






Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinlerinde Kule Yüksekliği ve Türbülans Yoğunluğu Etkisinin İncelenmesi

Rıza BÜYÜKZEREN¹  Mehmet Numan KAYA^{2*}  Ali Aydın BACAĞOĞLU² 
Muhammed UÇAR³  Hasan Basri ALTINTAŞ¹  Ali ÖZTÜRK² 
Ahmet Yasin BİLİCİ⁴ 

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

² Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

³ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

⁴ Chipkon Elektronik, İnnopark Konya Teknoloji Geliştirme Bölgesi, Konya, Türkiye

Makale Bilgisi

ÖZET

Geliş Tarihi: 01.08.2024
Kabul Tarihi: 27.08.2024
Yayın Tarihi: 31.12.2024

Anahtar Kelimeler:

Kule yüksekliği,
NREL,
Rüzgâr enerjisi,
Türbülans yoğunluğu,
YERT.

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri, yenilenebilir enerji üretiminde önemli bir rol oynamaktadır. Bu türbinlerin verimli ve güvenli bir şekilde çalışabilmesi için çeşitli çevresel ve tasarım faktörlerinin dikkate alınması gerekmektedir. Bu çalışmada, yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde kule yüksekliği ve türbülans yoğunluğunun rüzgâr türbini çalışma karakteristiği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Referans olarak seçilen NREL 5-MW rüzgâr türbinin çalışma simülasyonları farklı koşullarda gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar, 90, 110 ve 130 metre kule yüksekliklerinde, %1, %5, %10 ve %20 türbülans yoğunluğu seviyelerinde, referans 80 metre yükseklik için tanımlanan 6, 8 ve 10 m/s rüzgâr hızlarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın bulguları, kule yüksekliği ve türbülans yoğunluğunun rüzgâr türbini çalışma karakteristiği üzerinde önemli etkileri olduğunu ve bu etkinin büyüklüğünün kule yüksekliği ve rüzgâr hızına bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Türbülans yoğunluğunun, rüzgâr türbinlerinin aerodinamik ve yapısal parametreleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Türbülans yoğunluğundaki artışlar, rüzgâr hızında ve buna bağlı tüm parametrelerde dalgalanmaların artmasına neden olmuştur. Ayrıca, kule yüksekliğinin artması, türbinin maruz kaldığı rüzgâr hızını arttırdığı için rüzgâr türbini çıkış gücü artmaktadır. Ancak artan kule yüksekliği ile aerodinamik itme kuvveti de artmakta ve bu da yapısal elemanlar üzerindeki etkileri artırmaktadır. Rüzgâr hızı arttıkça türbülans yoğunluğunun olumsuz etkilerinin daha belirgin hale geldiği görülmüştür.

Investigation of the Tower Height and Turbulence Intensity on Horizontal Axis Wind Turbines

Article Info

ABSTRACT

Received: 1.08.2024
Accepted: 27.08.2024
Published: 31.12.2024

Keywords:

HAWT,
NREL,
Tower height,
Turbulence intensity,
Wind energy.

Horizontal axis wind turbines play an important role in renewable energy generation. For these turbines to operate efficiently and safely, various environmental and design factors need to be considered. In this study, the effects of tower height and turbulence intensity on the operating characteristics of horizontal axis wind turbines are investigated. Operating simulations of the NREL 5-MW wind turbine, selected as a reference, are carried out under different conditions. The simulations were carried out at tower heights of 90, 110 and 130 meters, turbulence intensity levels of 1%, 5%, 10% and 20%, wind speeds of 6, 8 and 10 m/s defined for the reference height of 80 meters. The findings of the study reveal that tower height and turbulence intensity have significant effects on wind turbine operating characteristics and the magnitude of this effect varies with tower height and wind speed. Turbulence intensity is found to have a significant effect on the aerodynamic and structural parameters of wind turbines. Increases in turbulence intensity resulted in increased fluctuations in wind speed and all related parameters. Furthermore, increasing the tower height increases the wind speed to which the turbine is exposed, thus increasing the output power of the wind turbine. In addition, the aerodynamic thrust increases with increasing tower height, which increases the effects on the structural elements. It was observed that the negative effects of turbulence intensity become more pronounced as the wind speed increases.

Bu makaleye atıfta bulunmak için:

Büyükzeren, R., Kaya, M.N., Bacakoğlu, A.A., Uçar, M., Altıntaş, H.B., Öztürk, A. & Bilici, A.Y. (2024). Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinlerinde Kule Yüksekliği ve Türbülans Yoğunluğu Etkisinin İncelenmesi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(3), 566-582. <https://doi.org/10.47112/neufmbd.2024.66>

*Sorumlu Yazar: Mehmet Numan Kaya, mnkaya@erbakan.edu.tr



This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Fosil yakıtların neden olduğu çevresel sorunlar göz önüne alındığında, temiz, sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynaklarının, özellikle güneş [1,2] ve rüzgâr enerjisinin, önemi her geçen gün artmaktadır [3–6]. Rüzgâr enerjisi, günümüz sürdürülebilir enerji üretiminde kritik bir rol oynamaktadır [7,8]. Fosil yakıtların kullanımına bağlı çevresel sorunları azaltmak amacıyla enerji üretiminde payı artırılan rüzgâr enerjisi, çevre dostu ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Enerji üretiminde önemli bir yer tutan rüzgâr türbinleri, rüzgârın kinetik enerjisini türbin vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Teknolojik ilerlemelerle maliyetlerin düşmesi, rüzgâr enerjisinin küresel enerji portföylerinde giderek daha büyük bir pay almasını sağlamaktadır. Bu gelişmeler, rüzgâr enerjisinin gelecekteki enerji ihtiyaçlarını karşılamada kritik bir rol oynayacağını göstermektedir. Rüzgâr türbinlerinin kurulumu karasal ve deniz üstü olarak yapılabilmektedir. Karasal rüzgâr türbinleri, genellikle açık alanlarda ve yüksek rüzgâr hızlarına sahip bölgelerde kurulmaktadır. Karasal türbinler, daha düşük maliyetli kurulum ve bakım avantajlarına sahip olmakla birlikte, rüzgâr verimliliğini artırmak için daha yüksek kuleler gerektirebilir. Ayrıca, karasal engeller ve yerel hava koşulları, rüzgâr hızlarını ve türbin verimliliğini etkileyebilir. Bununla birlikte, karada bulunmaları sebebiyle arazi kullanımı ve çevresel etkilere dikkat edilmesi gerekmektedir. Karasal rüzgâr türbinleri, dünya genelinde yaygın olarak kullanılan ve sürdürülebilir enerji üretimine önemli katkılar sağlayan bir teknolojidir. Deniz üstü rüzgâr türbinlerinde ise, daha yüksek ve sürekli rüzgâr hızları nedeniyle enerji üretim potansiyeli genellikle daha yüksektir. Deniz üstü türbinler, geniş ve açık deniz alanlarında kurulduğundan kara üzerindeki engellerden etkilenmezler ve böylece daha istikrarlı ve güçlü rüzgâr akımlarından faydalanabilirler.

Rüzgâr türbinleri, yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yer tutarak, sürdürülebilir enerji üretiminde kritik bir rol oynamaktadır. Farklı tasarım ve yapısal özelliklere sahip rüzgâr türbinleri, çeşitli avantaj ve dezavantajları beraberinde getirir. Bu bağlamda, özellikle NACA ve NREL aerofoil profillerinin Darrieus türbinleri üzerindeki aerodinamik performansını inceleyen çalışmalar, bu türbinlerin verimlilik ve uygulama alanları hakkında önemli bilgiler sunmaktadır [9]. Ayrıca, yeni hibrit kanat tasarımlarının üç boyutlu H-tipi Darrieus rüzgâr türbinlerinin genel performansı ve kendi kendine başlama kabiliyeti üzerindeki etkilerini araştıran araştırmalar, bu türbinlerin performansını artırma potansiyelini ortaya koymaktadır [10]. Bu çalışmalar, farklı rüzgâr türbini tasarımlarının sunduğu fırsatları ve karşılaştığı zorlukları anlamak için önemli bir temel oluşturmaktadır. Bu makale, bu türbini türlerinin avantaj ve dezavantajlarını ele alarak, hangi koşullar altında daha etkili olduklarını incelemeyi amaçlamaktadır.

Kule yüksekliği ve türbülans yoğunluğunun rüzgâr türbinleri üzerindeki etkisi, çeşitli çalışmalarda incelenmiştir. Türbülans yoğunluğu, art izi özelliklerini, dinamik rüzgâr yüklerini ve genel rüzgâr türbini verimliliğini etkiler [11,12]. Deneysel araştırmalar, türbülansın özellikle düşük Reynolds sayılarında rüzgâr türbinlerinin aerodinamik özelliklerinde önemli bir rol oynadığını göstermiştir [13]. Ayrıca, yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin farklı çalışma koşullarında verimliliklerini anlamak için performans analizleri yapılmış ve türbülans etkilerinin türbin performansı üzerindeki önemi vurgulanmıştır [14]. Türbülansın rüzgâr türbini art izi ve rüzgâr çiftliği verimliliği ile etkileşimi üzerine yapılan çalışmalar, türbin art izi akışlarını anlamının ve modellemenin önemini vurgulamaktadır. Bu etkileşimler, atmosferik sınır tabakası türbülans yapısı ve güç üretim verimliliği üzerinde önemli etkiler yaratmaktadır [15]. Türbülans yoğunluğunun, rüzgâr türbinlerinin aerodinamik yükleri ve yapısal performansı üzerinde önemli bir etkisi olduğu ve yüksek türbülans yoğunluğuna sahip rüzgâr alanlarında platform hareketleri ve yapısal yükleri etkilediği bulunmuştur [16]. Sonuç olarak, türbülans yoğunluğu ve rüzgâr türbinleri üzerindeki etkileri üzerine yapılan araştırmalar, atmosferik türbülans, art izi dinamikleri ve türbin performansı arasındaki karmaşık ilişkiyi vurgulamaktadır. Bunun yanı sıra, rüzgâr türbinlerinin konumlandırılması ve kule yüksekliğinin optimize edilmesi, rüzgâr gücü projelerinde

önemli hususlardır [17,18]. Göbek yüksekliğinin optimize edilmesi, rüzgâr türbinlerinin kapasitesini ve genel verimliliğini artırabilir [19]. Rüzgâr parametrelerinden türbülans yoğunluğu ve rüzgâr hız profili türbin performansına etki eden kritik faktörlerdir [17,20,21].

Bu çalışmada, yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde kule yüksekliği ve türbülans yoğunluğunun etkileri incelenmiştir. Kanat Elemanı Momentum (Blade Element Momentum, BEM) teorisi kullanılarak yapılan simülasyonlarda, NREL 5-MW rüzgâr türbini referans olarak alınmıştır. Simülasyonlar ve analizler, üç farklı rüzgâr hızı ve kule yüksekliği ile dört farklı türbülans yoğunluğu değeri için yapılmıştır.

MATERYAL VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

Rüzgâr Enerjisi ve Kanat Elemanı Momentum Teorisi ile İlgili Temel Formüller

(Basic Equations Related to Wind Energy and Blade Element Momentum Theory)

Bu bölümde öncelikle rüzgâr türbinleri ile ilgili hesaplamalarda ve Kanat Elemanı Momentum Teorisinde kullanılan bazı formüllere yer verilecektir. Reynolds sayısı, akışkan dinamiğinde önemli bir parametre olup, akışın laminar mi yoksa türbülanslı mı olduğunu anlamak için fikir verir. Kanat profilleri için Reynolds sayısı Denklem (1) ile hesaplanabilir.

$$Re = \frac{\rho U l}{\mu} \quad (1)$$

Bu denklemde ρ akışkan yoğunluğu (kg/m^3), U serbest akış hızı (m/s), l karakteristik uzunluğu (m) ve μ ise dinamik viskoziteyi ($Pa \cdot s$) ifade etmektedir. Aerodinamik ile ilgili çalışmalarda en çok kullanılan katsayılardan olan taşıma (C_D) ve sürüklenme (C_L) katsayıları kanat profilleri için Denklem **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** ve **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** kullanılarak hesaplanabilir. Buradaki F_L ve F_D sırasıyla kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerini (N) ve c veter uzunluğunu (m) ifade etmektedir [22].

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2 c} \quad (2)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho U^2 c} \quad (3)$$

Kanat eleman teorisinde her bir eleman birbirinden bağımsız olarak ele alınır ve sabit bir eksenel akış katsayısı olduğu, radyal etkileşimin olmadığı varsayılır. Bu bağlamda, kanat kesitinin tasarıma olan etkisi daha net ortaya çıkar. Akışkan ortamında hareket ettirilen bir kanat profilinde aerodinamik kuvvet bileşenlerinden hareket yönüne dik olan kaldırma kuvveti Denklem (4) ile ifade edilebilir.

$$F_L = C_L \frac{1}{2} \rho U^2 b c \quad (4)$$

Bu denklemde b kanat genişliğini ifade etmektedir. Benzer şekilde kanat üzerine etki eden sürüklenme kuvveti de Denklem **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'de ifade edilmiştir.

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho U^2 b c \quad (5)$$

Belirli bir dönme hızında tasarlanan kanat geometrisinin performansı, kanat uç hızı ile rüzgâr hızı arasındaki oran kullanılarak değerlendirilir ve bu orana kanat uç hız oranı (λ) denir. Kanat uç hız oranının sıfır olduğu durumda rotorda dönme hareketi görülmez ve rüzgârdan etkin güç alınamaz. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde genel olarak kanat uç hız oranı 0–12 arasında olduğunda pozitif güç katsayısı değeri elde edilir.

Güç katsayısı (C_p) hesabında Denklem **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** kullanılabilir.

$$C_P = \frac{P_{türbin}}{P_{disk}} = \frac{\frac{1}{2}\rho A k_V^4 (1-k_V)^2 U_D^3}{\frac{1}{2}\rho U_D^3 A} = 4k_V(1-k_V)^2 \quad (6)$$

Bu denklemde A disk alanını (m^2), k_V ise hız oranını (rotor öncesi hızın rotor sonrası hıza oranı) ifade etmektedir. Rüzgârın sahip olduğu kinetik enerjiden elde edebileceği maksimum güç katsayısı değeri (C_P) 'Betz Limiti' olarak adlandırılır ve alabileceği maksimum değer $k_V = 1/3$ için 0,5926 olarak hesaplanabilir [22].

Bir rüzgâr türbininin rotoruna gelen rüzgâr gücü

$$P = \frac{1}{2}\rho A V^3 \quad (7)$$

denklemleri ile ifade edilir. Bu formül, toplam verim n_t ile çarpıldığında faydalı güç elde edilir.

$$P_f = \frac{1}{2}\rho A V^3 n_t \quad (8)$$

Toplam verim ifadesi Denklem **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'da verilmiştir.

$$n_t = C_p n_d n_j \quad (9)$$

Burada n_d ve n_j mekanik ve jeneratör verimlerini ifade etmektedir. İstenilen yükseklikteki rüzgâr hızı, referans bir yükseklikteki rüzgâr hızı biliniyorsa Denklem **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** ile bulunabilir.

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{H}{H_0}\right)^\alpha \quad (10)$$

Burada V istenilen yükseklikteki rüzgâr hızı (m/s), H rüzgâr hızı hesaplanmak istenilen yüksekliği (m), V_0 referans yükseklikteki rüzgâr hızını (m/s), H_0 ise referans rüzgâr hızının ölçüldüğü yüksekliği (m), α ise pürüzlülük katsayısını ifade etmektedir. Bu çalışmada yüksekliğe bağlı hız değişimi hesaplamalarında pürüzlülük katsayısı değeri $\alpha = 0,16$ kabul edilmiştir.

Betz ve Schmitz Teorileri (Betz and Schmitz Theories)

Betz teorisinde rüzgârın rotasyonu dikkate alınmaz. Dolayısıyla bir 'r' radyal pozisyonunda, rotorun teğetsel hızı, başka bir deyişle, aşağı yönlü hızı için aşağıdaki ifadeler kullanılır. Teğetsel hızın tanımlanmasında rotorun açısal hızı da ifade edilir [22].

$$\omega = 2\pi n \quad (11)$$

$$U_R = \omega r = 2\pi n r \quad (12)$$

Burada n , rotorun saniyede gerçekleştirdiği tur sayısını ifade eder. Bununla birlikte, rotor düzlemindeki hız üçgeninin de tanımlanması gerekir. Rotor düzlemindeki rüzgâr hızı, kanat teğetsel hızı ve bağıl hızın oluşturduğu hız üçgeninden,

$$V^2 = U_R^2 + U_D^2 \quad (13)$$

ifadesi elde edilir. Kanat açılarının belirlenmesinde tanımlanan hız üçgeninden yararlanarak denklemler elde edilebilir.

Schmitz'in kanat teorisi Betz'in kanat teorisine göre daha detaylı olarak rotor düzlemindeki akış için geliştirmiştir. Teoride rotor şaftındaki torkun sadece rotor ardındaki dönüşten oluşturulabileceği belirtilmiştir. Güç ifadesinin elde edilmesinde,

$$P = M\omega \quad (14)$$

rotor torku (M) ve açısal hız (ω) kullanılır. Betz teorisinden farklı olarak, kanadın rotor dönüş yönündeki

teğetsel hızı için,

$$U_R = \omega r + \frac{1}{2} \Delta u \quad (15)$$

ifadesi kullanılır. Schmitz kanat teorisinde açışal momentumun korunumu uygulanırken, rotorda oluşan torkun, sadece türbin ardında oluşan helezonik dönüşle beraber oluşabileceği kabulü yapılır. Kanat elemanının teğetsel hızındaki değişimin, rotor düzlemini geçiş sırasında görülen hızdaki değişimin yarısı kadar olduğu kabulü yapılır.

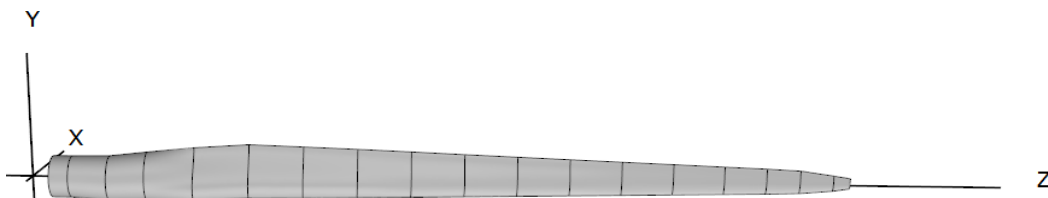
Referans Rüzgâr Türbini: NREL 5-MW (Reference Wind Turbine: NREL 5-MW)

Bu aşamada açık kaynak QBlade yazılımı kullanılarak simülasyonlar yapılmıştır. Bu yazılım özellikle rüzgâr türbini tasarımı ve analizi için geliştirilmiş açık kaynak bir yazılım paketidir. Bu yazılım, aerodinamik ve yapısal analizler yaparak kullanıcıların rüzgâr türbini performansını simüle etmesine olanak tanır. Ayrıca bu yazılım, özellikle yatay eksenli rüzgâr türbinleri (HAWT) ve dikey eksenli rüzgâr türbinleri (VAWT) üzerinde çalışmak isteyen araştırmacılar ve mühendisler rüzgâr türbinlerinin tasarım sürecini hızlandırırken, aynı zamanda türbinlerin aerodinamik performansını optimize etmek için ayrıntılı analizler yapılmasına olanak tanır. QBlade, rüzgâr türbini kanat profillerinin performansını simüle etmek için BEM (Blade Element Momentum) teorisini kullanır. Bu yöntem, kanat elemanlarının her biri üzerindeki aerodinamik kuvvetleri hesaplayarak türbinin toplam performansını değerlendirir. Ayrıca, yazılım kullanıcıların kanat profilleri oluşturmalarına, bu profilleri simüle etmesine ve elde edilen sonuçları görselleştirmesine olanak tanıyan kapsamlı bir arayüz sunar. Yazılımın bir diğer önemli özelliği ise aeroelastik analizler yapabilmesidir; bu sayede, rüzgâr türbinlerinin hem aerodinamik hem de yapısal dinamiklerini aynı anda incelemek mümkündür [23].

Literatürde, QBlade yazılımının rüzgâr türbini performans analizlerinde yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Örneğin, Marten ve diğerleri tarafından yapılan bir çalışma, yazılımın aerodinamik simülasyonlar için sunduğu yetenekleri detaylı bir şekilde ele almış ve bu yazılımın rüzgâr türbini tasarım sürecinde sağladığı faydaları ortaya koymuştur [23].

Referans olarak kullanılan rüzgâr türbini NREL 5-MW rüzgâr türbinidir. Bu rüzgâr türbini ile ilgili genel bilgiler Tablo 1’de verilmiştir [24]. Şekil 1’de Qblade yazılımından alınan bu rüzgâr türbinine ait görsel verilmiştir. Rüzgâr türbini 126 metre rotor çapına 3 metre göbek çapına sahiptir. Dört farklı kanat profili kullanılan bu rüzgâr türbinine ait burulma açısı ve veter uzunluğu dağılımı Qblade yazılımı ile elde edilen NREL 5-MW rüzgâr türbinine ait güç katsayısı – uç hız oranı eğrisi Şekil 2’de verilmiştir. Burada rüzgâr hızı 10 m/s olarak tanımlanmış olup, Prandtl uç kayıpları hesaba katılmıştır. Buna göre en fazla güç katsayısı değeri yaklaşık $C_p=0,48$ olarak yaklaşık $\lambda=7,6$ ’da elde edilmiştir. Şekil 3’te ise itme katsayısı – uç hız oranı eğrisi verilmiştir. Beklendiği gibi uç hız oranı arttıkça itme katsayısı değeri artmakta, yaklaşık $\lambda=12$ ’de $C_T=1$ değerine ulaşmaktadır.

Tablo 2’de verilmiştir [24].



Şekil 1
NREL 5-MW yatay eksenli rüzgâr türbini kanadının görseli

Tablo 1
NREL 5-MW rüzgâr türbini [24]

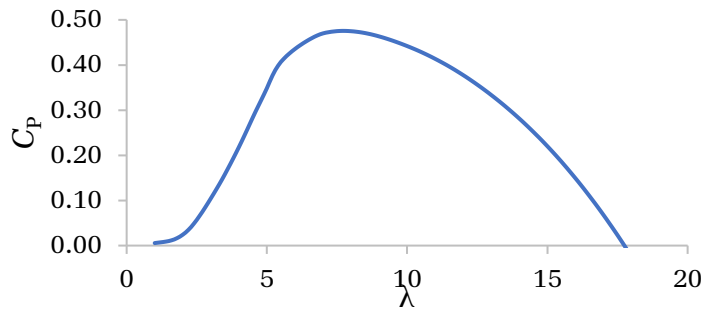
Özellik	Değer
Güç	5 MW
Kanat sayısı	3
Rotor çapı, göbek çapı	126 m, 3 m
Kule yüksekliği	90 m
Başlama, nominal, kesme rüzgâr hızları	3 m/s, 11,4 m/s, 25 m/s
Nominal rotor dönme hızı	12,1 d/d
Rotor çıkıntısı, eğimi, konikliği	5 m, 5°, 2,5°
Kule taban çapı, tepe çapı	6 m, 3,87 m

Qblade yazılımı ile elde edilen NREL 5-MW rüzgâr türbinine ait güç katsayısı – uç hız oranı eğrisi Şekil 2’de verilmiştir. Burada rüzgâr hızı 10 m/s olarak tanımlanmış olup, Prandtl uç kayıpları hesaba katılmıştır. Buna göre en fazla güç katsayısı değeri yaklaşık $C_P=0,48$ olarak yaklaşık $\lambda=7,6$ ’da elde edilmiştir. Şekil 3’te ise itme katsayısı – uç hız oranı eğrisi verilmiştir. Beklendiği gibi uç hız oranı arttıkça itme katsayısı değeri artmakta, yaklaşık $\lambda=12$ ’de $C_T=1$ değerine ulaşmaktadır.

Tablo 2

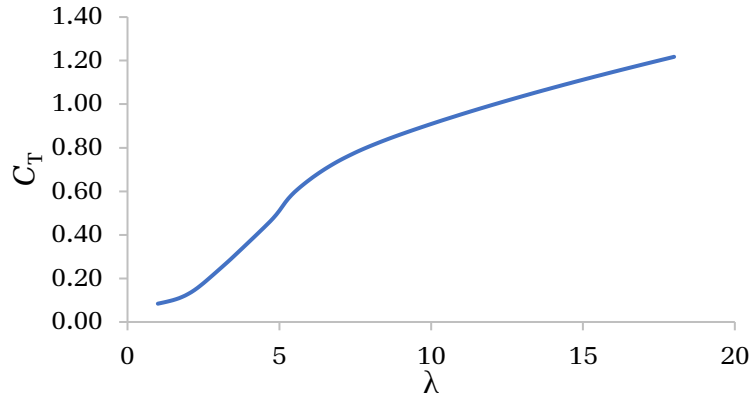
Veter Uzunluğu ve Burulma Açısı Dağılımı

	Radyal mesafe [m]	veter [m]	Burulma [derece]	Kanat profili
1	1,50000	3,54200	13,31	silindirik
2	2,86670	3,54200	13,31	silindirik
3	5,60000	3,85400	13,31	silindirik
4	8,33330	4,16700	13,31	silindirik
5	11,75000	4,55700	13,31	DU40
6	15,85000	4,65200	11,48	DU35
7	19,95000	4,45800	10,16	DU35
8	24,05000	4,24900	9,01	DU30
9	28,15000	4,00700	7,79	DU25
10	32,25000	3,74800	6,54	DU25
11	36,35000	3,50200	5,36	DU21
12	40,45000	3,25600	4,19	DU21
13	44,55000	3,01000	3,13	NACA64
14	48,65000	2,76400	2,32	NACA64
15	52,75000	2,51800	1,53	NACA64
16	56,16670	2,31300	0,86	NACA64
17	58,90000	2,08600	0,37	NACA64
18	61,63330	1,41900	0,11	NACA64
19	63,00000	0,96100	0,00	NACA64



Şekil 2

Referans rüzgâr türbinine ait uç hız oranı (λ) – güç katsayısı (C_P) eğrisi



Şekil 3

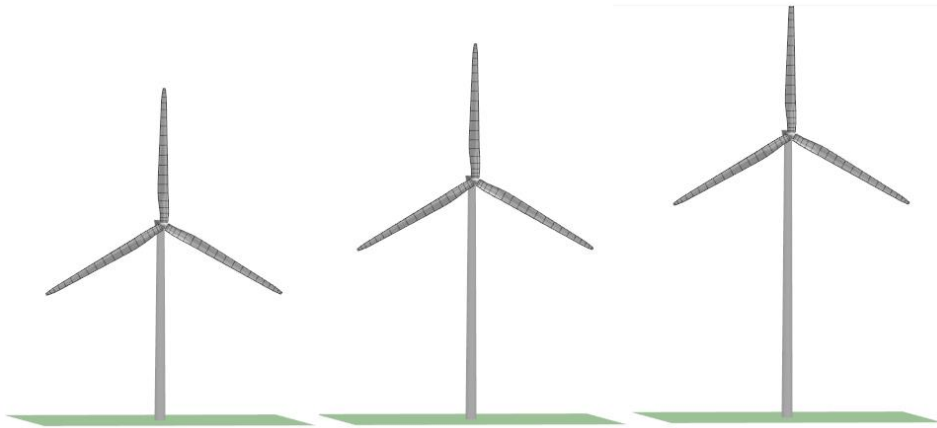
Referans rüzgâr türbinine ait uç hız oranı (λ) – itme katsayısı (C_T)

Bu çalışmada elde edilen en yüksek güç katsayısı değeri $C_P = 0,48$ olup, bu değer $\lambda = 7,6$ 'da elde edilmiştir. Literatürde yer alan NREL 5-MW türbini ile ilgili sonuçlarla karşılaştırıldığında, bu bulguların oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Jonkman ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda [24], NREL 5-MW referans türbini için maksimum güç katsayısının yaklaşık $C_P = 0,48$ seviyelerinde olduğu ve bu değer $\lambda = 7,5 - 8$ aralığında elde edildiği belirtilmiştir. Bu uyum, yapılan analizlerin doğruluğunu ve geçerliliğini desteklemektedir.

İtme katsayısı (C_T) sonuçlarına bakıldığında ise, bu çalışmada $\lambda = 12$ 'de $C_T = 1$ değerine ulaşıldığı tespit edilmiştir. Bu sonuç, itme katsayısının artan uç hız oranı ile yükseldiğini ve C_T değerinin belirli bir λ oranında doyuma ulaştığını göstermektedir. Literatürde de NREL 5-MW türbini için benzer eğilimler gözlemlenmiştir. Hansen tarafından yapılan bir çalışmada [25], C_T değerinin λ ile arttığı ve belirli bir λ oranından sonra (genellikle $\lambda = 11- 13$ aralığında) $C_T = 1$ 'e yakın bir değere ulaştığı rapor edilmiştir. Bu da bu çalışmada QBlade yazılımı ile elde edilen sonuçların literatürle tutarlı olduğunu göstermektedir.

Uygulanan Kule Yükseklikleri, Rüzgâr Hızları ve Türbülans Yoğunlukları (Applied Tower Heights, Wind Speeds and Turbulence Intensities)

Çalışmada üç adet kule yüksekliği – 90, 110 ve 130 metre, 80 metre referans yükseklikte üç adet rüzgâr hızı – 6, 8 ve 10 m/s ve dört adet türbülans yoğunluğu – %1, 5, 10 ve 20 uygulanmıştır. Şekil 4'de uygulanan kule yükseklikleri görsel olarak sunulmuştur. Yüksekliğe bağlı hız değişiminin hesabında pürüzlülük katsayısı değeri daha önceden bahsedildiği gibi 0,16 kabul edilmiştir.

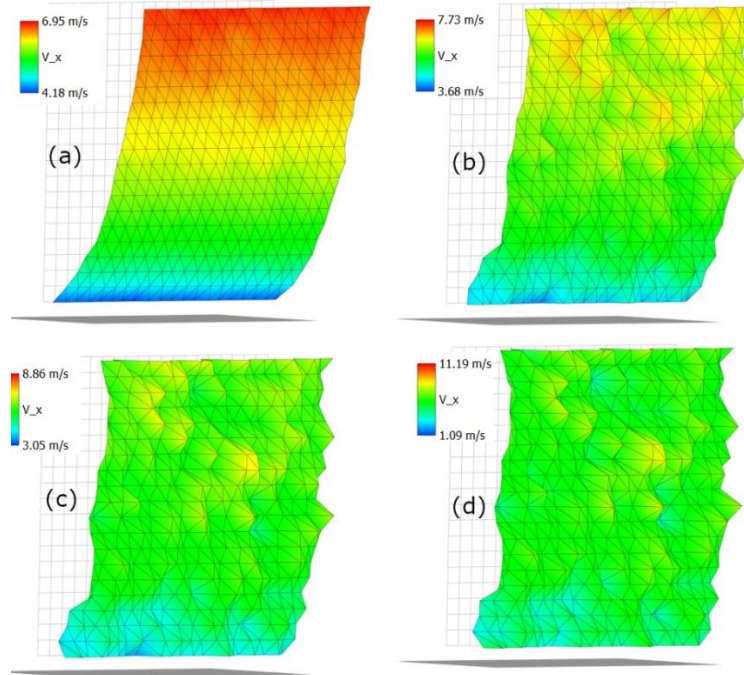


Şekil 4

Kule yükseklikleri: 90 m (sol), 110 m (orta), 130 m (sağ)

Türbülans yoğunluğu değeri girildikten sonra yazılım bu değere bağlı olarak rasgele türbülanslı

alanlar oluşturmaktadır. Şekil 5'te referans yükseklikte 6 m/s rüzgâr hızı için (a) %1, (b) %5, (c) %10, (d) %20 türbülans yoğunluğu değerlerinde örnek türbülanslı alan profilleri verilmiştir. Görüldüğü gibi türbülans yoğunluğu arttıkça hava hızındaki dalgalanmalarda artmaktadır.



Şekil 5

Referans yükseklikte 6 m/s rüzgâr hızı için (a) %1, (b) %5, (c) %10, (d) %20 türbülans yoğunluğu değerlerinde örnek türbülanslı alan profilleri

Tablo 3'de simülasyonlarda kullanılan girdiler özetlenmiştir. Görüldüğü gibi 160 x 160 m boyutundaki türbülans alanları Veers metodu ile oluşturulmuş, simülasyonlar 0,1 s zaman adımı ile toplam 240 s süre için gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3

Genel simülasyon girdileri

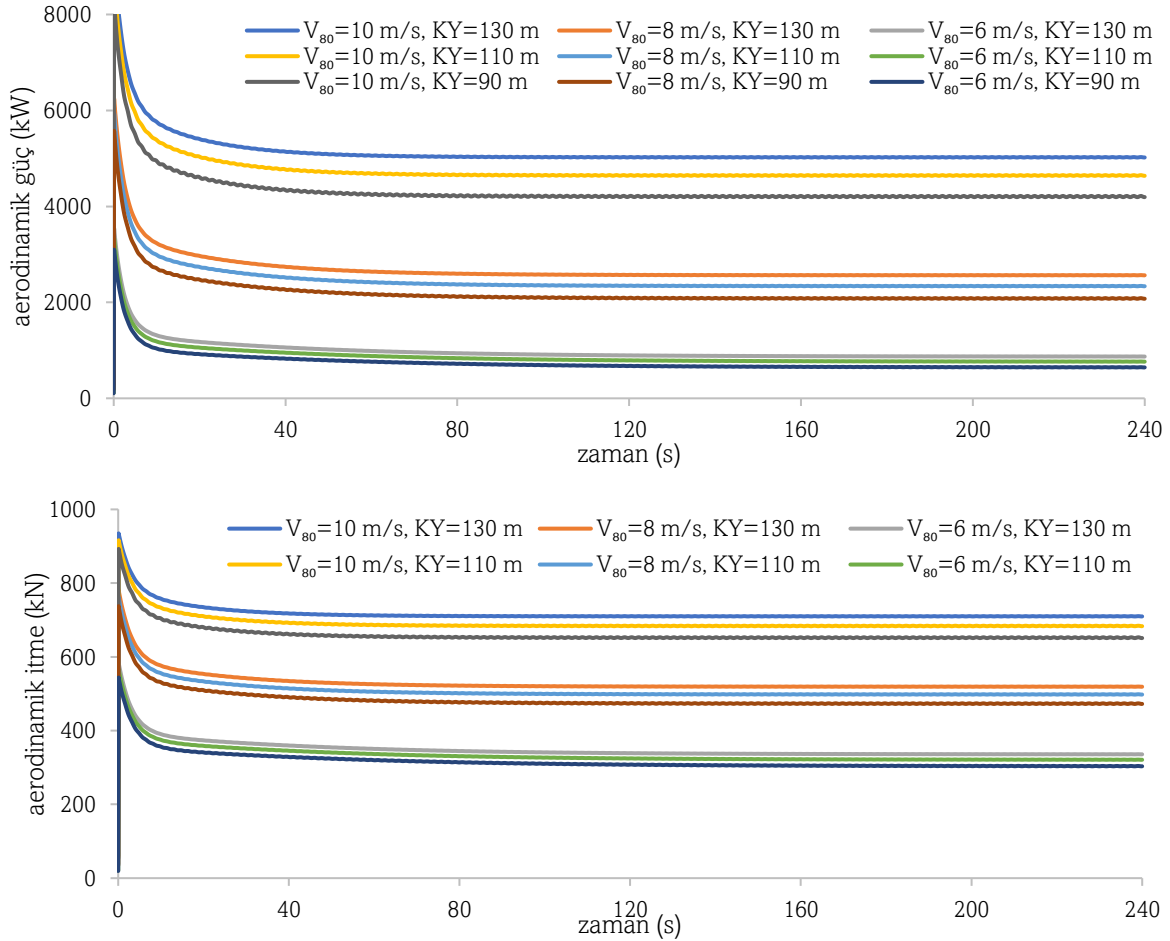
Özellik	Değer
Rüzgâr hızı (80 m referans yükseklikte)	6, 8, 10 m/s
Kule yüksekliği	90, 110, 130 m
Türbülans yoğunluğu	%1, %5, %10, %20
Pürüzlülük katsayısı	0,16
Türbülans alanı oluşturma metodu	Veers metodu
Türbülans alanı boyutları	160 x 160 m
Türbülans alanı için kullanılan rastgele girdilerin sayısı	1.000.000
Türbülans alanı simülasyon zaman adımı	0,1 s
Türbülans oluşturulmuş toplam zaman	240 s
Toplam simülasyon süresi	240 s
Simülasyon adımı	0,1 s
Rotor dönme hızı	12,1 d/d
Rotor çıkıntısı, eğimi, konikliği	5 m, 5°, 2,5°
Kule taban çapı, tepe çapı	6 m, 3,87 m
Hava yoğunluğu	1,225 kg/m ³

BULGULAR (RESULTS)

Şekil 6'da referans 80 m yükseklikte 6, 8 ve 10 m/s rüzgâr hızlarına göre üniform akış altında 90, 110 ve 130 m kule yükseklikleri için aerodinamik güç (üst) ve aerodinamik itme çıktıları verilmiştir.

Buna göre beklendiği gibi kule yükseklikleri ve referans yükseklikteki rüzgâr hızları arttıkça güç çıktısı ve itme değerleri bunlara bağlı artmıştır. Tablo 4'te üniform akış altında elde edilen aerodinamik güç, güç katsayısı (C_p), itme katsayısı (C_T) çıktıları özetlenmiştir. Burada kule yüksekliği ve rüzgâr hızının artmasıyla rüzgâr türbinlerinin ürettiği gücün önemli ölçüde arttığı, güç katsayısının yükseldiği, bu da daha yüksek kulelerin ve daha hızlı rüzgârların türbin verimliliğini olumlu yönde etkilediği gözlemlenmiştir. Örneğin, referans yükseklikte 6 m/s rüzgâr hızında güç üretimi 90 m'de 644 kW iken, 130 m'de 871 kW'a çıkmıştır. Rüzgâr hızına bağlı inceleme yapıldığında, 110 m yükseklikte 6 m/s hızda güç üretimi 764 kW iken, 10 m/s hızda 4639 kW'a çıkmıştır.

Şekil 6'ya göre, farklı kule yüksekliklerinde ve rüzgâr hızlarında elde edilen aerodinamik itme kuvvetleri, rüzgâr hızına ve kule yüksekliğine bağlı olarak değişmektedir. Yüksek kulelerde ve artan rüzgâr hızlarında aerodinamik itme kuvveti artmakta ve nominal rüzgâr hızına kadar maksimum seviyeye ulaşmaktadır. Bu itme kuvveti, türbinin nominal güce ulaştığı noktadan sonra, kanat açısının değişmesiyle birlikte azalmaktadır. Şekil 6'da rüzgâr hızları arttıkça aerodinamik itme kuvvetinin de arttığı gözlemlenebilir. Bu durum, türbin performansının ve yapısal dayanımının değerlendirilmesinde önemli bir parametre olarak ele alınmalıdır.



Şekil 6

Üniform akış altında 90, 110 ve 130 m kule yüksekliklerinde ve referans yükseklikte 6, 8 ve 10 m/s rüzgâr hızları için aerodinamik güç (üst) ve itme (alt) çıktıları

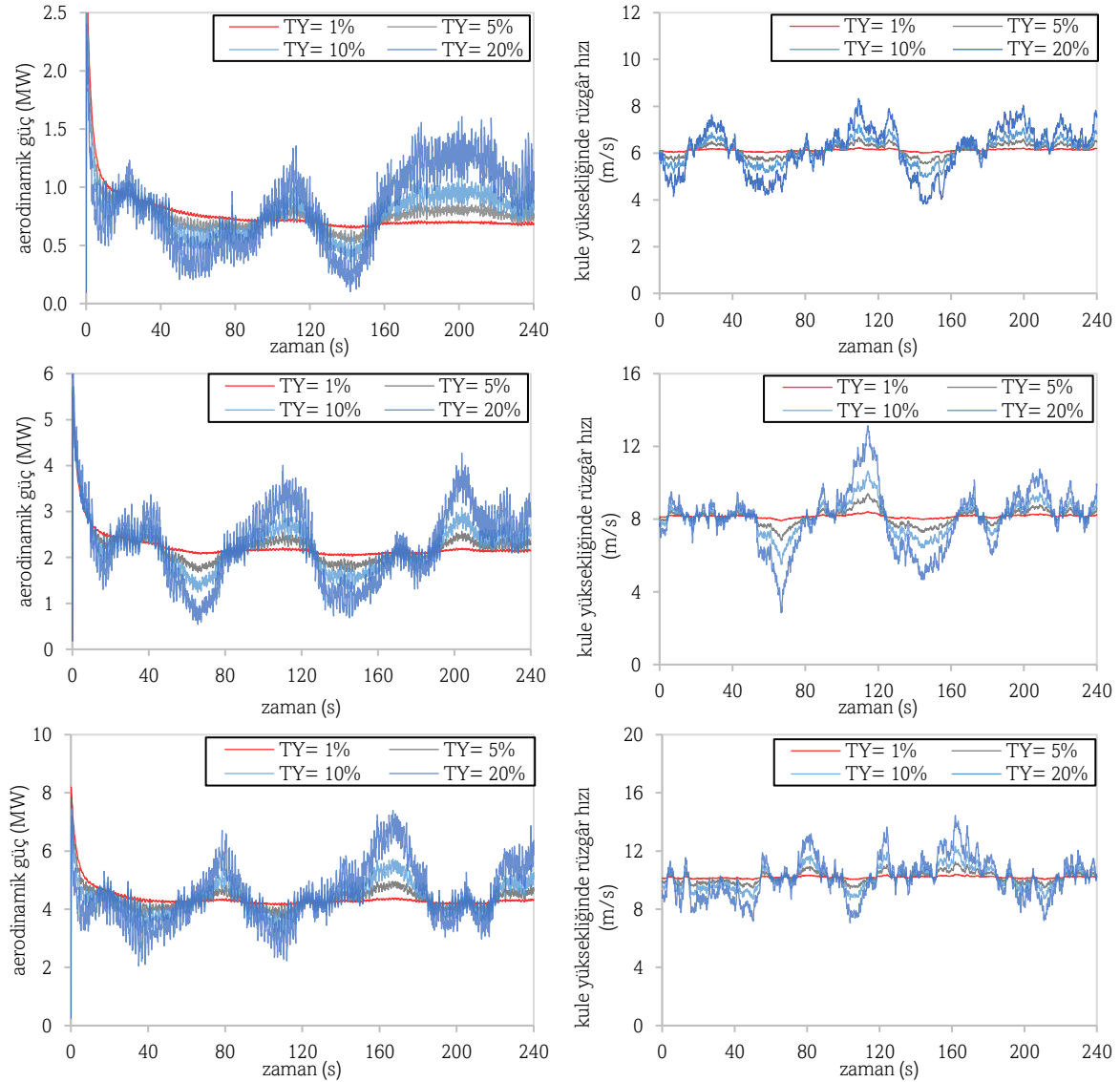
Tablo 4

Üniform akış altında çıktılar

Kule Yüksekliği →	90 m			110 m			130 m		
	Rüzgâr Hızı	Güç	C_p	C_T	Güç	C_p	C_T	Güç	C_p

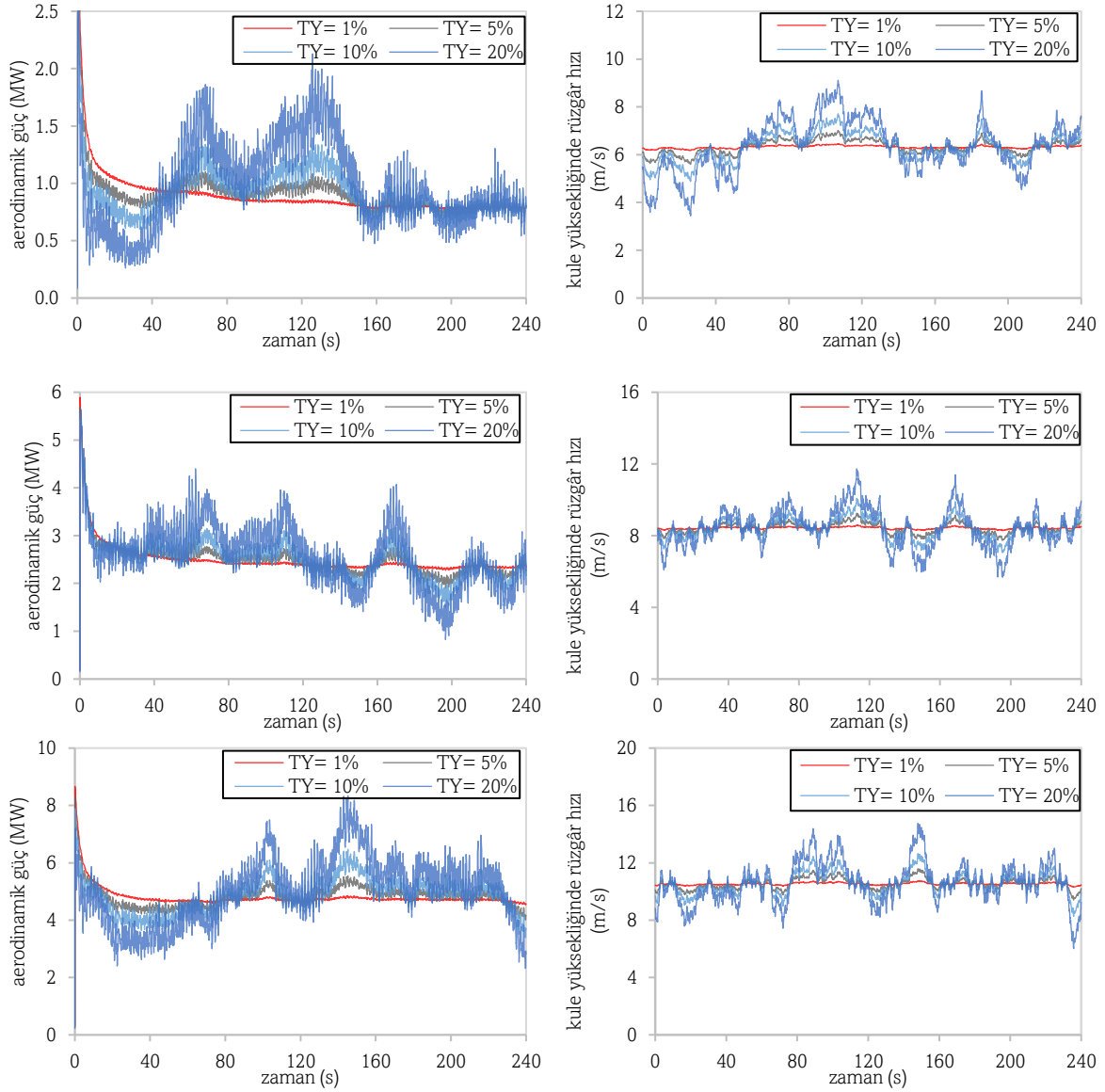
(m/s) (80 m)↓	(kW)			(kW)			(kW)		
6	644	0,37	1,06	764	0,40	1,05	871	0,42	1,05
8	2076	0,50	0,93	2336	0,51	0,92	2564	0,52	0,91
10	4195	0,52	0,82	4639	0,52	0,81	5021	0,52	0,80

Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9’da sırasıyla 90, 110 ve 130 metre kule yüksekliklerinde referans yükseklikte 6 m/s (üst), 8 m/s (orta) ve 10 m/s (alt) rüzgâr hızları için farklı türbülans yoğunluklarında aerodinamik güç çıkışı (sol) ve kule yüksekliğindeki rüzgâr hızının (sağ) simülasyonu sonuçları grafiksel olarak verilmiştir. İlk olarak Şekil 7 incelendiği zaman rüzgâr hızı dalgalanmalarının referans yükseklikte 6 m/s hızda daha az iken, 10 m/s hızda çok daha fazla olduğu görülmüştür. 90 metre kule yüksekliğinde ortalama rüzgâr hızındaki artış, referans yükseklik 80 metre olduğu için az bir miktarda olmuştur. Türbülans yoğunluğunun artmasıyla hem rüzgâr hızı hem de buna bağlı aerodinamik güç çıkışı değerlerindeki dalgalanmanın arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 7

90 m kule yüksekliği ve referans yükseklikte 6 m/s (üst), 8 m/s (orta) ve 10 m/s (alt) rüzgâr hızları için farklı türbülans yoğunluklarında aerodinamik güç çıkışı (sol) ve kule yüksekliğindeki rüzgâr hızının (sağ) simülasyonu

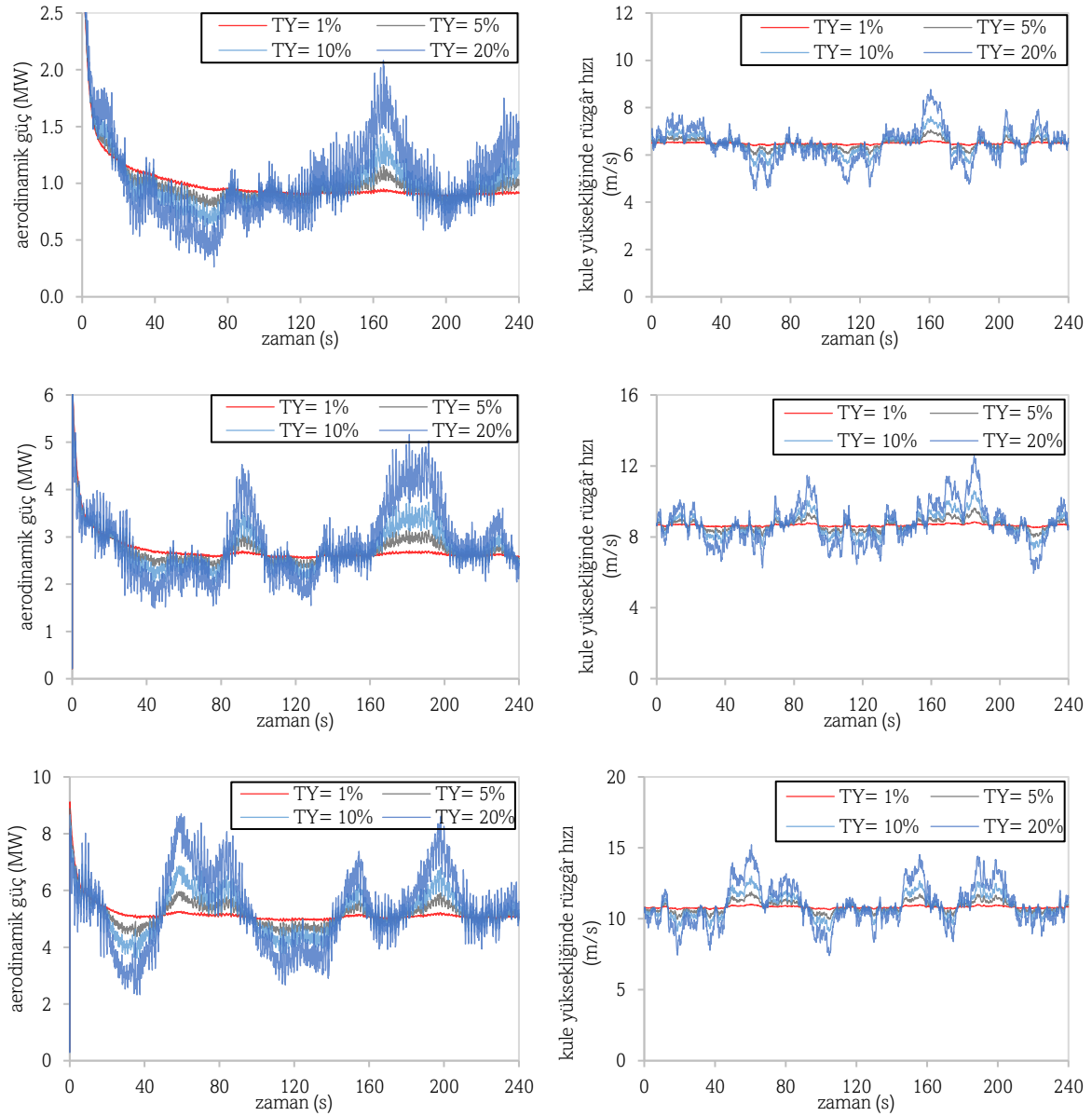


Şekil 8

110 m kule yüksekliği ve referans 6 m/s (üst), 8 m/s (orta) ve 10 m/s (alt) rüzgâr hızları için farklı türbülans yoğunluklarında aerodinamik güç çıkışı (sol) ve kule yüksekliğindeki rüzgâr hızının (sağ) simülasyonu

Şekil 8 incelendiğinde, kule yüksekliği arttıkça kule yüksekliğindeki rüzgâr hızlarının da arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle $V_{80}=10$ m/s ve türbülans yoğunluğu değerinin %20 olduğu durumda kule yüksekliğindeki rüzgâr hızının 13 m/s değerini geçtiği görülmüş, yaklaşık 4 m/s dalgalanma olduğu gözlemlenmiştir. Beklendiği gibi en az dalgalanma %1 türbülans yoğunluğu değerinde gerçekleşmiştir.

Şekil 9'da ise 130 metre kule yüksekliğindeki sonuçlar verilmiştir. Bu kule yüksekliğinde hızların $V_{80}=6, 8$ ve 10 m/s için sırasıyla yaklaşık 6,5, 9 ve 11 m/s değerlerine ulaştığı görülmüştür. Buna bağlı olarak hız ve aerodinamik güç dalgalanmalarının türbülans yoğunluğuna bağlı olarak çok daha fazla arttığı görülmüştür. Referans hız $V_{80}=6$ m/s olduğunda bile %20 türbülans yoğunluğunda kule yüksekliğindeki hız dalgalanmasının 1,5 m/s'yi bulduğu görülmüştür.



Şekil 9

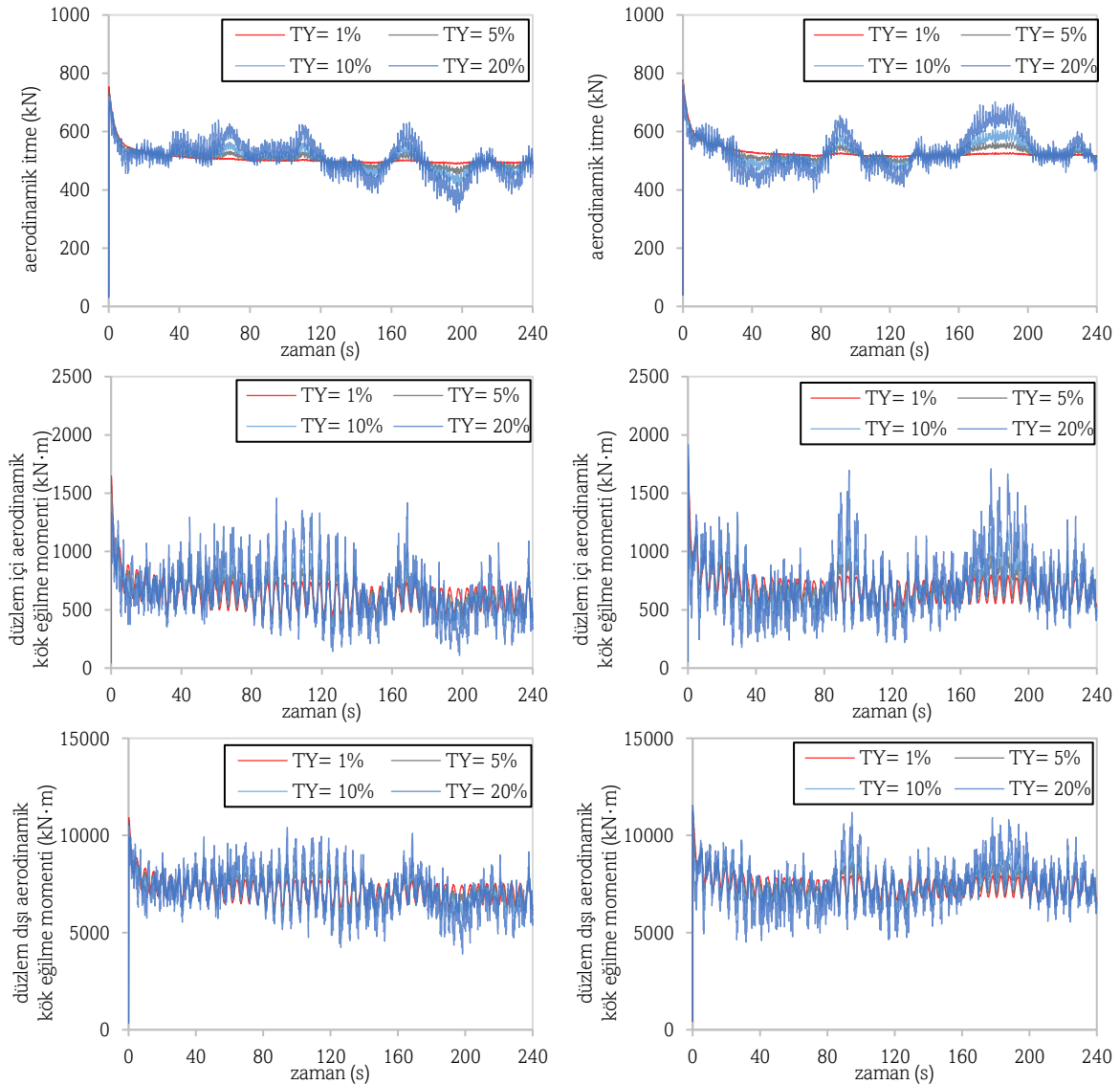
130 m kule yüksekliği ve referans yükseklikte 6 m/s (üst), 8 m/s (orta) ve 10 m/s (alt) rüzgâr hızları için farklı türbülans yoğunluklarında aerodinamik güç çıkışı (sol) ve kule yüksekliğindeki rüzgâr hızının (sağ) simülasyonu

Şekil 10'da rüzgâr hızı referans yükseklikte sabit tutularak 110 metre ve 130 metre kule yüksekliklerinin ve türbülans yoğunluklarının aerodinamik itme ile aerodinamik düzlem iç ve dış kök eğilme momentlerine olan etkileri incelenmiştir. 130 metrelik kule için, kule yüksekliğine bağlı olarak rotora gelen rüzgâr hızı göbekte yaklaşık %2,7 daha fazladır.

Kule yüksekliğine bağlı gelişen hız artışı doğal olarak hem kule hem de rotor kanatları üzerinde daha yüksek aerodinamik itmelere sebep olmaktadır. Aerodinamik itme kuvvetlerindeki artış Şekil 10'da %1 türbülans yoğunlukları karşılaştırıldığında açık olarak görülebilmektedir. 110 metre kule yüksekliği için aerodinamik itme değeri yaklaşık 500 kN değeri etrafında salınım yapmakta iken 130 metre için bu değer 520 kN dolaylarındadır. Kule yüksekliği artışı düzlem içi ve dışı kök eğilme momentlerini de etkilemiştir. 110 metrelik kule ile yapılan simülasyonda düzlem içi kök eğilme momenti yaklaşık 600 kN·m etrafında salınım yaparken bu değer 130 metrelik kule simülasyonu için 680 kN·m dolaylarındadır. Düzlem dışı kök eğilme momentlerinde ise bu değerler 110 metrelik kulede

yaklaşık 7000 kN·m ve 130 metrelik kulede yaklaşık 7500 kN·m civarında salınım göstermektedir.

Her iki kule yüksekliği için de Şekil 8 ve Şekil 9'a paralel olarak Şekil 10'da karşılaştırılan değerlerin yaklaşık 80 saniyelik periyotlarla dalgalandığı görülmektedir. Fakat bu iki kulenin aerodinamik itme ile aerodinamik düzlem iç ve dış kök eğilme momentlerinde ortalama sonuçların etrafında salınım genliklerinin farklı olduğu görülmüştür. 130 metrelik kule için bu genlikler daha fazladır. Kule yüksekliği farkı dolayısı ile anlık rüzgâr hızları 110 metrelik kulenin göbek yüksekliği için 10,5 m/s ve 130 metrelik kulenin göbek yüksekliğinde 12,5 m/s'ye kadar yükselmektedir. Bu durum özellikle %10 ve %20 türbülans yoğunluğunda daha belirgindir. Rüzgâr hızı dolayısı ile artan aerodinamik itmeye ek olarak, kule yükseklik artışı kuvvet kolunu uzatması dolayısı ile kule tabanında önemli derecede moment artışına sebep olmuştur. Ayrıca kule yüksekliğindeki artışla birlikte kulelerin ön-arka ve yanal doğal salınım frekansları da farklılaşmıştır. Sonuç olarak aerodinamik yüklere karşı yapı tepkisi ve salınım genlikleri değişmiştir.

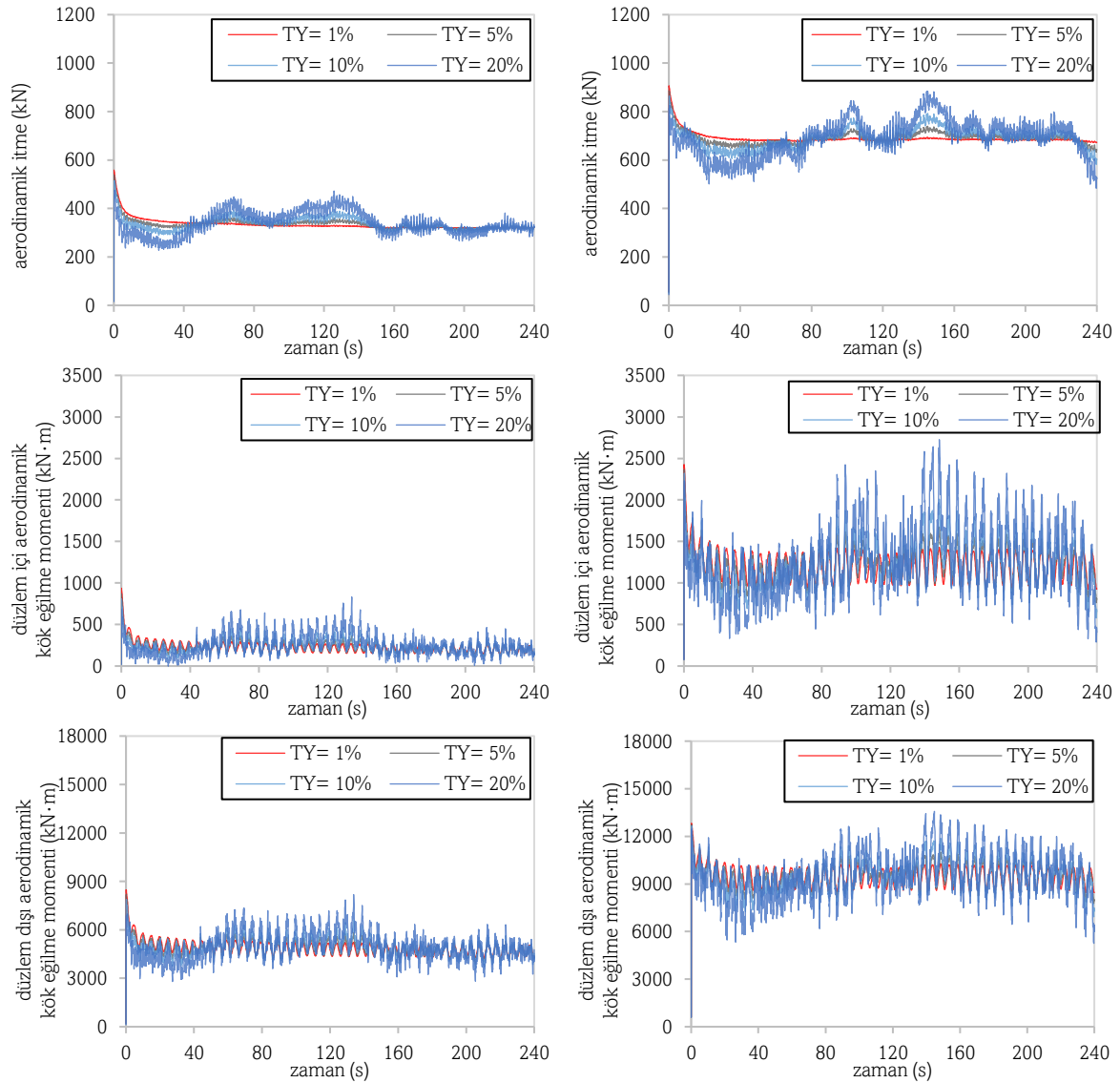


Şekil 10

Referans yükseklikte 8 m/s rüzgâr hızında, 110 m (sol) ve 130 m (sağ) kule yüksekliklerinde itme kuvveti (üst), aerodinamik düzlem içi kök eğilme momenti (orta), aerodinamik düzlem dışı kök eğilme momenti (alt) farklı türbülans yoğunluklarında değişimi

Şekil 11'de kule yüksekliği sabit tutularak referans yükseklikte farklı rüzgâr hızlarının ve türbülans yoğunluklarının aerodinamik itme ile aerodinamik düzlem iç ve dış kök eğilme momentlerine

olan etkileri incelenmiştir. Referans yükseklikteki 6 m/s hız için aerodinamik itme değerleri 320 kN civarında salınım yaparken bu değer 10 m/s rüzgâr hızı için yaklaşık 680 kN'dır. Aerodinamik itme kuvveti türbin nominal rüzgâr hızına kadar artmakta ve maksimum değere ulaşmaktadır. Nominal hızın üzerindeki değerlerde ise nominal güce ulaşıldığı için kanat açısı değişir ve aerodinamik itme değerleri hız arttıkça azalır. Türbülans yoğunluğuna bağlı değişimde ise 10 m/s rüzgâr hızları daha yüksek genlikli dalgalanmalara sebep olmuştur. Fakat bu dalgalanmaların ortalama etrafındaki seyrinde, kule yüksekliği değişimine benzer şekilde, önemli derecede genlik farkı görülmemektedir. Bu noktada Şekil 8'de verilen anlık rüzgâr hızı değişimleri göz önünde bulundurulmalıdır. Bu grafiklerde 10 m/s ortalama hız için ulaşılan anlık maksimum hızlar 6 m/s için edinilen anlık maksimum hızlara göre oransal olarak daha yüksek değerlere ulaşmıştır. Bu sonuçlar %20 türbülans yoğunluğu için belirgindir.



Şekil 11

110 m kule yüksekliğinde, referans yükseklikte 6 m/s (sol) ve 10 m/s (sağ) rüzgâr hızlarında itme kuvveti (üst), aerodinamik düzlem içi kök eğilme momenti (orta), aerodinamik düzlem dışı kök eğilme momenti (alt) farklı türbülans yoğunluklarında değişimi

Aerodinamik itmeye paralel olarak düzlem içi ve dışı eğilme momentleri de rüzgâr hızı artışı ile önemli derecede artmıştır. 80 metre referans yükseklikteki 6 m/s rüzgâr hızı 110 metrelik kule için düzlem içi kanat kök momentleri için yaklaşık ortalama 200 kN·m değerlerine ulaşırken bu değer 10

m/s için 1200 kN·m değerlerine kadar çıkmaktadır. Benzer şekilde düzlem dışı kanat kök eğilme momenti de yaklaşık ortalama 4500 kN·m değerlerinden 9500 kN·m değerlerine yükselmektedir. Ayrıca, %20 türbülans yoğunluğu için daha belirgin olmak üzere, anlık rüzgâr hızı dalgalanmalarının etkisi ile kanat kök eğilme momentleri daha yüksek genlikte dalgalanmalara sahiptir.

SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin performansı üzerindeki kule yüksekliği ve türbülans yoğunluğu etkileri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Referans olarak NREL 5-MW rüzgâr türbini seçilmiş, farklı kule yüksekliklerinde, türbülans yoğunluklarında ve rüzgâr hızlarında simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, kule yüksekliğinin ve türbülans yoğunluğunun türbin çalışma karakteristiği üzerinde belirgin etkiler yarattığını göstermektedir. Kule yüksekliği arttıkça, türbinin rüzgâr hızından daha fazla yararlandığı ve türbin verimliliğinin iyileştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, türbülans yoğunluğundaki artışlar, rüzgâr hızında ve buna bağlı tüm parametrelerde dalgalanmaların artmasına neden olmuştur. Bu etkiler, rüzgâr hızlarına göre değişiklik göstermiştir. Rüzgâr hızındaki artışın, aerodinamik itme, düzlem içi ve dışı eğilme momentlerinde ciddi artışa neden olduğu, türbülans yoğunluğunun artması ile bu parametrelerdeki dalgalanma miktarlarının önemli derecede arttığı görülmüştür. Sonuç olarak, türbin kule yüksekliği ve türbülans yoğunluğunun rüzgâr türbinleri için dikkate alınması gereken önemli parametreler olduğu ortaya konmuştur.

Etik Beyan (Ethical Statement)

Bu makale, yazarların daha önce başka bir yerde yayımlanmamış olan kendi özgün çalışmasıdır. Makale, yazarların kendi araştırma ve analizlerini doğru ve eksiksiz bir şekilde yansıtmaktadır. Sonuçlar, önceki ve mevcut araştırmalar bağlamında uygun bir şekilde ele alınmıştır.

Etik Kurul Onayı (Ethics Committee Approval)

Bu çalışma için etik kurulu onayı gerekmemektedir.

Yazar Katkıları (Author Contributions)

Araştırma Tasarımı (CRediT 1) M.N.K (%40) – A.A.B (%30) – R.B (%15) – M.U (%15)

Veri Toplama (CRediT 2) M.N.K (%60) – A.A.B (%30) – R.B (%10)

Araştırma - Veri Analizi - Doğrulama (CRediT 3-4-6-11) M.N.K (%30) – A.A.B (%20) – R.B (%10) – M.U (%20) – H.B.A (%10) – A.Ö (%10)

Makalenin Yazımı (CRediT 12-13) M.N.K (%30) – A.A.B (%30) – R.B (%10) – M.U (%20) – H.B.A (%10)

Metnin Tashihi ve Geliştirilmesi (CRediT 14) A.Ö (%20) – H.B.A (%30) – R.B (%30) – A.B (%10) – M.N.K (%10)

Finansman (Financing)

Bu çalışma herhangi bir kurum tarafından desteklenmeden yapılmıştır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarların bu çalışma için beyan ettikleri herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SDG)

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları: Desteklemiyor

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] R. Buyukzeren, A. Kahraman, A comparative study on the application of solar thermal collector and photovoltaic combinations to assist an air source heat pump, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 149 (2024), 9413–9428. doi:10.1007/s10973-024-13475-z.
- [2] R.E. Unal, M.H. Guzel, M.A. Sen, M.H. Aksoy, Solar radiation estimation using ANFIS model: evaluation of membership function types and data selection, *International Journal of Environmental Science and Technology*. 21 (2024), 9031-9044. doi:10.1007/s13762-024-05571-2.
- [3] B. Akgayev, S. Akbayrak, M. Yılmaz, M.S. Büker, V. Unsur, Assessing the feasibility of photovoltaic systems in Türkiye: technical and economic analysis of On-Grid, Off-Grid, and Utility-Scale PV Installations, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 6 (2024), 69-92.
- [4] A.O. Özkan, H.B. Demir, Fotovoltaik panellerde sıcaklık ve zenit açsın panel güç üretimine etkisi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 1 (2019), 1-9.
- [5] M.S. Endiz, R. Akkaya, Yarı Empedans Kaynaklı İnverterlerde Farklı PWM Kontrol Tekniklerinin Performans Etkisinin İncelenmesi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 2 (2020), 12-26.
- [6] R. Büyükzeren, A. Kahraman, M.N. Kaya, H.İ. Dağ, Experimental validation of performance parameters of an air source heat pump model, *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*. 9 (2021), 739–748. doi:10.29109/gujsc.1015345.
- [7] F. Kose, M.N. Kaya, Wind-Hydro pumped storage power stations to meet the energy demands of irrigation: feasibility, optimal design and simulation of a system, *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*. 39 (2018), 223-232.
- [8] H.D. Arslan, S.M. Acar Bilgili, S. Doğan, Farklı ilkim bölgelerinde TOKİ tip konutlarının doğal havalandırma analizi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 6 (2024), 1-21.
- [9] Y. Celik, A comparative aerodynamic analysis of NACA and NREL aerofoils for darrieus turbines using CFD, *International Journal of Innovative Engineering Applications*. 6 (2022), 111-117. doi:10.46460/ijiea.1075684.
- [10] Y. Celik, D. Ingham, L. Ma, M. Pourkashanian, Novel hybrid blade design and its impact on the overall and self-starting performance of a three-dimensional H-type Darrieus wind turbine, *Journal of Fluids and Structures*. 119 (2023), 103876. doi:10.1016/j.jfluidstructs.2023.103876.
- [11] Y.-T. Wu, F. Porté-Agel, Simulation of turbulent flow inside and above wind farms: model validation and layout effects, *Boundary-layer meteorology*. 146 (2013), 181-205.
- [12] M.N. Kaya, O. Uzol, D. Ingham, F. Köse, R. Buyukzeren, The aerodynamic effects of blade pitch angle on small horizontal axis wind turbines, *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*. 33 (2023), 120-134. doi:10.1108/HFF-02-2022-0128.
- [13] J.Y. Zhu, L. Zhang, Q.L. Qu, P.Q. Liu, Experimental investigation of aerodynamic characteristics for three typical micro wind turbines at low reynolds number, *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 13 (2020) 1143-1148.
- [14] D. Rozehnal, J. Hnidka, Performance analysis of a horizontal axis wind turbine, içinde: *MATEC Web of Conferences*, 2020: s. 52.
- [15] Y.-T. Wu, C.-Y. Lin, T.-J. Chang, Effects of inflow turbulence intensity and turbine arrangements on the power generation efficiency of large wind farms, *Wind Energy*. 23 (2020), 1640-1655.
- [16] L. Li, Y. Liu, Z. Yuan, Y. Gao, Dynamic and structural performances of offshore floating wind turbines in turbulent wind flow, *Ocean Engineering*. 179 (2019), 92-103.

- [17] K.O. Roberts, N. Mahomed, Hub height optimisation of commercial WTGs based on accurate wind resource analysis, *Wind Engineering*. 46 (2022), 200-220.
- [18] Y.-S. Lee, B.-L. Choi, J.H. Lee, S.Y. Kim, S. Han, Reliability-based design optimization of monopile transition piece for offshore wind turbine system, *Renewable Energy*. 71 (2014), 729-741.
- [19] K. Chen, M.X. Song, X. Zhang, The investigation of tower height matching optimization for wind turbine positioning in the wind farm, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 114 (2013), 83-95.
- [20] T.-H. Yeh, L. Wang, A study on generator capacity for wind turbines under various tower heights and rated wind speeds using Weibull distribution, *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 23 (2008), 592-602.
- [21] Q. Li, J. Murata, M. Endo, T. Maeda, Y. Kamada, Experimental and numerical investigation of the effect of turbulent inflow on a Horizontal Axis Wind Turbine (Part I: Power performance), *Energy*. 113 (2016), 713-722. doi:10.1016/j.energy.2016.06.138.
- [22] Y. Gülsoy, Kanal içerisinde rüzgar türbini tasarım ve HAD analizi ile kanal profilinin türbin performansına etkilerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı / Isı-Akışkan Bilim Dalı*, İstanbul, 2018.
- [23] D. Marten, J. Wendler, G. Pechlivanoglou, C.N. Nayeri, C.O. Paschereit, QBLADE: An open source tool for design and simulation of horizontal and vertical axis wind turbines, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 3 (2013), 264-269.
- [24] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, G. Scott, Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development, 2009. doi:10.2172/947422
- [25] M.O.L. Hansen, Aerodynamics of wind turbines, *Earthscan*, 2008.