



Eşli Çalışan Düşey Eksenli Türbin Performansının İki Boyutlu Benzetimi

Two Dimensional Numerical Analysis of Dual Working Vertical Axis Wind Turbine Performances

Ufuk Akgül ^{1*}, İskender Kökey ^{2,3}, Alpaslan Turgut ⁴, Ziya Haktan Karadeniz ⁵

¹ İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, TÜRKİYE

² Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, TÜRKİYE

³ XGEN Enerji, İzmir, TÜRKİYE

⁴ Dokuz Eylül Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Enerji Anabilim Dalı, İzmir, TÜRKİYE

⁵ İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: ufukakgul@hotmail.com

Geliş Tarihi / Received: 13.03.2022

Kabul Tarihi / Accepted: 10.06.2022

Atıf şekli/ How to cite: ARGÜL, U., KÖKEY, İ., TURGUT, A., KARADENİZ, H.K., (2023). Eşli Çalışan Düşey Eksenli Türbin Performansının İki Boyutlu Benzetimi. DEÜ FMD, 25(73), 81-89.

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.2023257307

Öz

Rüzgar enerji santralindeki (RES) türbinlerin birbirine göre konumları oldukça önemlidir. Bu açıdan önemli hususlardan biri de, birbirine yakın konumda çalışan iki düşey eksenli türbinin (DERT) birbirlerinin performansına olan etkisidir. Literatürde gösterilmiş olan, birlikte çalışan DERT'lerin performansındaki yükselişin nedenlerinin araştırılması gerekmektedir. Saha testlerinde rüzgâr hızlarının tam olarak kontrol edilememesi ve düşey eksenli türbinin kanat dışındaki yapısal elemanlarının akış bozucu etkisi olması, problemin daha basit haliyle, iki boyutlu bilgisayar benzetimi yöntemiyle incelenmesini zorunlu kılmıştır. Bu amaçla çalışma kapsamında, düşey eksenli türbinin akışı bozacak parçalarını ihmal ederek, farklı merkezler arası uzaklığa (1,5, 2, 2,5 ve 4) sahip eşli çalışan iki türbinin performansının farklı uç hız oranlarında (0,5, 1, 1,5, 2, 2,5 ve 3 uç hız oranı) tek çalışan türbine göre nasıl değiştiği iki boyutlu bilgisayar benzetimleriyle incelenmiştir. Eşli çalışma durumunda türbin performansının tek çalışmaya göre %26 yükseldiği görülmüştür. Bu yükselişin ana etkeninin blokaj etkisi olduğu, yanıl hızların ve iki türbin ara bölgesinde hızlanan akış gibi etkilerin ise daha az olduğu saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Düşey eksenli rüzgar türbini 1, eşli 2, iki boyutlu benzetim 3

Abstract

Location of turbines with respect to each other is quite important for designing wind power plants. Therefore, it is an important question how the performance of vertical axis wind turbines (VAWT) changes if they work in pairs. In this context, reasons of performance enhancement of dually working VAWTs as showed in literature should be investigated. Because of non-controllable nature of wind velocity and flow disruptive structural parts of VAWT, firstly, two dimensional numerical analysis of simplified model must be done instead of field test. In this study, two dimensional numerical analysis by using simplified VAWT model has been done for investigating how is turbine performance

changing with different center distances (1.5, 2, 2.5, 4 diameter from center to center) and TSRs (0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3). The results show that performance of dually working VAWTs is 26% higher than single working VAWT. It is obtained that the main reason of this performance enhancement is blockage effect and other factors as divergence lateral velocities and air accelerating between VAWTs zone are less effective.

Keywords: Vertical axis wind turbine 1, pair 2, two-dimensional numerical simulation 3

1. Giriş

Modern yatay eksenli rüzgâr türbinleri (YERT), daha yüksek performansı daha geniş uç hız oranı aralığında gösterdikleri için, düşey eksenli rüzgâr türbinlerine kıyasla rüzgâr türbini piyasasında daha yaygın kullanılmaktadır. 2004 yılında R. N. Thomas, birbirine yakın konumlandırılmış eşli çalışma durumunda düşey eksenli rüzgâr türbinlerinin (DERT) performansında artış görüldüğünü iddia etmiş ve bu kapsamda bir patent almıştır. 2010 yılında yapılan benzetim çalışmasında, sahada çalışan tek türbinle sonuçlar karşılaştırılmış ve hız vektörlerinde uyumsuzluk gözlenmiş olsa da, balık ardındaki girdap oluşumuna göre dizilen 16×16 adet Savonius tipi DERT'in performansında ciddi artış görülmüştür [1]. 2011'de yapılan bir başka çalışmada da eşli çalışan türbinin 4 çap kadar arka bölgesine konulan türbinin performansının tek çalışan türbine yakın olduğu, farkın %5'te kaldığı görülmüştür. Bu bilgiyle tasarlanan türbin birim yerleşim alanı başına 18 W/m²'lik güç elde edilmiştir ve bunun 30 W/m²'ye çıkabileceği belirtilmiştir. YERT'lerin kurulduğu türbin sahalarında birim yerleşim alanı başına 2-3 W/m² güç elde edildiği düşünüldüğünde bunun oldukça yüksek bir değer olduğu ve verimin 6-9 kat arttığı hesaplanmıştır [2]. Bu çalışmadan hareketle ilerleyen yıllarda yapılan akademik çalışmaların sayısı artış göstermeye başlamıştır. Ayrıca DERT'lerin kanat kesiti boyunca kanat profilinin sabit kalması nedeniyle kolay üretim, rüzgâr yönünden bağımsızlık ve daha sessiz çalışma gibi ek başka avantajları da bulunmaktadır [3].

Eşli çalışan DERT'lerdeki performans artışının mekanizmasını anlamak amacıyla bazı benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu benzetimlerde türbinler arası mesafe, uç hız oranı, türbinlerin birbirine göre dönüş yönü, faz farkı ve rüzgâr geliş yönü gibi önemli parametreler incelenmiştir. Merkezleri birbirine 1,32 türbin çapı kadar mesafede bulunan eşli çalışan üç kanatlı Darrieus tipi DERT çiftinin, 1,5

uç hız oranı için üç boyutlu benzetimleri yapılmış ve faz farkıyla çalışan türbinlerin performansının değişimi incelenmiştir [4]. Doğrulama ve ağdan bağımsızlık çalışmasında, en sık ağ yapısının kullanıldığı durumda, tek çalışan türbin için elde edilen tork değerleri deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında benzetimlerde %11 düşük tork değerleri elde edildiği raporlanmıştır. Üç farklı ağ yapısı için, testlerde 90 Nm bulunan tork değeri benzetimlerde sırasıyla 52 Nm, 70 Nm ve 80 Nm bulunmuştur, bu durum ağdan bağımsızlığın tam olarak sağlanamadığını göstermektedir. Eşli türbin benzetimlerinde hesaplama maliyetini düşürmek için, 70 Nm'lik tork değerinin bulunduğu, testlere göre yaklaşık %22 daha az hesaplandığı ağ yapısı kullanılmıştır. Bu nedenle doğruluğunun düşük olduğu değerlendirilen bu çalışmada, aynı fazda dönmeyen eşli çalışan türbinlerin performansında azalma olduğu ve sonuçların doğruluğunu artırmak için daha sık ağ yapısının kullanılması gerektiği belirtilmiştir [4]. 2016 yılında, eşli çalışan türbinlerin dönüş yönüne ve hava akış yönüne bağlı olarak performansın farklı uç hız oranlarında nasıl değiştiği incelenmiştir. Merkezleri birbirine 1,5 türbin çapı uzakta olan, akış yönüne göre içten dışa ve dıştan içe doğru zıt yönde dönen Darrieus tipi DERT çiftinin 2,3-3,2 uç hız oranı için iki boyutlu benzetim çalışması gerçekleştirilmiş ve dıştan içe dönme durumunda türbin performansının tek çalışan türbine göre yaklaşık %13 arttığı gözlenmiştir. Artışın fiziksel mekanizmasını, türbinlerin ön tarafındaki yanal hızların artması ve arka bölgedeki düşük hız alanının genişliği nedeniyle daha yüksek momentum türbinler tarafından kullanılması olarak tanımlamışlardır. Performansı etkileyen bir başka önemli parametre olan hava akış yönünün de incelendiği çalışmada, performans artışının ön ve arka taraftaki ±45°'lik bölgede sağlanabildiği belirtilmiştir. Türbinler arası mesafe değiştiğinde (1,5, 2, 2,5 ve 3 çap) benzer etkinin görüldüğü belirtilmiştir [5]. Çalışma kapsamlı olsa da, dar bir uç hız oranı bölgesinde

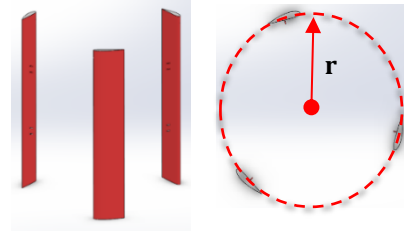
benzetimlerin gerçekleştirildiği görülmektedir. Eşli türbinlerin benzetimiyle ilgili bir başka çalışmada, basınç alanı ve hız dağılımları incelenmiş ve eşli çalışan türbinlerdeki performans artışının, türbin iç bölgesindeki %16'lık hacimsel debi artışından kaynaklandığı ileri sürülmüştür [6]. Ancak bu çıkarım takip eden çalışmada teyit edilememiştir. Eşli çalışma durumunda hava akış yönü ve türbinler arası mesafe gibi önemli parametrelerin performansa olan etkisinin incelendiği bir başka çalışmada, hava akış yönünden bakıldığında içe doğru ve dışa doğru dönen, 1,5 ve 1,05 çap mesafede çalışan DERT çiftinin iki boyutlu benzetimleri gerçekleştirilmiştir. 1,05 çap uzaklıkta ve hava akış yönüne göre içten dışa dönen DERT'lerin performansı %9,5 artış göstermiştir. Eşli çalışan DERT'lerin iç bölgesindeki hızların tek çalışan DERT'e göre daha düşük seviyede olduğu, önceki çalışmadan, [6], farklı olarak iç bölgede hacimsel debi artışının gözlenmediği belirtilmiştir. En yüksek performansın, dönüş yönüne bağlı olarak değişkenlik gösterse de, yanal hızların sıfır olduğu, iki türbin arasında akışın ivmelendiği bölgede elde edildiğinin altı çizilmiş ve performanstaki artışın yanal hızlarla daha ilişkili olduğu belirtilmiştir [7]. Eşli çalışan DERT'lerin iki boyutlu benzetim yöntemiyle incelendiği bir başka çalışmada, dıştan içe doğru zıt yönde dönen türbinlerde, türbin arası mesafenin 0,5 ve 1 çap olduğu durumda türbin performansında %23'e varan yükselişler görüldüğü belirtilmiştir. İki türbinin aynı ve farklı fazda çalıştığı durumun da incelendiği çalışmada, aynı fazda çalışan eşli türbinlerin ara bölgesinin belli periyotlarla çok daraldığına, bunun da Bernoulli prensibi gereği basıncın azalması, akışın hızlanmasına yol açtığı belirtilmiştir [8].

Literatürdeki araştırmaların çoğunlukla türbinler arası uzaklığın küçük olduğu değerler (1,05-1,5 çap aralığı) için veya dar bir uç hız oranı aralığı için gerçekleştirildiği, daha geniş türbinler arası mesafe ve uç hız oranı aralıklarında performansın nasıl değiştiğinin incelenmediği görülmektedir. Bu çalışmada, eşli çalışan düşey etksenli rüzgâr türbinlerin performansının geniş bir türbinler arası uzaklık aralığı (1,5, 2, 2,5 ve 4 çap) ve uç hız oranı (0,5-3) aralığındaki değişimin incelenmesi amacıyla iki boyutlu benzetimler gerçekleştirilmiştir.

2. Benzetim Yaklaşımı ve Doğrulama

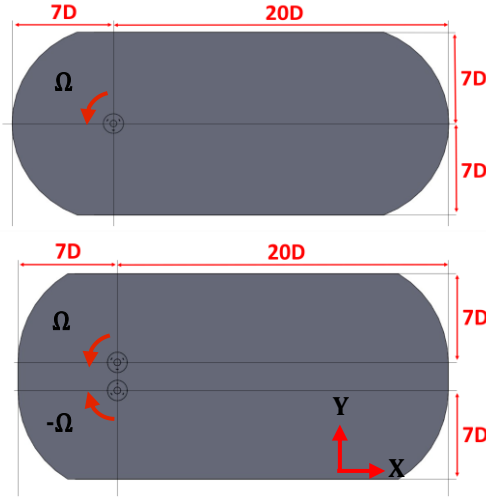
2.1. Benzetim yaklaşımı

Benzetim çalışması için Şekil 1'de gösterilen 2 m rotor çapında (D), 380 mm veter uzunluğuna (c) ve NACA 4418 profiline sahip 3 kanatlı Darrieus tipi DERT kullanılmıştır. Şekil 2'de tek türbin için hazırlanan hesaplama modelinin akış hacmi ve ağ yapısı görülmektedir. Tek türbin için gerçekleştirilen benzetimlerde akış hacminin genişliği ve uzunluğu sırasıyla 14 ve 27 çap olarak alınmıştır, eşli türbin benzetimleri için genişlik, yan kenarlara olan uzaklık sabit kalacak şekilde türbinler arası mesafeye bağlı olarak genişletilmiştir. Akış hacminin uzunluğu ise sabit tutulmuştur. Bu hesaplama modelinde, çok sık ağ yapısına (1368519 eleman sayısı) göre %2'den daha az performans katsayısına (c_p) sahip olan 932177 eleman sayısına sahip ağ yapısı kullanılmıştır ve eşli türbinlerin benzetimlerinde de benzer parametreler kullanılmıştır. Eşli çalışma durumunda eleman sayıları Tablo 1'de verilmiştir. Türbine ve kanada yakın bölgedeki ve kanat üzerindeki ağ yapısı Şekil 3'te gösterilmiştir. Kanat üzerindeki kuvvetlerin doğru yakalanması amacıyla ilk kalınlığı 0,1 mm olan 40 katmanlı sınır tabaka ağ yapısı kullanılmış ve y^+ değeri 2'nin altında tutulmuştur.



Şekil 1. Rüzgâr türbininin yapısı

Figure 1. Structure of wind turbine



Şekil 2. Akış hacmi
Figure 2. Fluid domain

Tablo 1. Akış hacminin eleman sayıları

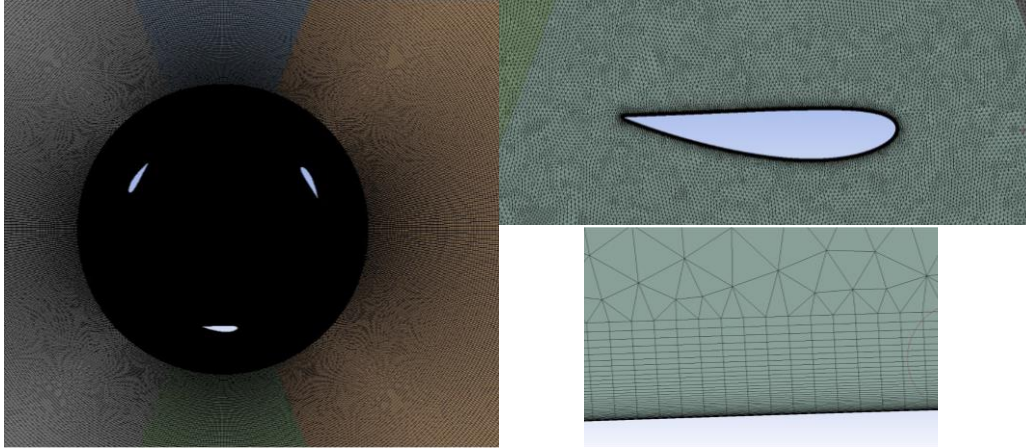
Table 1. Element number of fluid domain

	Eleman sayısı
Tek çalışan	932177
Eşli çalışan, 1,5D	1798554
Eşli çalışan, 2D	1866049
Eşli çalışan, 2,5D	1937619
Eşli çalışan, 4D	2149701

Benzetimler iki boyutlu ve zamana bağlı Reynolds-Ortalama-Navier-Stokes (RANS) denklemlerinin $k\omega$ -SST türbülans modeliyle çözümlenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Süreklilik ve momentum denklemlerinin çözülmesinde ayrık yöntem olan SIMPLE ailesi yaklaşımı kullanılmıştır. Yakınsama kriteri 10^{-3} olarak belirlenmiştir. Uç hız oranı ($\lambda = (\Omega \times r)/u_\infty$), 100 d/d'lık türbin devir sayısı (Ω) sabit tutularak sadece akış hızıyla (u_∞) değiştirilmiştir. Bir tur boyunca hesaplanan ortalama kanat Reynolds sayısı sadece türbin devir hızına bağlı olarak değiştiğinden, türbin devir hızı sabit tutularak ortalama kanat Reynolds sayısının sabit tutulması sağlanmıştır. Ortalama kanat Reynolds sayısı,

$$Re_{c,ort.} = \frac{\rho (\Omega r) c}{\mu} \quad (1)$$

şeklinde hesaplanmıştır. ρ havanın yoğunluğunu, μ ise havanın dinamik viskozitesini belirtmektedir.



Şekil 3. Türbin ve kanada yakın bölgedeki ve kanat üzerindeki akış hacminin ağ yapısı
Figure 3. Mesh details of fluid domain near of turbine and chord

İlk olarak 4 uç hız oranı için (100 d/d) benzetim yapılmış ve türbinin hangi süreden sonra stabil hale geldiği araştırılmıştır. Zaman adımları Balduzzi, F. vd. tarafından yapılan çalışmaya uygun biçimde, 0,5°'lik dönüş açısına tekabül edecek biçimde 0,000833 s olarak ayarlanmıştır ve hesaplamalar toplamda 9 s (15 tur) sürdürülmüştür. Şekil 4'te görüldüğü gibi türbin dönmeye başladıktan 10 s (7200 zaman adımı) geçtikten sonra moment katsayısı (c_m) periyodik olarak sabit genlikle dalgalanmaktadır. Sonuçların daha sağlıklı alınması için benzetimler 15. tura kadar sürdürülmüştür. Son tur boyunca moment katsayısının ortalaması kullanılarak tork değeri,

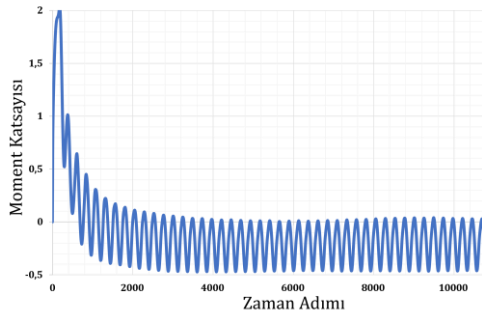
$$\tau = c_m \frac{1}{2} \rho A_{kesit} u_{\infty}^2 r \quad (2)$$

şeklinde hesaplanmıştır. Burada A_{kesit} türbin kesit alanını belirtmektedir. Güç değeri ve performans katsayısı sırasıyla,

$$P = \tau \Omega \quad (3)$$

$$c_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A_{kesit} u_{\infty}^3} \quad (4)$$

formüllerile belirlenmiştir.



Şekil 4. Moment katsayısının zamana bağlı değişimi

Figure 4. Variation of moment coefficient with time

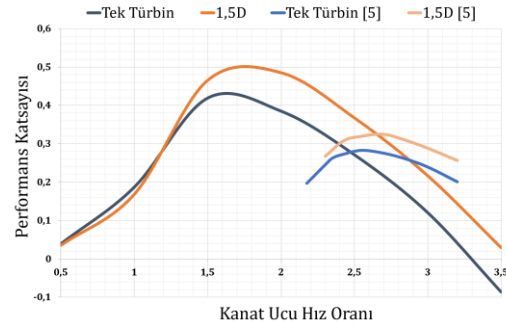
2.2. Doğrulama çalışması

Zanforlin, S. ve Nishino, T. tarafından 2016 yılında yapılan çalışma, 1,5 çap uzaklığındaki eşli çalışan DERT'in farklı uç hız oranlarındaki performans katsayısı iki boyutlu benzetimle belirlendiği için karşılaştırma amaçlı seçilmiştir.

Şekil 5'te eşli ve tek çalışma durumunda performans katsayısının uç hız oranına bağlı olarak değişimi gösterilmiştir. Kanat yapıları ve boyutları farklı olan iki türbinin yüksek performans seviyesi ve bu performansın elde edildiği uç hız oranı farklı olsa da eğilimlerin benzer olduğu görülmektedir. Şekil 6'da, normalize edilmiş performans katsayısının ($c_{p,n}$) normalize edilmiş uç hız oranıyla (λ_n) değişimi verilmiştir. Tek çalışan türbinin en yüksek performansı gösterdiği çalışma noktasındaki performans katsayısı ($c_{p, tek maks.}$) ve uç hız oranı ($\lambda_{tek maks.}$) baz alınmış ve eşli çalışma durumundaki çalışma noktalarının bu değere oranıyla performans katsayısı ve uç hız oranı,

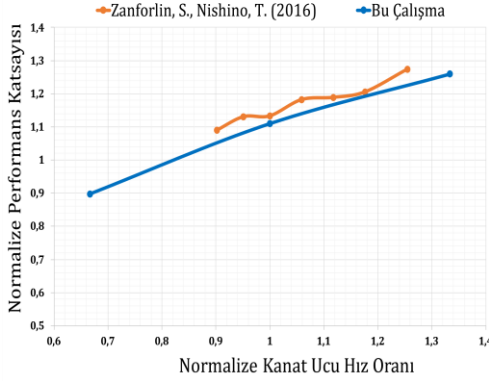
$$c_{p,n} = \frac{c_p}{c_{p, tek maks.}} ; \lambda_n = \frac{\lambda}{\lambda_{tek maks.}} \quad (5)$$

şeklinde normalize edilmiştir. En yüksek performansın elde edildiği çalışma noktasına göre, uç hız oranıyla performans katsayısının değişme eğiliminin referans alınan çalışmayla uyumlu olduğu görülmektedir. Bu nedenle uygulanan hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımının parametrik inceleme için yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.



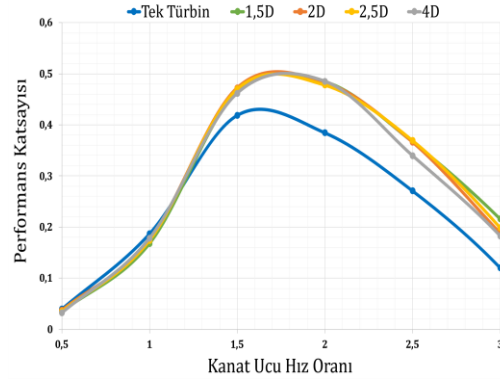
Şekil 5. Performans katsayısının uç hız oranıyla değişimi (1,5D olarak adlandırılan eğri eşli çalışma durumunu ifade etmektedir.)

Figure 5. Variation of coefficient of performance with tip speed ratio (The curve called 1.5D represents the paired working condition.)



Şekil 6. Normalize performans katsayısının normalize uç hız oranıyla değişimi

Figure 6. Variation of normalized coefficient of performance with normalized tip speed ratio



Şekil 7. Tek ve 1,5D, 2D, 2,5D ve 4D mesafede eşli çalışan DERT'lerin performans katsayılarının uç hız oranıyla değişimi

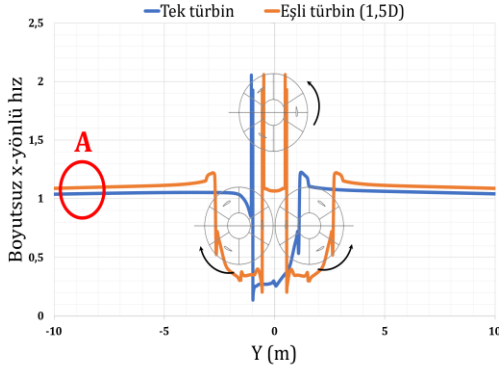
Figure 7. Variation of the performance coefficients of VAWTs operating in single and 1.5D, 2D, 2.5D and 4D distances in pairs with the tip speed ratio

3. Bulgular ve Tartışma

Tek ve eşli çalışan türbinlerin iki boyutlu benzetimleri, türbinlerin merkezleri arası mesafelerin 1,5, 2, 2,5 ve 4 çap olduğu durum için gerçekleştirilmiştir. Her bir durumdaki performans katsayısının uç hız oranıyla değişimi Şekil 7'de gösterilmiştir. Tek çalışan DERT en yüksek performansa ($C_{ptek}=0,42$) 1,5 uç hız oranında ulaşırken, eşli çalışan DERT uç hız oranı 2'de en yüksek performansa ($C_{peşli}=0,48$) ulaşmıştır. Eşli türbinin performans artışı 1,5 uç hız oranında %11 olurken, 2 uç hız oranında %26 ulaşmıştır, yüksek uç hız oranlarında türbin performansı önemli düşüş gösterse de oransal olarak tek türbine göre artmaya devam etmiştir. Bir başka deyişle, tek çalışan türbinin 7,2 m/s'lik rüzgâr hızındaki performans katsayısı 0,42 olurken, eşli çalışan türbinlerden her biri daha düşük bir rüzgâr hızında (5,4 m/s) daha iyi performans (0,48) gösterebilmiştir. Ayrıca 7,2 m/s'lik hava akış hızında da, eşli çalışan türbinlerin performans katsayısı (0,46) bir miktar düşüş gösterse de, tek çalışan türbine göre %11 daha iyi performans göstermeye devam ettiği gözlenmektedir. Grafik incelendiğinde göze çarpan bir başka nokta da, eşli çalışan türbinlerin 1,5 uç hız oranında da yine yüksek performans göstermesi olmuştur. Buradan eşli çalışan türbinlerin daha geniş uç hız oranı aralığında daha yüksek performans gösterebildiği anlaşılmaktadır.

Eşli çalışan türbinlerin performansının uç hız oranıyla değişimine bakıldığında, performans katsayısının türbinler arasındaki mesafeye çok duyarlı olmadığı görülmektedir. Benzer biçimde, Zanforlin, S. ve Nishino, T. tarafından 2016 yılında yapılan çalışmada da [5], 0° 'lik açıyla gelen akışta türbin performansının türbinler arası mesafeye ilginç şekilde çok az değiştiği belirtilmiştir. Buradan yola çıkıldığında, iki boyutlu benzetimlerdeki sonsuz kanat uzunluğu kabulü, üçüncü boyut etkilerinin hesaba katılmaması gibi kendine has kısıtları ve kanat haricindeki türbin parçalarının benzetimlerde ihmal edilmesi neticesinde, iki türbinin birbirini sınırlı biçimde etkilediği anlaşılmaktadır. Şekil 8'de 1,5 çap mesafesi olan eşli ve tek çalışan türbinlerin merkezinden geçen doğrultudaki x yönlü boyutsuz hız dağılımları gösterilmiştir. A ile gösterilmiş olan türbine uzak bölgede, blokaj etkisi nedeniyle akış hızlarında tek türbin için %4,4, eşli çalışan türbin için ise %8,2'lik yükselme olmaktadır. Bu durum, eşli çalışan türbinin tek çalışana göre %3,6 daha hızlı hava akışına maruz kaldığı anlamına gelmektedir. Eşli türbindeki performans artışının temel nedeni hava akış hızındaki bu artış olduğu düşünülmektedir. 7 çap uzaklıktaki noktadaki hız artışları ise tekli çalışan türbin için %2,2 olurken eşli çalışmada %5,8 olmuştur. Bu durum türbine yakın bölgede akış hızındaki %8,2'lik

yükselişin %5,8'inin iki boyutlu benzetimlerin kısıtlarından kaynaklığını düşündürmektedir. Eşli çalışan türbinlerin daha geniş uç hız oranı ve mesafe aralığında incelenmesi, Şekil 7'de bu olgunun daha net görülmesini sağlamıştır. Türbinler arası mesafe değiştiğinde türbin performansının yaklaşık olarak aynı kalması, performans artışının asıl etkeninin blokaj etkisi olduğunu göstermektedir.



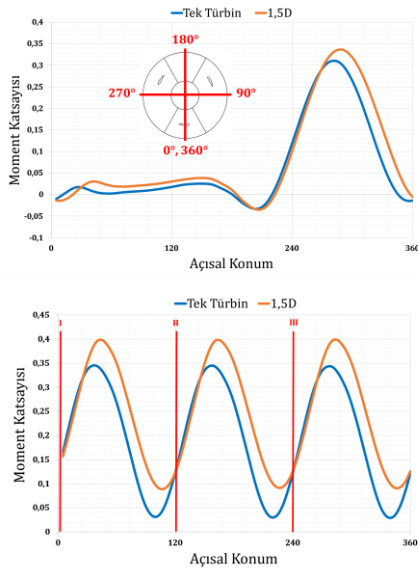
Şekil 8. Tek ve eşli çalışan DERT'lerin boyutsuz x-yönlü hızların y-ekseni ile değişimi

Figure 8. Variation of dimensionless x-direction velocities with y-axis of single and paired VAWTs

Boyutsuz akışa paralel (x-yönlü) hız dağılımına bakıldığında, eşli türbinler arasındaki bölgede akışın ivmelendiği, yüksek hızların görüldüğü belirlenmiştir. Bunun da türbin performansına olumlu etkileri olması mümkündür. Şekil 9'da tek ve eşli çalışan DERT'lerin performans katsayısının son bir tur boyunca değişimi verilmiştir. Kırmızı çizgilerle gösterilen yerler, türbin kanadının ara bölgede olduğu anlardır. Hara, Y., vd. tarafından 2021 yılında yapılan çalışmada aynı fazda çalışan eşli DERT'lerde, kanatların ara bölge karşılıklı konuma geldiği durumda türbinler arası alanın çok daralması nedeniyle basıncın düştüğü ve akış hızlanması nedeniyle performansın arttığı belirtilmiştir. Şekil 10'da bir tur boyunca tek bir kanadın ve türbinin moment katsayısındaki değişim görülmektedir. Tek kanadın 0° ya da 360° 'de olduğu bölgede eşli çalışma durumunda kayda değer bir artış olduğu gözlenmemiştir. Performans artışının esasen 210° 'deki konumla başladığı ve 290° 'lerde en yüksek değerine ulaştığı görülmektedir. Kanadın yüksek

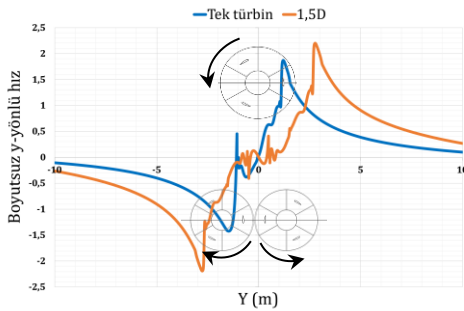
performans ürettiği bu bölgede tek ve eşli çalışan türbin kanadının moment katsayısının neredeyse tamamen aynı kaldığı görülmektedir. 270° ve 0° aralığında ise eşli çalışan türbinin tek çalışana göre daha yüksek performans gösterdiği görülmektedir. Bu yükseliş, ara bölgedeki hızlanmadan çok eşli çalışan türbinin akışta oluşturduğu diğer etkilerden (blokaj etkisi, yanal hızların değişimi) kaynaklandığını düşündürmektedir. Üç kanadın toplamının bir tur boyunca toplam moment değişimi grafiğinde kırmızı çizgiler her bir kanadın ara bölgeye geldiği yeri göstermektedir. Bu bölgeye yakın moment katsayısında artış olduğu gözlenmekte olsa da, bu durum ara bölgeye gelen kanat sayesinde değil, 240° 'lik açılal konumda bulunan diğer kanat sayesinde olmaktadır.

Zanforlin, S. ve Nishino, T. tarafından yapılan çalışmada ise, eşli çalışan türbinlerin birbirini etkileyerek yanal hızları (akışa dik yön) değiştirdiği, performans artışının nedenlerinden birinin de bu olduğu söylenmiştir. Şekil 10'da akışa dik yöndeki (yanal) hız dağılımının y-eksenine bağlı değişimi gösterilmiştir. Karşılaştırmanın daha belirgin olması amacıyla eşli türbinlerden birinin ve tek türbinin hız dağılımları üst üste konmuştur. Eşli çalışan DERT'lerde yanal hızların farklılaştığı gözlenmektedir. Zanforlin S. ve Nishino, T. tarafından 2016 yılında yapılan çalışmada belirtildiği gibi, yerel akışın yönünü kaldırma kuvveti üretimine daha elverişli hale getirmesi nedeniyle bu durum da performans artışının sebepleri arasındadır.



Şekil 9. Tek ve eşli çalışan DERT'lerin tek kanat (üstte) ve türbin (altta) için moment katsayısının son bir tur boyunca değişimi (1,5D olarak adlandırılan eğri eşli çalışma durumunu ifade etmektedir.)

Figure 9. The variation of the moment coefficient for single blade (top) and turbine (bottom) of single and paired VAWTs during the last round (the curve called 1.5D represents the paired operation situation).



Şekil 10. Tek ve eşli çalışan DERT'lerin yanıl hızların y-ekseni boyunca değişimi (1,5D olarak adlandırılan eğri eşli çalışma durumunu ifade etmektedir.)

Figure 10. The variation of the lateral velocities of the single and paired VAWTs along the y-axis (the curve called 1.5D represents the paired operation state).

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada tek ve eşli çalışan DERT'lerin performans katsayısının uç hız oranı ve türbinler arası mesafeyle nasıl değiştiği iki boyutlu benzetim yöntemiyle incelenmiştir. İki boyutlu benzetimler, sonsuz kanat uzunluğu, z yönlü hızları içermemesi ve buna ek olarak türbin içi yapıların benzetimlerde ihmal edilmesi nedeniyle kısıtlar içermektedir. Bu kısıtlar da göz önünde bulundurularak eşli çalışan türbinlerdeki performans artışının nedenleri irdelenmiştir.

Eşli çalışan türbinlerin daha geniş uç hız oranı aralığında yüksek performans gösterdiği, en yüksek performansın elde edildiği bölgede tek çalışan türbine göre %26'lara varan artış belirlenmiştir. Ancak bu yükselmenin kısmen yanal hızlar kaynaklı olabileceği değerlendirilse de, asıl etkenin blokaj etkisi olduğu, bu blokaj etkisinin yaklaşık %70'inin de iki boyutlu benzetimlerin kısıtlarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Performans artışının türbinler arası mesafeye rağmen değişmemesi bu bulguyu teyit eder niteliktedir.

Eşli çalışan DERT'lerin başarımlarının incelenmesi amacıyla yapılan iki boyutlu benzetimlerde performans katsayısının türbinler arası mesafeye duyarız olması konusunun araştırılması, çok daha uzun mesafelerde performansın düşüp düşmediğinin ya da hangi mesafelerde düşmeye başladığının belirlenmesi faydalı olacaktır. Bunun yanı sıra, eşli çalışmadaki performans artışının üç boyutlu bilgisayar benzetimleri, rüzgâr tüneli ve saha testleri ile incelenmesi yararlı olacaktır.

4. Discussion and Conclusion

In this study, how the performance coefficient of single and paired VAWTs changes with the tip speed ratio and the distance between the turbines is investigated by two-dimensional simulation method. Two-dimensional simulations have limitations as infinite blade length acceptance, lack of z-direction velocities, and in addition, neglecting of turbine internal structures. Considering these constraints, the reasons for the increase in performance in paired working turbines are examined.

It has been determined that the paired turbines show high performance in a wider tip speed ratio

range and an increase of up to 26% compared to the single operating turbine in the region where the highest performance is achieved. However, although it is considered that this increase may be partially due to lateral velocities, it is thought that the main factor is the blocking effect and approximately 70% of this blocking effect is due to the constraints of two-dimensional simulations. The fact that the performance increase did not change despite the distance between the turbines confirms this finding.

It will be useful to investigate the insensitivity of the performance coefficient to the distance between the turbines in two-dimensional simulations made to examine the performance of paired VAWTs, and to determine whether the performance decreases at much longer distances or at what distances it starts to decrease. In addition, it will be useful to examine the performance increase in paired working with three-dimensional computer simulations, wind tunnel and field tests.

5. Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

“Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.”

“Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.”

Kaynakça

- [1] Whittlesey, R. W., Liska, S., & Dabiri, J. O., 2010. Fish Schooling as a Basis for Vertical Axis Wind Turbine Farm Design, *Bioinspiration&Biomimetics* 5, ABD.
- [2] Dabiri, J. O., 2011. Potential order-of-magnitude enhancement of wind farm power density via counter-rotating vertical-axis wind turbine arrays. *Journal of renewable and sustainable energy*, 3(4), 043104.
- [3] Howell, R., Qin, N., Edwards, J., Durrani, N., 2010. Wind Tunnel and Numerical Study of a Small Vertical Axis Wind Turbine. *Renewable Energy*, İngiltere.
- [4] Korobenko, A., Hsu, M.-C., Akkerman, I., & Bazilevs, Y., 2013. Aerodynamic Simulation of Vertical-Axis Wind Turbines. *Journal of Applied Mechanics*.
- [5] Zanforlin, S., Nishino, T., 2016. Fluid Dynamic Mechanisms of Enhanced Power Generation by Closely Spaced Vertical Axis Wind Turbines. *Renewable Energy*, 99.
- [6] Alexander, A. S., Santhanakrishnan, A., 2020. Mechanisms of Power Augmentation in Two Side-by-side Vertical Axis Wind Turbines. *Renewable Energy*, 148, 600-610.

- [7] Guilbot, M., Barre, S., Balarac, G., Bonamy, C., Guillaud, N., 2020. A Numerical Study of Vertical Axis Wind Turbine Performances in Twin-rotor Configurations. In *Journal of Physics: Conference Series* (1618, No. 5, s. 052012).
- [8] Hara, Y., Jodai, Y., Okinaga, T., Furukawa, M., 2021. Numerical Analysis of the Dynamic Interaction between Two Closely Spaced Vertical-Axis Wind Turbines. *Energies*, 14(8), 2286.
- [9] Balduzzi, F., Bianchini, A., Maleci, R., Ferrara, G., & Ferrari, L. 2016. Critical issues in the CFD simulation of Darrieus wind turbines. *Renewable Energy*, 85, 419-435.