu güce sahip Şekil-5-(a) daki sistem Japonya'da Kyushu Üniversitesi Chikushi Kampüsüne, Şekil-5(b)'deki 10kW'luk sistem ise yine aynı kampüse kurulmuştur ve deneysel çalışmalar sürmektedir. Ayrıca patent çalışmaları da devam etmektedir. [3].



(a) 3kW



(b) 10kW

Şekil-5 [3]

3-TEK ROTOR VE ÇOKLU-ROTOR KARŞILAŞTIRMA ANALİZLERİ:

3.1 N.S. Sandhu ve S. Chanana çalışması:

N.S. Sandhu ve S. Chanana, tek-rotorlu sistem olarak Nordex-N117-3000kW modeli ve çok-rotorlu sistem olarak 3 adet Leitwind LTW77-1000 kW'luk modeli türbinleri baz alarak simülasyon ile karşılaştırma yapmışlardır. Bu karşılaştırmaların sonucu Tablo-1'deki üretim verilerini elde etmişlerdir. Ayrıca aynı çalışmada maliyet analizi de yapılmış olup; tek-rotorlu sistemin maliyeti 2.358.306 Euro, çok-rotorlu sistemin maliyeti ise 1.968.318 Euro olarak tahmin edilmiştir [4].

RÜZGAR HIZI	ÜRETİM DEĞERLERİ [MWh]	
	TEK ROTOR	ÇOKLU- ROTOR
8	13,52	14,37
12	18,28	19,16

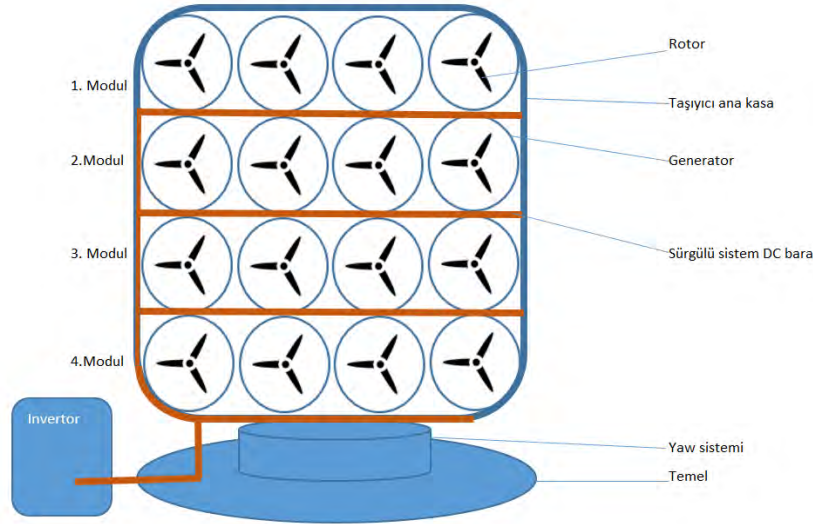
Tablo-1 Tek-rotorlu ve çok rotorlu sistemin üretim simülasyon sonuçları [4]

3.2 Vetas 4R-V29 simülasyon ve ölçüm sonuçları:

4R-V29 rüzgâr türbinini Danimarka Teknik Üniversitesi kampüsüne kuran Vestas firması saha ölçümlerini sunan bir rapor paylaşmıştır. Türbin üst iki rotorunun yerden yüksekliği 59,50 m ve alt iki rotorunun yerden yüksekliği ise 29.04 metredir. Rotor çapları ise 29 metredir. Yapılan simülasyon ve ölçümlerde tek rotorlu sisteme göre çok rotorlu sistemin %1,5 oranında performansının daha yüksek olduğu ve bu farka en çok alttaki 2 rotorun etki ettiği tespit edilmiştir[3].

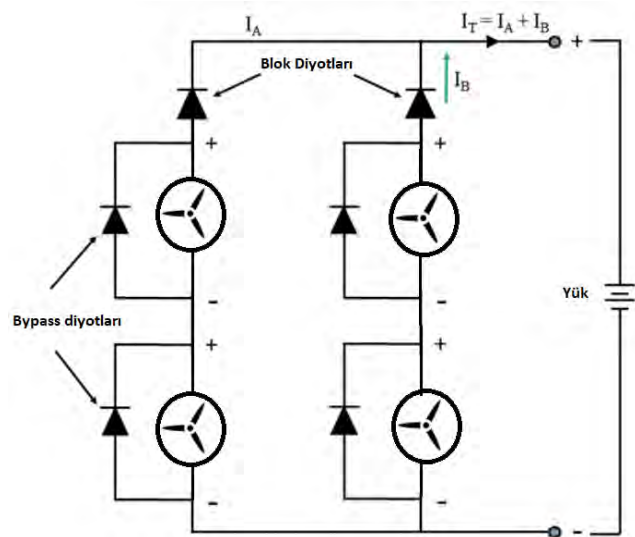
3.3 Ege Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde yürütülecek çalışma:

Şekil 6’da 4x4 yapıya sahip 16 rotorlu bir rüzgar türbini görülmektedir. Bu modelleme çalışmaları tamamlandıktan sonra modelin doğruluğunu görmek için küçük güçlü bir çok-rotorlu türbin prototipi imal edilecek ve deneysel ölçümler ile model sonuçları karşılaştırılacaktır.



Şekil-6

Prototip devrede türbinlerin 12/24V gibi düşük bir DC gerilim üretmesi beklenmektedir. Bu dc gerilimler Şekil 7’de görüldüğü gibi seri/paralel bağlantı ile daha yüksek akım/gerilim değerlerine yükseltilecektir [5]. Burada her bir modülün ürettiği akım/gerilim uyumlu olmaması durumunda bir DA-DA dönüştürücü kullanılarak akım/gerilim değerlerinin birleştirilmesi de mümkün olabilir. Örneğin bir modülün arızalı olması veya bakım nedeniyle enerji üretmemesi durumunda diğer modüllerin enerji üretmeye devam edebilmesi için –güneş panellerinde olduğu gibi- yangeçit (bypass) diyotları kullanılmıştır [5]. Benzer şekilde paralel bağlı kollar arasında akım sirkülasyonunu önlemek için tıkama (blocking) diyotları kullanılabilir. Yapılacak çalışmalarla hangi sistem topolojinin uygun olduğuna karar verilerek prototip devrede kullanılması sağlanacaktır.



Şekil-7

Prototip sistemde yük olarak akü kullanılması düşünülmektedir. Aküde depolanacak olan enerji uygun bir rezistif yük kullanılarak harcanacaktır. Burada akü kullanımının nedeni yük ile rüzgar jeneratörünün analizlerini birbirinden bağımsız yapabilmektir.

Çok-rotorlu rüzgar türbininden maksimum verimi alabilmek için her bir modülün maksimum verimde çalışmasının sağlanması gereklidir. Yapılacak analiz ve deneysel çalışmalarda modüllerden oluşan toplam türbin sistemi veriminin maksimize edilmesi için neler yapılması gerektiği analiz edilecektir. Eğer gerekirse modüller tek tek veya gruplar halinde bir DA-DA dönüştürücü üzerinden aküye bağlanabileceklerdir. Burada uygun topolojinin belirlenmesi çalışmanın hedeflerinden bir tanesidir. Sistemde modüllerin devre dışı edilmesi, bakıma alınması gibi durumlarda diğer modüllerin enerji üretmesi mümkün olacak şekilde tasarım yapılacaktır.

4. SONUÇ

20 MW geleneksel 3 kanatlı rüzgar türbinin gereksinimleri, 5 MW'lık bir referans bir rüzgar türbininden hareketle elde edilmiş ve Tablo-2 de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi kule ve rotor ağırlığı gerçekleştirilebilir sınırların üzerine çıkmaktadır. Diğer yandan 120 metrelik kanatların günümüz teknolojisi ile tek parça olarak üretilmesi mümkün değildir. Kanat kalınlığı 30 cm olması da bazı termal sorunları doğuracaktır. [6]. Ayrıca 120 metrelik bir kanada sahip bir rüzgar türbininin lojistik sorunları yanı sıra servis ve bakım maliyetleri de artacağı şüphesizdir.

		Reference wind turbine 5MW	Extrapolated turbine 10MW	Extrapolated virtual turbine 20 MW
Rating	MW	5	10	20
Wind Regime		IEC class 1B	IEC class 1B	IEC class 1B
No of blades		3	3	3
Rotor orientation		Upwind	Upwind	Upwind
Control		Variable speed, control pitch	Variable speed, control pitch	Variable speed, control pitch
Rotor diameter	M	126	178	252
Hub height	M	90	116	153
Max rotor speed	Rpm	12	9	6
Rotor mass	Tones	122	305	770
Tower top mass	Tones	320	760	880
Tower mass	Tones	347	983	2780
Theoretical electricity production	GWh	369	774	1626

Tablo-2 [6]

Kanat uzunluklarının azalmasına karşılık gücün artırılması önem taşımaktadır. Çoklu rotor sistemlerinde -güneş panellerinin bir araya gelerek dizi oluşturulması gibi- türbin ekle-çıkark şeklinde tasarımı ile yatırımcı ve üreticiye pratik çözümler sunması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Sandip, A. and Sapali, S.**, 2012, *Inovative multi rotor wind turbine designs*, Researchgate mechanical engineering department college of engineering Pune, India,
- [2] **Laan, M. et al**, 2019 *Power curve and wake analyses of the Vestas multi-rotor demonstrator*, Wind Energ. Sci. Discuss., Danimarka
- [3] **Göltenbott, U.**, 2017 , *Aerodynamics of Multi-Rotor Wind Turbine Systems using Diffuser-Augmentation*, Department of Aeronautics and Astronautics Graduate School of Engineering Kyushu University, 167,
- [4] **N.S.Sandhu, S.Chanana**, 2018, *Comparative Analysis of Conventional and Multi-Rotor Wind Turbines*, International Journal of circuits, systems and signal processing, Volume 12, Hindistan
- [5] **Fandrem, K.**, 2012, *Series connection of offshore DC wind turbines* , Norwegian University of Science and Technology, 14, Norveç
- [6] **European Wind Energy Association**, 2011. *Upwind Design Limits And Solution for Very Large Wind Turbines: A 20 MW Turbine Is Feasible*,
- [7] **Encyclopedia Britannica, Inc**, 2011. *Components of a wind turbine*

DENİZÜSTÜ RÜZGAR ELEKTRİK SANTRAL (DRES) PROJELERİ İÇİN RÜZGAR ÖLÇÜMLERİ

Dr Murat Durak

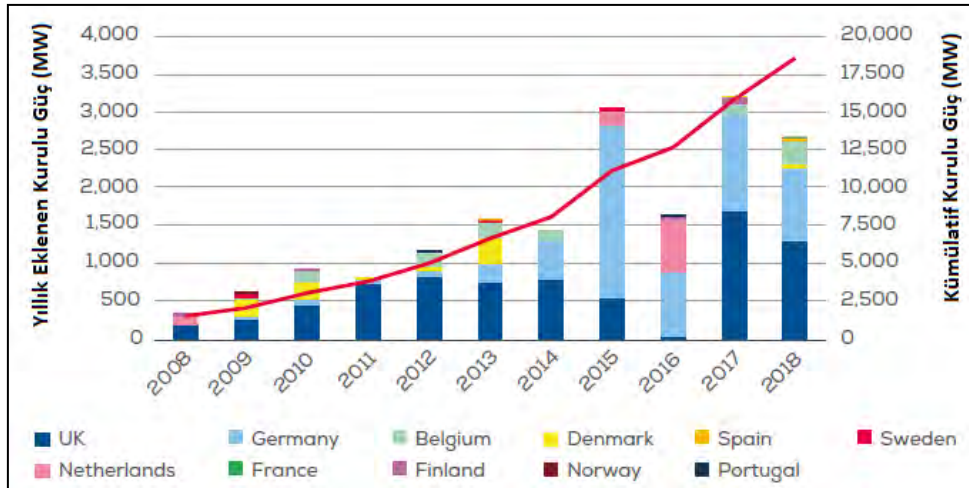
Meteoroloji Mühendisi
md@enermet.com.tr

ÖZET

Dünyada denizüstü (offshore) rüzgar elektrik santralleri yapılmaktadır. Ülkemizde de son yıllarda konu ile ilgili olarak kamusal çalışmalar başlamıştır. Ülkemizde karaüstü rüzgar ölçümleri yapılmakta olup denizüstü rüzgar ölçümleri henüz bulunmamaktadır. Denizüstü rüzgar ölçümleri, genellikle 150 metre yüksekliğe kadar yapılabilmektedir. Denizüstü RT'lerin boylarının karaüstünde kullanılanlara oranla daha uzun olması sebebi ile bu yüksekliklere çıkılabilmektedir. Denizüstü rüzgar ölçümleri karaüstü rüzgar ölçümlerinden bazı farklılıklar göstermektedir. Bu çalışmada denizüstü RES kurulum amaçlı rüzgar ölçümleri detaylı olarak anlatılacaktır.

1. GİRİŞ

1980'lerde yaşanan büyük endüstriyel ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak özellikle Almanya ve Danimarka gibi ülkelerin öncülüğünde rüzgar türbinleri gün geçtikçe gelişerek günümüze gelmiştir [1]. Denizüstü rüzgar elektrik santralleri (DRES) 1991'de, Danimarka Vindeby'de, Bonus marka 11 adet 450 kW'lık türbinler ile kurulan, 4.95 MW gücündeki proje ile başlamıştır. 2018 yılı sonu itibarı ile ise, 11 Avrupa ülkesinde 18499 MW kurulu güce ulaşmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Avrupa ülkeleri DRES kurulu gücü [2].

Avrupa ülkeleri içerisinde İngiltere ve Almanya DRES konusunda başı çeken ülkeler olarak öne çıkmaktadır. Tablo 1 ile de ülkelere göre DRES projelerinin detayları verilmiştir.

Tablo 1. Avrupa ülkeleri DRES durumu.

Ülke	DRES Sayısı	Toplam Kurulu Güç (MW)	DRT Sayısı
İngiltere	39	8183	1975
Almanya	25	6380	1305
Danimarka	14	1329	514
Belçika	7	1186	274
Hollanda	6	1118	365
İsveç	4	192	79
Finlandiya	3	71	19
İrlanda	1	25	7
İspanya	2	10	2
Fransa	2	2	2
Norveç	1	2	1
Toplam	105	18499	4543

2. DRES Proje Sahası Bulunması

Denizüstü RES'ler son 10 yılda özellikle Avrupa ülkelerinde yapılmıştır. Kara (onshore) RES ile denizüstü (offshore) DRES arasındaki en önemli farkları anlamak gerekmektedir. Bu farklar:

- Denizüstünde daha kararlı ve yüksek rüzgar hızlarının bulunması sebebiyle daha fazla enerji üretimi,
- Denizüstü RES'lerde montaj ve inşaat işlerinin daha yüksek meblağlara yapılması,
- Ulaşım nedeni ile bakım masraflarının daha yüksek olması,
- Denizüstü RES projelerinde finansman olanaklarının zorluğu,
- Denizüstü RES'lerin işletmesinin karaüstü RES'lerden daha zor olması sayılabilir.

Herhangi bir yerde denizüstü RES yapılabilmesi için bazı hususlar dikkate alınmalıdır. Özellikle kıyıdan uzaklık ve deniz derinliği DRES fizibilitesi açısından bakılan en önemli hususları oluşturmaktadır. Diğer önemli hususlar ise aşağıda görülmektedir [3]:

- Rüzgar potansiyeli,
- Bölgenin oşinografik yapısı,
- Doğal koruma,
- Elektrik iletimi ve karadaki enterkonnekte sisteme bağlantı koşulları,
- Denizüstü ve altı doğal koruma alanları ve canlılar
- Balıkçılık ve deniz trafiği,
- Boru hatları ve kablolar,
- Askeri kullanım,
- Ülkemize özel kıta sahanlığı hususu.

Yukarıda sayılan hususlardan dolayı DRES saha bulunması karaüstü RES projeleri gibi değildir ve devletin müdahil olacağı bir süreç işlemektedir. DRES rüzgar ölçümlerinin maliyeti çok yüksektir. Ülkemizde DRES projesi henüz uygulanmamıştır. Bu yüzden denizüstü herhangi bir ölçüm de bulunmamaktadır. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün Denizcilik Meteorolojisi birimi, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts verilerini kullanarak matematiksel modelleme ile denizüstünde tahminler yapmaktadır. Ancak bu modelleme ile DRES projesi için gereken hassasiyette tahmin yapılması mümkün değildir. Bu nedenle, santral kurulacak alanın özelliğine istinaden, bir denizüstü ölçüm istasyonu kurulması gerekmektedir. Denizüstü meteorolojik ölçüm istasyonu, DRES için gerekli olan rüzgâr hızı, rüzgâr yönü, yoğunluk, basınç, sıcaklık gibi ana bileşenlerin yanında denizaltı ekolojisi, oşinografi gibi bilimsel çalışmalara veri toplamak için çok önemlidir.

3. Denizüstü Meteoroloji Ölçüm Sensörleri

Denizüstünde rüzgâr hızları karaya göre çok daha kuvvetli olduğundan ve dalga, denizaltı su akıntıları gibi nedenlerle rüzgâr ölçüm sistemlerindeki yorulma (fatigue) karasal ölçüm sistemlerine göre çok fazladır. Denizüstünde kullanılan meteorolojik sensörler, karaüstünde kullanılanlardan bazı farklılıklar gösterir [4]. Bu farklılıklar aşağıda belirtilmiştir:

- Isıtmalı sensör kullanımı
- Sonik sensörler kullanımı
- Korozyona, nem ve deniz tuzuna karşı daha dayanıklı

sensörler olması gerekmektedir. Bu amaçla World Meteorological Organization sınıflandırmasına göre Secondary Standard meteorolojik sensörler kullanılmaktadır.

4. Denizüstü Rüzgâr Ölçümü

Denizüstü rüzgâr ölçümleri, genellikle 100-150 metre yüksekliğe kadar yapılabilir. Denizüstü RT'lerin boylarının karaüstünde kullanılanlara oranla daha uzun olması sebebi ile bu yüksekliklere çıkılabilmektedir. Konu ile ilgili en güzel çalışma 2003 yılında Kuzey Denizi ve Baltık Denizinde yapılan FINO (Forschungsplattformen in Nord- und Ostsee) denizüstü meteorolojik ölçümleri örnek verilecektir. 3 adet (FINO1, FINO2 ve FINO3) denizüstü ölçümleri yapılmıştır. Aşağıdaki tabloda bu ölçüm sistemlerine ait genel bilgiler görülmektedir. Bu projelerin amacı sadece denizüstü rüzgâr ölçümleri değil; aynı zamanda da denizüstü ekosisteminin öğrenilmesidir. Bunlara ek olarak civar biyolojik yapısı da incelenmiştir.

Tablo 2. FINO denizüstü ölçüm sistemleri genel özellikler.

Sistem Adı	Montaj Yılı	Direk Geometrisi	Yükseklik (m)	Deniz Derinliği (m)	Kıyıya Uzaklık (km)	Platform Boyutu
FINO 1 Kuzey Denizi	2003	Kare	101	28	45	16 x 16 m
FINO 2 Baltık Denizi	2007	Kare	101	24	31	12 x 12 m
FINO 3 Kuzey Denizi	2009	Üçgen	120	23	80	13 x 13 m

Aşağıdaki Şekilde üç denizüstü meteorolojik istasyonun konumu görülmektedir.

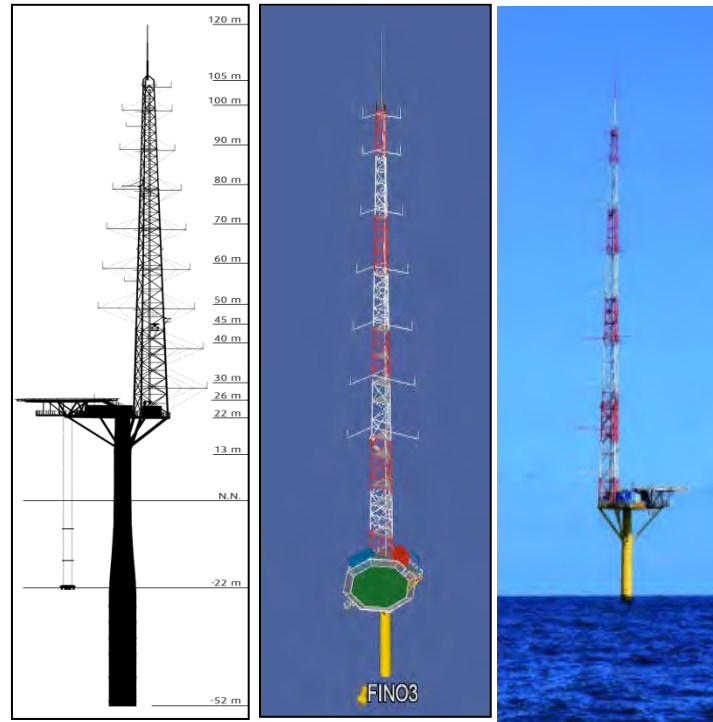


Şekil 2. FINO denizüstü meteorolojik sistemleri.

Bunlar arasında FINO 3 denizüstü meteorolojik sistemi anlatılacaktır.

4.1. FINO 3 Denizüstü Meteoroloji Ölçüm Sistemi

Almanya'nın Schleswig-Holstein eyaletinde FuE-Zentrum FH Kiel GmbH tarafından 2005 yılı sonunda başlatılan "Competence Center Offshore Wind Energy Utilization - North Sea Development Platform for Technology and Nature Conservation (FINO3-NEPTUN)" projesi kapsamında FINO 3 Denizüstü Meteoroloji Ölçüm Sistemi çalışmalarına başlanmıştır. Bu çalışma, Schleswig-Holstein Ekonomi Bakanlığı, Avrupa Birliği, European Fund for Regional Development (ERDF) ve Almanya Çevre Bakanlığı tarafından fonlanarak bitirilmiştir. 2006 yılında planlama başlanarak 2008 Mart ayında inşaat başlanmıştır ve Ağustos 2009 tarihinde de işletmeye alınmıştır [5]. FINO 3 projesi denizüstü ölçümlerin yanında; bilimsel çalışmalarda kullanılmak üzere de ciddi veri toplamaktadır.



Şekil 3. FINO 3 denizüstü meteoroloji ölçüm istasyonu.

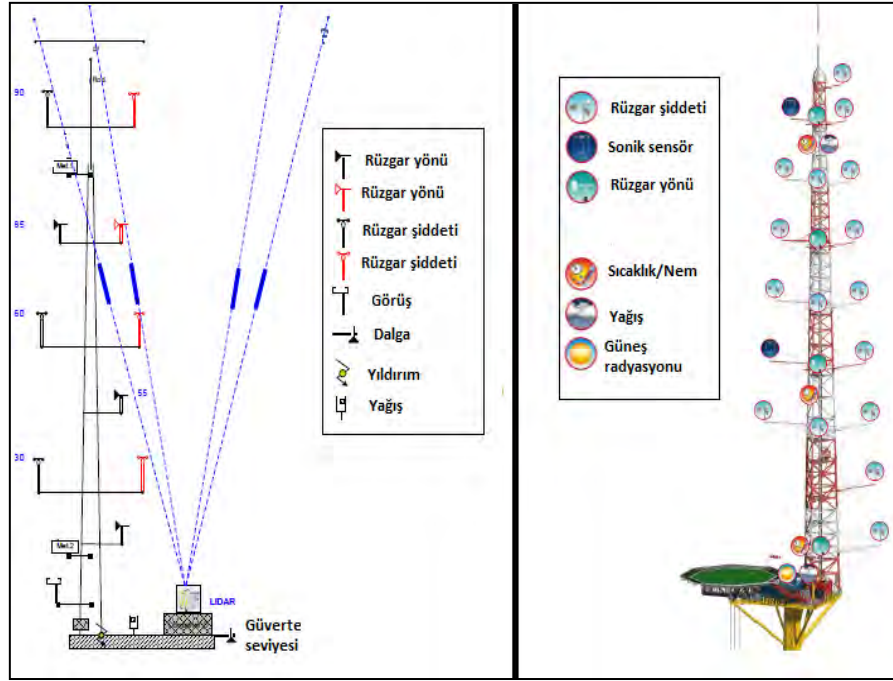
FINO3, kuzey denizinde ve kıyından 80 km uzaklıkta montajı yapılmıştır. Sistemin güverte yüksekliği 22 metre olup, ölçüm sistemi 105 m dir. Ölçüm sisteminin toplam uzunluğu ise 172 m dir. Yan kol uzunlukları 3.1 – 8.8 m arasında değişmektedir güç tedarigi 3 adet jeneratör ile sağlanmakta olup haberleşme uydu yoluyla yapılmaktadır. Helikopter alanı 5.3 ton olup; sistemin toplam ağırlığı 600 tondur. Bütün malzeme birbirine kaynak ile bağlanmıştır. Deniz seviyesinin üzerindeki platform, deniz dalga ve akıntılarından etkilenmeyecek şekilde tasarlanmıştır. Platformun üzerinde 3 adet konteyner bulunmaktadır. Birinci konteyner dinlenme, ikinci konteyner acil durum barınağını, üçüncü konteyner dizel jeneratör setini ve dördüncü konteyner de, akü teçhizatlarını taşımaktadır.

4.2 Ölçümü Yapılan Parametreler

FINO 3 projesi kapsamında aşağıdaki ölçümler yapılmaktadır:

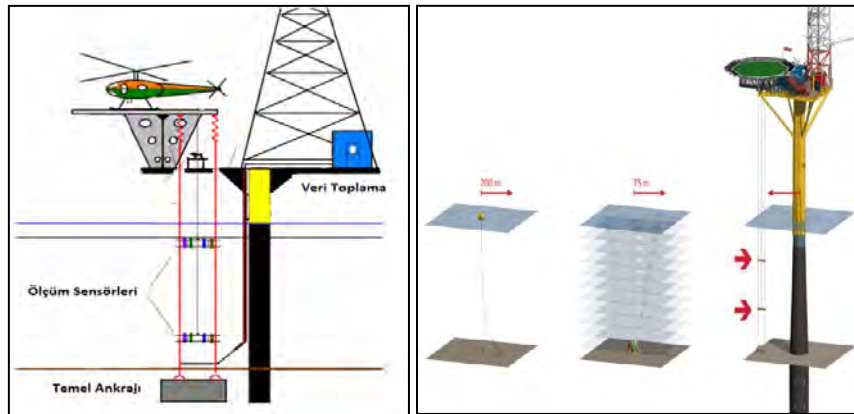
- Rüzgar ve meteorolojik değişken ölçümleri,
- Hidrografik (oşinografik) ölmümler,
- Deniz ekosistem değişken ölçümleri.

Deniz ekosistemi (maritime environment) ölçümleri ise, deniz seviyesi, akıntılar, dalgalar, gel git gibi parametreleri içermektedir. Buradaki ana amaç, yük ve stabilite ile ilgili verileri toplamaktır. Yapı üzerine etkiyen bu yüklerin nedeni de akıntı ve dalga oluşumlarıdır. Bu amaçla deniz suyu sıcaklığı, tuzluluk ve oksijen değişimi sürekli ölçülmektedir. Rüzgar şiddeti ölçümleri, 30. metreden başlayarak, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 ve 110 metreler olmak üzere 9 farklı seviyede yapılmaktadır; 40 ve 100 m de ultrasonik anemometreler de bulunmaktadır. Yön ölçümleri de 30 m den başlayarak 50, 70 ve 100. metreler olmak üzere toplam 4 farklı yükseklikten alınmaktadır. Bunların yanında, sıcaklık, nem ve basınç 30, 50 ve 100 m; yağış ölçümü 30 m ve global radyasyon ölçümü de 30 m de yapılmaktadır.



Şekil 4. FINO 3 Denizüstü meteoroloji ölçüm sistemi sensörler.

Denizüstü rüzgar ölçümü, karaüstü rüzgar ölçümünden daha detaylı ve pahalıdır. Karaüstü rüzgar ölçüm istasyonunda sadece meteorolojik parametreler ölçülmekte iken; denizüstünde bazı yapısal, deniz ve ekolojik ölçümler de eklenmektedir. Oşinografik ölçümler kapsamında dalga yüksekliği, denizdeki oksijen miktarı, deniz suyu sıcaklığı, basınç ve iletkenlik değerleri de ölçülmektedir. Şekil ile verilen sistem ile denizüstü meteoroloji istasyonundan 200 m civarına ve 13 farklı tabakada ölçümler yapılmaktadır.



Şekil 5. FINO 3 oşinografik ölçümler.

Ölçüm sisteminin inşaatı yaklaşık 1.5 yıl sürmüştür. 10 yıldır ölçümler alınmakta olup 2002 yılında ölçümlerin sonlandırılması planlanmaktadır. FINO 3 inşaat aşamalarına ait fotoğraflar aşağıda verilmiştir.



Şekil 6. FINO 3 inşaatına ait fotolar.

5. FINO 3 Ölçüm Sonuçları

Aşağıdaki Tablo ile FINO 3 denizüstü ölçüm sistemine ait özet bilgiler görülmektedir. 40 m de 9.2 m/s; 106 m de ise 9.6 m/s rüzgar hızı ölçülmüştür.

Tablo 3. FINO 3 ölçüm özet sonuçlar.

Değişken Adı	Değeri
Rüzgar hızı (40 m)	9.2
Rüzgar hızı (106 m)	9.6
Hakim Rüzgar Yönü	352 (Kuzey)
Sıcaklık	5.8
Basınç	1023 hPa

6. SONUÇ

Avrupa, karasal bölgelerin büyük bölümüne RES'ler kurulmuş olduğundan dolayı denizüstü alanlara yönelmiştir. Önümüzdeki yıllarda kurulum maliyeti yüksek olan DRES projelerinin ülkemizde de tekrar gündeme gelmesi beklenmektedir. Her ne kadar denizüstü ve karaüstü RES aralarındaki 2-3 katı yatırım maliyeti farkı olsa da; önümüzdeki yıllarda maliyetin düşeceği öngörülmektedir. Üç tarafı denilerle çevrili ülkemizde DRES projeleri gelecekte yapılacaktır. ETKB'nin yapacağı ihale öncesinde belirlediği sahalarda öncelikle meteorolojik ölçümlere başlanmalıdır. Bu ölçümlerle hem yatırım için hem de bilimsel amaçlı projeler için oldukça önemli veri toplanacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Durak, M. ve Özer, S.,** (2008). Rüzgar Enerjisi: Teori ve Uygulama, Ankara.
- [2] **Offshore Wind in Europe.** (2019). Key Trends and Statistics. Wind Europe, Brussels.
- [3] **Köroğlu, M.Ö., Ülgen, K.,** (2018).Denizüstü Rüzgar Enerji Santralleri: Çanakkale Örneği. Güç Sistemleri Konferansı, 15-16 Kasım, Ankara.
- [4] **Guide to Marine Meteorological Services,** (2001). World Meteorology Organization, 3rd Edition. Geneva.
- [5] **Stein, D.,** 2012. Offshore Wind Measurements, GL Garrad Hassan, Gdansk.
- [6] **Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı,** 2018. Rüzgar Enerjisine Dayalı Denizüstü Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları ve Bağlantı Kapasitelerinin Tahsisine İlişkin Yarışma İlanı, 21 Haziran 2018 Tarihli Resmi Gazete.

TEKİL KAZIK TEMELLİ AÇIK DENİZ RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN AVRUPA'DAKİ GELİŞİMİ

Baran Kaya¹, Elif Oğuz^{2,*}

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Laboratuvarı

*ODTÜ, RÜZGEM, Rüzgar Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi

¹baran.kaya@metu.edu.tr, ²elifoguz@metu.edu.tr

ÖZET

Artan sera gazı salınımlarının doğayı tehdit etmesi, yakıt fiyatlarındaki ekonomik dalgalanmalar, rüzgar gibi yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi arttırmıştır. Buna ek olarak, karada kurulu rüzgar türbinlerinde rastlanan olumsuzluklar, açık denizlerde rüzgar enerjisi santrali kuruluma uygun geniş alanların varlığı ve karaya kıyasla daha yüksek rüzgar enerjisi potansiyeli, sektörün açık denizlere yönelmesine neden olmuştur. Avrupa, açık deniz rüzgar enerjisinde mihenk taşı sayılabilecek yeniliklere öncülük etmiştir ve kurulu açık deniz rüzgar santrallerinin büyük çoğunluğu Avrupa'da bulunmaktadır. Tekil temeller; uygulama kolaylığı, üretim maliyetinin nispeten düşük oluşu, açık denizdeki petrol ve gaz santrallerinde birçok başarılı uygulamasının olması gibi etkenler nedeniyle açık deniz rüzgar enerjisinde kullanılan çeşitli temeller arasında %65 gibi önemli bir oranla dünyanın en çok tercih edilen temel türüdür. Bu çalışmada Türkiye gibi açık deniz rüzgar enerjisi sektörüne yeni girecek ülkelere kapsamlı bir bakış açısı kazandırmak ve bu konudaki teknik gerekliliklerin önemini vurgulamak amacıyla 1990-2019 yılları arasında Avrupa'da kurulan tekil kazık temelli açık deniz rüzgar santrallerindeki çevresel etkenler analiz edilmiş, temelde kullanılan teknolojik yenilikler ve gelişmeler değerlendirilmiştir.

1. GİRİŞ

Fosil yakıtlardan enerji üretmek, doğal dengeyi tehdit eden karbondioksit gibi gazların salınımlarında artışa neden olmaktadır [1]. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne ilişkin uluslararası bir anlaşma olan, 11 Aralık 1997'de, Japonya'da kabul edilen ve 16 Şubat 2005'te yürürlüğe giren Kyoto Protokolü, esas olarak bu zararlı gazların salınımlarının azaltılmasını amaçlamaktadır. Atmosferde bulunan zararlı gazların nedeni büyük ölçüde gelişmiş ülkelerde kurulu sanayi olduğundan, protokolün amaçlarını yerine getirmek, büyük ölçüde "ortak ancak farklılaştırılmış" ilkesi altında bu ülkelerin sorumluluğudur [2]. Bu sebeple, Birleşmiş Milletler, bu gazların salınımlarını azaltmayı ve küresel ısınmayla mücadeleyi amaçlayan Kyoto Protokolü'nü kabul etmiştir. AB, enerji ihtiyacının bir kısmını bu protokole uygun olarak yenilenebilir kaynaklarından üretmeyi planlamıştır. Yenilenebilir enerji; karbon salınımlarını azaltmak, enerji güvenliğini artırmak ve -birçok Avrupa ülkesi tarafından çok önemli konular olarak kabul edilen- iklim değişikliği ile mücadele gibi zorluklarla baş etmek için hayati önem taşımaktadır [1].

BM'nin bir parçası olan BM İklim Değişikliği Sekreterliği, insanlığın varlığını ve geleceğini tehdit eden konularda aktif olan BMİDÇS-Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nin (UNFCCC-UN Framework Convention on Climate Change) kabul edilmesiyle beraber 1992 yılında kurulmuştur [3]. Sekreteryanın kurulmasından sonra topluluk, bugüne kadar amacına ulaşmak için birçok adım atmıştır. Kyoto Protokolü'ne rağmen, atmosferdeki sera gazı içeriği hızla artmaya devam ettiğinden 2009 yılında Kopenhag'da, Kyoto'ya alternatif bir anlaşmayla sonuçlanması amaçlanan bir konferans düzenlenmiş, ancak beklenen sonuca ulaşamamıştır. Bu zirvenin beklendiği gibi sonuçlanmamasının ve başarısız görülmesinin birçok nedeni vardır. Bu başarısızlığın ana nedeninin küresel iklimdeki tehdit edici değişikliklerin göz ardı edilmiş olduğu söylenebilir. Ancak o dönemde başarısız sayılan bu konferans Paris Anlaşması için temel hazırlamıştır. Kyoto Protokolünün aksine, 2015 yılında 196 partinin katılımıyla imzalanan Paris Anlaşması, bu yüzyılın ikinci yarısında sera gazı

salınımını sifıra indirme gibi uzun vadeli hedeflere sahiptir. Paris Anlaşması küresel iklim sorununu çözmeye amaçlı değildir. Bununla birlikte, bu anlaşma, küresel ısınma gerçeğini ve düşük karbonlu stratejilere geçmenin gerekli olduğunu tüm dünyaya göstermiştir [4].

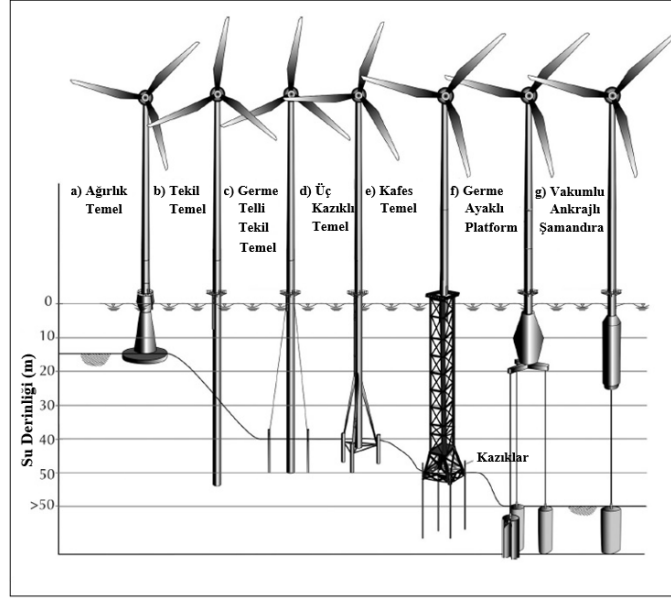
Enerji üretmek için yenilenebilir ve sürdürülebilir kaynakların kullanılması, petrol fiyatlarındaki dalgalanmalara ve yüksek düzeyde zararlı gaz salınımına karşı etkili bir çözüm olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, bu kaynakların kullanımı yaygınlaşmasının fosil yakıtların kullanımını azaltacağı gerçeği bu kaynaklara yönelimin gerekliliğini bir kere daha vurgulamaktadır. Rüzgar enerjisinin maliyeti nispeten daha düşük olduğundan [5], 1800'lerin sonlarından bu yana enerji üretmek için yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisi kullanılmaya başlanmıştır. 1990'larda, Danimarka, Almanya'daki Schleswig-Holstein ve İsveç'teki Gotland gibi yerlerde karada kurulu rüzgar türbinlerinden üretilen enerji miktarı, toplam enerji ihtiyacının %10'una ulaşmıştır [6]. Bu sebeple karada kurulu rüzgar türbinlerinin sektöre hâkim olduğu söylenebilir. Bununla birlikte, karadaki bu büyüme, bir rüzgar türbininin büyük bileşenlerini taşıma zorluğu, görsel ve gürültü etkileri ile ilgili kısıtlamalar gibi bazı sorunları da beraberinde getirmiştir. Bu sorunlara bir çözüm olarak, açık deniz rüzgar enerjisine eğilim artmıştır. Açık denizlerde; yüksek rüzgar kalitesi, karaya kıyasla daha sürekli rüzgar hızı gibi önemli avantajlarla beraber son yıllardaki teknolojik gelişmeler açık deniz rüzgar enerji piyasasını hareketlendirmiştir. Ayrıca, rüzgar türbinlerinin açık denizlerde kurulumu, karada kurulu rüzgar türbinlerinin görsel kirlilik ve gürültü gibi bazı olumsuz etkilerini ortadan kaldırmaya yardımcı olmaktadır. Öte yandan, açık deniz rüzgar türbinleri, yüksek işletme ve bakım maliyetleri, yük büyüklüğü, zorlu hava koşulları, karmaşıklık ve destek yapısının tasarım süreci ile ilgili belirsizlikler gibi bazı dezavantajlara sahiptir [6,7]. Buna ek olarak, karaya kurulu rüzgar türbinlerine kıyasla daha büyük destek yapıları gerektirmesi, karayla bir elektrik şebekesi kurmak için su altı kabloları, kurulum ve bakım için özel gemiler kullanılması gibi faktörler sebebiyle açık deniz rüzgar türbinlerinin maliyetleri 2-3 kat daha yüksektir [8].

Bir rüzgar santralının ömrü boyunca yürütülen birkaç aşama vardır [9]. Bunlar başlıca:

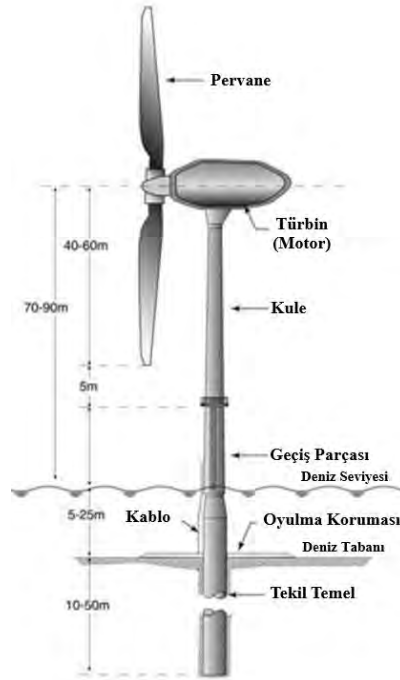
- Proje geliştirme ve onay,
- Türbin tasarımı ve imalatı,
- Kurulum ve işletmeye alma,
- İşletme ve bakım,
- İşletmeden çıkarma ve sökme işlemleridir.

Açık deniz rüzgar türbinleri için sabit tipler (ağırlık temel, tekil kazık temel, vakumlu kova keson temel, üç kazıklı temel, kafes tipi temel) ve yüzer tipler (spar tipi platform, germe ayaklı platform vb.) olmak üzere iki tip destek yapısı kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları Şekil 1'de gösterilmiştir [10]. Bunların içinden, tekil (kazıklı) temeller, şu anda açık deniz rüzgar türbinlerinde en çok kullanılan destek yapılarıdır. Bunun sebebi olarak, kurulumlarının basit olması, imalat maliyetlerinin nispeten düşük oluşu ve açık deniz petrol ve gaz yapılarındaki başarılı uygulamaları gösterilebilir [11].

Tekil kazık temelli açık deniz rüzgar türbini bileşenlerinin yaygın kullanım boyutları Şekil 2'de gösterilmiştir. Tekil kazık temeller, silindirik şeklindeki geniş çaplı çelik kazıkların forajla veya titreşimli çekiçler yardımıyla deniz tabanına çakılmasıyla kurulan destek yapılarıdır [12]. Fakat, deniz tabanının çok sert olması durumunda, deniz yatağı, delme ekipmanı kullanılarak kazık çapından biraz daha geniş delindikten sonra tekil temel yerleştirilir [13]. Genellikle, 5-6 m çapında kazıklar kullanılır [12]. Ancak, 60 m'ye kadar su derinliğinde, 10 m'ye kadar olan çaplar için tekil kazık temellerin uygulanabilir olduğu önerilmektedir [14]. Açık deniz rüzgar türbinlerindeki teknolojik gelişmelerle beraber, 2010 yılından bu yana, 6 m'den daha büyük çaplı tekil kazık temeller üretilmeye başlanmış ve son olarak Rentel rüzgar santralinde 8 m çapında tekil kazık temeller kullanılmıştır.



Şekil 1. Destek Yapısı Çeşitleri [10]

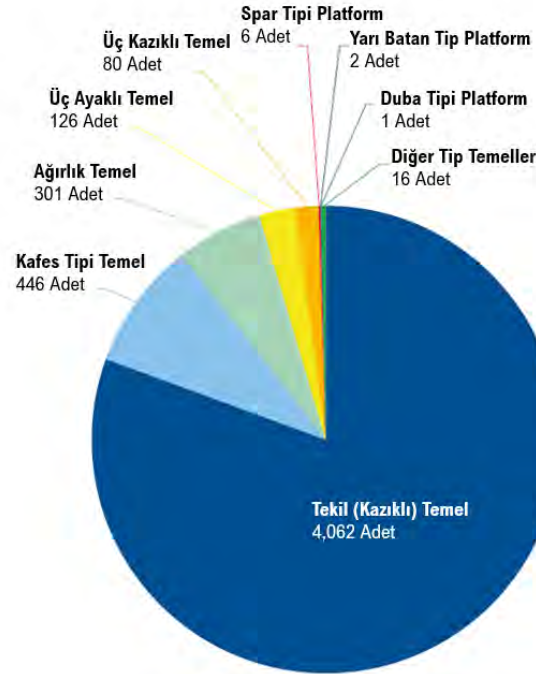


Şekil 2. Tekil Kazık Temelli Açık Deniz Rüzgar Türbin Sistemi Bileşenleri [10]

Tekil kazık temelli türbinler genellikle sığ su derinliklerinde (20-40 m) kullanılır [15]. Ancak, 30-40 m su derinliklerinde, çok esnek olabileceğinden, tekil temeller yanıl olarak çelik tellerle desteklenir ya da daha ekonomik bir alternatif olarak düşünölebilecek üç kazıklı veya kafes tipi temeller kullanılabilir [7].

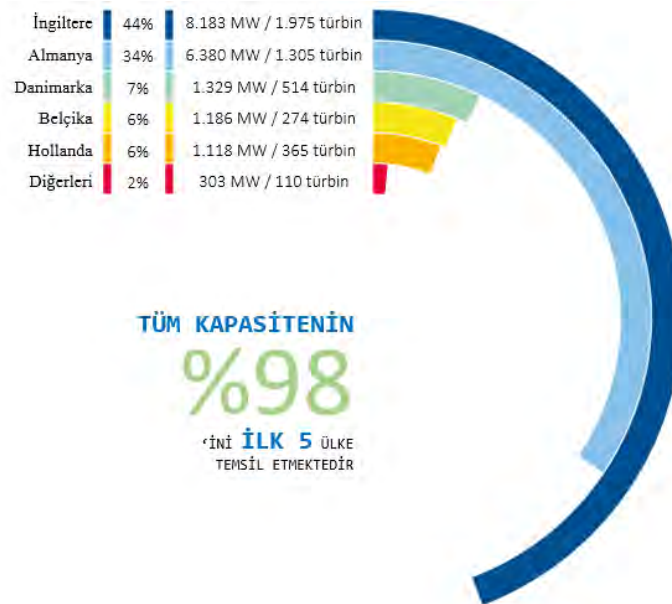
2017'nin sonuna gelindiğinde, Avrupa'daki açık deniz rüzgar türbin kurulumları, yaklaşık %84'lük bir oranla tüm dünyadaki kurulumların büyük bir çoğunluğunu oluşturuyordu [16,17]. Buna ek olarak, Şekil 3'te gösterildiği gibi 2018'in sonunda Avrupa'da %81,9'luk kurulum yüzdesine ulaşan tekil kazık temeller en yaygın tip olma niteliğini taşımaktadır [5,18]. Avrupa kıta sahanlığının yapısı dolayısıyla sığ su derinliklerinde kurulum açısından en uygun destek

yapısı olan tekil temeller daha yaygın olarak kullanılmıştır. Buna ek olarak, özellikle kum ve çakıldan oluşan Avrupa deniz tabanında tekil temel montajının nispeten daha kolay olması tekil temelleri diğer temel tiplerine göre daha ekonomik kıldığı için bu tip temeller çok daha yaygın bir şekilde tercih edilmiştir [5].



Şekil 3. 2018 yılının sonunda sayılarına göre Avrupa'daki destek yapısı tipleri [18]

2018 yılı sonunda, Avrupa'da açık deniz rüzgar türbinlerinden elde edilen rüzgar enerjisi, 4.543 rüzgar türbini ile 18.499 MW'a ulaşmıştır. İngiltere, toplam 1.975 türbinle 8.183 MW'a ulaşmıştır ve bu alanda %44'lük bir oranla kurulu açık deniz rüzgar gücü kapasitesi alanında Avrupa'da liderdir. İngiltere'yi %34'le Almanya takip etmektedir ve sırasıyla Danimarka, Belçika ve Hollanda izlemektedir. 2018'in sonunda Avrupa ülkelerinde ulaşılan toplam kurulu yüzdelik oran, toplam kurulu kapasite ve toplam açık deniz rüzgar türbini sayıları Şekil 4'te gösterilmiştir [18].



Şekil 4. 2018 yılının sonunda Avrupa ülkelerinin toplam yüklü kapasite ve türbin sayıları [18]

Gelişmekte olan ülkelerden biri olan Türkiye’de artan nüfusla beraber enerji ihtiyacı yıllık %8 oranında artmaktadır [19]. 1998 yılında karada kurulan ilk rüzgar türbini uygulamasından sonra, şu anda rüzgardan enerji üretimi tüm enerji üretiminin %6.78’ine ulaşmıştır [20]. Ancak, Türkiye’nin de diğer Avrupa ülkeleri gibi yenilenebilir ve sürdürülebilir kaynaklardan enerji üretimiyle ilgili belirlediği hedefleri vardır. Türkiye’nin üç tarafını çevreleyen denizlerde görülen rüzgar hızları, Türkiye’deki açık deniz rüzgar enerjisi potansiyelini açıkça göstermektedir. Satır ve Malkoç’a göre, Türkiye’deki açık deniz rüzgar potansiyeli 10.463 MW olarak belirtilmiştir [21,22]. Türkiye için bir açık deniz rüzgar türbini geliştirmeden önce gerekli mevzuatın belirlenmesi ve hesaplar için gerekli olan tüm verilerin İngiltere’de olduğu gibi bir kurumda toplanması önemlidir. Ayrıca, her bir yenilenebilir enerji sisteminin belirli bir yer için tasarlanması gerektiğinden, Türkiye’deki açık deniz rüzgar türbini kurulumu için en uygun bölgeleri belirlemek amacıyla araştırmacılar tarafından çok sayıda fizibilite çalışması yapılmıştır. Türkiye için yapılan bu fizibilite çalışmalarına göre, İğneada, Gökçeada, Bozcaada, Baba Burnu, Alanya, Anamur, İskenderun, Akıncı Burnu ve Saros gibi yerler açık denizde rüzgar türbini kurulumu için en uygun yerler olarak belirlenmiştir. Türkiye’nin Ege Denizi kıyıları göz önüne alındığında, açık deniz rüzgar çiftliği kurmak için uygun yerlerden biri olarak seçilen Bozcaada’da, su derinlikleri 20-30 m civarındadır ve bu su derinlikleri için en uygun destek yapıları sabit tiplerdir [21]. Tekil temellerin Avrupa’da yaygın oluşu sebebiyle, Türkiye’de kurulacak muhtemel ilk açık deniz rüzgar türbinin de bu tip bir destek yapısının tercih edileceği düşünülmektedir. Bu amaçla Türkiye, Stratejik Sektör İşbirliği Programında, Danimarka, Almanya, İngiltere gibi Avrupa ülkeleriyle son zamanlarda bir dizi projede yer almaya başlamıştır. Enerji üretiminin yaklaşık yüzde 40’ını rüzgardan sağlayan ve açık deniz rüzgar enerjisi sektöründe dünya liderlerinden biri olan Danimarka, Stratejik Sektör İşbirliği Programı kapsamında Türkiye ile ikili projeler sürdürmektedir. Bu iş birliğini güçlendirmesi beklenen açık deniz rüzgar enerjisi projelerini görüşmek üzere Mart 2019’da Ankara’da bu konuda ilk toplantı yapılmıştır. Bu toplantıda, özellikle açık deniz rüzgar enerjisi sektöründe uzun yıllardır yer alan, planlama ve proje geliştirme alanlarında birçok deneyim kazanmış olan Danimarka, ilgili politikaların, stratejilerin ve çözümlerin geliştirilmesinde bilgilerini ve deneyimlerini paylaşmıştır [23]. Konuyla ilgili henüz başlangıç aşamasında olan önemli bulgular Danimarka Enerji Ajansı başkanı tarafından toplantıda yetkililerle paylaşılmıştır. Rüzgar verilerinin güvenilirliği ve dönemsel belirsizliği ile ilgili risklerin yanısıra batimetri haritalarının önemi ajans başkanı tarafından vurgulanmıştır. Türkiye’de açık deniz rüzgar enerjisi için uzun vadeli bir planlamaya ihtiyaç duyulduğundan, açık deniz rüzgar enerjisinin gelişimi ile ilgili teknik uzmanlık ve vasıflı işgücünün mevcudiyeti açısından, bu çalışmada Avrupa’daki bütün tekil kazık temelli açık deniz rüzgar türbinleri ve kurulum aşamalarında kazanılan tecrübelerinin gözden geçirilerek özetlenmesi amaçlanmıştır. Türkiye’de son zamanlarda gündeme gelen bütün bu enerji politikaları göz önüne alındığında, bu çalışma, özellikle Türkiye gibi açık deniz sektörüne yeni adım atacak olan ülkeler için kapsamlı bir inceleme sağlamak amacıyla tüm kurulumları gözden geçirmeyi amaçlamıştır. Avrupa’daki bütün tekil kazık temelli açık deniz rüzgar türbinleri aşağıda sunulmuştur.

2. AVRUPA’DAKİ GELİŞMELER

2.1 1990’LAR

Dünyanın ilk açık deniz rüzgar türbini, 220 kW kapasiteli Norgersund, kıyıdan 250 m açıkta 7 m su derinliğinde 1990 yılında İsveç’te kurulmuştur [8,13,24]. Bu rüzgar türbini üç adet düşey kazıktan oluşan ve tasarımı kafes tipi temellere dayanan üç kazıklı temel üzerine kurulmuştur. Ancak, ilerleyen yıllarda ağırlık temel tiplerinin sığ ve sakin sular için daha elverişli oluşu ve tekil kazık temelli destek yapılarının kolay kurulumu, petrol ve doğalgaz sektöründeki başarılı uygulamaları sebebiyle bu destek yapıları üç kazıklı temel tiplerinin yerini almıştır [25]. Norgersund 1998 yılında devreden çıkarılmış [6] ve 2008 yılında sökülmüştür [8,13,24].

Vindeby, 450 kW üretim kapasiteli 11 rüzgar türbiniyle, dünyanın ilk açık deniz rüzgar santrali olma özelliğini taşımaktadır. 1991 yılında Danimarka’da kurulan bu türbinler ağırlık temellerle

desteklenmekteydi. Yıllık 12 GWs/yıl güç üreten bu proje açık denizde rüzgar verisi elde etmek ve türbinlerin açık denizdeki performansını incelemek için kullanılmaktaydı [8,13,24]. 2016 yılında, ömrünü tamamlamış olan rüzgar santrali işletmeden çıkarılmış; 2017 yılında sökülüştür (Bkz. Şekil 5) [26].



Şekil 5. Dünya'nın ilk açık deniz rüzgar santralini (Vindeby, Danimarka) söküm çalışmaları [26]

Dünyada tekil kazık temellerle desteklenen ilk açık deniz rüzgar santrali 1994 yılında Hollanda'da kurulan Lely rüzgar santralidir. Kurulumundan 22 yıl sonra meydana gelen olayda türbinlerden birinin pervane başı ve kanadı metal yorgunluğu nedeniyle kırılmış ve suya düşmüştür. Bu olay sonucunda, beklenen ömrünü tamamlamaya yaklaşan rüzgar türbinlerini sökme kararı alınmıştır. 3 hafta süren çalışmalar sonunda yüzer vinçler ve römorkörlerle tamamen sökülüştür [6].

Lely'nin kurulumundan 2 yıl sonra, 600 kW kapasiteli 28 adet rüzgar türbininden oluşan Irene Vorrink rüzgar santrali 1996 yılında Hollanda'da kurulmuştur [24,27]. Denizde kurulanların aksine, Hollanda'da kurulan bu iki santral Lake IJsselmeer isimli gölde kurulmuştur [13].

1998'den beri İsveç'te faaliyet gösteren Bockstigen rüzgar santralinde destek yapısı olarak kullanılan tekil kazık temeller deniz tabanının delinmesiyle açılan kuyulara oturtulmuştur. Bu yöntemle monte etme işlemi ilk defa bu santralde kullanılmıştır. Santralin enerji üretim kapasitesi başlangıçta 5 adet Wind World 550 kW türbinle 2.75 MW iken (Bkz. Şekil 6), 2014 yılında Momentum Gruppen A/S rüzgar santralini satın aldıktan sonra ve 20. yıl sonunda eski türbinleri 2018'de Vestas V47 660kW türbinler ile değiştirilerek santralin kapasitesi 3.3 MW'a yükseltilmiştir. Öte yandan, türbinleri yenilemek onarmaktan daha maliyetli olmasına rağmen, yeni türbinler eski türbinlerden iki kat daha fazla enerji sağlayacağı için firma türbinleri değiştirme yoluna gitmiştir [24,28]. Bu projede kullanılan tekil kazık temellerin, 43 tonluk düşük ağırlığı ve 2.25 m ile nispeten küçük çaplı olması nedeniyle kolaylıkla sahaya taşınmış ve önceden açılan deliğe oturtulmuştur. 2.4 m çapında ve 10 m derinliğindeki temel delikleri, deniz tabanındaki kayayı bir mavna ile delerek oluşturulmuştur. Delme işlemi bittikten sonra temeller deliğe yerleştirilmiş ve kaya ile arasındaki boşluklar özel bir beton ile doldurularak temeller sabitlenmiştir. Teknik ve planlama problemleri nedeniyle kurulum süreci bir süre uzamıştır. Teknik problem, su altı kablosunun sabitlenmesiyle ilgiliydi ve bunun nedenleri su akımlarının beklenenden daha büyük olması ve kablunun sabitlenmesinin zorluğunun küçümsenmesiydi. Bu sorunu gidermek için öncelikle kablo üzerine beton çuval yerleştirilerek ağırlık oluşturulmuş ve ardından kablo 12 mm çelik kancalarla tutturulmuştur. Her iki girişim de hayal kırıklığı ile sonuçlanmıştır. Ancak, kablolar 25 mm U şeklinde kancalarla bağlandığında başarılı olmuştur. Planlama tarafında ise, temel deliğini açmak için kullanılan mavnanın kurulum sahasına gecikmesi ve dalga yüksekliği, sığ sulara ulaştığında yükseldiği için dalga yüksekliğinin tahmin

edilenden daha yüksek olması büyük bir problem teşkil etmekteydi. Dalga yüksekliği kritik bir faktördür çünkü tekil kazık temeller deliklere yerleştirilirken dalgalara karşı çok hassastır. Ancak ne yazık ki, kabloları sabitleme sorununu çözme kışa kadar sürmesi ve kurulum sürecindeki yanlış planlama nedeniyle yaşanan gecikmeler maliyeti %10 artırmıştır. Bu projenin tüm aşamaları boyunca kazanılan bilgi ve tecrübenin gelecekteki projelerin daha düşük maliyetlerle inşa edilmesi için faydalı olacağı düşünülmektedir. Bockstigen rüzgar türbinlerinin maliyet/enerji üretim oranı önceki açık deniz rüzgar türbinleri Vindeby ve Tunø Knob ile karşılaştırıldığında, Bockstigen'den yaklaşık %50-80 daha pahalı oldukları açıkça görülmektedir. Ayrıca, Vinkompaniet tarafından karada inşa edilen rüzgar santralinin maliyet/enerji üretim oranının, Bockstigen'den %15-20 daha düşük olması, açık deniz rüzgar türbinlerinin gelişen teknolojiyle beraber karaya kurulan rüzgar türbinlerine karşı yüksek maliyet probleminin giderek azalmaya başladığını göstermektedir [28].



Şekil 6. Bockstigen açık deniz rüzgar santrali [28]

1990'larda, teknoloji bugünlerde olduğu kadar gelişmiş değildi ve sadece birkaç ülke açık deniz rüzgar enerjisi ile ilgilendiği için teknoloji yavaş geliyordu; bu nedenle az sayıda açık deniz rüzgar santrali kurulmuştur (bkz. Tablo 1). Ayrıca, destek yapılarının ve şebeke bağlantılarının yüksek maliyetli imalat ve montaj işlemleriyle beraber santralin işletme ve bakım maliyetleri de yüksek olduğundan, kıyıdan onlarca kilometre uzağa rüzgar türbinleri kurmak pek makul görünmüyordu. Buna ek olarak, tasarım teknolojileri yeterince gelişmediği için, o günlerde 10 metreden daha fazla su derinliğinde kurulu açık deniz rüzgar santrali bulunmamaktaydı.

Tablo 1. 1990'lı yıllarda Avrupa'da kurulan tekil kazık temelli açık deniz rüzgar santralleri

Rüzgar Santrali, İşletmeye Alındığı Yıl [24]	Ülke [24]	Türbin Kapasitesi (MW) [24]	Toplam Kapasite (MW) [24]	Kazık Çapı (m)	Kazık Ağırlığı (t)	Kıyıya Mesafe (km)	Su Derinliği (m)
Nogersund, 1990	İsveç	0.22	0.22	(üç kazıklı)	-	0.25 [8]	7 [8]
Vindeby, 1991	Danimarka	0.45	4.95	(ağırlık temel)	-	1.80 [5]	2.5-5 [29]
Lely, 1994	Hollanda	0.5	2	3.2-3.7 [27]	89 [30]	0.80 [30]	5-10 [30]
Irene Vorrink, 1996	Hollanda	0.6	16.8	3.515 [31]	-	1.00 [5]	1-2 [29]
Bockstigen, 1998	İsveç	0.66	3.3	2.25 [28]	43 [28]	4.00 [28]	6 [28]

1990'lı yıllarda Avrupa'nın, 2010 yılı sonunda 2500 MW kurulu açık deniz rüzgar enerjisi kapasitesine ulaşılması planlanmıştır [32].

2.2 2000'LER

1990'larda kurulan açık deniz rüzgar türbinlerinden kazanılan deneyimler ve gelişen teknoloji ile daha büyük ölçekli rüzgar santralleri kurulmaya başlanmış ve açık deniz rüzgar enerjisi ile ilgilenen ülkelerin sayısında artış olmuştur.

Utgrunden rüzgar santrali 7 adet 1.5 MW rüzgar türbininden oluşmaktadır ve megavat sınıfı rüzgar türbinlerinin kullanıldığı ilk rüzgar santralidir. Bu projede, geçiş parçasını ve tekil temeli birbirine bağlamak için ilk kez açık deniz rüzgar enerjisinde bir derz eklemi kullanılmıştır. Yumuşak-yumuşak tasarım konsepti ilk kez bu açık deniz rüzgar santralinde kullanılırken, önceki santrallerde nispeten daha ağır tekil kazık temel kullanımını gerektiren yumuşak-sert tasarım konsepti kullanılmıştır. Yumuşak-yumuşak tasarım konsepti, daha az ağırlığa sahip daha küçük çaplı tekil kazık temeller kullanmayı mümkün kılar ve çok az bile olsa geçiş parçasının ve kulenin boyutlarını azaltır. Ayrıca, imalat ve kurulum kolaylaşır ve boyutlardaki azalma nedeniyle destek yapısına etki eden yükler azalır. Bununla birlikte, temelin hassas bileşimi nedeniyle, genel dinamik davranışa, toprak koşullarına duyarlılığa ve dalga tahriklerine daha fazla önem vermek gerekir. Kurulumdan 5 yıl sonra yapılan kontrollerde çatlak veya kusur olmadığı gözlemlenmiştir. Bu sayede, derz eklemine geçiş parçası üzerindeki yükleri temele iletmede başarılı olduğu kanıtlanmıştır [33].

2000 yılında kurulan Blyth, İngiltere'nin ilk açık deniz rüzgar santralidir. İngiltere, bu proje ile açık deniz rüzgar enerjisi sektörüne girmiştir. Kıyıya 800 m uzaklıkta ve 6-11 m arasında değişen su derinliklerinde foraj deliklerine oturtulan tekil temeller üzerine monte edilen 2 adet 2 MW'lık türbinden oluşmaktadır [25].

Yttre Stengrund rüzgar santrali 2001 yılında İsveç'te kurulmuştur. Her biri 2 MW kapasiteli beş türbinden oluşan santral 10 MW güç üretim kapasitesine sahipti. Deniz tabanının birkaç metrelik kohezyonsuz kum tabakasıyla kaplı kayadan oluşması nedeniyle temellerin montajından önce kayayı delmek ve kumun foraj deliklerini doldurmasını engellemek gerekiyordu [25]. Teknik ve finansal gerekçeler nedeniyle türbinleri yenileriyle değiştirmek yerine, rüzgar santralinin kullanımdan kaldırılmasına karar verilmiştir. Bu rüzgar santralinin hizmetten çıkarılması 2015 yılında başlamış ve 2016 yılında deniz kablolarının sökülmesiyle beraber tümüyle tamamlanmıştır [34].

Kuzey Denizi'nin Danimarka sularında 2002 yılında inşa edilen Horns Rev 1 rüzgar santrali, dünyanın ilk büyük ölçekli açık deniz rüzgar santrali (bkz. Şekil 7) olma özelliğine sahiptir. Kıyıdan 14-20 km uzaklıkta bulunan bir alanda kurulan 80 adet rüzgar türbini deniz tabanına çakılarak sabitlenmiş tekil temeller üzerine monte edilmiştir. Horns Rev 1 rüzgar çiftliğinin inşasıyla beraber, açık deniz rüzgar enerjisi sektörü, Elsam Engineering A/S tarafından tasarlanan ve geliştirilen Rüzgar Çiftliği Ana Kontrol Cihazı olarak adlandırılan yeni bir teknolojiyle tanışmıştır. Bu cihaz, rüzgar santralinin 80 ayrı jeneratör yerine tek bir jeneratör olarak çalışmasını sağlamak için tasarlanmıştır [35].



Şekil 7. Büyük bir alanı kaplayan Horns Rev 1 rüzgar santrali [35]

Danimarka'da bulunan Frederikshavn, tüm enerji ihtiyaçlarını yenilenebilir enerji kaynaklarından üretmeyi hedefleyen ve kıyılarında açık deniz rüzgarından enerji üretilebilecek geniş alanlara sahip olan bir şehirdir [36]. Bu amaçla 2003 yılında Frederikshavn rüzgar santrali, ikisi 3 MW, diğer ikisi ise 2.3 MW kapasiteli 4 türbin ile inşa edilmiştir. Bu rüzgar çiftliğinde, üç adet tekil kazık temel ve bir adet tekil-kova tipi temel test amacıyla bir arada kullanılmış [37] ve bu kullanım, santralin sahibine bu iki temel tipini kıyaslama şansı vermiştir [25].

Danimarka'da Samsø adlı bir ada, tüm enerji ihtiyaçlarını yenilenebilir enerji kaynaklarından elde etmeyi hedefliyordu. Bu amaç doğrultusunda, her biri 2.3 MW kapasiteli 10 rüzgar türbini 4.5 m çapında ve 300 ton ağırlığındaki tekil temeller üzerine monte edilerek, 2003 yılında adayla aynı adı taşıyan bir açık deniz rüzgar santrali inşa edilmiştir. Kıyıya nispeten yakın bir yerde, 3.5 km açıktaki kurulmasına rağmen, su derinliği, 20 m ile önceki rüzgar santrallerinden daha derindi [25].

İrlanda'daki ilk açık deniz rüzgar santrali olan ve 2003 yılında kurulan Arklow Bank rüzgar santrali 26 m su derinliğine ulaşarak Samsø rüzgar santralinde kırılan rekoru geçmiştir. Bu rüzgar santralinde, o sırada en büyük kapasiteye sahip olan 3.6 MW kapasiteli rüzgar türbinleri, üretilen en geniş çapa sahip 5.1 m çapında tekil temeller üzerine oturtulan türbinlerden oluşmaktadır. 100 m'ye kadar uzayabilen ana kaldırma koluna sahip ve 5.5 m çapa kadar kazıkları tutma kapasitesi olan, dünyanın en ağır çekiçlerinden biri olan Jamping Jack kullanılarak deniz tabanına çakılmıştır. Bu rüzgar santralinin ikinci aşaması inşa edildiğinde, toplam kapasite 520 MW'a ulaşacaktır [25].

North Hoyle rüzgar santrali, İngiltere için açık deniz rüzgar enerjisi alanında bir dönüm noktasıdır [38]. Bu rüzgar santrali 2003 yılında kurulmuş ve her biri 2 MW kapasiteli toplam 30 adet rüzgar türbininden oluşmaktadır. İngiltere'deki ilk büyük ölçekli açık deniz rüzgar santrali olma özelliğini taşıyan proje İngiltere'nin 1. raunt olarak adlandırdığı projelerden biridir. Bu raunttaki projeler enerji üretiminin yanında, gelecekteki projeler için faydalı olacağı düşünülen bilgi ve deneyimler kazanmak üzere tasarlanmıştır [39]. Temeli deniz tabanına sabitlerken hem çakma hem de foraj tekniği kullanılmıştır. Tekil temeller deniz tabanının üst ve yumuşak kısmı olan kum ve kil tabakasına çakılarak yerleştirildikten sonra daha önce alttaki kaya tabakasında açılmış olan deliğe yerleştirilmiştir [38].

Scroby Sands rüzgar santrali kıyıdan 3.6 km uzaklıkta ve 5-10 m arasında değişen su derinliklerinde kurulmuştur [39]. 4.2 m çapında ve 200 ton ağırlığındaki tekil kazık temeller üzerine kurulu her biri 2 MW kapasiteli 30 türbinden oluşmaktadır [30]. Bu rüzgar santrali, İngiltere kıyılarının en büyük kum yığınlarından biri olan Scroby Sands adlı bir kum yığını üzerine inşa edilmiştir. Kum yığınının şekli, boyutu ve yüksekliği; gelgit akıntılarının, dalgaların, denizdeki kabarmaların birleşik etkileri nedeniyle değişkenlik gösterebildiğinden türbinleri bir kum yığınının üzerine kurmak zorlayıcı bir işti [40]. Oyulma korumasına rağmen, koruma bölgesinin etrafında, beklenmedik şekilde ikincil oyulmaların oluştuğu gözlenmiştir [41,42]. Bu nedenle, oyulma korumasının tasarımında oyulma çukurları ve girdaplar gibi ikincil etkilerin göz önünde bulundurulması CEFAS (2006) tarafından önerilmektedir. Bu etkiler fazladan yük getirebilir veya deniz tabanındaki yanal desteği azaltabilir [42]. Bu rüzgar santralinde, su altından gelen kabloların karaya bağlandığı noktada üç adet geçiş bağlantısı bulunmaktadır. Bu geçiş bağlantılarından biri arızalandığında, devrelerden biri onarım çalışmaları nedeniyle kapatıldığından rüzgar santralinin kapasitesi önemli ölçüde azalır. Bu tür bir üretim kaybını önlemek için, olası bir arıza durumunda derhal değişim yapabilmek için sahada yedek geçiş bağlantıları mevcuttur [43].

2007 yılında, Egmond aan Zee açık deniz rüzgar santrali, Kuzey Denizi'nin Hollanda kıyılarında 10-18 km açıktaki ve 15-19 m arasında değişen su derinliklerinde enerji üretmeye başlamıştır. Pilot proje olarak inşa edilen bu rüzgar santralindeki amaç, açık deniz rüzgar santrallerindeki çevresel etkiler nedeniyle ortaya çıkan zorlukları araştırmaktır. Bu araştırmaların bir parçası

olarak, Egmond'un kurulumundan sonra liman yunuslarının sayısındaki değişiklikleri görmek için bir çalışma yapılmıştır. Kurulumdan bir yıl önce ve rüzgar santralini işletimi sırasında iki yıl boyunca, karşılaştırma yapmak için seçilen iki farklı alanda ve rüzgar santralini kurulu olduğu alanda, akustik olarak gözlem yapabilen T-POD'lar kullanılarak yunusların sayısı gözlenmiştir. Bu çalışmanın sonunda, santral alanındaki yunus sayısında ilginç bir artış gözlenmiştir ve bu artışın sebebi kesin olarak bilinmemektedir. Bununla birlikte, rüzgar santralini inşasından sonra beslenme ve barınma için uygun yerlerin artmasının, inşaat alanındaki yunusların sayısında bir artışa neden olabileceği düşünülmektedir [44].

Princess Amalia rüzgar santralinde, her biri 2 MW gücünde toplam 60 rüzgar türbini bulunmaktadır [45]. Kıyıdan 23 km uzaklıkta ve 19-24 m su derinliği aralığında kuruludur, yani zamanının en uzakta ve en derinde kurulan açık deniz rüzgar santrali olma niteliğini taşımaktadır. Göçmen kuşları korumak ve Hollanda kıyılarında görsel kirlilik yaratmamak için bu kadar uzakta ve derinde inşa edilmiştir [46]. Egmond aan Zee rüzgar santralini kurulumundan sonra liman yunusu sayısında artış görülmesine rağmen, açık deniz rüzgar santrallerinin inşası sırasında gürültülü çalışmalar sebebiyle bölgedeki liman yunuslarının sayısındaki düşüş daha önce yapılan deneysel çalışmalarda kanıtlanmıştır. Ancak, Egmond aan Zee rüzgar santralini yaklaşık olarak 10 km batısında kurulan bu rüzgar santralinde yapılan kazık çakma ve türbinlerin kurulması gibi gürültülü çalışmalar Nisan 2007'de tamamlandığından ve rüzgar santrallerinin liman yunusu sayısına etkilerini araştıran çalışmaya bu tarihten sonra ikinci akustik izleme dönemi ile devam edildiğinden, bu durumun yunus sayısındaki artışın sebeplerinden biri olabileceği düşünülmektedir [44].

Her ne kadar Almanya kıyıları açık deniz rüzgar enerjisi için uygun bir potansiyele sahip olsa da batı ve kuzey kıyılarının çoğunun çevresel koruma altında olmasından, Baltık Denizi kıyılarının turizm amaçlı ve deniz taşımacılığında yoğun olarak kullanılmasından kaynaklanan sınırlamalar açık deniz rüzgar enerjisi potansiyeli olan bölgeleri azaltmıştır. Bu nedenle, bazı projeler üzerinde çalışılmasına rağmen, hiçbir gerçekleşmemiş ve 1990'lı yıllarda hiçbir açık deniz rüzgar santrali kurulmamıştır [32].

Almanya'nın ilk açık deniz rüzgar santrali 2009'da kurulan Alpha Ventus'tur [32]. 6'sı üç kazıklı, 6'sı kafes tipi temeller üzerine oturtulmuş her biri 5 MW üretim kapasitesine sahip toplam 12 türbinden oluşan bu küçük rüzgar santrali, Kuzey Denizi'ndeki Borkum Adası'na 45 km uzaklıkta 4 km²'lik bir alana kurulmuştur [47]. Yapılan bazı gözlem çalışmalarında, santralin inşasından sonra bu bölgenin deniz tabanında bazı anemon, yengeç ve istiridye kolonileri büyümeye başladığı görülmüştür [24].

Lynn ve Inner Dowsing rüzgar santralleri, 2009 yılında birbirine bitişik olarak İngiltere'de inşa edilmiştir. Her biri 3.6 MW gücünde toplam 54 rüzgar türbini, hidrolik çekiç yardımıyla deniz tabanına çakılan tekil kazık temeller üzerine inşa edilmiştir. Bu iki rüzgar santrali, 2003 yılında iki ayrı deneyimli şirket tarafından ayrı ayrı tasarlanmış ve onaylanmıştır. Barrow açık deniz rüzgar santralini kurulmasıyla beraber bu konuda tecrübe kazanan ve İngiltere doğalgaz endüstrisinde tanınmış bir firma olan Centrica, projeyi 2008 yılında satın almış ve inşa etmiştir. Bu iki rüzgar santralini kurulumuyla birlikte Birleşik Krallık, toplam 598 MW kurulu açık deniz rüzgar gücüne ulaşarak deniz rüzgarından enerji üreten ülkeler arasında lider olmuştur [48].

2000'lerde Avrupa'da kurulan tüm tekil temelli açık deniz rüzgar santralleri Tablo 2'de görülebilir.

Tablo 2. 2000'li yıllarda Avrupa'da kurulan tekil temelli açık deniz rüzgar santralleri

Rüzgar Santrali, İşletmeye Alındığı Yıl [24]	Ülke [24]	Türbin Kapasitesi (MW) [24]	Toplam Kapasite (MW) [24]	Kazık Çapı (m)	Kazık Ağırlığı (t)	Kıyıya Mesafe (km)	Su Derinliği (m)
Utgrunden, 2000	İsveç	1.5	10.5	3-3.65 [33]	110-165 [33]	8 [13]	7-10 [13]
Blyth, 2000	İngiltere	2	4	3.5 [31]	120 [49]	0.8 [13]	6-11 [13]
Y. Stengrund, 2001	İsveç	2	10	3-3.5 [29]	-	5 [13]	6-10 [13]
Horns Rev I, 2002	Danimarka	2	160	4 [27]	230 [30]	14-20 [30]	6-14 [30]
Frederikshavn, 2003	Danimarka	2.3-3	10.6	12* [50]	135* [50]	4 [51]	0.2 [51]
Samsø, 2003	Danimarka	2.3	23	4.5 [25]	300 [30]	3.5 [30]	20 [25]
Arklow Bank, 2003	İrlanda	3.6	25.2	5.2 [25,52]	280 [25,52]	10 [24]	10-25 [24]
North Hoyle, 2003	İngiltere	2	60	4 [30]	250 [30]	9.2 [39]	7-11 [39]
Enova, 2004	Almanya	4.5	4.5	-	-	0	2 [53]
Scroby Sands, 2004	İngiltere	2	60	4.2 [30]	200 [30]	3.6 [39]	5-10 [39]
Kentish Flats, 2005	İngiltere	3	90	4.3 [27,31]	247 [30]	9.8 [39]	5 [39]
Barrow, 2006	İngiltere	3	90	4.75 [27,31]	530 [30]	7 [54]	21-23 [54]
Egmond, 2007	Hollanda	3	108	4.6 [27]	250 [30]	10 [30]	10-18 [30]
Burbo Bank, 2007	İngiltere	3.6	90	4.7 [27,31]	400 [30]	8 [39]	2-8 [39]
P. Amalia, 2008	Hollanda	2	120	4 [27,30]	320 [30]	23 [30]	19-24 [30]
Lynn & I. Dowsing, 2009	İngiltere	3.6	194.4	4.74 [27]	225.5	6.2-6.9 [39]	6-13 [29]
Rhyl Flats, 2009	İngiltere	3.6	90	4.72 [27]	235 [30]	10.7 [39]	6.5-12.5 [39]

*Tekil-kova tipi temel

2000'li yılların ilk on yılında, açık deniz rüzgar türbinleri için en yaygın destek yapısı, 4-6 m çapındaki tekil kazık temeller olup, su altındaki gömülü uzunlukları yaklaşık 20-30 m'dir. Zemin koşullarına ve yüklerin büyüklüğüne göre, bu boyutlar ve ölçüler belirtilen aralıklar arasında değişmektedir [55]. Tablo 2'den görülebileceği gibi, açık deniz rüzgar enerjisi alanında teknolojinin gelişmesi ve ilerlemesi, kıyıdan 23 km uzaklıkta ve 24 metreye kadar su derinliklerinde tekil kazık temelli rüzgar türbinlerinin kurulumunu mümkün kılmıştır. Ayrıca, bu gelişmeler gelecekte kıyıdan daha uzakta ve daha derin sularda bu tipte uygulamaların yapılabilmesi konusunda güven vermiştir.

1990'lı yıllarda Avrupa'da 2010 yılı sonuna kadar toplam 2.500 MW kurulu kapasiteye ulaşma hedeflenmiş olmasına rağmen [32], toplam kurulu açık deniz rüzgar enerjisi, 9 Avrupa ülkesinde kurulu olan 45 rüzgar çiftliği ile, 1990'larda öngörülen değeri aşarak, 2995 MW'a ulaşmıştır. 1341.2 MW kurulu kapasiteye sahip İngiltere, 2010 yılı sonunda 853.7 MW kurulu kapasiteye sahip Danimarka'nın önünde yer alarak kurulu açık deniz rüzgarı kapasitesindeki en büyük ülkeler listesinin başında gelmiştir. 2010 yılının sonunda toplamda 742 adet kurulu tekil kazık temel vardı, bu da toplam kurulu temel tiplerinin %65'ini oluşturmaktaydı [56].

2.3 2010'LAR

2010'larda, Almanya ve Belçika da açık deniz rüzgarından enerji üretmeye başlamıştır. Tablo 3'te açıkça görüldüğü gibi bu on yılda kurulan açık deniz rüzgar santrallerinin sayısında önemli bir artış vardır (>30). Avrupa'da açık deniz rüzgârından yararlanan ülkeler, bu kaynaktan faydalanarak daha fazla enerji üretmek için daha büyük rüzgar santralleri inşa etmeyi amaçlamıştır. Avrupa'da 2010'larda inşa edilmiş 30'dan fazla tekil temelli açık deniz rüzgar santrali olmasına rağmen (Bkz. Tablo 3), bu zaman diliminde dönüm noktası olarak düşünülebilecek rüzgar santralleri bu bölümde özetlenmiştir.

Tablo 3. 2010'lu yıllarda Avrupa'da kurulan tekil temelli açık deniz rüzgar santralleri

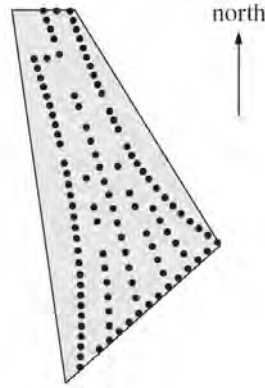
Rüzgar Santrali, İşletmeye Alındığı Yıl [24]	Ülke [24]	Türbin Kapasite esi (MW) [24]	Toplam Kapasite (MW) [24]	Kazık Çapı (m)	Kazık Ağırlığı (t)	Kıyıya Mesafe (km)	Su Derinliği (m)
Belwind, 2010	Belçika	3	165	5 [27,30,31]	550 [30]	46 [30]	15-24 [30]
Horns Rev II, 2010	Danimarka	2.3	209.3	3.9 [30]	280 [30]	30 [30]	9-17 [30]
Gunfleet Sands, 2010	İngiltere	3.6	172.8	5 [27,31]	423 [30]	7.4 [39]	0.5-10 [39]
Robin Rigg, 2010	İngiltere	3	174	4.3 [27]	310 [30]	11.5 [39]	4-13 [29]
Thanet, 2010	İngiltere	3	300	4.7 [27,31]	-	12 [57]	20-25 [57]
EnBW Baltic I, 2011	Almanya	2.3	48.3	4.3 [30]	215 [30]	16 [30]	16-19 [30]
Walney Phase I&II, 2011	İngiltere	3.6	367	6.5 [27,31]	806 [30]	14 [58]	23-30 [58]
Anholt, 2013	Danimarka	3.6	399.6	5.35 [27]	630 [30]	15-20 [30]	15-19 [30]
Greater Gabbard, 2013	İngiltere	3.6	504	6 [30]	700 [30]	26 [30]	20-32 [30]
Gunfleet Sands III, 2013	İngiltere	6	12	-	-	8 [5]	5-12 [5]
Lincs, 2013	İngiltere	3.6	270	5.2 [30]	480 [30]	8.5-16.3 [30]	6-8 [30]
London Array, 2013	İngiltere	3.6	630	4.7-5.7 [29,59]	650 [59]	20 [30]	0-25 [29]
Sheringham Shoal, 2013	İngiltere	3.6	316.8	4.3-5.7 [29]	375-530 [60]	17-23 [60]	17-22 [60]
Northwind, 2014	Belçika	3	216	5.2 [27]	-	37 [5]	15-23 [5]
Meerwind Süd/Ost, 2014	Almanya	3.6	288	5.5 [27]	-	54.4 [5]	22-26 [5]
Riffgat, 2014	Almanya	3.6	108	6 [30]	720 [30]	15-30 [30]	18-23 [30]
Teesside, 2014	İngiltere	2.3	62.1	4.6 [29]	160 [30]	1.5 [30]	8-22 [29]
West of D. Sands, 2014	İngiltere	3.6	389	5-6 [29]	-	15 [5]	17-21 [29]
Amrumbank West, 2015	Almanya	3.775	302	6 [30]	800 [30]	35 [30]	20-25 [30]
B. Riffgrund I, 2015	Almanya	4	312	5.9 [30]	495-684 [30]	54 [30]	29-29 [30]
Butendiek, 2015	Almanya	3.6	288	6.5 [27]	-	32 [61]	17-22 [61]
Dantysk, 2015	Almanya	3.6	288	6 [27]	730 [30]	69 [30]	21-31 [30]
EnBW Baltic II, 2015*	Almanya	3.6	288	6.5 [62]	927 [62]	32 [63]	23-44 [63]

Rüzgar Santrali, İşletmeye Alındığı Yıl [24]	Ülke [24]	Türbin Kapasite esi (MW) [24]	Toplam Kapasite (MW) [24]	Kazık Çapı (m)	Kazık Ağırlığı (t)	Kıyıya Mesafe (km)	Su Derinliği (m)
Eneco, 2015	Hollanda	3	129	5 [64]	525 [64]	23 [65]	18-24 [66]
Gwynt Mor, 2015	İngiltere	3.6	576	6 [27]	700 [30]	13-18 [30]	12-28 [30]
Humber Gateway, 2015	İngiltere	3	219	4.2 [29]	-	10 [5]	10-18 [29]
Westermest Rough, 2015	İngiltere	6	210	6.25 [29]	500-810 [67]	10 [5]	12-22 [29]
Kentish Flats II, 2015	İngiltere	3.3	49.5	5 [24]	223-260 [24]	8 [24]	3-5 [24]
Westermestwind, 2016	Hollanda	3	144	5 [68]	250 [68]	0.5-1.2 [68]	3-7 [69]
Nobelwind, 2017	Belçika	3.3	165	5 [70]	-	47 [70,71]	26-38 [71]
Gode Wind I&II, 2017	Almanya	6.264	582	7.5 [14]	940 [29]	45 [72]	28-34 [72]
Nordergründe, 2017	Almanya	6.15	110.7	5.5 [73]	370 [73]	15 [73]	10 [73]
Nordsee One, 2017	Almanya	6.15	332.1	-	-	45 [74]	28 [74]
Sandbank, 2017	Almanya	4	288	6.8 [75]	900 [75]	90 [75]	24-34 [75]
Veja Mate, 2017	Almanya	6	402	7.8 [76]	1302.5 [76]	95 [77]	40 [78]
Gemini, 2017	Hollanda	4	600	5.5-7 [27]	670-916 [79]	85 [80]	36 [80]
Dudgeon, 2017	İngiltere	6	402	7-7.4 [81]	800- 1200	35 [74]	12-24 [74]
Galloper, 2018	İngiltere	6	353	7.5 [82]	1200 [82]	27 [83]	27-36 [83]
Race Bank, 2018	İngiltere	6.3	573.3	-	-	27 [84]	12-22 [84]
Rampion, 2018	İngiltere	3.45	400.2	5.75-6.5 [85]	550-800 [85]	13-20 [86]	19-40 [87]
Walney Extension, 2018	İngiltere	7&8	659	-	500-970 [88]	19 [89]	20-37 [90]
Arkona, 2019	Almanya	6.417	385	7-7.75 [91]	1200 [91]	35 [92]	23-37 [93]
Rentel, 2019	Belçika	7.35	309	8 [94]	1250 [94]	32-40 [94]	22-36 [94]

*39 tekil kazık temel, 41 kafes tipi temel [63]

Anholt rüzgar santrali 2013 yılında Danimarka kıyılarından 15-20 km uzaklıkta ve 15-19 m su derinliğinde bir alana inşa edilmiştir [30]. Toplamda, her biri 3.6 MW olan 111 rüzgar türbini, tekil kazık temeller üzerine oturtulmuştur. 396,6 MW kapasiteli Anholt hala Danimarka'nın en büyük açık deniz rüzgar santrali olarak bilinmektedir. Bu rüzgar çiftliğinin yerleşim düzeni; deniz dibi koşullarını, sahaya özgü kazık tasarımını ve hakim rüzgar yönünü dikkate alarak optimizasyon çalışmasıyla verimli bir şekilde tasarlanmıştır. Yapılan optimizasyon çalışmasının sonunda, bölgede hakim rüzgar yönü ve 30 m'den daha derin yumuşak kil tabakası nedeniyle türbinlerin santral alanının batı-güneybatısında yoğun bir şekilde konumlandırıldığı yerleşim düzeni Şekil 8'de görülmektedir [14]. Denizlere dökülen kimyasallar, petrol atıkları veya kazık çakma işlemi esnasında ortaya çıkan gürültü gibi su altı yaşamını tehdit eden riskleri en aza indirerek çevresel etkileri azaltmak için kurulum ve işletme aşamalarında bazı önlemler alınmıştır. Bu önlemlere örnek olarak, kazık çakma işlemi sırasında, deniz canlılarını inşaat alanından uzak tutmak için bazı araçlar kullanılmış ve kurulum aşamasında gemi çarpışmalarını önlemek için çalışma alanının etrafına uyarı işaretleri yerleştirilmiştir. 2020 yılına kadar %30 yenilenebilir enerji kapasitesine ulaşmayı hedefleyen Danimarka hükümeti, bu rüzgar

santralinin 2013 yılında tamamlanmasıyla beraber bu yöndeki hedeflerinde düzenlemeler yapmış ve hedefi arttırmıştır [95].



Şekil 8. Anholt açık deniz rüzgar santralinin yerleşim düzeni [14]

2013 yılı, açık deniz rüzgar enerjisi endüstrisinde İngiltere için bir dönüm noktasıydı; çünkü dünyanın en büyük iki açık deniz rüzgar santrali olan, 177 tekil kazık temelli türbin (2 trafo merkezi) ile toplam 630 MW üretim kapasitesine sahip London Array ve 140 tekil kazık temelli türbin ile 504 MW üretim kapasitesine sahip Greater Gabbard inşa edilmiştir [96]. London Array, kıyıya 20 km mesafede [30] ve 0-25 m arasında değişen su derinliklerinde [29], Greater Gabbard ise kıyıya 26 km mesafede ve 20-32 m arasında değişen su derinliklerinde [30] kurulmuştur. Greater Gabbard rüzgar santralinin İngiltere'de kıyıya 20 km'den daha uzak bir mesafede kurulan ilk tekil kazık temelli rüzgar santrali olması, İngiltere'de açık deniz rüzgar enerjisi alanında teknolojik ilerlemeler açısından önemli bir gelişme olarak görülebilir [58]. Greater Gabbard projesi hedeflendiği gibi 2010 yılında tamamlanabilseydi, İngiltere'nin enerji ihtiyacının %10'unu yenilenebilir kaynaklardan karşılama hedefinin yarısını karşılayacaktı [97]. London Array'in o zamanın teknolojisi düşünüldüğünde kıyıdan bu kadar uzakta kurulmasının yanı sıra, şiddetli rüzgarların ve beklenmedik dalgaların meydana gelebileceği bu alanda projeyi inşa etmek çok zordu. Bu nedenle, kurulum aşamasında kaza olmamasını sağlamak amacıyla en son teknoloji ve ekipman kullanılmıştır. Daha önceki projelerden farklı olarak, her bir kazık sahadaki konumuna göre ayrı ayrı tasarlanmış ve tekil temelleri kurmak için iki farklı gemi kullanılmıştır, çünkü bölgede 25 m'ye kadar ulaşabilen gelgitler meydana gelmektedir. En fazla 40 m su derinliğinde çalışabilen MPI Adventure derin sularda, modern bir jack up duba olan A2Sea Sea Worker ise sığ sularda kazık kurulumu aşamasında kullanılmıştır. Çevre koşullarının daha sert olduğu yerlerde, bu iki gemi yetersiz kaldığı için birkaç kazığın kurulumunda HLV Savenen isimli başka bir gemi kullanılmıştır. Sabit bir platform oluşturmak ve bu platformdaki kazıkları çakmak için, gemiler dört adet uzatılabilir ayak kullanılarak deniz suyu üzerine kaldırıldı. Tekil kazık temellerin üzerine monte edilmiş, üzerinde bakım çalışmalarına olanak sağlayan merdiven ve platformları olan geçiş parçaları, denizde bulunan bu yapıların uzaktan kolayca görülebilmesi ve tanımlanması için sarıya boyanmıştır. Yukarıda belirtilen zorlu işler nedeniyle her bir tekil kazık temel ortalama bir ila iki günde kurulmuştur [98].

Westermeerwind, Hollanda kıyılarında inşa edilen en büyük açık deniz rüzgar santralidir. Bölgedeki uygun rüzgar potansiyelinin yanı sıra, çevrenin doğal güzelliği bozulmak istenmediği için, bu rüzgar santrali Şekil 9'da görülebileceği gibi yakın kıyıya (0.5-1.2 km) kuruldu. Kurulum alanında su derinliği çok sığ olduğu için nakliye ve montaj işlerinde kullanılan büyük gemiler bölgeye girememektedir. Bu nedenle 250 ton ağırlığında ve 5 m çapında 48 adet çelik tekil kazık temel gemi ile kurulum alanına birer birer taşındı ve özel tasarlanmış dubalar ile kuruldu. Tekil temellerin montaj işleri haftada 6 gün çalışmayla 3 ayda tamamlandı. Karada kurulu NOP Agrowind ve Zuidwester rüzgar santralleri ile birlikte, 2018'de işletmeye alınan Westermeerwind rüzgar santrali, Hollanda'nın en büyüğü olan Nooldoostpolder rüzgar çiftliğini oluşturur [99].



Şekil 9. Westermeerwind rüzgar santraliniin kurulumu [99]

Veja Mate rüzgar santrali, 2017 yılında Almanya'nın Kuzey Denizi kıyılarında kurulmuştur. Tekil kazık temeller üzerine kurulu türbinlerle toplam 402 MW gücünde enerji üretimi planlanan [78] bu rüzgar santrali Borkum Adası'na 95 km mesafede, 40 m su derinliğinde, düzenli ve güçlü rüzgarların estiği bir alanda kuruludur [77]. 7.8 m çapında (Bkz. Şekil 10-a ve Şekil 10-b) ve 1302,5 ton ağırlığındaki toplam 67 tekil kazık temel [76], dünyada şimdiye kadar üretilen en ağır tekil kazık temelleriydi [30]. Temellerin ve geçiş parçalarının imalatında kullanılacak 100.000 ton çelik, tasarımcı ve imalatçının iş birliği içinde çalışmasıyla kısa sürede elde edildi. Bu ağır ve XXL tekil kazık temellerin (yaklaşık 7 m çapında [100]) kurulum aşamasında, dünyanın en büyük kendiliğinden hareket eden jack up kurulum gemisi olan ve 1500 tona kadar kaldırma kapasiteli SeaJacks Scylla, kullanılmıştır. Bu derin sularda zamanın en büyük tekil kazık temellerinin deniz tabanına yerleştirilmesi için, dünyanın en büyük kazık çekici kullanılmıştır. Ancak, Alman yetkililer tarafından belirlenen gürültü sınırlamalarına uymak için bir gürültü azaltma sistemine ihtiyaç vardı. Bu nedenle, su altındaki ses seviyesini 160 dB'nin altında tutmak için ses düşürücü bir sistem olan HSD sistemi ve çift büyük kabarcık perdesi kullanılmıştır [101]. Bunun yanında yaşanan diğer bir zorluk ise, rüzgar santraliniin kıyıya olan mesafesinin, inşaat ve işletme aşamalarında çalışmayı zorlaştırmasıydı [102].



(a)



(b)

Şekil 10. Veja Mate rüzgar santralinde kullanılan tekil temeller (a) [30]; (b) [101]

Gemini rüzgar santrali, kıyıya 85 km mesafede 2017 yılında Hollanda'da kurulmuştur. Santralin kurulum alanında su derinliği 28-36 m arasında değişmekteydi. Tekil kazık temellerle desteklenen her biri 4 MW kapasiteli toplam 150 türbine sahip olan bu santral toplam 600 MW kurulu güce sahiptir [24]. Tasarım aşamasında, destek yapısı olarak tekil kazık temeller veya kafes tipi temellerin kullanımı ele alınmıştır. Bu iki alternatifin kendilerine özgü avantajları ve dezavantajları vardır. Örnek olarak, tekil kazık temellerin imalatında daha fazla çelik, fakat daha az iş gücü gerekirken, kafes tipi temellerin yapısal bileşenlerinin birlikte kaynaklanması gerekmektedir ve bakım maliyeti tekil kazık temellerden daha yüksektir. Ayrıca, projenin ana yüklenicisi, tekil kazık temel kurulumu ile ilgili daha fazla deneyime sahipti ve tüm gemileri tekil kazık temel kurulumu için uygundu. Tekil kazık temellerin kurulumu kafes tipi temellere kıyasla daha kolaydır ve tekil kazık temellerin bir diğer avantajı da gemide daha az yer kaplaması nedeniyle taşıma kolaylığı sağlayarak nakliye işlemini hızlandırmasıdır. Tekil kazık temelleri taşıyan gemi santralin kurulacağı alana ulaştığında, Aeolus gemisi GPS yardımıyla her bir kazık için koordinatları belirledikten sonra, ikinci bir vinçle desteklenen Aeolus ana vinciyle gemiden alınıp dikey pozisyona getirilen kazıklar darbeli çekiç tarafından deniz tabanına çakılmadan önce kurulu olacağı konum santimetre hassasiyetinde hatasız şekilde ayarlanmıştır [103].

Rampion, kıyından 13 km uzaklıkta ve 19-40 m arasında değişen su derinliğine sahip bir alanda 2018 yılında İngiltere'de inşa edilmiş bir açık deniz rüzgar santralidir. Her biri 3.45 MW kapasiteli toplam 116 rüzgar türbini, çapı 5.76-6.5 m arasında değişen 800 tonluk tekil kazık temellerle desteklenmiştir. Bu 116 tekil kazık temelin her biri, su derinliği ve deniz tabanı zemin koşulları gibi sahaya özgü durumlar dikkate alınarak tasarlanmıştır [85]. Karagöz balıklarının yumurtlama mevsimi süresince inşaat işleri durdurulmuş olmasına rağmen, tekil kazık temellerin kurulumunda kullanılan iki geminin, MPI Discovery ve Pacific Orca, sürekli çalışması sayesinde santralin kurulumu planlanan zamanda tamamlanmıştır [104].

Walney Extension rüzgar santralinde, London Array'de kurulu türbinlerin yarısından daha az sayıda türbin olmasına rağmen, Walney Extension 659 MW kurulu güç kapasitesiyle, London Array'den daha fazla toplam güç kapasitesine ulaşmıştır [105]. Yani, dünyanın en büyük kapasiteli açık deniz rüzgar santrali olan, 40 adet MHI Vestas V164-8.0-MW ve 47 adet Siemens Gamesa SWT-7-MW-154 rüzgar türbininden oluşan [106] Walney Extension, aynı bölgede inşa edilen Walney I ve Walney II rüzgar santralleri de dahil olmak üzere Walney açık deniz rüzgar santrali projesinin bir parçası olarak 2018 yılında İngiltere'nin İrlanda Denizi kıyılarında kurulmuştur [106,107]. Bu rüzgar santralinin inşası, birincisi Vestas türbinlerinin, ikincisi ise Siemens türbinlerinin kurulumu olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Tüm türbinler tekil kazık temellerle desteklenmiştir [107]. Bu rüzgar santralinde destek yapısı olarak kullanılan kazıklar, Gemini ve London Array rüzgar santralinin kurulumunda da kullanılan Aeolus ve Svanen gemileri tarafından taşınmış ve kurulmuştur [108].

Rentel rüzgar santrali, Belçika'da kurulan 5. rüzgar santralidir. 2019 yılında işletmeye alınan bu santral Kuzey Denizi'nde kurulmuştur. Toplamda 42 adet 7.35 MW kapasiteli D7 Siemens rüzgar türbini, 1.250 ton ağırlığa sahip olan ve 8 m çapındaki dünyanın en büyük tekil kazık temelleri üzerine kurulmuştur. Santralde bir adet transformatör bulunmaktadır. Bu transformatörün üzerinde bulunduğu platformu destekleyen tekil temelin Kuzey Denizi'nin zorlu koşullarında 20-22 senelik beklenen kullanım ömrü süresince gereken rijitliği sağlaması için deniz tabanının 40 m altına gömülmüştür. Bu yüzden, transformatör temeli 1.850 tona kadar ulaşan ve türbin temellerinden farklı boyutlara sahip olan bir yapıya sahiptir [94].

2010'lu yıllarda, önceki yıllara kıyasla daha büyük ve daha fazla açık deniz rüzgar türbini kurulmuştur. Bu on yılın sonlarına gelindiğinde, kıyından 95 km uzaklıkta ve 40 m'den daha derinlerde rüzgar türbini kurulumu mümkün hale gelmiştir. Bugüne kadarki teknolojik ilerlemelere bakarak, gelecek dönemlerde yaşanacak gelişmelerle 8 m'den daha geniş çapta ve 1.300 tondan daha ağır tekil kazık temellerin üretilebilir ve uygulanabilir hale geleceği söylenebilir.

3. SONUÇ

Artan sera gazı salınımını azaltmayı amaçlayan Kyoto Protokolü (1997) ve Paris Anlaşması (2015), özellikle Avrupa ülkelerinde enerji üretimi için açık deniz rüzgarı gibi yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelimi artırmıştır. Avrupa'daki kurulu açık deniz rüzgar santralleri, %84 gibi büyük bir oranla tüm dünyadaki açık deniz rüzgar santrallerinin büyük çoğunluğunu oluşturmaktadır. Kurulu açık deniz rüzgar türbinleri, Avrupa kıta sahanlığında tekil tip destek yapılarının uygunluğu ve bu tipin Avrupa'nın deniz tabanı koşullarında kurulmasının kolaylığından dolayı çoğunlukla tekil temellerle desteklenmiştir. Açık denizde kurulan ilk rüzgar türbinleri, çapları 2-4 m arasında değişen ve 100 tondan daha hafif tekil kazık temellerle desteklenmiştir. Bu türbinler su derinliğinin en fazla 10 m olduğu ve kıyıdan uzaklığın 4 km'den fazla olmadığı bölgelerde kurulurken, mevcut kurulu tekil kazık temelli açık deniz rüzgar türbinlerinde, gelişen teknoloji sayesinde kıyıdan 95 km mesafeye ve 45 m su derinliğine ulaşılmıştır. Son dönemlerde yapılan kurulumlarda, yine gelişen teknoloji sayesinde, 8 m çapında ve 1300 ton ağırlığındaki tekil kazık temellerin üretilmesi ve kurulmasının uygun olduğu bir noktaya ulaşılmıştır. İlk açık deniz rüzgar türbininin kapasitesi 220 kW iken, şu anda 8 MW kapasiteli türbin kurulabilmektedir. Ayrıca, artan enerji ihtiyacı, gelişen teknoloji ve ülkelerin açık deniz rüzgar enerjisine artan ilgisiyle beraber rüzgar santrallerinin sayısı ve kapasitesi giderek artacaktır.

Kurulumu gerçekleştirilen ilk açık deniz rüzgar türbinleri bu sistemlerin performansını test etmek amacıyla kurulmuştur. Kurulum aşamasında, öngörülemeyen ve maliyeti artıran sorunlarla karşılaşmış ve bu sorunlara karşı bazı çözümler geliştirilmiştir. Bu sorunlardan edinilen deneyimler sayesinde aynı sorunların tekrar ortaya çıkmaması için bazı önlemler alınmıştır. Kurulum aşamasında ve sonrasında, bölgedeki sualtı yaşamını gözlemlemek için çok sayıda araştırma yapılmıştır ve bu araştırmalar sonucunda getirilen kısıtlamalara uymak için teknoloji bu yönde gelişmiştir. Günümüzde, enerji yatırımcıları sert hava koşullarında yaşanabilecek iş kazalarını göz önünde bulundurarak en son teknolojiyi kullanıp riski en aza indirmeyi hedeflemektedir.

Karşılaşılan zorlukların bir sonucu olarak edinilen deneyimler teknolojiyi geliştirmiştir ve bu deneyimler açık deniz rüzgar endüstrisine yeni girenler için oldukça faydalı olacaktır. Bu nedenle, yazarlar, teknik anlamda daha derin bir bakış açısına sahip olmak için Avrupa'daki tekil temelli açık deniz rüzgar türbinlerinin gelişimini ele alarak gelecekteki çalışmalar için gerekli tüm iyileştirmelerin önemini vurgulamayı amaçlamıştır.

KAYNAKLAR

- [1] P. Higgins, A.M. Foley, Review of Offshore Wind Power Development in the United Kingdom, in: 2013 12th Int. Conf. Environ. Electr. Eng., IEEE, 2013: pp. 589–593. doi:10.1109/EEEIC.2013.6549584.
- [2] What is the Kyoto Ptorocol? | UNFCCC, (n.d.). <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-kyoto-protocol/what-is-the-kyoto-protocol/what-is-the-kyoto-protocol>.
- [3] UNFCCC, (n.d.). <https://unfccc.int/>.
- [4] Falkner R., The Paris Agreement and the new logic of international climate politics, Int. Aff. 92 (2016) 1107–1125. https://static1.squarespace.com/static/538a0f32e4b0e9ab915750a1/t/57d3dfc646c3c43b079d1c59/1473503175245/Falkner_2016_TheParisAgreement.pdf.
- [5] K.Y. Oh, W. Nam, M.S. Ryu, J.Y. Kim, B.I. Epureanu, A review of foundations of offshore wind energy convertors: Current status and future perspectives, Renew. Sustain. Energy Rev. 88 (2018) 16–36. doi:10.1016/j.rser.2018.02.005.
- [6] A.R. Henderson, C. Morgan, B. Smith, H.C. Sørensen, R.J. Barthelmie, B. Boesmans, Offshore Wind Energy in Europe - A Review of the State-of-the-Art, Wind Energy. 6 (2003) 35–52. doi:10.1002/we.82.

- [7] B.C. O’Kelly, M. Arshad, Offshore wind turbine foundations - analysis and design, Elsevier Ltd, 2016. doi:10.1016/B978-0-08-100779-2.00020-9.
- [8] M. Bilgili, A. Yasar, E. Simsek, Offshore wind power development in Europe and its comparison with onshore counterpart, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 (2011) 905–915. doi:10.1016/j.rser.2010.11.006.
- [9] J.G. Dedecca, R.A. Hakvoort, J.R. Ortt, Market strategies for offshore wind in Europe: A development and diffusion perspective, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 66 (2016) 286–296. doi:10.1016/j.rser.2016.08.007.
- [10] S. Malhotra, Selection, Design and Construction of Offshore Wind Turbine Foundations, in: I.H. Al-Bahadly (Ed.), *Wind Turbines*, 2011: pp. 231–264. doi:10.5772/32009.
- [11] D. Lombardi, S. Bhattacharya, D.M. Wood, Dynamic soil-structure interaction of monopile supported wind turbines in cohesive soil, *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 49 (2013) 165–180. doi:10.1016/j.soildyn.2013.01.015.
- [12] B.W. Byrne, R. McAdam, H.J. Burd, G.T. Houlsby, C.M. Martin, L. Zdravković, D.M.G. Taborda, D.M. Potts, R.J. Jardine, M. Sideri, F.C. Schroeder, K. Gavin, P. Doherty, D. Igoe, A.M. Wood, D. Kallehave, J. Skov Gretlund, New design methods for large diameter piles under lateral loading for offshore wind applications, in: 3rd Int. Symp. Front. Offshore Geotech. (ISFOG 2015), Oslo, Norw., 2015: pp. 10–12. doi:10.1201/b18442-96.
- [13] N. Nikolaos, Deep water offshore wind technologies, Thesis of Master in Science, University of Strathclyde Department of Mechanical Engineering, 2004. [http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/MSc 2004/nikolaos.pdf](http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/MSc%2004/nikolaos.pdf).
- [14] D. Kallehave, B.W. Byrne, C. LeBlanc Thilsted, K.K. Mikkelsen, Optimization of monopiles for offshore wind turbines, *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 373 (2015). doi:10.1098/rsta.2014.0100.
- [15] X. Wu, Y. Hu, Y. Li, J. Yang, L. Duan, T. Wang, T. Adcock, Z. Jiang, Z. Gao, Z. Lin, A. Borthwick, S. Liao, Foundations of offshore wind turbines : A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 104 (2019) 379–393. doi:10.1016/j.rser.2019.01.012.
- [16] GWEC Global Wind 2017 Report | A Snapshot of Top Wind Markets in 2017: Offshore Wind, 2017.
- [17] M. DeCastro, S. Salvador, M. Gómez-Gesteira, X. Costoya, D. Carvalho, F.J. Sanz-Larruga, L. Gimeno, Europe , China and the United States : Three different approaches to the development of offshore wind energy, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 109 (2019) 55–70. doi:10.1016/j.rser.2019.04.025.
- [18] WindEurope, Offshore Wind in Europe - Key Trends and Statistics 2018, n.d. <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Offshore-Statistics-2018.pdf>.
- [19] C. İlkiliç, H. Aydin, Wind power potential and usage in the coastal regions of Turkey, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 44 (2015) 78–86. doi:10.1016/j.rser.2014.12.010.
- [20] TURKISH WIND ENERGY STATISTIC REPORT 2019, 2019.
- [21] M. Satir, F. Murphy, K. McDonnell, Feasibility study of an offshore wind farm in the Aegean Sea , Turkey, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 81 (2018) 2552–2562. doi:10.1016/j.rser.2017.06.063.
- [22] Y. Malkoc, The Role of Wind energy in Turkish Electric Energy Supply, *Chamb Electr Eng Turkey Energy J.* 3 (2007) 45–50.
- [23] Strengthened Danish-Turkish relations on offshore wind energy, (n.d.). <http://tyrkiet.um.dk/da/nyheder/newsdisplaypage/?newsid=e8b3e389-ad43-47a4-a385-fdaae06711f2>.
- [24] Global Offshore Wind Farms Database - 4C Offshore, (n.d.). <https://www.4coffshore.com/windfarms/>.
- [25] M.B. Zaaijer, A.R. Henderson, Review of current activities in offshore wind energy, Fourteenth Int. Offshore Polar Eng. Conf. (2004).
- [26] The world’s first offshore wind farm is retiring, (2017). <https://orsted.com/en/Media/Newsroom/News/2017/03/The-worlds-first-offshore-wind-farm-is-retiring>.

- [27] S. Bhattacharya, Design of Foundations for Offshore Wind Turbines, Wiley, 2019.
- [28] B. Lange, E. Aagaard, P.-E. Andersen, A. Møller, S. Niklasson, A. Wickman, Offshore Wind Farm Bockstigen: Installation and Operation Experience, EWEC Conf. (1999) 300–303.
- [29] O.B. Leite, REVIEW OF DESIGN PROCEDURES FOR MONOPILE OFFSHORE WIND STRUCTURES, Thesis of Master in Science, University of Porto Department of Civil Engineering, 2015.
- [30] V. Negro, J.-S. López-Gutiérrez, M.D. Esteban, P. Alberdi, M. Imaz, J.-M. Serraclará, Monopiles in offshore wind: Preliminary estimate of main dimensions, Ocean Eng. 133 (2017) 253–261. doi:10.1016/j.oceaneng.2017.02.011.
- [31] L. Arany, S. Bhattacharya, J.H.G. Macdonald, S.J. Hogan, Closed form solution of Eigen frequency of monopile supported offshore wind turbines in deeper waters incorporating stiffness of substructure and SSI, Soil Dyn. Earthq. Eng. 83 (2016) 18–32. doi:10.1016/j.soildyn.2015.12.011.
- [32] R.J. Barthelmie, A Brief Review of Offshore Wind Energy Activity in the 1990s, Wind Eng. 22 (1998) 265–273.
- [33] M. Kühn, P.W. Cheng, H. Bergström, J.-åke Dahlberg, J. Duffy, J. Jacquemin, T. Thiringer, P. Passon, J. Pettersson, Utgrunden Offshore Wind Farm : Results of 5 Years of Operation and Research, Copenhagen Offshore Wind. (2005).
- [34] The first decommission in the world of an offshore wind farm is now completed - Vattenfall, (2016). <https://corporate.vattenfall.com/>.
- [35] J.R. Kristoffersen, The Horns Rev wind farm and the operational experience with the wind farm main controller, Copenhagen Offshore Wind. (2005).
- [36] P.A. Østergaard, H. Lund, A renewable energy system in Frederikshavn using low-temperature geothermal energy for district heating, Appl. Energy. 88 (2011) 479–487.
- [37] A. Westwood, Refocus Marine Renewable Energy Report: Global Markets, Forecasts and Analysis 2005-2009, Elsevier, 2005.
- [38] DTI, 2nd DTI Operating Report - Capital Grant Scheme for the North Hoyle Offshore Wind Farm, 2006.
- [39] Q.Y. Feng, P.J. Tavner, H. Long, Early experiences with UK round I offshore wind farms, Proc. Inst. Civ. Eng. Energy. 163 (2010) 167–181. doi:10.1680/ener.2010.163.0.1.
- [40] H. Park, C.E. Vincent, Evolution of Scroby Sands in the East Anglian coast , UK, J. Coast. Res. (2007) 868–873.
- [41] R.J. Whitehouse, J.M. Harris, J. Sutherland, J. Rees, The nature of scour development and scour protection at offshore windfarm foundations, Mar. Pollut. Bull. 62 (2011) 73–88. doi:10.1016/j.marpolbul.2010.09.007.
- [42] J. Ress, P. Larcombe, C. Vivian, A. Judd, Scroby Sands Offshore Wind Farm – Coastal Processes Monitoring, Final Rep. Dep. Trade Ind. Proj. Code AE0262, Cefas, Lowestoft. (2006).
- [43] Capital Grant Scheme for Offshore Wind Annual Report: January 2006 - December 2006, 2007.
- [44] M. Scheidat, J. Tougaard, S. Brasseur, J. Tougaard, J. Carstensen, T. van Polanen Petel, J. Teilmann, P. Reijnders, Harbour porpoises (Phocoena phocoena) and wind farms: a case study in the Dutch North Sea, Environ. Res. Lett. 6 (2011). doi:10.1088/1748-9326/6/2/025102.
- [45] P.A. Fleming, A. Ning, P.M.O. Gebraad, K. Dykes, Wind Plant System Engineering through Optimization of Layout and Yaw Control, Wind Energy. 19 (2016) 329–344. doi:10.1002/we.1836.
- [46] Princess Amalia windfarm - Mott MacDonald, (n.d.). <https://www.mottmac.com/article/2367/princess-amalia-windfarm>.
- [47] M. Dähne, A. Gilles, K. Lucke, V. Peschko, S. Adler, K. Krügel, J. Sundermeyer, U. Siebert, Effects of pile-driving on harbour porpoises (Phocoena phocoena) at the first offshore wind farm in Germany, Environ. Res. Lett. 8 (2013) 1–16. doi:10.1088/1748-9326/8/2/025002.

- [48] Lynn and Inner Dowsing Offshore Wind Farms, (2009). http://www.cargos-paquebots.net/Revue de presse/0000_IMAGES-07/117-Eoliennes_P&O.pdf.
- [49] L. Pepper, Monitoring and evaluation of Blyth offshore wind farm - Installation and Commissioning, 2001. <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20163732>.
- [50] Frederikshavn - Universal Foundation, (n.d.). <https://universal-foundation.com/case-studies/frederikshavn/>.
- [51] F. Villalobos, Model Testing of Foundations for Offshore Wind Turbines, Doctor of Philosophy, University of Oxford, 2006.
- [52] A. Moller, Efficient Offshore Wind Turbine Foundations, *Wind Eng.* 29 (2006) 463–469.
- [53] ENOVA Offshore Project Ems Emden Offshore Wind Farm, (n.d.). <https://www.4coffshore.com/windfarms/enova-offshore-project-ems-emden-germany-de77.html>.
- [54] S. Breton, G. Moe, Status, plans and technologies for offshore wind turbines in Europe and North America, *Renew. Energy.* 34 (2009) 646–654. doi:10.1016/j.renene.2008.05.040.
- [55] A.H. Augustesen, K.T. Brodbæk, M. Møller, S.P.H. Sørensen, L.B. Ibsen, T.S. Pedersen, L.V. Andersen, Numerical Modelling of Large-Diameter Steel Piles at Horns Rev, *Proc. 12th Int. Conf. Civil, Struct. Environ. Eng. Comput.* (2009).
- [56] The European Wind Energy Association, The European offshore wind industry key trends and statistics 2010, n.d. http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/20110121_Offshore_stats_Full_Doc_final.pdf.
- [57] E. Uraz, Offshore Wind Turbine Transportation & Installation Analyses, Thesis of Master in Science, Gotland University Department of Wind Energy, 2011.
- [58] P. Higgins, A. Foley, The evolution of offshore wind power in the United Kingdom, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 37 (2014) 599–612. doi:10.1016/j.rser.2014.05.058.
- [59] J. Zhang, I. Fowai, K. Sun, A glance at offshore wind turbine foundation structures, *Brodogr. Teor. i Praksa Brodogr. i Pomor. Teh.* 67 (2016) 101–113. doi:10.21278/brod67207.
- [60] Sheringham Shoal Offshore Wind Farm, Scira Offshore Energy. (n.d.). <http://sheringhamshoal.co.uk/newsdownloads/Downloads/Sheringham Shoal Factsheet Sept 2010.pdf>.
- [61] Butendiek offshore wind farm factsheet, (n.d.). <https://www.ewz.ch/content/dam/ewz/services/dokumentencenter/ueber-ewz/dokumente/factsheet-butendiek-2016-e.pdf>.
- [62] Baltic 2 Offshore Wind Farm, (n.d.). <https://www.ballast-nedam.com/projects/baltic-2-offshore-wind-farm/>.
- [63] Wind farm in the Baltic Sea: EnBW Baltic 2, (n.d.). <https://www.enbw.com/renewable-energy/wind-energy/our-offshore-wind-farms/baltic-2/>.
- [64] H. Abolhadi, Support Policy Instruments for Offshore Wind Power in the Netherlands, Delf University of Technology, 2017.
- [65] Eneco Luchterduinen wind farm, (n.d.). <https://www.eneco.nl/over-ons/projecten/windpark-luchterduinen/#locatiekeuze>.
- [66] Eneco Luchterduinen Wind Farm, (n.d.). <https://www.4coffshore.com/windfarms/eneco-luchterduinen-netherlands-nl32.html>.
- [67] P. Smith, Westernmost Rough foundations completed, (2014). <https://www.windpoweroffshore.com/article/1295923/westernmost-rough-foundations-completed>.
- [68] Manufacturing and driving of 48 foundation piles, (n.d.). <http://www.westermeerwind.nl/en/construction/manufacturing-and-driving-of-48-foundation-piles/>.
- [69] Westermeerwind Wind Farm, (n.d.). <https://www.power-technology.com/projects/westermeerwind-wind-farm/>.
- [70] JDN, JDN Annual Report, 2017. <https://www.jandenul.com/sites/default/files/annual->

- report/attachments/Annual_Report_2017.pdf.
- [71] Nobelwind - DETAILS, (n.d.). <http://www.nobelwind.eu/#details>.
 - [72] Gode Wind 1+2 - 97 XL offshore foundations, (2016).
https://www.bladt.dk/UserFiles/05_Downloads/Foundations/Gode_Wind_12_Blaa_bjaelke_Low.pdf.
 - [73] AMBAU produces 18 monopiles and transition pieces for the Nordergründe Wind Farm, (2015). http://ambau.com/uploads/media/AMBAU_PI_002-2015_Nordergruende_en_01.pdf.
 - [74] A.G. Gonzalez-Rodriguez, Review of offshore wind farm cost components, *Energy Sustain. Dev.* 37 (2017) 10–19. doi:10.1016/j.esd.2016.12.001.
 - [75] OFFSHORE WIND FARM SANDBANK, (2016). <https://www.menck.com/news/11-news/179-offshore-wind-farm-sandbank>.
 - [76] EEW SPC produces 1st giant monopile for 402-MW Veja Mate wind park, *SeeNews Renewables*. (2016). <https://www.emis.com/php/search/doc?dcid=521022710&ebSCO=1?>
 - [77] Veja Mate Offshore Project GmbH About Us, (n.d.). <http://www.vejamate.net/#aboutus>.
 - [78] P. Passon, K. Branner, S.E. Larsen, J. Hvenekær Rasmussen, Offshore Wind Turbine Foundation Design - Selected Topics from the Perspective of a Foundation Designer, Thesis in Doctor of Philosophy, Technical University of Denmark Department of Wind Energy, 2015.
 - [79] Investor Presentation, (2015). http://northlandpower.com/cmsAssets/docs/pdfs/InvestorPresentation/NorthlandInvestorPresentation_October.pdf.
 - [80] DILLINGER, STEEL IS THE VITAL INGREDIENT - Solutions in Steel for Offshore Wind Energy Installations, (n.d.). <https://www.dillinger.de/d/downloads/download/5995>.
 - [81] Dudgeon Offshore Wind Farm - Power Technology | Energy News and Market Analysis, (n.d.). <https://www.power-technology.com/projects/dudgeon-offshore-wind-farm/#targetText=Each+turbine+has+a+rotor,weighing+between+800t-1%2C200t>.
 - [82] Year ends on a high for Galloper as foundation construction starts, (2017). <http://www.galloperwindfarm.com/year-ends-on-a-high-for-galloper-as-foundation-construction-starts/>.
 - [83] Facts & Figures, (n.d.). <http://www.galloperwindfarm.com/about/#facts-figures>.
 - [84] Race Bank Offshore Wind Farm foundation T&I and scour protection, (n.d.). <https://www.deme-group.com/geosea/references/race-bank-offshore-wind-farm-foundation-ti-and-scour-protection>.
 - [85] Steel monopile foundations | Rampion Offshore Wind, (n.d.). <https://www.rampionoffshore.com/wind-farm/components/foundations/>.
 - [86] The south coast's first offshore wind farm | Rampion Offshore Wind, (n.d.). <https://www.rampionoffshore.com/>.
 - [87] Rampion Wind Farm, (n.d.). <https://www.4coffshore.com/windfarms/rampion-united-kingdom-uk36.html>.
 - [88] Van Oord's topduo Aeolus en Svanen klaren klus Walney Extension offshore windpark - LINK, (n.d.). <https://www.linkmagazine.nl/oords-topduo-aeolus-en-svanen-klaren-klus-walney-extension-offshore-windpark/>.
 - [89] Walney Extension makes UK wind farm world's largest, (2018). <https://www.theengineer.co.uk/walney-extension-worlds-largest/>.
 - [90] Walney Extension Wind Farm, (n.d.). <https://www.4coffshore.com/windfarms/walney-extension-united-kingdom-uk63.html>.
 - [91] First monopile was loaded at the quay of the Rostock foundation manufacturer EEW SPC for the offshore wind farm Arkona, (n.d.). <https://eew-group.com/about/news/detail/eew-spc-loads-first-monopile-for-arkona/>.
 - [92] Ongoing project Arkona - 60 transition pieces and monopiles, 2017. https://www.bladt.dk/UserFiles/05_Downloads/Foundations/ONGOING_Arkona_Ongoing_verII.pdf.
 - [93] Arkona Wind Farm, (n.d.). <https://www.4coffshore.com/windfarms/arkona-germany-de46.html>.
 - [94] Rentel Offshore Wind Farm | The Project, (n.d.). <https://www.rentel.be/en>.

- [95] L.-F. Pau, Anholt Offshore Wind Farm, 2015. http://www.mega-project.eu/assets/exp/resources/Anholt_offshore_Wind_Farm.pdf.
- [96] A.H. Day, A. Babarit, A. Fontaine, Y.-P. He, M. Kraskowski, M. Murai, I. Penesis, F. Salvatore, H.-K. Shin, Hydrodynamic modelling of marine renewable energy devices: A state of the art review, *Ocean Eng.* 108 (2015) 46–69. doi:10.1016/j.oceaneng.2015.05.036.
- [97] N.J. Brookes, A megaproject case study: The Greater Gabbard Wind Farm, n.d.
- [98] London Array | Offshore Construction, (n.d.). <http://www.londonarray.com/the-project-3/offshore-construction/>.
- [99] Westermeerwind - A wind farm for and by the Polder, (n.d.). <http://www.westermeerwind.nl/en/>.
- [100] XL Monopiles, (n.d.). http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/14-15/XL_Monopiles/introduction.html.
- [101] Boskalis, Veja Mate Offshore Wind Farm Project Sheet, n.d.
- [102] Project Finance International EMEA Report: VEJA MATE SCORES A GERMAN HAT TRICK, n.d.
- [103] M. Haang, A. Drenthe, eds., *Living on Wind Gemini Wind Park, Gemini Wind Park*, n.d.
- [104] C. Tomlinson, Media release - Foundation installation completed on schedule at Rampion, (2016) 1–2. [https://www.eonenergy.com/About-eon/our-company/generation/planning-for-the-future/wind/offshore/~/_media/ContentEditors/ECR/Rampion/Public Communication Documents/1703 First turbine media release.pdf](https://www.eonenergy.com/About-eon/our-company/generation/planning-for-the-future/wind/offshore/~/_media/ContentEditors/ECR/Rampion/Public%20Communication%20Documents/1703%20First%20turbine%20media%20release.pdf).
- [105] A. Vaughan, World's largest offshore windfarm opens off Cumbrian coast, *Environ. \ Guard.* (2018). <https://www.theguardian.com/environment/2018/sep/06/worlds-largest-offshore-windfarm-opens-cumbrian-coast-walney-extension-brexite>.
- [106] World's largest offshore wind project online | Windpower Offshore, (n.d.). <https://www.windpoweroffshore.com/article/1492066/worlds-largest-offshore-wind-project-online>.
- [107] Walney Extension Offshore Wind Farm, United Kingdom - Power Technology, *Energy News Mark. Anal.* (2019). <https://www.compelo.com/energy/projects/walney-extension-offshore-wind-farm/>.
- [108] Turbine foundations up at 659-MW Walney Extension, *SeeNews Renewables.* (2017). <https://www.emis.com/php/search/doc?dcid=585276756&ebsco=1?>

DENİZ ÜSTÜ RÜZGAR TÜRBİNLERİ: TEMEL TİPİ SEÇİMİ VE DENİZ TABANI ZEMİN ARAŞTIRMALARI

Nejan Huvaj¹, Eray Caceoğlu², Yelaman Baidol³

^{1,2,3}Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

¹ODTÜ Rüzgar Enerjisi Araştırma Merkezi RÜZGEM

¹nejan@metu.edu.tr, ²eray.caceoglu@metu.edu.tr, ³yelaman.baidol@metu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada deniz üstü rüzgar türbinleri için kullanılabilen farklı temel tipleri, temel tipi seçimini etkileyen faktörler ve gereken deniz tabanı zemin araştırma çalışmaları ele alınmıştır. Dünyada farklı ülkelerde deniz üstü rüzgar türbin temelleri ile ilgili kullanılmakta olan mevcut uluslararası standartlar incelenerek özet olarak sunulmuştur. Bu bildirinin amacı deniz üstü rüzgar enerjisi ile ilgili yapılması gereken deniz tabanı saha araştırmaları ile ilgili genel bir bilgilendirme sunmaktır. Bu sunumun, ülkemizde deniz üstü rüzgar türbinleri projelerine yönelik olarak bir tartışma-paylaşım ortamı sağlayacağı da düşünülmektedir.

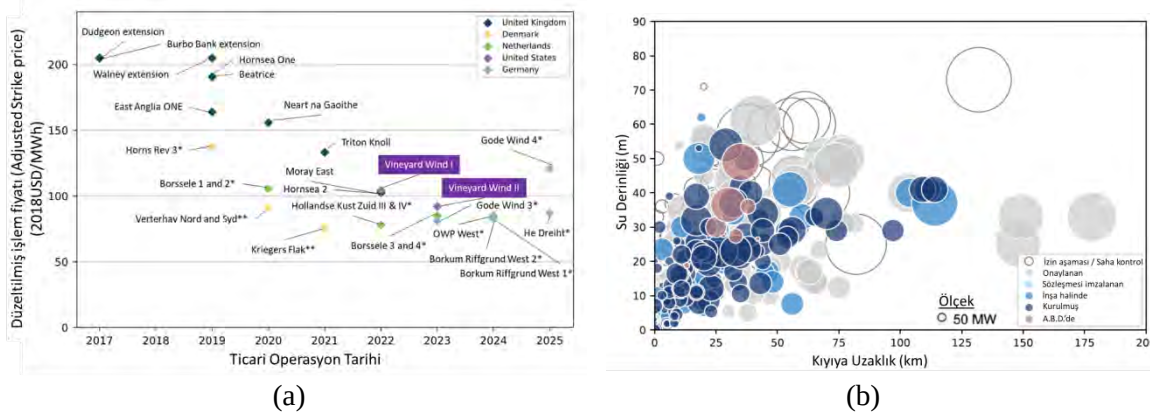
1. DENİZ ÜSTÜ RÜZGAR TÜRBİNLERİ

Deniz üstü rüzgar türbini (DRT) çiftliklerinin ilki 1991’de Danimarka’nın Vindeby kasabasında kıyından 2 km uzaklıkta ve 4 m su derinliğinde (11 adet, rotor çapı 35 m olan her biri 450 kW rüzgar türbini) yapılmış, ve bu tarihten itibaren de bu sektör özellikle Danimarka, Almanya, Birleşik Krallık, Hollanda gibi Avrupa ülkelerinde, özellikle Kuzey Denizi’ne yerleştirilen çiftlikler ile giderek büyümüştür. Bu büyümenin başlıca sebebi açık denizlerde tutarlı/devamlılık gösteren ve yüksek rüzgar hızı potansiyelinin karaya göre daha fazla olmasıdır.

2018 yıl sonu itibarıyla Avrupa’da elektrik şebeke bağlantısı yapılmış (operasyonel olan) toplam 105 adet DRT çiftliği bulunmaktadır, bunların 39 adedi (1975 adet tekil rüzgar türbini ve toplam 8183 MW kapasite) Birleşik Krallık’ta, 25 adedi (1305 adet tekil rüzgar türbini ve toplam 6380 MW) Almanya’da, 14 adedi (514 adet tekil rüzgar türbini ve toplam 1329 MW) Danimarka’dadır. Yalnızca 2018 yılında kurulumu yapılmış DRT çiftlikleri Çin’de 2652 MW, Birleşik Krallık’ta 2120 MW, Almanya’da 835 MW, Danimarka’da 28 MW’tır [1, 12]. 2018 yılı itibarıyla tüm dünyada mevcut deniz üstü rüzgar enerjisi kapasitesi ise 22592 MW’dır ve bunun 17979 MW’ı Avrupa’dadır [1, 12]. Deniz üstü rüzgar enerjisindeki güncel trendler [1, 2]’den özetlenerek aşağıda sunulmaktadır:

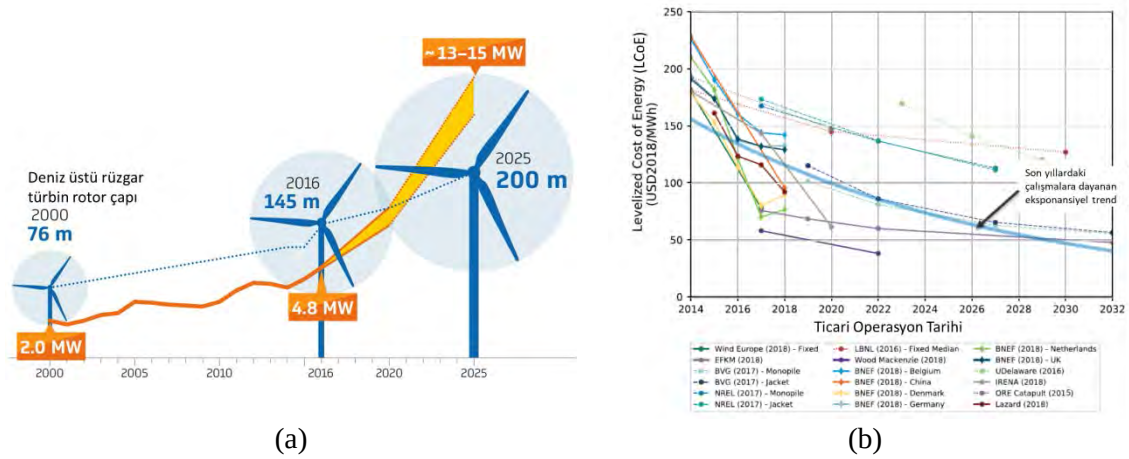
- *Deniz üstü rüzgar enerjisi yarışmalarında kazanan fiyat (strike price) yıllar içinde giderek düşmektedir* (Şekil 1a). Şekil 1a’da, uluslararası farklı projelerin rakamlarında benzerlik sağlanabilmesi için kontrat süresi, elektrik grid bağlantısı ve gelir mekanizması ile ilgili düzeltmeler yapılarak rakamlar verilmiştir [1]. 2017-2019 yıllarında operasyona giren projelerde yaklaşık \$200/MWh olan rakamın 2024-2025’te operasyona girecek projelerde \$75/MWh’ye düştüğü görülmektedir. Ayrıca Amerika’daki ilk DRT çiftliği olacak olan, Massachusetts eyaleti yakınında, karadan 15 mil uzaklıkta, ortalama 42 m su derinliğindeki (tekil kazık temel tipi olan) Vineyard Wind projesi Faz-1 ve Faz-2 de (her iki faz bittiğinde, her birinin kapasitesi 9,5 MW olan toplam kapasite 800 MW) Şekil 1a’da görülmektedir.

- *Yapılan deniz üstü rüzgar türbinlerinde deniz su derinliği yıllar içinde giderek artmaktadır* [1, 2]. 2006-2007 yıllarında operasyon halindeki DRT çiftliklerinde ortalama su derinliği 20 m civarında iken, 2017-2018 yıllarında 30 m'dir ve 2022'lerde ortalamanın 40 m olması beklenmektedir. Bu artışın sebepleri rüzgar türbini teknolojileri ve mühendisliğindeki gelişmeler, kurulum maliyetlerindeki düşüş ve yüzer temelli türbinlerin gelişmesi olarak belirtilmektedir [2]. 2018 Kasım ayında Birleşik Krallık'taki Crowne Estate ajansı, yarışmaya açtığı alanların su derinliğini 50 m'den 60 m'ye çıkarmıştır [1]. Şekil 2(b)'de deniz tabanına sabitlenmiş temel tipi olan türbinler için su derinliği ile kıyıya olan uzaklık arasındaki ilişki görülmektedir. Ayrıca yüzer temelli (floating) DRT'lerinde, Japonya'da su derinliği 120 m olan "yarı-batırılabilir (semisubmersible)" tip, Birleşik Krallık'ta 100 m ve Norveç'te ise 220 m su derinliğinde "spar" tipi yüzer temelli türbinlerin kurulumu yapılmıştır [1].



Şekil 1. (a) Düzeltilmiş işlem fiyatı USD/MWh planlanan elektrik satışı olarak, İngiltere, Danimarka, Hollanda, A.B.D. ve Almanya deniz üstü rüzgar yarışmaları rakamları (*grid bağlantı ve proje geliştirme maliyeti eklenmiş, **grid bağlantı maliyeti eklenmiş ve kontrat süresi düzeltilmesi yapılmış) [1], (b) Deniz tabanına sabitlenmiş temelleri olan DRT için su derinliği ve kıyıya uzaklık ilişkisi [1].

- *Deniz üstü rüzgar türbinlerinin rotor çapı ve güç kapasitesi giderek artmaktadır* (Şekil 2a). Şekil 2a'da görüleceği gibi 2000 yıllarında Avrupa'da yeni yerleştirilen deniz üstü rüzgar türbinlerinin ortalama nominal kapasitesi 2,0 MW iken, 2016 yılında 4,8 MW olmuştur. 2017 yılında 8 MW türbinler operasyonda olup, 9,5 MW türbin tanıtımı yapılmış, ve 2019'da 12 MW prototip mevcut olup, 2025'te ise 13-15 MW türbinlerin sektöre girmesi beklenmektedir. Ayrıca DRT çiftliklerinin büyüklüğü de artmaktadır. 1990'da Avrupa'daki bir DRT çiftliğinin toplam kapasitesi ortalama 5 MW iken, 2017'de 475 MW'dır ve 1200 MW inşaat aşamasındadır (Birleşik Krallık'ta Hornsea rüzgar çiftliği) [3].
- *Deniz üstü rüzgar çiftliklerinde LCoE azalmaktadır* (Şekil 2b). Şekil 2b'de görüleceği gibi son yıllarda yapılan çalışmalara dayanarak, deniz tabanına sabitlenmiş tipte temelleri olan rüzgar çiftliklerinin 2018 yılında \$120/MWh olan LCoE değerinin 2030 yılında \$50/MWh'ye düşeceği öngörülmektedir [3]. Yüzer tipte temelleri olan DRT çiftliklerinde ise 2018 yılında \$175/MWh olan LCoE değerinin 2030 yılında \$70/MWh'ye düşeceği öngörülmektedir. Ayrıca bir DRT yaşam döngüsü maliyet analizinde en büyük parça olan CapEx değerlerinin 2002 yıllarında \$1500/kW değerlerinden başlayarak 2014'lere kadar artış gösterdiği (2014'lerde ortalama \$5500/kW), ancak bu tarihten sonra bir düşüş gözlemlendiği ve 2018 yılında global kapasite-ağırlıklı ortalama CapEx değerinin \$4350/kW'ye geldiği rapor edilmektedir [1]. Avrupa'da 2019 yılında bir proje için CapEx değeri \$2870/kW olarak rapor edilmiştir [1].



Şekil 2. (a) Avrupa’da yeni kurulan tekil türbinlerin ortalama kurulmuş kapasitesi ve değişen rotor çapları (2025 için tahminler üreticiler ve işletmeciler tarafından yapılmıştır, veri kaynağı: WindEurope 2017, infografikler Ahnen & Enkel tarafından hazırlanmıştır) [3], (b) Dünyada deniz tabanına sabitlenmiş tipte temelleri olan DRT çiftliklerinin LcoE değerleri ve 2017-2018 yıllarında yapılmış olan çalışmalara dayanan trend [1].

- *Deniz üstü rüzgar türbinlerinde deniz ekosisteminin korunması giderek daha çok ön plana çıkmaktadır.* Çevre koruma açısından deniz üstü rüzgar türbinleri özel ve çok katı regülasyonlara uymak zorundadırlar. Kuşlar için yavrulama ve dinlenme bölgeleri olan alanlar uygun olmayan alan ilan edilmektedir. DRT temellerinin denizde imalatı (çakma-vibrasyon-delme vb) operasyonlarında düşük-gürültülü imalat sağlayan yeni teknolojiler geliştirilmektedir. Örneğin, Hollanda’da Delft Teknik Üniversitesi ve partnerlerinin yürütmekte olduğu “nazık kazık çakma (gentle driving of piles)” projesinde, memeliler ve balıklar için zarar verici seviyede olan kazık çakma gürültü seviyesinin azaltılması için düşük frekans-yüksek frekans vibratörler ile tekil kazık (monopile) çakma operasyonu üzerine çalışılmaktadır [4].

2. DENİZ ÜSTÜ RÜZGAR TÜRBİNLERİ İÇİN GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ VE TEMEL ÇEŞİTLERİ

DRT yatırım maliyetleri kıyıya yakın ve sığ sulardaki bir türbin sahası için 2009 yılındaki rakamlara göre ortalama 2,0-2,2 milyon €/MW mertebelerinde olabilmektedir [5]. Toplam yatırım maliyeti içinde türbin temelini maliyetteki payına örnek vermek açısından Danimarka’daki en büyük 2 DRT sahası (Horns Rev (80 adet 2 MW türbin, tekil kazık temelli) ve Nysted (72 adet 2,3 MW türbin, ağırlık tipi temelli)) incelenebilir. 2009’daki rakamlara göre her iki projede, temellerin toplam maliyet içindeki payı ortalama olarak %21’dir [5], karadaki bir türbin için ise temelin maliyeti tüm maliyet içinde yaklaşık %5-9’dur. Diğer kalemlerden olan, türbin, ve ulaşım ve kurulumu %49’unu, denizde ara istasyon (trafo) ve kablolar maliyeti (deniz içinde DRT’leri ve ara istasyonu birbirine bağlayan kablolar, ara istasyonun kendisi ve burada toplanan elektriğin karaya iletimini sağlayan kablolar) ise %16’sını oluşturmaktadır [5]. Bu göstermektedir ki, DRT projelerinde türbin temeli en yüksek maliyeti olan kalemlerden biridir ve rüzgar çiftliğini “rekabetçi maliyetli (cost-competitive)” yapmada en önemli rollerden birine sahiptir.

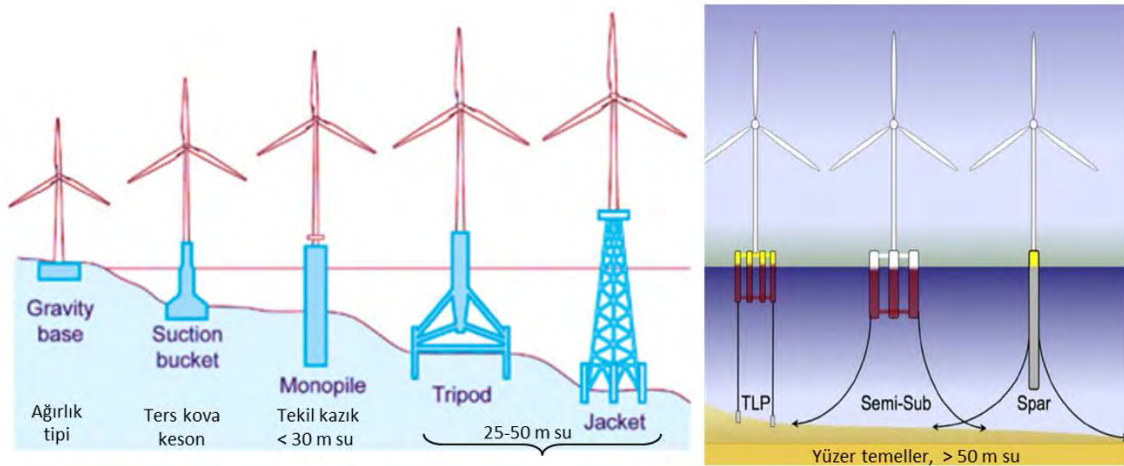
Hızlı gelişen DRT sektörü, aynı zamanda geoteknik mühendisleri için de ilgi çekici bir iş sahası oluşturmaktadır. Ancak, deniz zemini ile ilgili çalışmalarda bazı zorluklarla karşılaşlabilmektedir [6]:

- Zemin etütleri genellikle özel gemilerin kullanımını gerektirdiği için yüksek maliyetlidir.
- Zemin koşulları, yüksek karbonat içeriği, gaz içeriği, örselenmemiş numune alımında gereken hassas ve özel yöntemler, deniz tabanı doğal afet problemleri, sağlam (rijit) tabaka altında zayıf (yumuşak) tabakada zımbalama göçmesi (punch through) problemi vb gibi nadir rastlanan durumlar gösterebilir.
- Yapıya uygulanan yükler yüksek oranda çevresel kaynaklı ve tekrarlı yüklerdir. Ayrıca, bu kuvvetler 120 MN·m gibi yüksek momentlere neden olabilmektedir [7].
- Karadaki projelerden farklı olarak, inşaat esnasında karşılaşılan beklenmedik bir durum için tasarımda değişiklik yapılması genellikle mümkün değildir, veya çok zordur.

Bu bölümde DRT'lerinde kullanılan temel tipleri hakkında genel bilgi verilecek ve gerekli deniz tabanı zemin çalışmaları ile ilgili özet bilgiler sunulacaktır.

DRT tasarımında kullanılan IEC 61400-3 kodlu standart [8], temel tasarımı için ISO 19900 standardını [9] (petrol ve doğal gaz endüstrisinin ihtiyaçlarına göre hazırlanmış bir standarttır) referans gösterse de bunun dışındaki şartnamelerin de kullanımına izin vermektedir [8, 9].

DRT'lerinde kullanılmakta olan temeller 4 gruba ayrılmaktadır. Bunlar: (1) Kazıklı temeller (tekil kazıklı, grup kazıklı, jacket (kafesli sistemli kazıklı temel)), (2) Ağırlık tipi temeller, (3) Vakumlu kova keson tip temeller, (4) Yüzer tip temeller'dir. Temel tipi seçimini genel olarak su derinliği, arazi koşulları, türbin çeşitleri, rüzgar hızı, dalga yüksekliği, vb. faktörler etkilemektedir. Şekil 3'te farklı temel tipleri ve kullanıldıkları su derinlikleri gösterilmektedir [10, 11].



Şekil 3. DRT'lerinde kullanılan temel tipleri ve kullanıldıkları yaklaşık su derinlikleri [10, 11]

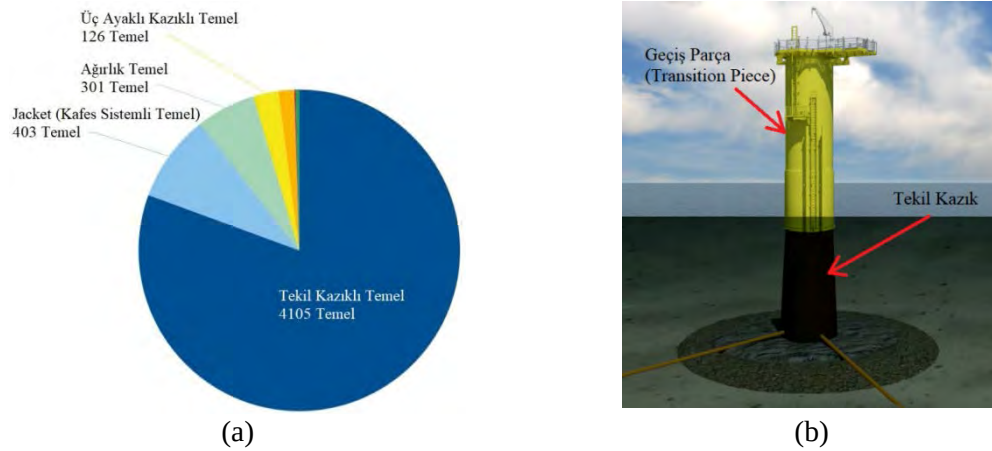
2.1. KAZIKLI TEMELLER

Çekme ve sıkışma yüklerini temelden deniz tabanı zeminine aktaran kazıklı temeller DRT'lerinde en yaygın olarak kullanılan temel tipidir (Şekil 3, Şekil 4). 2018 yılında kurulumu yapılan deniz üstü rüzgar türbinlerinde temellerin %75'ini tekil kazıklar, %25'ini ise jacket'lar oluşturmuştur [6, 7, 12]. Kazıklı temeller, büyük çaplı çelik borular kullanılarak inşa edilmesi kolay olmasının yanı sıra, diğer temel tiplerine göre daha ekonomik olabilmektedir. Bu tip temeller deniz tabanına çakılarak, foraj yapılarak veya vibrasyon yöntemi ile yerleştirilmektedir.

Yerleştirme derinliği (tekil kazık uzunluğu) genellikle çevresel ve zemin şartlarına göre 5 ila 120 m arasında değişmektedir, kazık çapı ise 2 m ila 8 m veya daha fazla olabilmektedir [6, 7, 12].

2.1.1. TEKİL KAZIKLI TEMELLER

Tekil kazıklı temellerde genellikle aerodinamik ve hidrodinamik yükler yapı üzerinden kazığa kesme kuvveti ve eğilme momenti olarak transfer edilerek deniz tabanındaki zemine yanal yük olarak aktarılmaktadır. Bu tip temellerde türbin kulelerinin, geçiş parçaları (Şekil 4b) (geçiş parçaları temel borularına konularak boruların deniz tabanına çakılırken borularda dönel ve dikeylik hataları oluşmasını engeller) kullanılarak temele kolayca bağlanabilmesinin yanı sıra dalga, akım ve buz yüklerinin tasarımının ve analizinin açık bir biçimde yapılabilmesi bu tip temellerin yaygınlığının nedenleri arasında sayılabilir. Tekil kazıklı temellerin diğer bazı avantajları: (1) deniz tabanında asgari hazırlık gerektirmesi, (2) Deniz tabanındaki deformasyon ve oyulmalara veya buz akımına karşı dayanıklı olması, (3) Boruların üretiminin nispeten ucuz olması, (4) Sınırlı zemin alanının kullanılmasıdır (rüzgar çiftliği için ekolojiktir) [14]. Tekil kazıklı temellerin ana dezavantajları ise çakılarak yerleştirildiği zaman çevre ve canlılar açısından sorunlar yaşanması [4, 14]; belli su derinliklerine kadar uygulanabilir/ekonomik olması; çok derin deniz tabanına yerleştirilmesini gerektiren durumlarda uygulaması çok pahalı ve yerleştirme sırasında burkulma olasılığı bulunmasıdır [14]. Tekil kazıklı temeller ayrıca yanal destekler (strut) ile desteklenebilirler. Standart tekil kazıklar 30 m su derinliğine kadar kullanılmaktadır. Desteklenmişleri ise 30-40 m su derinliklerine uygun görülmektedirler. Genellikle desteklenmiş tekil kazıklı temellerin homojen olmayan zeminlerde kullanılması daha uygun olmaktadır.



Şekil 4. (a) 2018 yılı sonu itibariyle elektrik şebekesine bağlanmış (operasyonel) olan DRT'lerinde kullanılan temel tiplerinin paylaşımı (Kaynak: WindEurope Offshore Wind in Europe), (b) Bir tekil kazık ve geçiş parçası

2.1.2. GRUP KAZIKLI TEMELLER

Grup kazıklı temeller genellikle üç (tripod) veya dört ayaklıdır, ve 25 ve 50 m arası su derinliklerinde tercih edilmektedirler. Bu günlerde üç ayaklı kazıklı temeller kullanılmaktadır. Üç ayaklı kazıklı temeller tekil çelik boru, destekler ve çelik ayaklardan oluşmaktadır (Şekil 3). Jacket ve tekil kazıklı temellerin avantajlarından faydalanmak için bu tip temeller kullanılmaktadır. Türbin kulesinden gelen yük tekil çelik borudan transfer edilerek temel ayaklarına aktarılır. Üç ayaklı kazıklı temelleri kullanmanın en önemli avantajlarının biri bu tip temellerin ekstrem dalga durumlarındaki deniz geçiş bölgelerinde (transitional water regions) iyi bir opsiyon olmasıdır [15]. En büyük dezavantajları ise yerleştirilmesinin pahalı ve buz akımına karşı düşük dayanıklı olmasıdır (ince temel elemanları kullanılırsa) [16].

2.2. JACKET (KAFESLİ SİSTEMLİ KAZIKLI TEMELLER)

Kafes sistemli temeller yapının stabilitesi için deniz tabanına çakılarak yerleştirilen kazıklar üzerinde kurulmaktadır (Şekil 3). Kafes sistemli kazıklı temeller genellikle 25-50 m su derinliklerinde kullanılmaktadır. Bu temelleri çelik kazıklar, kafes sistemi ve geçiş elemanları oluşturur [13]. Kafes sistemli temellerin rijit olması sayesinde ekstrem koşullarda kullanılması uygun bulunmaktadır [16]. Tekil kazık (monopile) sistemindeki kazıklara kıyasla, kafes sisteminde kullanılan kazıklar daha ince-uzun ve daha küçük çaplıdır. Bunun yanı sıra bu tip temellerin en önemli avantajlarından biri ise tekil kazıklı temele göre zemin şartlarına daha az hassas olmasıdır. Bu temellerin kompleks yapımından dolayı üretiminin daha pahalı olması kafes sistemli temellerin dezavantajı olarak sayılabilir [13, 16] .

2.3. AĞIRLIK TEMELLER

Ağırlık temeller betonarme veya balast malzemeye doldurulmuş çelik keson kullanılarak yapılmaktadır. Bu temellerin şekli genelde dairesel (Şekil 3) olmasına rağmen inşa edilmesini kolaylaştırmak için kare kesitli de yapılmaktadır [16]. Rüzgar ve dalga yüklerine karşı kendi öz ağırlığıyla dayanıklılık gösterebilmektedir. Ağırlık temeller genellikle oturma ve taşıma gücü dağılımından dolayı homojen zemin için uygun görülmesine rağmen neredeyse 0'dan 25 m'ye kadar su derinliklerinde bulunan bütün zeminlerde kullanılmaktadır. Bu tip temellerde çekme yükünden kaçınılması gerektiğinden dolayı yeterli öz ağırlık sağlayarak tasarımı yapılmaktadır [16]. Ağırlık temellerin inşa edilmesi (üretilmesi) tekil kazıklı temellere göre daha ucuz olabilmektedir. Fakat ağır yük taşıma teknelerinin kullanılması ve deniz tabanı hazırlıklarının yapılması gerekliliğinden dolayı bu tip temellerin yerleştirilmesi daha yüksek maliyetli olduğu görülmektedir. Bu temellerin önemli avantajlarından biri tamamen veya kısmen tamamlanmış olarak kolayca taşınabilmesidir [16].

2.4. VAKUMLU KOVA KESON TİP TEMELLER

Kova keson temeller (Şekil 3) ağırlık temeller ile şekil ve boyut olarak aynıdır. Ancak yerleştirilme metodu diğer temellerden ayıran özelliğidir. Yüksek su derinlikleri için kova keson çapları 12 – 15 m'ye kadar olabilmektedir. Kova kesonlar üç ayaklı temellerde kazıklar yerine de kullanılabilmektedir. Bu tip temellerin tasarımında tekil kova keson temellerde devrilme momenti kritik olarak görülmektedir. Çoklu kova keson temellerde ise çekme yüküne karşı dayanımına göre tasarlanmaktadır [16]. Kova keson tip temellerin özel bir yerleştirme yöntemi vardır. Kovanın açık olan alt ucu deniz tabanı zemin hizasına getirilir, kova içindeki su pompalanarak çıkarılır, ve bunun sayesinde bastırıcı güç veya emiş gücü oluşturularak kova deniz zemini içine bastırılır [7]. Killi zeminlerde keson içiyle dışı arasında oluşan basınç farklılığından dolayı kova keson deniz dibine oturmaktadır. Kumlu zeminlerde ise kovanın çevresindeki zeminlerde hidrolik eğim (gradyan) oluşmasından dolayı kova ucundaki zemin mukavemeti azalır, ve kovanın kolayca deniz dibine oturmasını sağlar. Bu durum sıkı kumlu zeminlerde bile görülmektedir [13]. Bu tip temellerin en önemli avantajları: yüksek su derinliklerinde de kullanılabilmesi, basit üretimi ve kolay taşınabilir olması, ucuz kurulumu olması, düşük maliyetli olması ve kova yanları (etek, skirt) sayesinde yanal dayanımının yüksek olmasıdır. Dünyadaki örneklerinden birkaçı: 2014 yılında Almanya'da, Borkum Riffgrund 1 DRT sahasında, 25 m su derinliğinde, kova çapı 8 m, kova etek yüksekliği 8 m olan, kum zeminde yapılan, 3,6 MW türbinler, ve 2013 yılında Birleşik Krallık'taki Dogger Bank DRT sahasında, 18 m su derinliğinde, kova çapı 14 m, kova etek yüksekliği 8 m olan türbinlerdir.

2.5. YÜZER TİP TEMELLER

Su derinliği yükseldikçe (> 50 m) çelik tekil kazık vb diğer temeller ekonomik açıdan fizibil olmaktan çıkmakta ve yüzer tip temellerin daha fizibil olduğu görülmektedir [13]. Yüzer tip temellerin kurulmasının kolay olması, ve kurulum sırasında deniz tabanına, çevreye çok zarar

vermemesi bu tip temellerin önemli avantajlarından sayılabilir [17]. Yüzer tip temeller, statik dengenin sağlanması için kullanılan yöntemlere göre üçe bölünmektedir: (1) Balast yüklerin türbin kulesinin altına bağlanarak türbinin dengesinin sağlandığı “Balast ile stabilize edilenler (Spar-Buoy)”, (2) Çelik halatlar kullanılarak türbin platformunun dengede tutulduğu “Mooring Line Stabilised (Tension Leg Platform)”, (3) Dağıtılmış kaldırma kuvveti vasıtasıyla dengede tutulan “Buoyancy Stabilised” olanlar [17, 13].

3. DENİZ ÜSTÜ RÜZGAR TÜRBİNLERİ İÇİN DENİZ TABANI ZEMİN ÇALIŞMALARI

DRT ile ilgili dünyada mevcut olan tasarım şartnameleri: Norveç DNV şartnameleri başta olmak üzere; International Electrotechnical Commission (IEC)’nin IEC 61400-1 “Design Requirements” (2005) ve IEC 61400-3 “Offshore wind turbines” (2009); Almanya Germanischer Lloyd (GL)’nin “Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines” (2005); Almanya Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)’nin “Standard: Design of Offshore Wind Turbine Structures (2015)”, ve “Standard for Geotechnical Site and Route Surveys (2014)”; A.B.D.’nin American Bureau of Shipping, ABS #176 “Bottom-fixed wind turbines (Deniz tabanına sabitlenmiş temeli olan DRT)” ve ABS #195 “Floating wind turbines (Yüzer temelli DRT)”; Japonya Nippon Kokan Koji (NKK)’nin “Floating wind turbine structures (Yüzer DRT’ler)”; Danimarka’nın Danimarka Enerji Ajansı (Danish Energy Agency, DEA)’nin “Recommendation for technical approval of offshore wind turbines (2001)”dır. Dünya çapında DRT proje süreçlerinde yürütülen deniz tabanı saha araştırmaları için hazırlanmış şartnameler ise Tablo 1’de verilmiştir. Bu çalışmada dünyada en yaygın olarak tercih edilen şartname olan DNVGL-RP-C212 standardı ile bu standardın detaylar için referans gösterdiği ISSMGE (2005) ele alınacaktır [18, 19].

Tablo 1. Deniz tabanı zemin etüdü şartnameleri

Şartname Adı	Ülke	Yıl
ISO 19905-1: Petroleum and natural gas industries - Site specific assessment of mobile offshore units - Part 1: Jack-ups	İsviçre	2012
API 2000: Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design	-	2000
DNVGL-RP-C212: Offshore soil mechanics and geotechnical engineering	Norveç	2017
DNVGL-ST-0126: Support structures for wind turbines	Norveç	2018
DNV-OS-J101: Design of Offshore Wind Turbine Structures	Norveç	2014
BSH No-7004: Standard Ground Investigations - Minimum requirements for geotechnical surveys and investigations into offshore wind energy structures, offshore stations and power cables	Almanya	2014
ISSMGE TC1: Geotechnical and Geophysical Investigations for Offshore and Nearshore Developments	Birleşik Krallık	2005
DS 472: Forudsætninger for vindmøllekonstruktioner I Danmark	Danimarka	2007

3.1. DNVGL-RP-C212’YE GÖRE ZEMİN ETÜDÜ

3.1.1. AMAÇ, KAPSAM VE PLANLAMA

Zemin etüdü, detaylı geoteknik tasarımı yapılacak olan temel için gerekli bütün zemin bilgilerini sağlamalıdır. Zemin etüdü süreci jeolojik çalışmalar, jeofizik incelemeler ve geoteknik araştırmalar olmak üzere üçe bölünebilir. Jeolojik çalışmalar, geoteknik araştırmalarda kullanılacak yöntemlerin seçiminde faydalı olabilir. Jeofizik incelemeler ise

geoteknik araştırmalar esnasında açılacak sondajların sayısı ve konumlarını belirlerken faydalı olacaktır. Geoteknik araştırmalar hem saha deneylerini hem de laboratuvar çalışmaları için gereken zemin örneklerinin alınmasını içerir.

Zemin etüdünün kapsamı ve yöntemi; inşa edilecek olan yapının tipi, büyüklüğü ve önemi ile zemin ve deniz tabanı koşulları dikkate alınarak belirlenmelidir. Sondajlar arasındaki mesafe ve sondaj derinliği, temel tasarımı ve imalatı için önemli olabilecek bütün katmanların yanal ve düşey değişimlerini belirleyecek şekilde seçilmelidir. DRT çiftliklerinde olduğu gibi birden fazla temel gerektiren durumlarda, zemin katmanları ve zemin taşıma gerilmeleri her bir temel veya temel grubu için uygun olarak belirlenmelidir. Zemin etüdü, olası zayıf oluşumların yapı ve temelin güvenliği ve performansını etkilemeyeceği bir derinliğe kadar gerekli bilgileri sağlamalıdır. Zemin etüdü, yapı ve temelin etkileyebilecek doğal afet (örneğin deniz tabanı heyelanları, deprem fay hatları ve çamur volkanları) risklerinin araştırılması için de gereklidir.

Zemin etüdünün erken aşamalarında, toplanan bilgiler planlanan yapının fizibilitesini göstermeli ve aynı zamanda proje için en uygun bölgenin belirlenmesine olanak sağlamalıdır. Son aşamalarda ise, detaylı bir temel tasarımı için gerekli olan tüm bilgiler kapsamlı şekilde sağlanmalıdır. Yapılacak işlemlerin sıralaması aşağıdaki gibi olmalıdır.

- Varsa, bölgesel mevcut jeolojik, jeofizik ve geoteknik bilgiler ile mevcut temellerin performans bilgilerinin toplanması
- Jeofizik incelemelerin deniz tabanı batimetrisi ve incelemeleri ile deniz tabanı altı profillerini içerecek şekilde yapılması
- Geoteknik saha araştırmalarının ön tasarımlara göre yapılması
- Yapı ve temelin yeri ve tipi belirlendikten sonra, belirlenen yerde, detaylı geoteknik araştırmalar ile topoğrafik haritalama ve deniz tabanı zemin araştırmalarının yapılması

3.1.2. JEOFİZİK ZEMİN İNCELEMELERİ VE GEOTEKNİK ARAŞTIRMALAR

Geoteknik araştırmaların optimize edilmesi için, jeofizik incelemeler geoteknik araştırmalardan önce yapılmalıdır. Jeofizik incelemeler, temeli etkileyebilecek deniz tabanı özelliklerini içerecek şekilde batimetrisinin belirlenmesi için gereklidir. Jeolojik riskler araştırılmalı ve haritalanmalıdır. Jeofizik zemin incelemeleri deniz tabanı altı katmanları içermelidir. Erozyon kanalları gibi deniz tabanı altı oluşumlar da haritalanmalıdır.

Geoteknik araştırmaların kapsamı (örneğin sondaj derinliği ve sayısı, arazi deneyleri ile laboratuvarda yapılacak deneylerin çeşidi ve sayısı) seçilen temel tipinin tasarımı için gerekli bütün bilgileri sağlayacak şekilde olmalıdır. Araştırmalar, yapının neden olduğu yüklemekten etkilenen bütün zemin hacmini kapsamak zorundadır. Bu hacim, yükler ile temel boyutları ve tipine göre değişir. Geoteknik araştırmaların planlanması ve uygulanması ile ilgili daha detaylı bilgi ISSMGE (2005)'de verilmiştir. Sondaj sayısı ve saha deneylerinin uygulanacağı lokasyonlar, zemin şartlarının değişkenliği hesaba katılarak belirlenmelidir. Zemin katmanlarının kalınlıklarının ve derinliklerinin büyük farklılıklar gösterdiği veya yüksek değişkenlik göstere zemin özellikleri bulunduğu durumlarda, daha fazla sondaj ve deney uygulanması gerekebilir. Bütün sondajlarda, sürekli numune elde edilmesi hedeflenmelidir.

3.1.3. ZEMİN ÖZELLİKLERİ İLE İLGİLİ BİLGİ

Deniz tabanı zeminleri ile ilgili bilgi, doğrudan ölçülerek veya fiziksel ya da deneysel ilişkiler kullanılarak bulunabilir ve en az şunlardan oluşur: zemin tanımlamaları, zeminin doğal birim hacim ağırlığı, zemin danelerinin özgül ağırlığı, doğal su içeriği, boşluk oranı, dane büyüklüğü

dağılımı (granülometri eğrisi), karbonatlı ve organik içerik yüzdesi, plastik ve likit limitler ile plastisite ve likidite indeksleri, Kumlu zeminlerde minimum ve maksimum boşluk oranları ile görelî sıklık (tercihen piezokoni penetrasyon deneyi (PCPT) korelasyonları ile), ilave boşluk suyu basıncı, ön konsolidasyon basıncı ve ön konsolidasyon oranı, geçirgenlik (permeabilite), kayma dalga hızı. Temel tasarımı için gerekli olan zemin kesme mukavemeti parametreleri şunları içermelidir:

- Kum katmanları için, üç eksenli basınç veya basit kesme deneyi gibi testler sonucunda elde edilen içsel sürtünme açısı (testlerde saha koşullarındaki görelî yoğunluk ve tasarımın yaratacağı gerilme büyüklükleri esas alınmalıdır.)
- Kil katmanları için, konsolidasyonsuz drenajsız (UU), izotropik veya anizotropik olarak konsolide edilmiş konsolidasyonlu drenajsız (CU) üç eksenli basınç deneyleri, konsolidasyonlu basit kesme deneyi (DSS) gibi testlerle elde edilen drenajsız kesme mukavemeti (hem örselenmemiş (pik), hem de yoğrulmuş mukavemet değerleri elde edilmelidir).

Zeminin yapıyla olan statik ve dinamik etkileşiminin analizi ile temeldeki oturma ve deplasmanların hesaplanabilmesi için deformasyon parametreleri gereklidir. Bu parametreler şunları içerir:

- Kayma dalga hızı kullanılarak hesaplanan küçük gerinimlerde kayma modülü, G_{max}
- Kayma modülünün gerinime bağlı azalış fonksiyonu
- Zeminin sönümleme oranının gerinime bağlı fonksiyonu
- Konsolidasyon parametreleri, örneğin sıkışma indisi, konsolidasyon katsayısı

PCPT, T-bar veya top penetrasyon deneyleri gibi saha deneyleri, belirli sayıda numune alınarak yapılan laboratuvar deneylerine kıyasla, derinlik boyunca daha sürekli zemin profilleri elde edilmesini sağlayabilir. Bu yüzden, zemin etütlerinde saha deneylerinin kullanılması önerilir. Kumlarda, görelî sıklık (relative density) tahminlerinin güvenilir şekilde yapılabilmesi için PCPT yapılması gereklidir. Killerde, PCPT ve T-bar testleri dolaylı olarak drenajsız kesme mukavemeti-derinlik profilleri sağlar ve kimi zaman belirli sayıda numune alınması ve laboratuvar deneyleri ile tespit edilemeyebilecek lokal zayıf tabakaların belirlenmesine yardımcı olabilir. Saha deneyleri kullanılarak mukavemet değerleri laboratuvar deneyleri ile ilişkisi baz alınarak tahmin edilir. Bu ilişki, laboratuvar deneyleri ile elde edilen sonuçlar ile kalibre edilmelidir. Özellikle sığ derinliklerdeki zemin-boru-kablo etkileşimi için sığ derinliklerdeki zeminde T-bar deneyi tercih edilebilmektedir. Presiyometre ve dilatometre deneyleri tekil kazıklı temellerde yanal zemin dayanımları açısından faydalı veriler sağlarlar.

Laboratuvar test programı, detaylı temel tasarımı için yeterli verileri sağlayacak şekilde, zeminin mukavemet ve deformasyon özelliklerini belirlemek üzere değişik deney çeşitleri ve yeterli sayıda numune içermelidir. Kum ve kil gibi zeminlerde, basit kesme (DSS) ve üç eksenli basınç deneyleri mukavemet parametrelerini belirlemek için uygun test çeşitleridir. Tasarımları dalga yükü tarafından kontrol edilen temellerin stabilite analizi, kapasite tahmini ve rijitlik değerlendirmeleri için, tekrarlı yükler altında drenajsız deneyler (çevrimsel DSS, çevrimsel üç eksenli basınç deneyleri) yapılmalıdır.

3.1.4. KAZIKLI TEMELLERDE ZEMİN ETÜDÜ

DNVGL-RP-C212 şartnamesinde bütün farklı temel çeşitleri için gereken zemin etüdü şartları belirtilmiş olmasına rağmen, bu bildirimizde en çok tercih edilen temel çeşidi olduğu için yalnızca tekil kazıklı temellerle ilgili zemin etüdlerine yer verilecektir.

Kazıklı temellerde, öngörülen kazık penetrasyon derinliğinin altına uzanan derin sondajlar yapılmalı, PCPT uygulanmalı ve zemin örnekleri alınmalıdır. Tekil kazık eksenel yük taşıma kapasitesi, kazık uzunluğu boyunca (özellikle kazığın alt yarısında, derinlerde yer alan) bütün zemin tabakalarının kayma mukavemetinden etkilenir. Eğer tasarımda kazık alt ucunun girdiği (örneğin sıkı kum gibi) bir tabakadan yüksek uç direnci sağlanacağı öngörülüyorsa, özellikle bu tabakanın dayanım özellikleri ve tabaka üst sınırı (üst kotu), tabakanın kalınlığı ve bunların yanal devamlılığı doğru bir şekilde belirlenmelidir. Kumlu zeminlerdeki saha araştırmalarında, özellikle derinlikle yüksek devamlılık oranı olacak şekilde PCPT deneylerinin sağlıklı bir şekilde yapılmasına önem ve öncelik verilmelidir. PCPT deneyinde çok sıkı kumların yüksek dayanımını ölçebilecek şekilde, en az 100 MPa uç direnci ölçebilen, PCPT sistemi kullanılmalıdır. Killi zeminlerde yapılan saha araştırmalarında ise, numune alımı ve laboratuvar deneyleri daha önemli olup, olabildiğince fazla sayıda laboratuvar deneyi yapılabilecek şekilde numuneler alınmasına önem ve öncelik verilmelidir.

Jacket türü temellerde kullanılan uzun-ince kazıklarda, kazık yanal yük taşıma kapasitesine deniz tabanından itibaren $10 \times$ kazık çapı derinliğe kadar olan yüzeye yakın zeminler etki edeceğinden, bu sığ zemin birimlerinden örnekler alınması ve laboratuvar deneyleri yapılması önem arz etmektedir. Bu numuneler bir kaç adet derin sondajda elde edilebileceği gibi, derin ve sığ sondajlar birbirini komplemente edecek şekilde birkaç adet sığ sondaj yapılarak numune alınması da düşünülebilir. Kazıklı temellerin yanal yüklere karşı tasarımında, hem PCPT gibi arazi deneyleri hem de numune alınarak laboratuvar deneyleri, birlikte, yeterli derinliğe kadar yapılmalıdır. Jacket'lardaki uzun-ince kazıklardan farklı olarak, büyük çaplı tekil kazık temellerin tasarımı için, gereken araştırma derinliğinin, öngörülen maksimum kazık penetrasyon derinliğinden kazık yarıçapı kadar daha derin olması yeterlidir.

Eksenel yüklere karşı kazıklı temel tasarımı için, en az bir CPT ve yakınında numune almak için bir sondaj uygulanmalıdır. Ancak, bu 1 CPT ve 1 numune alınan sondaj önerisi, deniz üstü petrol ve gaz endüstrisi uygulamalarındaki jacket temeller ile DRT çiftliklerinde deniz tabanındaki ara istasyon (trafo) içindir; DRT jacket temeller için genelde her ikisi yapılmaz. Araştırma derinliği, öngörülen kazık penetrasyon derinliğine ek olarak bir etki derinliğini içermelidir. Etki derinliği zemindeki tabakalara bağlıdır ve olası bir zımbalama göçmesi (punch through) ihtimalini saf dışı bırakacak bir derinliğe kadar ulaşmalıdır. Eğer zımbalama göçmesi ile ilgili daha detaylı hesaplamalar yapılmamış ise, bu derinlik, kazığın ucundan üç-dört kazık çapı kadar aşağıya kadar alınmalıdır. Belirli bir zemin tabakasından kazık uç direnci açısından yararlanılabileceği durumlarda, bu tabakanın özellikleri ve tabakanın üst sınırının (kotunun) yatay düzlemdeki değişkenliğine karar verebilmek için daha geniş bir kapsam gerekebilir.

Tipik bir jacket temel için yapılacak olan zemin araştırmalarında, jacket'in her bir ayağının bulunacağı yerde bir derin sondaj yapılır (bu sondajlar, ayakların birinin bulunduğu yerde PCPT, diğer ayağın bulunduğu yerde ise numune alınarak sondaj yapılacak şekilde planlanabilir). Çok sayıda türbin bulunan DRT çiftliklerinde, her bir jacket'in yapılacağı lokasyonda, jacket'ın ayaklarının orta noktasında tek bir derin sondaj da yapılabilir. Eğer alanda önceden yapılmış geoteknik çalışma ve sondaj bilgileri mevcut ise, veya güvenilir jeofizik çalışmalar yapılmış ise ve sahanın jeolojisi ile ilgili bilgiler bu sahada üniform zemin koşulları bulunacağını öngörebiliyorsa, daha az sayıda sondaj da yeterli görülebilir.

3.2. ISSMGE (2005)'YE GÖRE ZEMİN ETÜDÜ

3.2.1. GİRİŞ, PLANLAMA ve BÜRO ÇALIŞMALARI

DRT projelerinde doğru temel tipi seçimi ve seçilen temelin doğru tasarlanmasını ve boyutlandırılmasını sağlayacak şekilde, elde edilmesi gereken bilgiler aşağıdaki bilgileri içerir:

- Deniz tabanı topoğrafyası ve morfolojisi (örneğin kaya mostraları vb)
- Zemin ve kaya birimlerinin tanımlanması, kalınlıkları, tabakalanmaları ve yatay ve düşey yönlerde devamlılığı/değişkenliği
- Dinamik (tekrarlı) yükler, yükleme hızı, zeminin hassasiyeti gibi faktörlerin etkileri
- Deniz dibinde oyulma ihtimali
- Deniz tabanı şev stabilitesi
- Sahadaki deprem tehlike değerlendirmesi
- Sığ gazlar ve hidratlar

Gerekli bilgilerin niceliği verilen şu faktörlere bağlıdır:

- Planlanan yapının türü
- Öngörülen inşaat/kurulum yöntemi
- Su derinliği
- Hali hazırda var olan bölgesel bilgiler
- Proje aşamaları (fizibilite çalışması veya nihai tasarım gibi)
- Temele binen yük çeşitleri
- İnsan ve çevreye olan kabul edilebilir risk

ISSMGE planlama aşamalarını büro çalışmaları, topoğrafik ve jeofizik incelemeler ve geoteknik araştırmalar ve laboratuvar çalışmaları olarak üç aşamada inceler. Geoteknik tasarım ve bununla ilgili gereken saha araştırmaları yapının fonksiyonuna ve genel tasarım konseptine, çevresel yüklere (dalga yüklerinin büyüklüğü ve periyodu, dalga yükleri kompozisyonu, bölgedeki akımlar, buz kütlelerinin yol açacağı yükler, sahada olası deprem yükleri) bağlıdır. Bu aşamada projenin hem tasarımı hem imalatını, pratik ve lojistik olarak etkileyebilecek bütün konular düşünülmelidir.

Büro çalışmaları esnasında uygun bilgiler içeren bütün kaynakların taranması, toplanması ve elde edilen bilgilerin değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu bilgilere örnek olarak şunlar verilebilir:

- Deniz tabanı batimetrisi
- Deniz tabanı jeolojisi
- Sismik aktivite kayıtları
- Var olan geoteknik bilgiler
- Bölgede varsa geçmişte yapılmış temeller ile ilgili bilgiler
- Dalga, akım ve rüzgar verilerini içeren meteorolojik ve oşinografik (metocean) bilgiler

Deniz tabanı kablo güzergahları, deniz tabanından çıkarılacak kum kaynak alanları gibi bazı çalışmalar, teknik olmayan ekstra bilgiler toplanmasını da içerebilir (örneğin gemi trafiği yoğunluğu, çevre koruma bölgeleri, balıkçılık, askeri faaliyetler, batık gemi-arkeolojik kalıntı, izinler vb).

3.2.4. JEOFİZİK ZEMİN İNCELEMELERİ

Şartnamenin bu kısmındaki esaslar DNVGL-RP-C212 ile aynı olmakla beraber, ISSMGE (2005) şartnamesi araştırma yöntemleri ile ilgili daha detaylı bilgi sunmaktadır.

- Deniz tabanı batimetrisi ve topoğrafyası için: echosounding, swath echosounding
- Deniz tabanı özellikleri ve engeller için: sidescan sonar, deniz tabanındaki mevcut boru, kablo, metalik atık, askeri cihaz-mühimmat vb metalik objeleri tespit etmek için magnetometre,
- Deniz tabanı jeolojik bilgiler için: sismik yansıma yöntemi (akustik enerjinin, sesin, deniz tabanından veya jeolojik oluşumlardan yansıması esası kullanılır, deniz tabanından 50 m derinlikler ile ilgili bilgi verebilir, bu yöntem ile jeolojik oluşumlar arasındaki sınırlar belirlenmesine rağmen daha çok nitel sonuçların elde edileceği ve sondaj ve numuneler kullanılarak bu sonuçları bütünleyici geoteknik değerlendirmeler yapılması gerekir), yüksek çözünürlüklü sismik kırılma yöntemi (özellikle deniz tabanından ilk 3 m derinlikle ilgili detaylı bilgi edinmek için uygulanır), elektrik öz direnç/rezistivite yöntemi (kil-kum gibi farklı tabakaların birbirinden ayırd edilmesini sağlamaz, ancak genel olarak ciddi oranda rijitlik-sertlik farkı olan tabaka sınırlarını (örneğin zemin-kaya) tespit etmede tercih edilir. Elektrik enerjisi kullanılarak deniz tabanı yakınındaki zeminin öz direncinin ölçülmesi esasına dayanır. Bunun için çok elektrotlu akım kablosunun çekildiği bir çekme kızak kullanılır. Bu yöntemde sonuçlar su derinliği ve tuzluluk oranına bağlı olduğundan sistemin kalibrasyonu dikkatli yapılmalı ve operasyon prosedürlerinde detaylara önem verilmelidir).

3.2.5. GEOTEKNİK ARAŞTIRMALARDA KULLANILAN ARAZİ DENEYLERİ

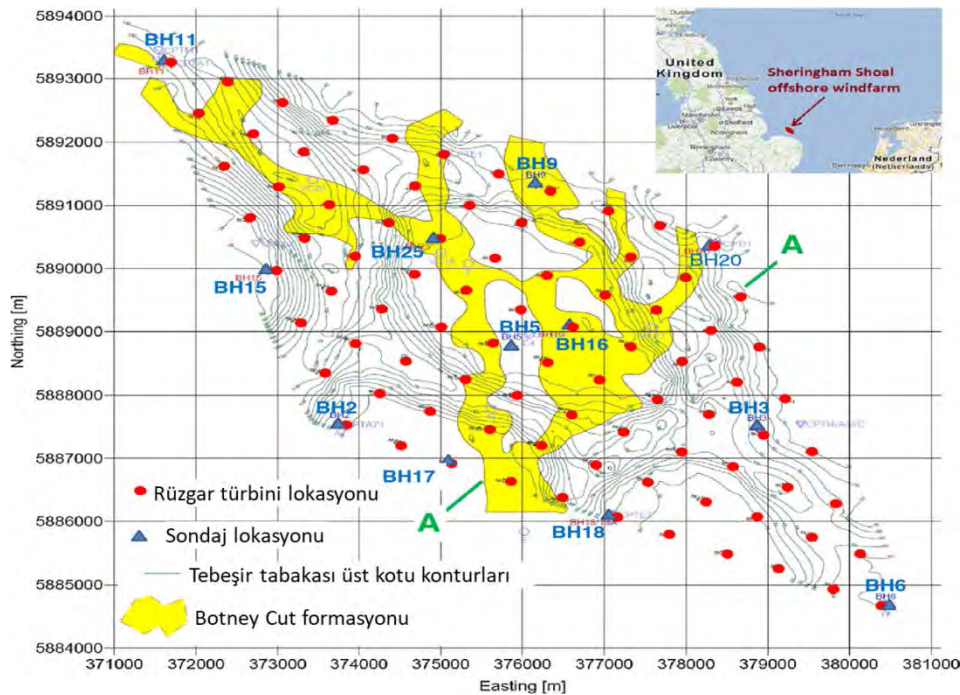
Geoteknik araştırmalar esnasında deniz tabanında sondajlar yapılır, laboratuvar deneylerinde kullanılmak üzere zemin numuneleri alınır ve arazi deneyleri yapılır. Numune alma yöntemleri ve kullanılması gereken numune alma tüpleri ile ilgili bilgiler ISSMGE (2005) şartnamesinde verilmiştir. Örneğin killi birimlerde numune almak için piston numune alıcı, veya bu mümkün değilse ince cidarlı itki-numune alıcı kullanılması gerekmektedir. Rutin deniz tabanı geoteknik çalışmalarında yapılan saha testlerinin en başında, ilave boşluk suyu basıncı ölçümleri de alınan PCPT koni penetrasyon deneyi gelmektedir. Bunun yanı sıra killi zeminler için arazi vane (kanatlı) kesme deneyi ve T-bar deneyleri de yapılmaktadır. Burada sadece PCPT'ye kısaca değinilecektir.

3.2.5.1. KONİ PENETRASYON TESTİ (CPT) VE PİEZOKONİ PENETRASYON TESTİ (PCPT)

Deniz üstü geoteknik mühendisliğinde en yaygın olarak kullanılan test türleri CPT ve PCPT'dir. Bu test ile, zemin türleri ve tabakalarının kalınlıkları ile birlikte temel tasarımında gerekli olan bazı geoteknik parametreler (örneğin killi birimlerde drenajsız kayma mukavemeti, kumlarda göreceli sıkılık ve içsel sürtünme açısı vb) elde edilebilir. CPT testi sırasında, deniz tabanına, koni şeklinde ucu olan ve sensörler ile basınç ve sürtünme ölçümleri yapabilen bir prop (ölçüm cihazı), belli bir hızda (genellikle 2 cm/sn) deniz tabanına derinlikle devamlı olarak itilir. Zeminin koni şeklindeki ucun girişine gösterdiği direnç koni ucundaki sensörler ve prop ile zemin arasındaki yanıl sürtünme kaydedilir. PCPT testlerinde ise ekstra olarak zeminin içinde bu koninin girmesi nedeniyle oluşan ilave boşluk suyu basınçları, koni ucundaki gözenekli bir bölmede ölçülür. Bu ölçüm de zemin tabakalarının özelliklerinin belirlenmesinde, geçirgenlik, konsolidasyon durumu gibi önemli bilgiler elde edilmesini sağlar. Sensörler ile ölçülen veriler anında deniz yüzeyindeki gemideki veri toplayıcı sistemden görülebilir.

3.3. ÖRNEK ZEMİN ETÜDÜ ÇALIŞMASI

Bu kısımda Birleşik Krallık'ta şu anda işletmede olan Sheringham Shoal çiftliğinde yapılan zemin etüdü çalışmalarına yer verilen bir çalışma özetlenecektir [20]. Bu çiftlikte 317 MW üretim kapasitesine sahip 88 rüzgar türbini bulunmaktadır. Çiftlik, Kuzey Denizi'nde kıyıdan 20 km açıklıkta yer almaktadır ve ortalama su derinliği 20 metredir. Projede kullanılan temel tipi tekil kazıklar olup bu kazıkların çapı 4,7 – 5,7 m, penetrasyon derinlikleri ise 27 – 37 m'dir. 2005-2006 yıllarında ön saha araştırmaları yapılmış, 2008 yılında ise kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Benzer sahalardan elde edilen önceki tecrübelerden faydalanılmış, ve DNV No 30.4 (1992) ve DNV-OS-J101 (2011) şartnamelerine uygun olarak saha araştırmaları planlanmıştır. Önerilen minimum sondaj sayısı, rüzgar türbini sayısının %10'u olsa da [21], bölgede 9 yerine 5'i ön araştırmalar sırasında, 7'si de ana araştırmalar sırasında olmak üzere toplam 12 deniz tabanı sondajı uygulanmıştır. Bunun sebebi, bölgedeki zemin koşullarının görece karmaşık olduğunun düşünülmesidir. Sondajların yerleri belirlenirken, yapılmış olan sismik araştırmalar ve jeolojik bilgileri tamamlayıcı nitelikte, zeminden yeterli noktadan numuneler alınması planlanmış, ayrıca tüm DRT çiftlik sahasının köşelerinde birer adet ve ortasında olmak üzere sondaj yerleri belirlenmiştir. Uygulanan sondaj derinlikleri deniz tabanından itibaren 26 – 70 m'dir. Bu sondajlar arasında 4-5 km mesafe bulunmaktadır. Uygulanan sondajların ve planlanan rüzgar türbinlerinin konumları Şekil 5'te gösterilmiştir. Sahada aşırı konsolide olmuş kil birimleri ve sıkı kum birimleri mevcut olup, bunların altında farklı ayrışma derecelerinde tebeşir kaya tabakası bulunmaktadır. Sondaj konumlarının ve derinliklerinin öngörülen bütün katmanlar ile ilgili bilgi verecek şekilde seçilmesine özen gösterilmiştir. Yapılan geoteknik araştırmalar, sahip olunan önbilgiler kullanılarak tahmin edilen zemin koşulları ile örtüşmüştür.



Şekil 5. Sheringham Shoal DRT çiftliğindeki sondaj yerleri ve rüzgar türbini konumları [20]

4. SONUÇ

Türkiye için deniz üstü rüzgar enerjisi projelerinin geliştirilmesi açısından öncelikli olarak yapılması gereken çalışmalar şu şekilde akla gelmektedir:

- (1) denizlerdeki yerel rüzgar kaynağı (potansiyeli) yüksek hassasiyetle ve detaylı bir şekilde ölçülerek belirlenmelidir;
- (2) belirlenecek potansiyel yerlerde metocean istasyonları kurularak

uzun süreli ölçümler alınmalıdır; (3) deniz üstü rüzgar potansiyeli atlası hazırlanmalı, ve deniz üstü rüzgar türbinlerini uzun yıllardır kullanmakta olan diğer ülkelerde olduğu gibi, “Deniz Mekansal Planlama (Marine Spatial planning)” çalışması ile en uygun sahalara belirlenmelidir; (4) ayrıca özellikle bir deprem ülkesi olan Türkiye için, dünya çapında uygulanmakta olan deniz tabanı saha araştırması şartnameleri göz önüne alınarak, Türkçe ve İngilizce olarak deniz tabanı saha araştırmaları şartnameleri (daha sonra da DRT tasarım şartnameleri) hazırlanmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2018 Offshore Wind Technologies Market Report, 94 pp. <https://www.energy.gov/eere/wind/downloads/2018-offshore-wind-market-report>
- [2] <https://www.energy.gov/eere/wind/articles/top-trends-offshore-wind>
- [3] Wagner, Andres (2019), German Offshore Wind Energy Foundation, "Overview of the Development of offshore wind energy in Germany", Türk-Alman Enerji Forumu, 2-3 Temmuz 2019, T.C. Enerji Bakanlığı
- [4] <https://grow-offshorewind.nl/project/gentle-driving-of-piles>
- [5] Wind Energy – The Facts (2009) European Wind Energy Association (EWEA) <https://www.wind-energy-the-facts.org/development-and-investment-costs-of-offshore-wind-power.html>
- [6] Randolph, M.F. (2011). *Offshore geotechnical engineering*. London, New York: Spon Press,
- [7] Byrne, B.W., Houlsby, G.T., (2003). Foundations for Offshore Wind Turbines, Phil. Trans. Royal Society of London, Vol. 361, pp.2909-2930.
- [8] International Electrotechnical Committee. *Wind turbines - Part 3: Design requirements for offshore wind turbines*. IEC 61400-3:2009
- [9] International Organization for Standardization. *Petroleum and natural gas industries -- General requirements for offshore structures*. ISO 19900:2019. İsviçre.
- [10] <https://www.windpowerengineering.com/projects/offshore-wind/foundations-that-float/>
- [11] Moulas, D., Shafiee, M., Mehmanparast, A. (2017), Damage Analysis of Ship Collisions with Offshore Wind Turbine Foundations, Ocean Engineering, 143, p.149-162
- [12] WindEurope (2019) Offshore Wind in Europe: Key Trends and Statistics 2018, 40 p. <https://windeurope.org/about-wind/statistics/offshore/european-offshore-wind-industry-key-trends-statistics-2018/>
- [13] Singh, B., Mistri, B., & Patel, R. (n.d.). Comparison of Foundation Systems for Offshore Wind Turbine Installation.
- [14] Bakmar, C. L. (2009). Design of Offshore Wind Turbine Support Structures: Selected topics in the field of geotechnical engineering. Aalborg: Department of Civil Engineering, Aalborg University. (DCE Thesis; No. 18).
- [15] Plodpradit, P., Dinh, V. N., & Kim, K. (2019). Tripod-Supported Offshore Wind Turbines: Modal and Coupled Analysis and a Parametric Study Using X-SEA and FAST. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(6), 181. doi:10.3390/jmse7060181
- [16] Westgate, Z.J., DeJong, J.T. (2005). Geotechnical Considerations for Offshore Wind Turbines
- [17] IRENA (2016), Floating Foundations: A Game Changer for Offshore Wind Power, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi
- [18] DNV GL AS. *Offshore soil mechanics and geotechnical engineering*. DNVGL-RP-C212 (2017)
- [19] International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (2005). *Geotechnical and Geophysical Investigations for Offshore and Nearshore Developments*.
- [20] Le, T.M.H., Eiksund, G.R., Strøm & Saue, M. (2014). Geological and geotechnical characterisation for offshore wind turbine foundations: A case study of the Sheringham Shoal wind farm. *Engineering Geology*, 177, p.40-53
- [21] DNV GL AS. *Design of Offshore Wind Turbine Structures*. DNVGL-OS-J101 (2014).

RÜZGAR EKONOMİSİ

Anıl Güneyli

Berdan Cıvata A.Ş.

anilguneyli@hotmail.com; anil.guneyli@berdancivata.com

ÖZET

Sanayileşme, bir bölgede sanayi etkinliklerini ön plana çıkarmak için yapılan sosyal, ekonomik ve mühendisliğe ilişkin çalışmaların tümü olarak tanımlanmaktadır. Günümüz dünyasında gelişmiş ülkelerin aynı zamanda sanayileşmiş ülkeler olmaları, ekonomik gelişme ile sanayileşme arasında yadsınamaz bir ilişkinin olduğunu göstermektedir. Dünyada 1800'lerin sonlarında başlayıp günümüze kadar süre gelen sanayi hamlelerinde ülkemiz kendine yer bulmakta zorlanmış ve bu sanayileşme hamlelerini kaldıraç olarak kullanamamıştır.

Dünyada artan enerji ihtiyacına karşılık yenilenebilir enerjinin özellikle rüzgar enerjisi potansiyelinin henüz %1'i kullanılmaktadır ve kalanı için gerekli doğrudan yatırım tutarı yaklaşık 42trilyon \$ (usd)'dır. Hal böyleyken Türkiye olarak küresel pazara milli rüzgar türbini markası çıkartmak için geç kalmış sayılmayız.

Rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretimi gerçekleştiren ana araç rüzgar türbinleridir. Rüzgar türbini; kule, rotor, nacelle adı verilen üç ana bileşen ve bunların alt bileşenleri dahil toplamda 6000'in üzerinde bileşenden oluşmaktadır. Nacelle adı verilen, elektriği üreten jeneratör bölümü bir türbinin yaklaşık %70 maliyetini teşkil eder. Bazı parçaları hariç henüz nacelle bölümü ülkemizde üretilmemektedir.

Tamamen yerli rüzgar türbin tasarımı ve imalatı; Türkiye'nin 1800'lerden beri gerçekleştiremediği sanayi hamlesi ve buna bağlı ekonomik kalkınma için bulunmaz bir fırsattır. Ülkemizde türbinin tüm bileşenlerini üretmek için gerekli sınai ve beşeri kabiliyet mevcuttur.

1. SANAYİLEŞME SÜRECİ VE MARKA KAVRAMI

Sanayi devrimiyle büyük bir değişime giren dünya, ekonomik olarak hızlı bir gelişme süreci yaşamıştır. Ekonominin ana kollarından olan sanayi ile birlikte özellikle doğada bulunan hammaddeler değerlendirilmeye ve şekillenmeye başlamış, sanayi yatırımları ve faaliyetleri artmıştır. İçinde bulunduğumuz zamanda ekonomik, sosyal, kültürel ve teknolojik alanda meydana gelen değişim ve gelişimler pazarların küreselleşmesine neden olmuş ve zamanla mesafe kavramını ortadan kaldırmıştır. Küreselleşme olgusunun her geçen gün önem kazandığı günümüz dünyasında gerek firmalar gerekse ülkeler kıyasıya rekabet halindedir. Küreselleşen pazarlardan pay alma ve kazanç artırma çabası arttıkça rekabet de artmaktadır.

Günümüzde gittikçe ağırlaşan rekabet koşulları ve değişen tüketim kalıpları uluslararası arenada yer almak isteyen ülkeler ve işletmeleri, daha fazla katma değer ve daha fazla pazar payı anlamına gelen güçlü markalar yaratmaya zorlamaktadır. Güçlü bir marka ülkenin çok yönlü zenginliğinde büyük bir etkidir. Markalar ülke ekonomisinin kalkınmasında büyük bir rol oynamaktadırlar. Bir ülkenin küreselleşmiş markaları o ülkenin gücüdür. Küreselleşmenin ve rekabetin etkisiyle büyük şirketler küçük şirketlerin zayıflamasına hatta yok olmalarına sebep olmaktadır. Bu rekabetten kazançlı çıkabilmek için markalaşmak en büyük çözümlerden biri olarak gözükmektedir. Çünkü; marka, yüksek pazar payı, yüksek satış ve kar anlamı taşımaktadır ki, markanın ekonomi üzerindeki etkisi ile kastedilmek istenen budur. Bugün dünyada büyük şirketlere baktığımız zaman marka değerlerinin milyarlarca dolar tutarında olduğunu görmekteyiz, bazı markaların değerinin pek çok ülkenin ticaret hacminden daha fazla

olduğunu söyleyebiliriz. Pek çok tanınmış markaya sahip olan ülkenin de, dünya ekonomisinde söz sahibi olduğu aşîkârdır. Güçlü bir ülke markası, ülke hasılasının artmasına yardımcı olur; yatırım, yetenekli ve donanımlı kişileri ülkeye çeker ve turizm açısından da rekabette avantaj sağlar. Ülke marka değeri arttıkça, ülke imajı güçlenir, ülkeye karşı oluşan güven artar, hem yerli yatırımlar, hem de doğrudan yabancı yatırımlar artar. Yani, ekonomi ve ülke marka değerleri birbirleriyle daima doğru orantılı ilişki içindedirler.

1.2.TÜRKİYEDEKİ SANAYİLEŞME SÜRECİNE GENEL BİR BAKIŞ

Cumhuriyetin kuruluşu ile başlayan yılların ana sorunu toplumun değişik kesimleri arasında dayanışmayı sağlamak, birçok özveri ve bedel karşılığında sağlanan siyasal bağımsızlığı ekonomik bağımsızlıkla taçlandırmaktır. Bunu sağlamanın yolu da yerli sanayi kurmak ve geliştirmekten geçmektedir.

Cumhuriyet ilan edilmeden önce, Şubat 1923’de, takip edilecek iktisat politikasının tespit edilmesi ve iktisadi kalkınma hamlesinin tüm toplumun katılımı ile başlatılması için İzmir İktisat Kongresi (İİK) toplanmıştır. Cumhuriyet kadrosunun iktisadi gelişmeden anladığı sanayileşme olmuştur. Başka bir deyişle, birinci ana hedef sanayileşmedir. Ekonominin tüm kesimlerine önem verilmesi gerektiği fakat sanayileşme olmadan iktisadi gelişmenin gerçekleştirilmeyeceği anlaşılmıştır. Cumhuriyetin ilk on yılı, ekonomik onarım ve kurumların oluşturulması dönemi olmuştur. 1950, 1980 ve 2000 yılları sonrası ülkemizde sanayi gelişerek farklı boyut kazanmaya başlasa da henüz dünya arenasında söz sahibi olabilmemiş değiliz. Araştırmalara göre Türkiye, kat ettiği önemli mesafelere rağmen, henüz gelişmekte olan ülkeler kategorisinde algılanmaktadır.

2.TÜRKİYE VE DÜNYADAKİ RÜZGAR ENERJİSİ GENEL DURUMU

Dünya nüfusundaki hızlı artış, sanayileşme, teknolojik araç ve gereçlerin insan yaşamında yoğun bir şekilde yer alması, enerji tüketiminin çok hızlı artmasına sebep olmaktadır. Fabrikalar, atölyeler, evdeki elektronik araçlar, sokak aydınlatmaları, demiryolu taşımacılığı, hatta elektrikle çalışan otomobiller gibi birçok alanda enerji, temel girdi haline gelmiştir. Bütün bu gelişmeler, enerji tüketimini her yıl ortalama %4-5 oranında arttırmaktadır.

Enerji üretiminde yaygın olarak kullanılan fosil yakıt rezervlerinin (kömür, petrol ve doğalgaz) azalması, fosil yakıtların işlenmesi için daha derinlere inilme zorunluluğunu getirmiştir. Fosil yakıtlar üzerine yapılan araştırmalar neticesinde, dünyadaki enerji tüketim hızı fosil yakıtların oluşum hızının 300 bin katına eşit olduğunu göstermektedir. Başka bir ifadeyle, bir günde yaklaşık bin yıllık fosil yakıt oluşumu tüketilmektedir. Bu durum, fosil yakıt rezervlerinin giderek tükeneceğinin bir göstergesi olup, enerji ihtiyacı duyan ülkeleri de yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönlendirmektedir.

Günümüzde yaygın olarak kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarından, rüzgâr enerjisi kullanımının bazı avantajları mevcuttur. Rüzgâr enerjisi, yenilenebilir özelliğe sahip, taşıma sorunu bulunmayan ve enerji üretimi için çok yüksek teknoloji gerektirmeyen bir enerji kaynağıdır. Ayrıca, bu enerji kaynağı atmosferde serbest ve bol bir şekilde bulunmakta ve çevre kirliliği oluşturmamaktadır. Güneş ve dünya var olduğu sürece var olacak rüzgâr enerjisinden yararlanmak için başka bir enerji şekline dönüştürülmesi gerekmektedir. Bunun için rüzgâr türbinlerinden faydalanılmaktadır. Rüzgâr türbinleri, rüzgârın kinetik enerjisinden elektrik enerjisi üretmek amacıyla kullanılmaktadır. Son yıllarda rüzgâr türbin teknolojisinde meydana gelen gelişmeler (türbin çeşitleri, türbin yükseklikleri vb.) rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üretim maliyetini düşürerek rüzgâr enerjisini fosil yakıt rezervleriyle rekabet edebilir bir duruma getirmiştir. Bu sebeple, birçok gelişmiş ve gelişmekte olan ülke, rüzgâr gücünden elektrik enerjisi üretme çalışmalarını devlet politikası haline getirerek her aşamada desteklemektedir.

2.1.DÜNYADAKİ RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİ VE KURULU GÜCÜ

Rüzgâr enerjisi, kullanımı giderek artan ve potansiyeli yeni keşfedilmiş tükenmez bir enerji kaynağıdır. Dünya rüzgâr enerji potansiyelini belirleyebilmek amacıyla Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalarda, 5.1 m/s üzerinde rüzgâr kapasitesine sahip bölgelerin, uygulamaya dönük ve toplumsal kısıtlar nedeni ile %4'ünün kullanılacağı öngörüsüne dayanarak, dünya teknik rüzgâr potansiyeli 53000 TWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Rüzgâr enerji potansiyeli yüksek olan kıtalar/bölgeler sırasıyla; Kuzey Amerika (14000TWh/yıl), Doğu Avrupa ve Rusya (10600 TWh/yıl), Afrika (10600 TWh/yıl), Güney Amerika (5400 TWh/yıl), Batı Avrupa (4800 TWh/yıl), Asya (4600 TWh/yıl) ve Okyanusya (3000 TWh/yıl) şeklindedir. Bu veriler, Kuzey Amerika, Doğu Avrupa - Rusya ve Afrika'nın dünya rüzgâr enerji potansiyelinin %66'sına sahip olduğunu göstermektedir. Dünya teknik rüzgâr potansiyelinin belirlenmesi çalışmasında, rüzgâr hızının 4-5 m/s olduğu bölgeler dikkate alınmamasına rağmen, bu bölgeler de oldukça iyi rüzgâr potansiyeline sahiptir. Sadece Almanya'da bu potansiyelin değeri 90 TWh/ yıl olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, bu hesaplamalar sadece karasal bölgeler için yapılmış olup, dikkate alınmayan açık deniz (offshore) bölgelerinin de ihmal edilemeyecek ciddi bir potansiyeli mevcuttur.

2.2.TÜRKİYEDEKİ RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYELİ VE KURULU GÜCÜ

Ülkemizde rüzgâr enerjisi durumunun analiz edilebilmesi için, öncelikle ülkemiz rüzgâr enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Türkiye'de rüzgâr enerji potansiyelini belirlemek amacıyla rüzgâr ölçümleri, diğer meteorolojik ölçümlerle birlikte Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından yapılmaktadır. İlk aşamada belirlenmiş olan ve rüzgâr enerjisi yönünden umut verici yerlerde yapılan etütler ile rüzgârdan enerji üretimine elverişli olabilecek bölgelere Rüzgâr Enerjisi Gözlem İstasyonları (RGİ) kurulup veri toplanmaya başlanmıştır. Ölçümler çoğunlukla 10 m yükseklikte alınmakla birlikte, 30 m yükseklikte alınan ölçümler de mevcuttur. Veriler birer saatlik ve 10 dakikalık periyotlarla toplanmakta, yazılım programı kullanılarak işlenmekte ve arşivlenmektedir. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nün (YEGM) ölçüm istasyonlarından elde edilen ortalama rüzgâr hızları, bölgelerin rüzgâr enerjisi uygulamaları için elverişli olup olmadığını göstermektedir. Ülkemizde enerji amaçlı ölçümler için MGM'nin istasyon sayısı yetersiz olup, daha güvenilir rüzgâr verileri elde etmek amacıyla istasyon sayısının hızla artırılması gerekmektedir. İstasyon sayısının artırılmasıyla Türkiye rüzgâr enerji potansiyel atlası (REPA) belli periyotlarda güncellenebilecektir. Bu şekilde, rüzgâr enerji potansiyeli yüksek olan bölgelerdeki ortalama rüzgâr hızları ve rüzgâr güç yoğunlukları belirlenerek bu sektöre yatırım yapacak şirketler teşvik edilebilecektir.

Türkiye'de yer seviyesinden 50 metre yükseklikte ve 7,5 m/s üzeri rüzgâr hızlarına sahip alanlarda kilometrekare başına 5 MW gücünde rüzgâr santralı kurulabileceği kabul edilmiştir. Bu kabuller ışığında, orta-ölçekli sayısal hava tahmin modeli ve mikro-ölçekli rüzgâr akış modeli kullanılarak üretilen rüzgâr kaynak bilgilerinin verildiği Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) hazırlanmıştır. Türkiye kara rüzgâr enerjisi potansiyeli 48.000 MW olarak belirlenmiştir. Bu potansiyele karşılık gelen toplam alan Türkiye yüz ölçümünün %1,30'una denk gelmektedir. 2018 yılında işletmede olan rüzgar enerji santrallerinin toplam kurulu gücü ise 7.005 MW' dir.

3.RÜZGAR TÜRBİN BİLEŞENLERİ VE YERLİ ÜRETİLEBİLİRLİK

3.1.RÜZGAR TÜRBİN BİLEŞENLERİ

Rüzgâr türbin üretimi çok yönlü rüzgâr güç endüstrisinin ana çekirdeğini oluşturur. Döküm, haddeleme ve işleme nedeni ile türbin üretimi ağır sanayiye de önemli bir katkıda bulunur.

Bir rüzgâr türbini aşağıdaki parçalardan oluşur:

1. Kule
2. Rotor
3. Nacelle (Faaliyet kutusu)
4. Diğer bileşenler (trafo, devre kesiciler, fiber optik kablolar, vb. diğer bileşenler)

3.1.1.KULE

Rüzgâr türbinini destek elemanıdır. Rüzgâr enerjisinden en iyi şekilde yararlanmak amacıyla farklı yüksekliklerde üretilmektedir. Kule parçalarını birbirine, nasele ve zemine flanşlar, civatalar ve ankrajlarla bağlanır. Kulenin ağırlığı yaklaşık 200-400 ton arasındadır ve türbin ağırlığının yaklaşık %60'ını oluşturmaktadır.

3.1.2.ROTOR

Rotor dört temel bileşenden oluşur. Bunlar; kanatlar, kanat kökü, kanat açısı ayarlama sistemi ve rotor göbeği (Hub)'dir.

Kanat: Rüzgâr enerjisini mekanik enerjiye dönüştürür. Temel malzemesi çelikte güçlendirilmiş epoksi reçine gibi cam takviyeli elyaf ve güçlendirilmiş malzemelerdir. Ağırlığının %70-75'i epoksi veya polyester reçineli cam elyafıdır. Toplam rüzgâr türbini ağırlığının %7'sini oluşturur. Kendiliğinden duran (Stall regülasyonlu) veya değişken kanat açılı (variable pitch) olmak üzere iki farklı tasarımda olabilir.

Kanat Kökü: Rotor kanatlarını destekleme ve göbeğe güvenli bir şekilde bağlanmasına yardımcı olan çelikten yapılan bileşenlerdir. Genel olarak ağırlığı 1 ton civarındadır.

Kanat Açısı Ayarlama Sistemi: Rüzgâr hızına göre istenen dönme hızında optimum açının sağlanabilmesi için kanat açılarını ayarlar. Genellikle her biri bir kanada ait olmak üzere üç motorludur. Kanat açısı sistemi elektrik veya hidrolik olarak sürücü ile döndürülen yuvarlak dişlidir. Kanat açısı sistemi sürücüsü genellikle paslanmaz çelik ve alaşımlı çelikten üretilir.

Rotor Göbeği (Hub): Rotor kanatları ve kanat kökleri için dayanak noktası ve kanat açısı kontrol sisteminin de bulunduğu yerdir. Türbinin en büyük parçalarından birisidir. Malzeme genellikle sfero döküm olup yaklaşık 7-20 ton ağırlığındadır. Göbek serbest olarak döner, mil ve rulman montajı kullanarak nasele bağlanır.

3.1.3.NACELLE

Ağırlık olarak rüzgâr türbinin en ağır parçası olup içerisinde dişli kutusu, jeneratör, sağ sol döndürme sistemleri, frenleme sistemleri gibi elektronik ve mekanik ekipmanların olduğu türbin parçasıdır. Nacelle bileşenleri şunlardır: 1.Jeneratör Soğutma Fanı 2.Jeneratör 3.Üst Kontrol Kabini 4.Ana çatı 5.Jeneratör Bağlantı Ayağı 6.Kaplin 7.Dişli Kutusu 8.Şok Absorbe Edici 9.Yaw dişli kutusu 10.Ana Şaft 11.Dişli Kutusu Soğutma Grubu

3.1.4.DİĞER BİLEŞENLER

Elektrik toplama sisteme ve iletişim sistemi olmak üzere iki ana sistemden meydana gelir.

Elektrik Toplama Sistemi: Her bir rüzgâr türbini; yükseltici trafoları, devre kesicileri, ayırıcılar, havai hat veya yeraltı kabloları şalt sahası ve sistem bağlantı trafosu (Trafo Merkezi) oluşur.

İletişim Sistemi: İletişim sistemi rüzgâr türbinlerinin her birinin çalışmasının izlenmesi ve performanslarının kontrol merkezine raporlanmasını sağlar. Veri toplama ekipmanları ve fiber kablolar türbinin izlenmesi ve performansının raporlanması içindir. Kontrol istasyonu verileri birleştirir ve bilgileri yerel şebekeye gönderir.

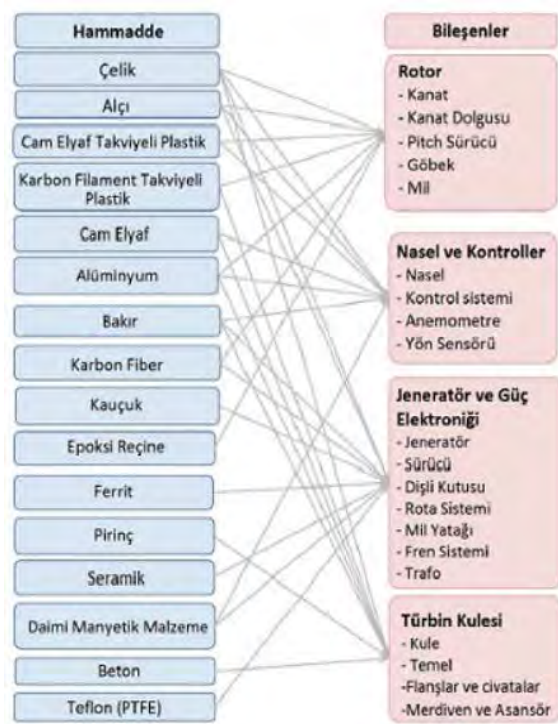
3.2.YERLİ ÜRETİLEBİLİRLİK

3.2.1.RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN HAMMADDELER

Tipik bir rüzgâr türbini öncelikle çelikten (ağırlığının yaklaşık %90'ı) yapılır. Alüminyum ve diğer hafif kompozitler de özellikle kanat yapımında önemlidir. Türbin yapımında kullanılan diğer hammaddeler arasında ön gerilimi alınmış beton, bakır ve cam elyafı/fiberglas, sabit mıknatıslar, dökme demir/pik, karbon fiber, kauçuk, epoksi, ferrit, pirinç, seramik ve teflon da bulunmaktadır. Bir rüzgar türbinin malzeme ihtiyacı türbin ağırlığının yaklaşık yüzdesi olarak Şekil 1'de ; türbinin bileşen-hammadde ilişkisi de Şekil 2'de gösterilmiştir.

Malzeme	Çelik	Cam Elyafı	Bakır	Beton	Yapıştırıcı	Alüminyum	Hammaddeler
Ağırlık (%)	89,1	5,8	1,6	1,3	1,1	0,8	0,3

Şekil 1. Rüzgar Türbinleri İçin Hammadde İhtiyacı



Şekil 2. Rüzgar Türbini Bileşen Hammadde İlişkisi

3.2.2.RÜZGAR TÜRBİNLERİ İÇİN OEM TEDARİK ZİNCİRİ YAPISI

Rüzgâr türbinleri orijinal ekipman üreticileri (OEM) tarafından imal edilirler. Bu şirketler öncelikli olarak türbin tasarlara, ana bileşenleri dış kaynaklardan temin eder, genellikle 6000'den fazla türbin parça veya bileşenini bir rüzgâr türbin oluşturmak üzere bir araya getirir, markalar ve gideceği yere nakleder. OEM'ler genellikle üretilmiş bileşenleri iki farklı yolla satın alır. En yaygın yöntem 2. ve 3. kademe tedarikçilerden temel parçaları doğrudan tedarik eden ve birleştiren bir toplayıcı/integratör şirket kiralamaktır. OEM'ler genellikle türbinin yaklaşık %90 parçasını toplayıcılar aracılığı ile tedarik eder. Parçaların yaklaşık %10'u ise doğrudan 1. kademe tedarikçilerden temin edilir.

1.Kademe Tedarikçileri; kule, göbek (hub), kanatlar veya dişli kutusu gibi büyük bileşenleri yapar.

2.Kademe Tedarikçileri; merdiven, cam elyafı, kontrol sistemleri, hidrolik, güç elektroniği, bağlantı elemanları, reçine, makine parçaları ve motorları. vb alt grupları imal eden bazı üreticilerdir.

Bir rüzgâr türbini parçasının arızası halinde onarımının oldukça pahalı olması nedeniyle orijinal ekipman üreticileri türbin tedarikçi yeterlilik sürecinde oldukça tutucudurlar ve son derece yüksek kalite (tutarlı ve sıfır hata kalitesi) isterler. Bir çoğu yeterlilik sürecine başlatmak için ISO 9001 ve ilk sipariş öncesinde ilgili standartlara sahip olma ve sıkı denetimi gerekli görür. Bu yüksek kalite yeterlilik standartları nedeniyle ilk temastan başlangıç üretim siparişinin alınmasına kadar geçen süre oldukça uzun olup 18 ayı bulabilmektedir.

3.2.3.RÜZGAR TÜRBİN BİLEŞENLERİNİN YURTIÇİNDE ÜRETİLME DURUMU

Ülkemiz kule, kanat, transformatör, jeneratör, iç elektrik bağlantıları ve şalt sahası ile ilgili elektromekanik ekipmanlar, kontrol, sistem koruma ve güvenlik sistemleri gibi rüzgâr santrali sistem bileşenlerinin üretimi konusunda sınai ve beşeri güce sahiptir.

Tamamen yerli rüzgar türbini tasarımı ve imalatı, rüzgar teknolojisinde yerli üretim politika destekleri, teknolojik uzmanlık ve işgücü gibi faktörlerle sağlanabilir. Uygun teşvikler sağlandıkça ve rüzgârdan bir enerji kaynağı olarak yararlanılabileceğine olan bilinç ve güven arttıkça bu konuda bir yandan türbin bileşenlerinin yerli üretimi diğer yandan rüzgâr ölçüm ve değerlendirmesi, santral tasarımı, nakliye ve türbinlerin montajı, işletme ve bakımı, enerji üretimi ve ticareti vb. konularda da hizmet sağlayan alt firmaların sayısı da hızla artacaktır. Rüzgar türbin bileşenlerinin yerli üretim durum değerlendirmesi Şekil 3’de gösterilmiştir.

Rüzgar Türbin Bileşenleri	Yurt İçinde Üretim/Temini E(yet)/K(ısmen)/H(ayır)	Açıklama
Rotor	K	Know-How gerekli. Küçük rüzgar türbinleri için (≤ 500 kW) üretim yapılabilmektedir. Büyük türbinler için (> 1 MW) üretim altyapısının (üretim bantları, tezgah vb) buna uygun hale getirilmesi gerekli
Kanatlar	E	Know-How gerekli. Büyük güçlü (> 1 MW) uluslararası bir çok rüzgar türbin markasının kanatları üretilmektedir.
Dişli Kutusu	K	Know-How gerekli. Küçük rüzgar türbinleri için (≤ 500 KW) üretim yapılabilmektedir. Büyük türbinler için üretim altyapısının (üretim bantları, tezgah vb) buna uygun hale getirilmesi gerekli
Jeneratör	K	Know-How gerekli. Küçük rüzgar türbinleri için (≤ 500 KW) üretim yapılabilmektedir. Büyük rüzgar türbinleri jeneratörlerinin üretimi konusunda yürütülen çalışmalar var.
Kaplin	K	Know-How gerekli. Büyük güçlü rüzgar türbinleri için döküm ve işleme için üretim kapasitelerinin geliştirilmesi gerekli
Yön Bulma Sistemi(Yaw)	H	Know-How gerekli. Üretim mümkün
Hidrolik Üniteler	E	Yerli üretim mümkün.
Kule	E	Know-How gerekli. Birçok uluslararası rüzgar türbininin kulesi yerli üreticiler tarafından üretilmektedir. Hibrit kule imalatı da yapılmaya başlanmıştır.
Nacelle	K	Know-How gerekli. Küçük rüzgar türbinleri için (≤ 500 KW) üretim mümkün. Büyük türbinler için üretim altyapısının (üretim bantları, tezgah vb) buna uygun hale getirilmesi gerekli

Şekil 3. Rüzgar Türbin Bileşenlerinin Yerli Üretim Durumu

3.2.4.RÜZGAR TÜRBİN BİLEŞENLERİNİN MALİYET DEĞERLENDİRİLMESİ

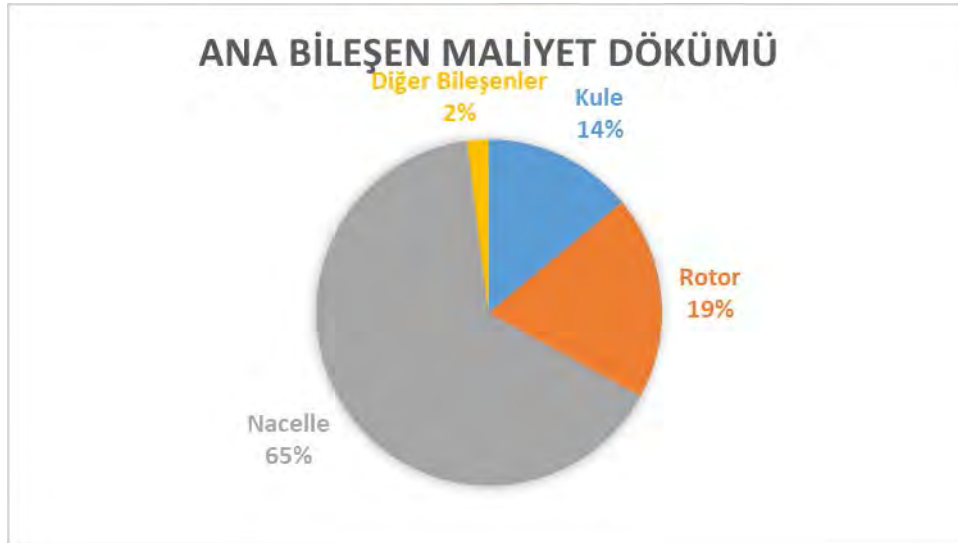
Rüzgâr türbinleri yaklaşık 4 m/s ile 25 m/s arasındaki rüzgâr hızlarında elektrik üreten makinelerdir. Avrupa’da karadaki rüzgâr projeleri için türbin, şebeke bağlantı, temeller altyapı vb dahil 2008 yılında rapor edilen yatırım maliyeti 1-1,9 Milyon €/MW (1,7-2,45 Milyon \$/MW) arasında değişmektedir.

Bir rüzgâr türbini, tesis maliyet oranının %65-%84’ünü oluşturmaktadır. Gelişmiş ülkelerdeki rüzgar enerji sistemlerinin sermaye maliyet oranları Şekil 4’de gösterilmiştir.

Kara Rüzgar Türbini	
Sermaye Yatırım Maliyeti (USD/kW)	1700 - 2450
Türbin Maliyeti (%)	65-84
Şebeke Bağlantı Maliyeti (%)	9-14
İnşaat Maliyeti (%)	4-16
Diğer Sermaye Maliyeti (%)	4-10

Şekil 4. Gelişmiş Ülkelerdeki Rüzgar Enerji Sistemi Maliyet Oranları

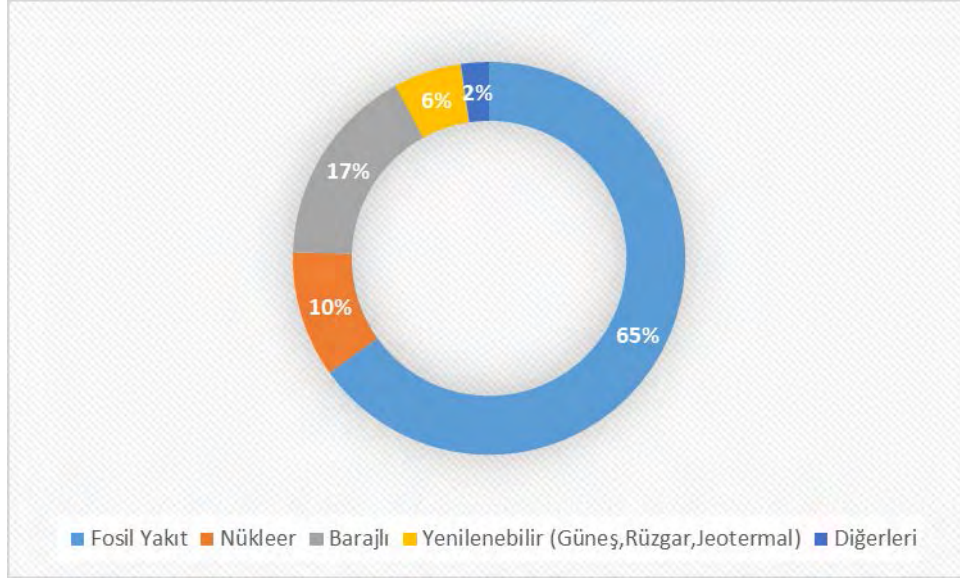
Rüzgâr türbini ise 6000 farklı bileşenden oluşmakta olup bu bileşenlerin türbin maliyetleri içerisindeki payları da Şekil 5’de gösterilmektedir.



Şekil 5. Rüzgar Türbini Ana Bileşenleri ve Maliyet Payları

4.SONUÇ

Dünyada ülkelerin nüfus artışı, sanayileşme ve ekonomik büyümeden dolayı elektrik enerji tüketimi günden güne artmaktadır. Artan bu enerji ihtiyacının yaklaşık %65’lik kısmı fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. 2018 itibariyle dünya elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı Şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 6. Dünya Elektrik Enerjisi Üretimine Kaynaklara göre Dağılımı

Enerji üretiminde fosil yakıt kullanımına bağlı olarak karbon emisyonları 32,5 milyar tona ulaşarak tarihi rekor kırmıştır. Uluslararası Enerji Ajansı raporuna göre üç senedir yatay bir çizgi izleyen karbon emisyonu, enerji talebindeki patlama ile yeniden yükselişe geçti. Tüm bu gelişmelerin yanı sıra dünya liderleri Eylül 2015 tarihinde BM Genel Merkezinde bir araya gelerek 2030 yılına kadar dünyada yoksulluğun tüm boyutlarıyla ortadan kaldırılması, insanlığın ortak refahının sağlanması ve çevrenin korunması için ülkemizin de aralarında bulunduğu 193 ülkenin oybirliği ile Sürdürülebilir Kalkınma Amaçlarını kabul etti ve bu alanda belirlenen 17 hedef ile ilgili iyileşme aksiyonları alacağını taahhüt etti. Bu küresel hedeflerden 7. Hedef olan Erişilebilir ve Temiz Enerji hedefi direkt olarak 11.,12.,13. ve 15.hedefler ise dolaylı olarak sadece ülkemizin değil dünyanın da ekonomik, çevresel ve sosyal yönlerin tümüyle yenilenebilir enerjiye odaklanmasının gereklilik olduğunu gözler önüne sermektedir.

Dünya çapında fosil yakıtlardan tamamen çıkma tarihini bazı kaynaklar 2030 yılı olarak vermektedir. Bu bağlamda; rüzgar türbinlerinin çalışması, çevreye zararlı gaz emisyonuna neden olmadığından enerji geleceğimizde ve iklim değişikliğini önlemede büyük bir role sahiptir. Geleneksel elektrik enerjisi üretimine göre rüzgar enerjisinin avantajları aşağıda sıralanmıştır:

- ☐ Temiz ve emisyonlu bir enerji kaynağıdır. Emisyonu olmadığı için sera gazları oluşturmaz ve küresel ısınmaya katkı sağlamaz
- ☐ Yakıt maliyeti yoktur ve işletme masrafları azdır.
- ☐ Dışa bağımlı olmayan ve çevresel koşullar uygun olduğunda sürekli enerji oluşturan bir kaynaktır
- ☐ Rüzgar türbinleri karmaşık olmayan otomatik makinalardır ve periyodik bakımlar sonucu 20-30 yıllık ömürleri boyunca sorunsuz çalışırlar
- ☐ İşletmeye almak ve kullanmak üç ay gibi kısa bir sürede mümkün olabilmektedir

Rüzgar enerjisinin bu avantajları düşünüldüğünde; geleceğin enerji kaynağı rüzgardır. Türkiye olarak enerjide dışa bağımlılığımızı azaltmak ve geliştirmekte olan ülke kategorisinden gelişmiş ülke kategorisine girmek için milli rüzgar türbini üretmeye mecburuz. Bugünkü sanayi yapısı ve bilgi birikimi ile rüzgâr türbinlerinin büyük bölümünü üretebilecek bir sanayi gücüne de sahibiz. Temellerini atacağımız milli rüzgar türbin markamızla yurtiçindeki rüzgar enerji potansiyelini gerçekleştirerek dövizin dışarı çıkmasını engelleyebilir ve dünyadaki potansiyele de markamızı ihraç ederek döviz girdisi sağlayabiliriz. Bu sayede; yakamızı bir türlü bırakmayan orta gelir tuzağından kurtulup ülkemizin hak ettiği gelişmişlik düzeyine kavuşabiliriz.

KAYNAKLAR

- [1] **Malkoç, Y.** Rüzgar Enerjisi, EİE İdaresi Genel Müdürlüğü, Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği
- [2] **Taç, Z.** Rüzgar Türbinlerinde Yerli Üretim ,2013
- [3] **Doğan, M.** Türkiye Sanayileşme Sürecine Genel Bir Bakış, Marmara Coğrafya Dergisi 2013, Sayı:28, s.211-231
- [4] **Elyay, İ.** Küreselleşme Olgusu Çerçevesinde Ülkelerin Marka Değeri ve Gelişmekte Olan Ülkeler Örneği, İstanbul Ticaret Üni.Yüksek Lisans Tezi 2014
- [5] **Çelikdoğan, S., Taç, Z., Alyanak,E.** Enerji Ekipmanları Yerli Üretimi Durum Değerlendirmesi ve Öneriler 2014, s.141-181
- [6] **İnanç, H.** Ülkelerin Markalaşma Süreci ve Marka Kavramı, Uluslararası Yönetim Akademisi Dergisi 2018, Sayı:3, s.317-331
- [7] **Şenel, M.Can., Koç, E.** Dünya ve Türkiyede Rüzgar Enerjisi Durumu-Genel Değerlendirme, Mühendis ve Makine Dergisi Sayı:663 2015, s.46-56
- [8] **Çedikçi, T.** Türkiye Ekonomisinde Markalaşmanın Önemi, İstanbul Kültür Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi 2008
- [9] **Anonim.** <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Ruzgar>
- [10] **Kıncay,O., Kıncay,O., Yumurtacı,Z., Bekiroğlu,N.** Rüzgar Enerjisi, Yıldız Teknik Üniversitesi
- [11] **Anonim.** What's Next For Wind?, <https://www.greentechmedia.com/articles/read/whats-next-for-wind#gs.njdi6r> , 2011
- [12] **Anonim.** Küresel Karbon Salınımı 2017'de Rekor Kırdı, <https://www.dunyaenerji.org.tr/kuresel-karbon-salinimi-2017de-rekor-kirdi/> 2018
- [13] **World Nuclear Association.** World Nuclear Performance Report 2018, <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>
- [14] **International Renewable Energy Agency (IRENA).** Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series, Volume:1 Power Sector Wind Power 2012



MMO TEPEKULE KONGRE VE SERGİ MERKEZİ

Anadolu Cad. No: 40 Bayraklı-İZMİR Tel: (232) 462 33 33 - 210/209 | Faks: (232) 462 43 77

www.ruzgarsempozyumu.org | www.windsymposium.org

 /izmirruzgarsempozyumu  /ruzgarsempozyum