

ÇAPRAZ AKIŞLI RÜZGAR TÜRBİNİ BAŞARIMININ İNCELENMESİ

Ziya Haktan Karadeniz¹, İbrahim Can Güteryüz²

^{1,2}İzmir Katip Çelebi Üniversitesi

¹zhaktan.karadeniz@ikc.edu.tr, ²can.guleryuz@hotmail.com

ÖZET

Şehir içi küçük ölçekli rüzgâr türbini olarak kullanılabilir, binalar ile bütünleşik (yapının yüksek rüzgâr hızlarına sahip bölgelerine özel olarak yerleştirilebilir) veya bağımsız olarak yerleştirilebilir, yerleştirileceği konumdaki baskın rüzgâr özelliklerine bağlı olarak düşey veya yatay olarak konumlandırılabilir bir çeşit rüzgâr türbini olan Çapraz Akışlı Rüzgar Türbinleri (ÇART) tanıtılmıştır. Mevcut iki boyutlu sayısal çalışma sonuçlarından ve deneysel çalışmalardan elde edilen ÇART başarımları incelendiğinde literatürde bir tutarsızlık olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, ÇART'ların oluşturduğu karmaşık akış yapısıdır. Yüksek miktarda türbülans içeren ÇART akışının bilgisayar benzetimleri ile incelenmesinde, türbülans etkilerinin sonuçlara doğru yansıtılabilmesi için üç boyutlu modelleme gereklidir. Ancak çoğu diğer rüzgâr türbini modeli incelemesinde olduğu gibi sayısal çalışmalar iki boyutlu incelemelerle sınırlıdır. Bu nedenle bu çalışmada, tekil çalışma durumu incelenen bir ÇART'ın başarımının belirlenmesi için yapılan iki boyutlu ve üç boyutlu bilgisayar benzetimleri sonucunda elde edilen tork ve güç katsayısı eğrileri literatürdeki deney sonuçları ile karşılaştırılarak üç boyutlu sayısal modellemenin önemi ortaya koyulmuştur.

1. GİRİŞ

Günümüzde yüksek kapasiteli elektrik üretimi için çoğunlukla yatay eksenli rüzgâr türbinleri kullanılmaktadır. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri ile ilgili çalışılan en güncel konu türbülans yönetimidir. Türbülans türbinin aerodinamik verimin artırılması için en aza indirilmelidir. Türbülans kaynağı; türbine çarpan rüzgâr, her bir türbin için türbin kanatlarının birbirleri ve kule ile etkileşimi ve türbinlerin birbirleri ile etkileşimi olabilir. Türbine gelen rüzgârın türbülans özelliklerin değiştirmek mümkün değildir. Türbin kanatlarının rüzgâr ile etkileşimi sonucu oluşan türbülans yapılarının (kanat ucu girdapları vb.) kontrolü ve türbinin kendi bileşenleri (kule ve kanatlar) arasındaki türbülans etkileşimi de özellikle yatay eksenli rüzgâr türbinleri için yoğun olarak çalışılmaktadır [1, 2, 3, 4, 5].

Alternatif olarak geliştirilen düşey eksenli rüzgâr türbinleri ise daha çok düşük güç ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılmaktadır. Oldukça farklı tipte düşey eksenli rüzgâr türbini bulunmakla birlikte, başarımları ayrıntılı olarak incelenip belgelenmiş, yaygın üretimi sağlanmış, güvenilirliği yüksek, uygun maliyetli ve ticari olarak kolaylıkla bulunabilen düşey eksenli rüzgâr türbini piyasası henüz oluşmamıştır. Üzerlerinde en çok çalışılan düşey eksenli rüzgâr türbinleri olan Savonius ve Darrieus tipi türbinler ve bunların benzeri yapıya sahip türevleridir. Kaldırma kuvveti ile çalışan Darrieus tipi türbinler, itme kaynaklı çalışan Savonius tipi türbinlere göre daha verimli olmaları nedeniyle daha yoğun araştırılmaktadırlar. Özellikle kanat kesit profili ve diğer geometrik parametreler üzerine deneysel ve sayısal araştırmalar yapılmaktadır. Yakın zamanda yapılan çalışmalar, Darrieus tipi düşey eksenli rüzgâr türbinlerinin daha küçük alanlarda uygun düzende birbirlerine yakın konumlandırılarak daha etkin şekilde kullanılabilirliğini göstermektedir [6, 7, 8, 9]. Bu bilgiler ışığında düşey eksenli rüzgâr türbinleri için yapılan çalışmaların sayısı hızla artmaktadır. Yeni teknoloji ürün deneysel ve sayısal yöntemlerin (zamansal çözünürlüklü parçacık görüntülemeli hız ölçümü yöntemi büyük girdap benzetimi vb.) kullanımı ile farklı türbinlerin tekil kullanımdaki

başarımları ve birbirleriyle etkileşim halindeyken başarımları çalışılmaktadır [10, 11, 12, 13, 14]. İddia edildiği gibi uygun düzende eşler olarak çalıştırılan rüzgâr türbinlerinin daha verimli çalışması durumunda, bu tür çalışmaya en uygun tipteki türbinlerin bulunması için araştırmalar yapılması gerekmektedir. Ancak öncelikle farklı tiplerdeki düşey eksenli rüzgâr türbinlerinin ayrıntılı olarak incelenmesi ve tekil çalışma durumundaki başarımları belirlenmelidir.

Bu çalışma kapsamında incelenen Çapraz Akışlı Rüzgar Türbinleri (ÇART'lar), tekil kullanımda düşey eksenli rüzgar türbini olarak değerlendirilebilir, ancak özellikle binalarla bütünleşik tasarım yapılabildiği durumlarda yatay eksenli olarak kullanılmaları da mümkündür. ÇART'lar en temel anlatımla bir çember üzerine eşit aralıklarla dizilmiş çok sayıda kanatçıktan oluşur. ÇART'larda alın yüzeyi üzerinde boşluk yoktur ve akışkan kanatların arasından biri giriş biri çıkış tarafında olmak üzere iki kere geçer. Bu nedenle çapraz akışlı olarak adlandırılırlar. ÇART'ın karakteristik özelliği, türbin dönerken kanat uçlarında oluşan küçük girdapların birleşerek oluşturduğu eksenden kaçık girdaptır. Eksenden kaçık girdabın merkezinin konumu, boyutları vb. özellikler türbin başarımlarını belirler. Ancak akışı yönetmek ve başarımlarını en uygun seviyeye çıkarmak için türbin çapı, kanat profili ve sayısı gibi geometrik parametrelerin incelenmesi gerekir.

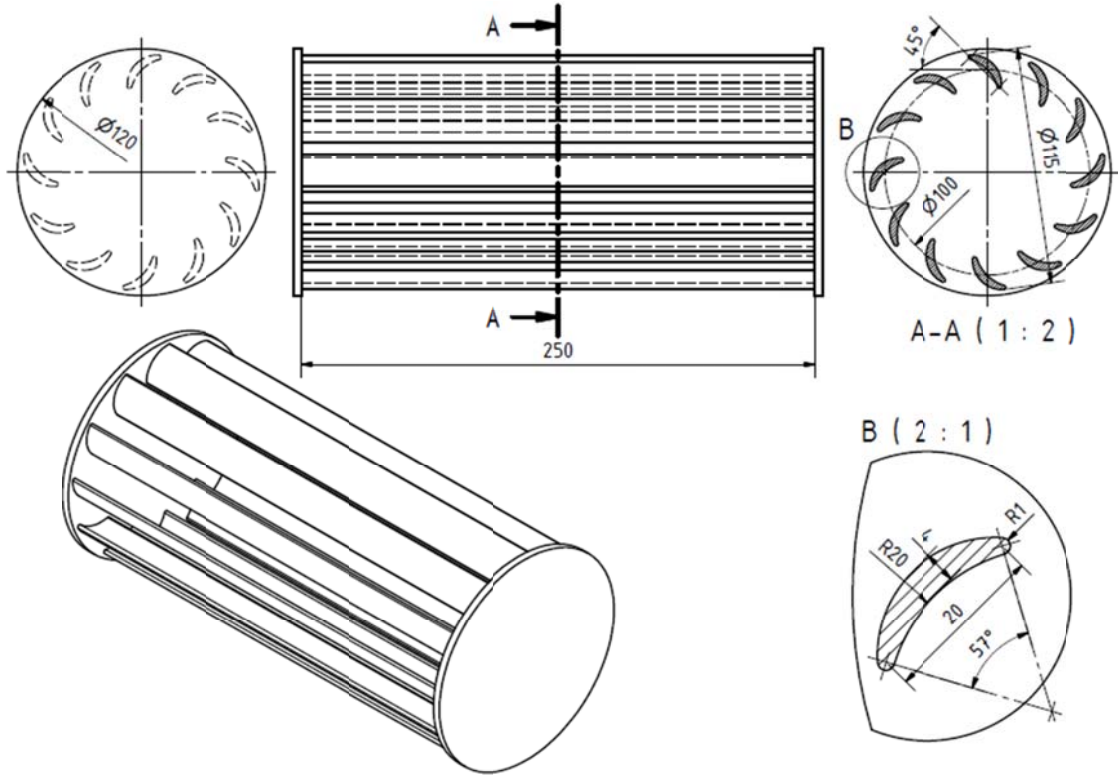
ÇART'lar rüzgar yönünden bağımsız olarak çalışırlar. Ancak rüzgar, rotorun rüzgar yönüne dik kesitinin bir kısmında türbini döndürmeye çalışırken kalan kısmında durdurucu etki yapar. Bu nedenle ÇART'lar farklı yapılarla bitişik çalışma durumunda ve özel tasarlanmış akış yönlendiricilerle birlikte daha verimli çalışırlar. Yakın tarihli gerçekleştirilen çalışmalar ÇART'ların tekil kullanımında ve farklı yönlendirilmiş akış koşulları altında başarımlarını incelemeye yöneliktir [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21]. Deneysel ve sayısal çalışmalarda yönlendirilmiş akış koşulları altında ÇART başarımlarının tekil kullanıma göre iki kata kadar iyileştirilebildiği gözlemlenmiştir. Ancak literatürde kurulan sayısal modellerin tamamında akış iki boyutlu olarak incelenmiştir. Yüksek miktarda türbülans içeren ÇART akışında, türbülans etkilerinin sonuçlara doğru yansıtılabilmesi için üç boyutlu modelleme gereklidir. İki boyutlu sayısal çalışma sonuçlarından elde edilen ÇART başarımları, deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında büyük miktarda sapma olduğu görülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, tekil çalışma durumu incelenen bir ÇART'ın başarımlarının belirlenmesi için yapılan iki boyutlu ve üç boyutlu bilgisayar benzetimleri sonucunda elde edilen tork ve güç katsayısı eğrileri literatürdeki deney sonuçları ile karşılaştırılarak üç boyutlu sayısal modellemenin önemi ortaya koyulmuştur.

2. SAYISAL ÇALIŞMA

Deney ve sayısal benzetim sonuçlarını karşılaştırabilmek için iki ve üç boyutlu sayısal çalışmada Tanino ve ark.'ın [21] gerçekleştirmiş oldukları deneye ait geometri, sınır şartları ve kabuller göz önünde bulundurulmuştur.

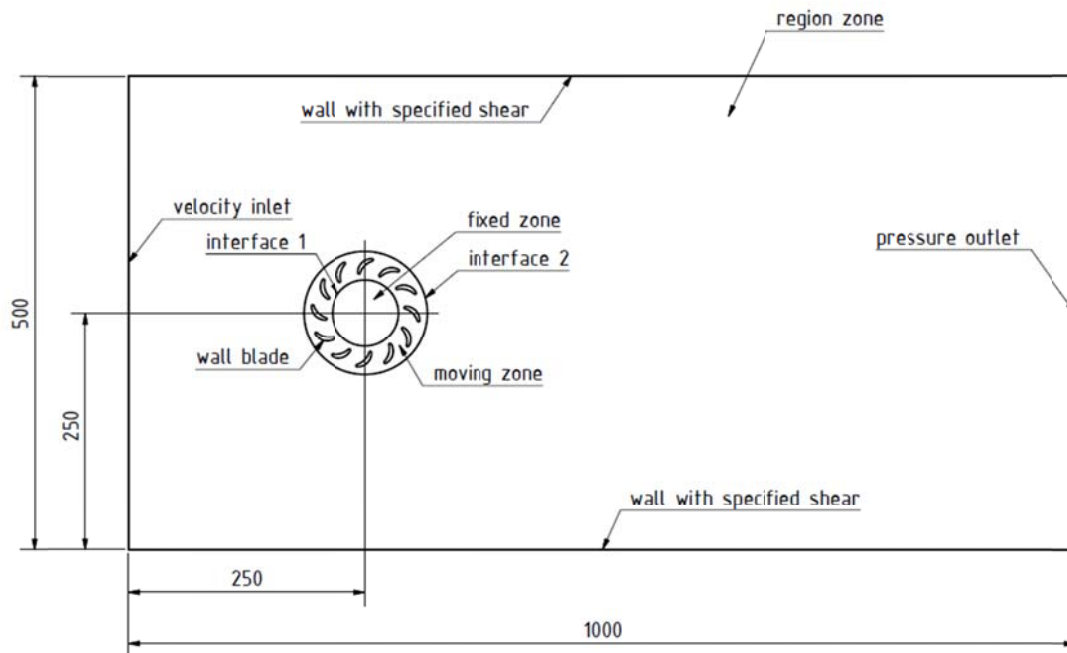
2.1. Geometri

İki ve üç boyutlu sayısal çalışmalarda Şekil.1'deki ÇART'a ait geometrik boyutlar ve kanat profili kullanılarak iki ve üç boyutlu sonlu hacimler modelleri oluşturulmuştur. İncelenen ÇART'a ait başlıca boyutlar; kanatların dış uçlarına teğet geçen çemberin çapı 115 mm, kanat giriş uzunluğu 20 mm, kanat uzunluğu 250 mm, ortalama rotor çapı 100 mm'dir. Rotorda 12 adet kanat bulunmaktadır.



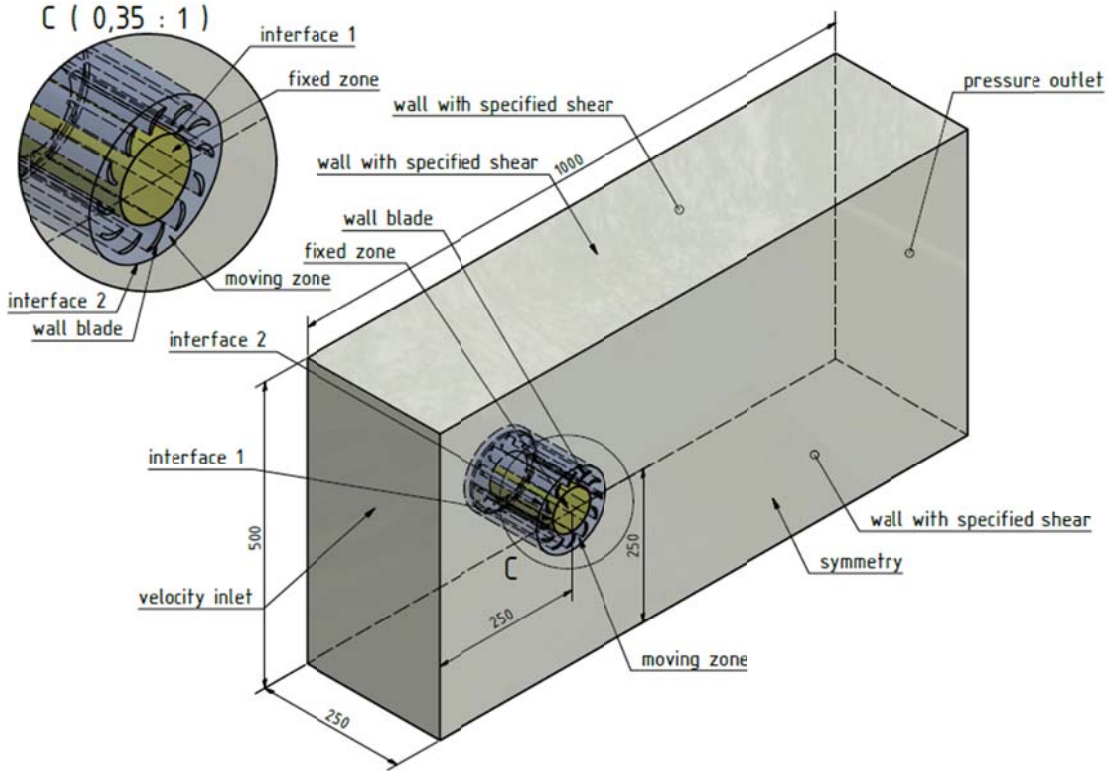
Şekil 1. Geometrik boyutlar ve kanat profili (ölçüler mm'dir.)

İki boyutlu sayısal modelde ÇART, ortalama rotor çapının 5 katı genişliğindeki ve 10 katı uzunluğundaki kontrol hacminin kenarlardan 250'şer mm mesafeye konumlandırılmıştır. ÇART onu çevreleyen akışkan hacminden çıkartılmıştır. Kanatları çevreleyen halka biçimindeki dönel akışkan bölgesi (moving zone), bunun içerisinde kalan daire şekilli durağan akışkan bölgesi (fixed zone) ve bu iki akışkan hacmini deney düzeneği boyutlarıyla sınırlandıran çevre akışkan bölgesi (region zone) oluşturulmuştur. İki boyutlu ÇART sayısal modeli Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. İki boyutlu sayısal model (ölçüler mm'dir.)

Üç boyutlu sayısal modelde ise ÇART, ortalama rotor çapının 5 katı genişliğindeki, 10 katı uzunluğundaki ve 5 katı derinliğindeki kontrol hacminin kenarlardan 250'şer mm mesafeye konumlandırılmıştır. ÇART onu çevreleyen akışkan hacminden çıkartılmıştır. Geometri ve sınır koşulları simetrik olduğu için modelin yarısı sayısal modele dahil edilmiştir. Böylece ihtiyaç duyulan hesaplama gücü yarı yarıya azaltılmıştır. Kanatları çevreleyen içi boş silindir biçimindeki dönel akışkan hacmi (moving zone), bunun içerisinde kalan silindirik biçimli durağan akışkan hacmi (fixed zone) ve bu iki akışkan hacmini deney düzeneği boyutlarıyla sınırlandıran akışkan hacmi (region zone) oluşturulmuştur. Üç boyutlu ÇART sayısal modeli ise Şekil 3'de görülmektedir.

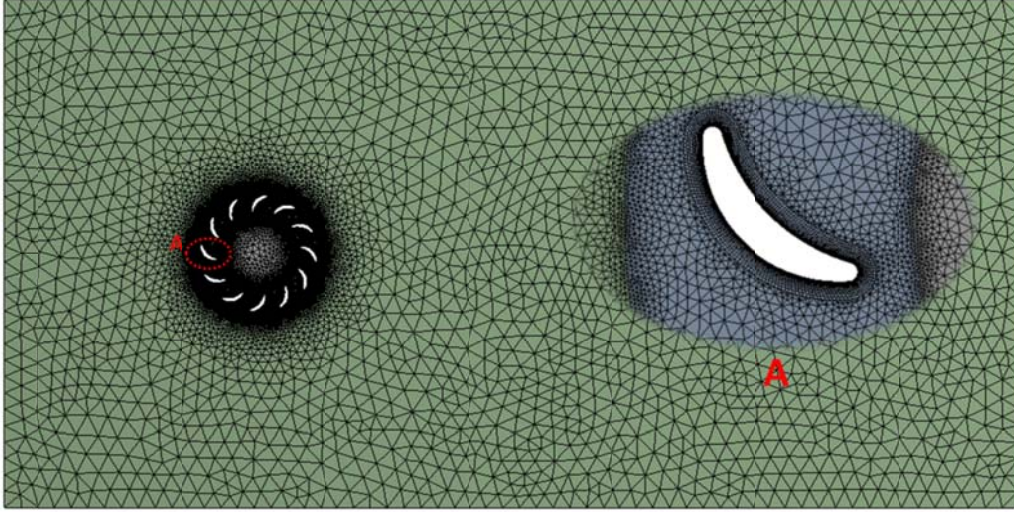


Şekil 3. Üç boyutlu sayısal model (ölçüler mm'dir.)

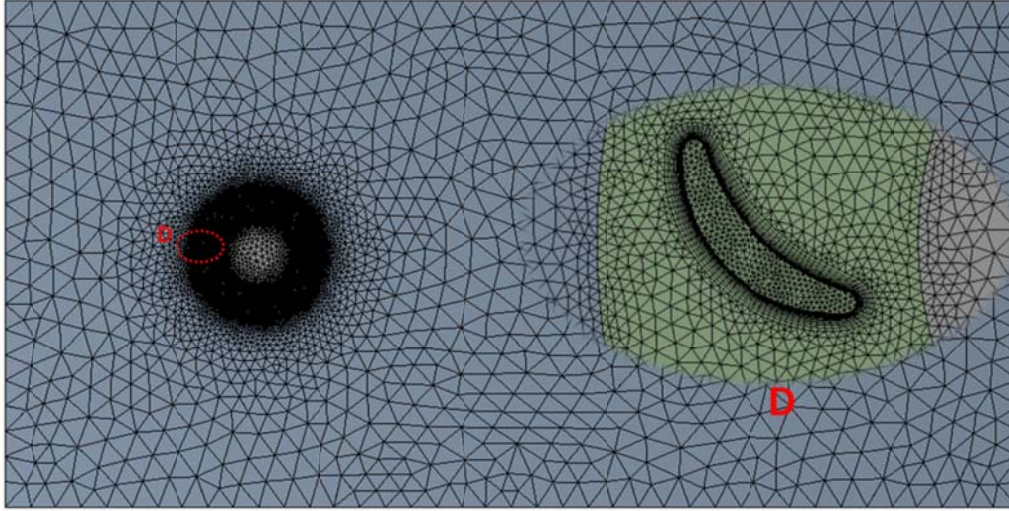
2.2. Sınır Şartları ve Kabuller

İki ve üç boyutlu sayısal çalışmalar iki farklı giriş hızına göre gerçekleştirileceği için ($v=4$ m/s ve $v=8$ m/s) her bir sayısal model için iki farklı sonlu hacimler ağ yapısı söz konusudur. y^+ değeri 1 hedeflenerek $v=4$ m/s ve $v=8$ m/s giriş hızları için rotor kanatları üzerinde sınır tabakadaki ilk hücre yüksekliği 0,049 mm ve 0,0245 mm olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan ilk hücre yüksekleri için sayısal çalışmalara ait sınır tabakalar 15 katmandan meydana getirilmiştir.

İki boyutlu sayısal çalışmaya ait sonlu elemanlar ağ yapısı üçgen yapıda, kabul edilebilir kalite değerleri içerisinde $v=4$ m/s giriş hızı için 57.365 düğüm ve 77.630 elemandan; $v=8$ m/s giriş hızı için 59.068 düğüm ve 81.036 elemandan oluşmaktadır (Şekil 4). Üç boyutlu sayısal çalışmaya ait sonlu elemanlar ağ yapısı tetrahedral yapıda, kabul edilebilir kalite değerleri içerisinde $v=4$ m/s giriş hızı için 10.504.579 düğüm ve 29.132.992 elemandan; $v=8$ m/s giriş hızı için 10.774.886 düğüm ve 30.730.896 elemandan oluşmaktadır (Şekil 5).



Şekil 4. İki boyutlu sayısal modelin ağ yapısı



Şekil 5. Üç boyutlu sayısal modelin ağ yapısı

İki ve üç boyutlu sayısal çalışmalarda giriş hızı (velocity inlet) ile belirtilen sınırlara giriş hızları birinci ve ikinci durum için sırasıyla sabit $v=4$ m/s ve $v=8$ m/s olarak tanımlanmıştır. Birinci durumda dönel akışkan bölgeye ait açılma hızları sırasıyla $w=0, 8, 16, 24, 32, 40, 48, 56$ rad/s olacak şekilde ve ikinci durum yani giriş hızının $v=8$ m/s olduğu durumda dönel akışkan bölgeye ait açılma hızları sırasıyla $w=0, 16, 32, 48, 64, 80, 96, 112$ rad/s olacak şekilde benzetimler kararlı durum için (steady state) gerçekleştirilmiştir.

Her iki durumda da basınç çıkışı (pressure outlet) ile belirtilen sınır koşulunda ise basınç 0 Pa olarak girilmiştir. Sırasıyla sürtünmesiz duvar sınır koşulları (wall with specified shear), kanatlar için duvar sınır koşulları (wall blade), durağan, dönel ve çevre akış bölgeleri arası geçişi belirtmek için arayüz sınır koşulları (interface 1, interface 2) ve üç boyutlu çalışmada sayısal modelin simetrik olduğunu belirtmek için simetri sınır koşulu (symmetry) tanımlanmıştır (Şekil 2, Şekil 3).

Bütün akışkan bölgeleri (durağan, dönel ve çevre akış bölgeleri) hava olarak tanımlanmış olup, programa havanın 15 C°'deki yoğunluk ve dinamik viskozitesi girilmiştir.

İki ve üç boyutlu bütün sayısal çalışmalarda Çizelge 1'deki çözücü (solver) ayarları kullanılmıştır. Türbülans etkileri SST k-omega türbülans modeli kullanılarak göz önünde bulundurulmuştur.

Çizelge 1. Çözücü Ayarları

Precision	Viscous Model	Pressure Velocity Coupling Scheme	Gradient	Pressure	Momentum	Turbulent Kinetic Energy	Turbulent Dissipation Rate
Double	SST k-omega	Coupled	Green Gauss Node Based	PRESTO	First Order Upwind	First Order Upwind	First Order Upwind

Karşılaştırmalarda kullanılacak temel parametre olan moment katsayısı,

$$C_m = \frac{M}{0,5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot R \cdot A} \quad (1)$$

formülüyle hesaplanır. Bu formülde rüzgar tarafından türbine uygulanan moment (M), yapılan bilgisayar benzetimi sonucunda program tarafından hesaplanır. Akışkan yoğunluğu (ρ), giriş hızı (V), kanatların dış uçlarına teğet geçen çemberin yarıçapı (R) ve rotorun rüzgar yönüne dik yönde taradığı alan (A) referans değerleri olarak programa tanıtılarak her bir iterasyon için moment katsayısı (C_m) hesaplanır.

Güç katsayısı,

$$C_p = \lambda \cdot C_m \quad (2)$$

formülüyle elde edilir. Bu formülde kanat ucu hız oranını (λ)'dır. Kanat ucu hız oranı,

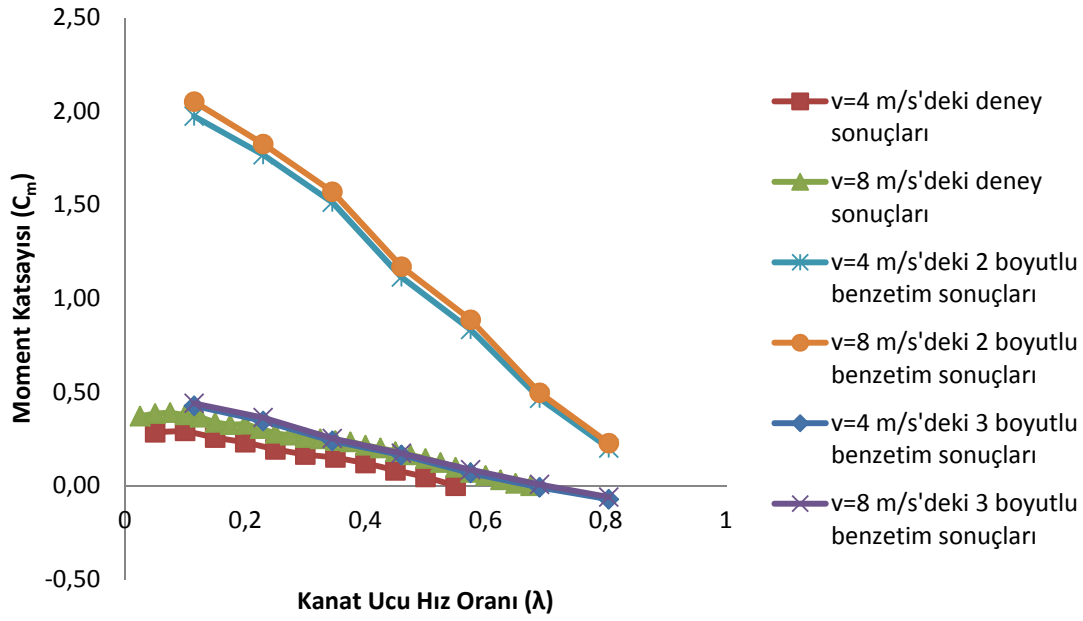
$$\lambda = \frac{w \cdot R}{V} \quad (3)$$

formülüyle hesap edilir. Burada V; giriş hızı, R; kanatların dış uçlarına teğet geçen çemberin yarıçapı ve w; rotorun açısal hızıdır.

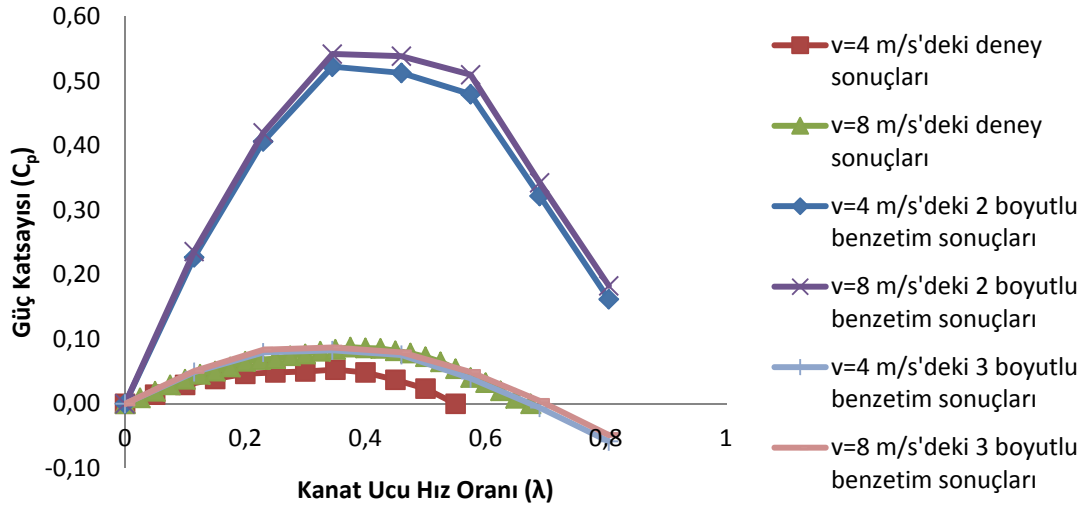
2.3. Bulgular ve Değerlendirme

Gerçekleştirilen iki ve üç boyutlu sayısal çalışmalar neticesinde giriş hızının $v=4$ m/s ve $v=8$ m/s olduğu durumlar için moment katsayısının kanat ucu hız oranına bağlı değişimini ve güç katsayısının kanat ucu hız oranına bağlı değişimini veren eğriler elde edilmiştir. Her bir kanat ucu hızında hesaplanan moment katsayısı ve güç katsayısı benzetimin düzenli rejime girdiği son 50 iterasyonun ortalaması alınarak elde edilmiştir (Şekil 6, Şekil 7).

İki boyutlu benzetim sonuçlarından elde edilen ÇART başarımları, deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında büyük miktarda sapma olduğu görülmektedir. Moment katsayısının en yüksek değeri her iki serbest akış hızında iki boyutlu çalışma için deney sonuçlarından yaklaşık 5 kat yüksek tahmin edilmiştir. Üç boyutlu sayısal çalışma sonuçlarına bakıldığında ise iki boyutlu çalışmaya göre daha gerçekçi sonuçlar elde edildiği, deney sonuçlarına yaklaşıldığı söylenebilir. Moment katsayısının en yüksek değeri 4 m/s serbest rüzgar hızı için deney sonuçlarından yaklaşık 1.5 kat daha yüksek tahmin edilmiştir. 8 m/s serbest rüzgar hızı içinse benzetim ve deney sonuçları her kanat ucu hız oranında yaklaşık olarak eşittir. Güç katsayısı açısından yapılan karşılaştırma içinde benzer bulgulardan bahsedilebilir. Üç boyutlu çalışmadan elde edilen bu sonuçlar yüksek miktarda türbülans içeren ÇART akışında, türbülans etkilerinin sonuçlara doğru yansıtılabilmesi için üç boyutlu modellemenin gerekliliğini göstermektedir. Ancak, iki ayrı serbest akış hızı koşulu için sonuçlarda oluşan farklılıklar irdelenmelidir.



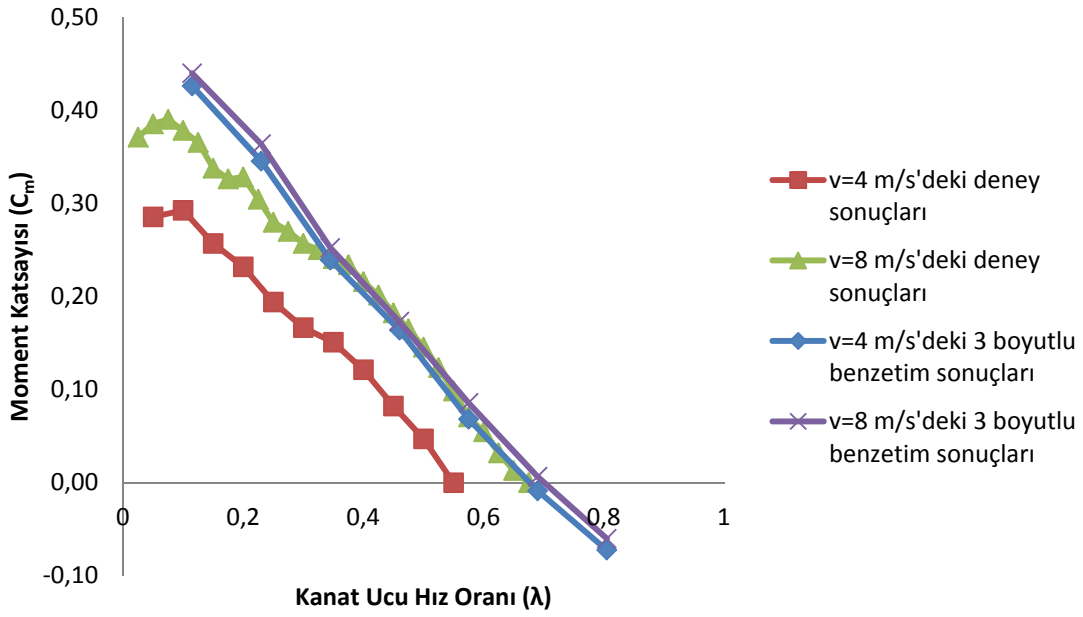
Şekil 6. Moment katsayısı (C_m) - kanat ucu hız oranı (λ) eğrisi



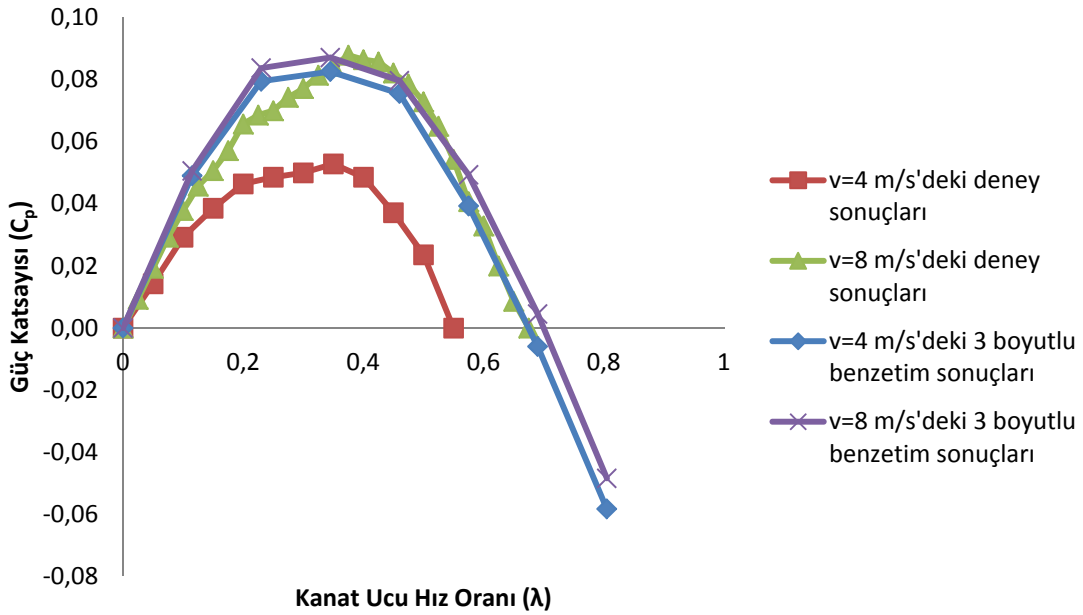
Şekil 7. Güç katsayısı (C_p) - kanat ucu hız oranı (λ) eğrisi

Üç boyutlu sayısal çalışma sonuçlarıyla deney sonuçlarını daha yakından inceleyebilmek ve yorumlayabilmek üzere Şekil 8 ve Şekil 9'da moment katsayısının (C_m) - kanat ucu hız oranına (λ) değişimini ve güç katsayısının (C_p) - kanat ucu hız oranına (λ) değişimini veren eğriler daha yakından incelenmiştir.

Üç boyutlu benzetim sonuçlarında giriş hızının $v=4$ m/s ve $v=8$ m/s olduğu eğriler arasındaki farkın deney sonuçlarında bu giriş hızlarındaki eğriler arasındaki farktan daha az olduğu görülmektedir. Ancak üç boyutlu benzetim ile deney sonuçlarının birbirine yakın olup aynı eğilimde oldukları söylenebilir. Şekil 9'da deneysel çalışma sonuçlarına göre serbest rüzgâr hızının iki katına çıkmasıyla en yüksek güç katsayısının da iki katına çıktığı görülmektedir. Ancak, sayısal çalışma sonuçlarında bu artış sadece 1.05 kattır. Benzetim sonuçları her iki serbest rüzgâr hızı için de deneysel çalışmadaki 8 m/s serbest rüzgâr hızı verilerine daha yakındır. Karşılaştırmada kullanılan deneysel çalışmada daha yüksek rüzgâr hızları için veri bulunmadığından çalışma ilerletilememiştir. Ancak üç boyutlu çalışmanın gerçek duruma çok daha uygun sonuç verdiği açıkça görülmektedir.



Şekil 8. Moment katsayısı (C_m) - kanat ucu hız oranı (λ) eğrisi (3 boyutlu model)



Şekil 9. Güç Katsayısı (C_p) - kanat ucu hız oranı (λ) eğrisi (3 boyutlu model)

3. SONUÇLAR

Bu çalışmada, tekil çalışma durumu incelenen bir ÇART'ın başarımının belirlenmesi için yapılan iki boyutlu ve üç boyutlu bilgisayar benzetimleri sonucunda elde edilen tork ve güç katsayısı eğrileri literatürdeki deney sonuçları ile karşılaştırılarak üç boyutlu sayısal modellemenin önemi ortaya koyulmuştur. Deney sonuçlarında farklı serbest rüzgâr hızlarında moment ve güç katsayısı eğrilerinde oluşan farklılık ayrıntılı olarak incelenmelidir. Bu farkın ÇART'ların oluşturduğu karmaşık akış yapısından kaynaklandığı düşünülebilir. Sayısal çalışmada yapılan kabuller ve basitleştirmeler nedeniyle bu farklılık net olarak görülememiş olabilir. Ancak, literatürde farklılığın kaynağı ile ilgili yapılan her iki açıklamayı da

destekleyecek yeterli çalışma yoktur. Bu nedenle incelemeler artırılmalı ve özellikle Çapraz Akışlı Fan'lar için yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar da göz önünde bulundurularak geometrik parametrelerin ve akış ile ilgili farklılıkların ÇART başarımı üzerindeki etkileri sistematik olarak hem sayısal hem de deneysel olarak incelenmelidir. Üç ve iki boyutlu modelleme sonuçları arasındaki farklılık sadece ÇART'ların bilgisayar benzetimleri ile incelenmeleri için değil tüm düşey eksenli rüzgâr türbinleri konusunda yapılan çalışmalar için yol göstericidir.

KAYNAKLAR

- [1] CHAMORRO, Leonardo P., et al. Turbulence effects on a full-scale 2.5 MW horizontal-axis wind turbine under neutrally stratified conditions. *Wind Energy*, 2014.
- [2] ABDELSALAM, Ali M.; RAMALINGAM, Velraj. Wake prediction of horizontal-axis wind turbine using full-rotor modeling. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2014, 124: 7-19.
- [3] CHU, Chia-Ren; CHIANG, Pei-Hung. Turbulence effects on the wake flow and power production of a horizontal-axis wind turbine. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2014, 124: 82-89.
- [4] LEE, Hsiao Mun; WU, Yanhua. A Tomo-PIV study of the effects of freestream turbulence on stall delay of the blade of a horizontal-axis wind turbine. *Wind Energy*, 2014.
- [5] JEONG, Min-Soo, et al. Effects of torsional degree of freedom, geometric nonlinearity, and gravity on aeroelastic behavior of large-scale horizontal axis wind turbine blades under varying wind speed conditions. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2014, 6.2: 023126.
- [6] WHITTLESEY, Robert W.; LISKA, Sebastian; DABIRI, John O. Fish schooling as a basis for vertical axis wind turbine farm design. *Bioinspiration & biomimetics*, 2010, 5.3: 035005.
- [7] DABIRI, John O. Potential order-of-magnitude enhancement of wind farm power density via counter-rotating vertical-axis wind turbine arrays. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2011, 3.4: 043104
- [8] KINZEL, Matthias; MULLIGAN, Quinn; DABIRI, John O. Energy exchange in an array of vertical-axis wind turbines. *Journal of Turbulence*, 2012, 13.1.
- [9] DABIRI, John O., et al. A New Approach To Wind Energy: Opportunities And Challenges.
- [10] SHAMSODDIN, Sina; PORTÉ-AGEL, Fernando. Large eddy simulation of vertical axis wind turbine wakes. *Energies*, 2014, 7.2: 890-912.
- [11] TESCIONE, G., et al. Near wake flow analysis of a vertical axis wind turbine by stereoscopic particle image velocimetry. *Renewable Energy*, 2014, 70: 47-61.
- [12] KACPRZAK, Konrad; LISKIEWICZ, Grzegorz; SOBCZAK, Krzysztof. Numerical investigation of conventional and modified Savonius wind turbines. *Renewable energy*, 2013, 60: 578-585.
- [13] ZHOU, Tong; REMPFER, Dietmar. Numerical study of detailed flow field and performance of Savonius wind turbines. *Renewable Energy*, 2013, 51: 373-381.
- [14] D'ALESSANDRO, V., et al. Unsteady Aerodynamics of a Savonius wind rotor: a new computational approach for the simulation of energy performance. *Energy*, 2010, 35.8: 3349-3363.
- [15] KLEMM, Toni; GABI, Martin; HERAUD, Jean-Nicolas. Application of a cross flow fan as a wind turbine. *Journal of Computational and Applied Mechanics*, 2007, 8.2: 123-133.
- [16] MANDIŞ, Ioana Corina; ROBESCU, Dan Niculae; BĂRGLĂZAN, Mircea. CAPITALIZATION OF WIND POTENTIAL USING A MODIFIED BANKI TURBINE.
- [17] COLLEY, Gareth; MISHRA, Rakesh. Computational flow field analysis of a Vertical Axis Wind Turbine. *Renewable energy and power quality*, 2011.
- [18] COLLEY, Gareth, et al. Effect of rotor blade position on Vertical Axis Wind Turbine performance. In: proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10) Granada, Spain. 2010.

- [19] KAWAMURA, Tetuya; SATO, Yuko. Numerical simulation of the flow around across-flow wind turbine. Research Institute of Mathematical Science, Kyoto University, Japan, 2002, 1288.5: 44-51.
- [20] FUKUTOMI, Junichiro; SHIGEMITSU, Toru; DAITO, Hiroki. Study on performance and flow condition of a cross-flow wind turbine with a symmetrical casing. Journal of Fluids Engineering, 2011, 133.5: 051101.
- [21] DRAGOMIRESCU, A. Performance assessment of a small wind turbine with crossflow runner by numerical simulations. Renewable Energy, 2011, 36.3: 957-965.
- [22] TANINO, Tadakazu; NAKAO, Shinichiro; UEBAYASHI, Genki. Improving ambient wind environments of a cross-flow wind turbine near a structure by using an Inlet Guide Structure and a Flow Deflector. Journal of Thermal Science, 2005, 14.3: 242-248.