



Savonius rüzgar türbinlerinde Reynolds sayısının etkisinin nümerik olarak incelenmesi

Utku ŞENTÜRK*

Ege Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir
Utku.senturk@ege.edu.tr, Tel: (232) 311 49 68

Aydoğın ÖZDAMAR

Geliş: 31.03.2017, Kabul Tarihi: 27.10.2017

Öz

Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin yaygın olarak kullanılmalarının başlıca nedeni, kuşkusuz, yüksek enerji verimliliğine sahip olmalarıdır. Ancak bu tip türbinlerin geometrik yapıları gereği üretimleri görece zordur. Bir düşey eksenli rüzgar türbini olan Savonius rüzgar türbini ise, çok daha ilkel bir geometriye sahiptir. Bundan ötürü, üretim olanaklarının ve yöntemlerinin kısıtlı olduğu bölgelerde, düşük enerji verimliliğine rağmen halen bir alternatif olarak önemini korumaktadır. Bu çalışmada, Reynolds sayısının, bir Savonius rüzgar türbininin performansına etkisi, hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları yardımıyla incelenmiştir. Çalışmada, iki boyutlu, sıkıştırılamaz, daimi olmayan ve türbülanslı akış kabulleri altında, sonlu hacimler yöntemine dayalı ANSYS Fluent ticari yazılımı kullanılmıştır. Deneysel literatür verileri ışığında doğrulanan nümerik yöntem kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlar ile, türbin çapı cinsinden tanımlı Reynolds sayısının 4×10^4 , 4×10^5 , 4×10^6 , 8×10^6 ve 20×10^6 değerlerinde performans karakteristikleri karşılaştırılmıştır. Buna göre, Reynolds sayısının 4×10^6 değerinde en yüksek güç faktörü değerine ulaşılmış olup bu çalışma noktasında devirlilik sayısı 1.0 ve güç faktörü değeri 0.27 olarak bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Savonius; rüzgar enerjisi; hesaplamalı akışkanlar dinamiği; Reynolds sayısı

* Yazışmaların yapılacağı yazar

Giriş

Savonius çarkı ya da rotoru, rüzgar ve su akımlarından mekanik enerji elde etmek için, Finlandiyalı mucit Sigurd Johannes Savonius tarafından icat edilmiş olan bir akım makinasıdır (Savonius, 1929). Rüzgar enerjisi dönüşümünde daha yaygın şekilde kullanılagelmiş olmasından ötürü bu tasarım, Savonius rüzgar türbini olarak da anılmaktadır. Savonius rüzgar türbini, çalışma prensibi açısından düşey eksenli rüzgar türbinleri sınıfına dahildir (Şekil 1). Diğer tüm rüzgar türbinlerinde de olduğu üzere, U_∞ (m/s) serbest akım hızındaki rüzgara maruz kalan ve Ω (rad/s) açısal hızı ile dönen, R (m) dönme yarıçapına sahip bir Savonius rüzgar türbini için devirlilik sayısı (uç-hız oranı),

$$\lambda = \Omega R / U_\infty \quad (1)$$

ile tanımlanır. Akış rejimine ilişkin Reynolds sayısı, havanın yoğunluğu ρ (kg/m^3), dinamik viskozitesi μ ($\text{kg/(m}\cdot\text{s)}$) ve türbinin uzunluk ölçeği $D = 2R$ olmak üzere,

$$Re_D = \rho U_\infty D / \mu \quad (2)$$

ile ifade edilir. Rüzgarın sahip olduğu kinetik enerjinin bir kısmı türbine mekanik enerji olarak aktarılır ve türbin milinde M (Nm) momenti oluşur. Bu moment boyutsuz formda yazılarak, moment faktörü elde edilir:

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A R} \quad (3)$$

Burada A (m^2), türbin ön bakış alanıdır. Türbin milindeki mekanik gücün, türbin ön bakış alanındaki mevcut rüzgar gücüne oranı, enerji dönüşümüne ilişkin verimliliği ortaya koyan türbin güç faktörüdür:

$$C_P = \frac{M \Omega}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^3 A} \quad (4)$$

Böylece, $\lambda = C_P / C_M$ yazılabilir. Kısaca, moment ve güç faktörleri, türbinin performans karakteristiklerini tanımlayan temel

büyükliklerdir. Ayrıca Betz limiti gereği, güç faktörünün ~ 0.59 değerinden daha büyük olması imkansızdır.

Savonius rüzgar türbini, günümüzde ticarileşmiş olan yatay eksenli rüzgar türbinleri ile karşılaştırıldığında, belirgin farklar göze çarpar. Bunların başlıcaları şu şekilde sıralanabilir:

1. Enerji verimliliği: Aerodinamik kanat formuna sahip modern türbinler, yüksek verime sahip olup, bunların güç faktörü değerleri, 0.50'ye dayanmıştır. Ancak aynı sebepten ötürü bu türbinlerin birim maliyeti hayli yüksektir (1221 \$/kW; Moné vd, 2014). Savonius rüzgar türbinlerinin güç faktörü ise 0.25 ila 0.30 aralığında olup, basit geometrisi dolayısıyla üretimi, görece daha kolay ve ucuzdur.
2. Moment karakteristiği: Savonius rüzgar türbininin moment faktörü, yatay eksenli türbinlere nazaran daha büyük değerler alır. Böylece durağan haldeki türbin, rüzgar akımı geldiğinde kendiliğinden kalkış yapabilir. Ayrıca, elektrik enerjisi üretimi dışında, su pompalamak için de kullanılabilir.
3. Hakim rüzgar yönünün etkisi: Savonius rüzgar türbinleri, tasarımı dolayısıyla rüzgar yönünden bağımsızdır. Yatay eksenli rüzgar türbinleri ise, hakim rüzgar yönüne çevirecek elektrik motorlarına ihtiyaç duyarlar.
4. Mekanik bileşenlerin konumu: Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde dişli kutusu, jeneratör ve diğer aktarma bileşenleri türbin kulesinin tepesine konumlandırılmış olup montajı ve bakımı zordur. Savonius rüzgar türbinleri düşey eksenli olduğundan, tüm bileşenler zemine yerleştirilebilir.

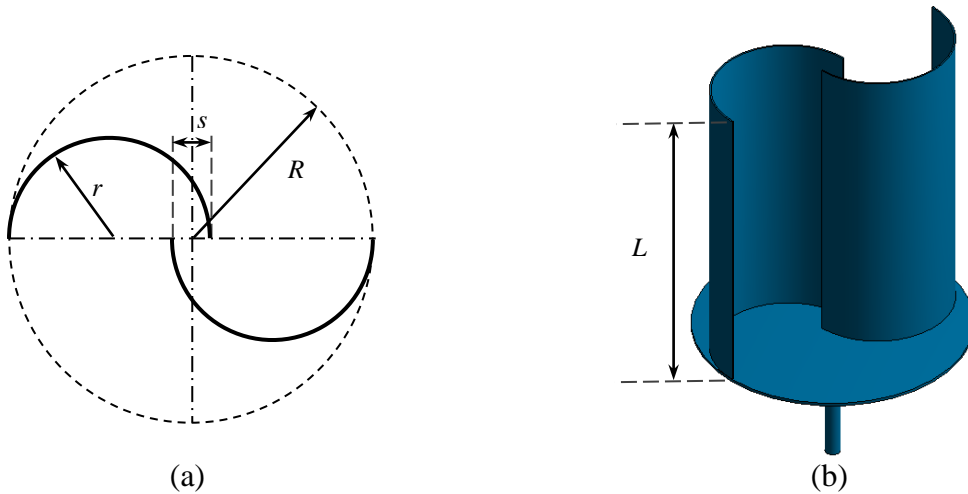
Bu değerlendirmeye göre Savonius rüzgar türbinleri, öncelikle maddi olanakların ve bunun yanında üretim teknikleri ile montaj becerilerinin kısıtlı olduğu bölgelerde, düşük enerji verimliliğine rağmen halen tercih edilebilecek bir alternatiftir.

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), günümüzde, turbomakina performansının tayininde temel araştırma yöntemlerinden biri olup, Savonius rüzgar türbini etrafındaki akış

karakteristiklerini incelemek amacıyla sıkça kullanılmaktadır (Sarma vd., 2014; Driss vd., 2014; Sun vd., 2012; Morshed vd., 2013). Akwa ve diğerleri (2012), kanat bindirme payının (Şekil 1a) etkisini parametrik olarak incelemişler ve en yüksek verimin $s=0.15$ civarında elde edildiğini vurgulamışlardır. Bir Savonius rüzgar türbinine uygulanan perdeleme ile elde edilecek performans artışının deneysel ve nümerik olarak incelenmesi, Deda Altan ve diğerleri (2008) tarafından gerçekleştirilmiştir. Zhou ve Rempfer (2013), özgün kanat formuna sahip bir Savonius rüzgar türbini etrafındaki akışı nümerik olarak incelemişler ve geleneksel türbin ile karşılaştırmalı olarak değerlendirmişlerdir.

Havanın termofiziksel özelliklerinin ve hakim rüzgar hızının belli olduğu bir coğrafi konum için Reynolds sayısını belirleyen büyüklük, türbin boyutudur. Reynolds sayısı, kanat kesitindeki aerodinamik kuvvetleri, dolayısıyla, mil momentini ve elde edilecek gücü etkiler. Gasch ve Twele (2012), aerodinamik profil kesitli türbinlerde, kiriş uzunluğu cinsinden tanımlı Reynolds sayısının kritik değerini, 2×10^5 civarında öngörmüşler, bunun üzerindeki değerler için Reynolds sayısının türbin performans karakteristiklerine etkisinin ihmal edilebileceğini vurgulamışlardır. Menet ve Bourabaa (2004), bir Savonius rüzgar türbini için Reynolds sayısının etkisini 1×10^5 ila 5×10^5 aralığında nümerik olarak incelemişler ve

moment ve güç katsayısındaki değişimlerin %3'ü geçmediğini ifade etmişlerdir. Akwa ve diğerleri (2012), Savonius türbinlerine ilişkin kapsamlı bir derleme yapmışlar, moment faktörünü Reynolds sayısının 43350 ile 433500 değerlerinde nümerik olarak karşılaştırmışlar, bu aralıkta büyük değişimlerin olmadığını ortaya koymuşlardır. D'alessandro ve diğerleri (2010) tarafından yapılan deneysel incelemede, $Re_D = 2.2 \times 10^5$ civarında akışın türbülanslı olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, Ducoin ve diğerleri (2017), bir Savonius rüzgar türbini etrafındaki akışın doğrudan nümerik simülasyonunu $Re_D = 1.23 \times 10^5$ değeri için gerçekleştirmiş olup, kanat profili üzerinde türbülansa geçiş bölgelerini tespit etmişlerdir. Bu çalışmalar dışında, Savonius rüzgar türbinleri etrafındaki akışın laminar rejimden türbülansa geçişine ilişkin yeterli bilgi mevcut değildir. Ayrıca, söz konusu mevcut çalışmalarda en yüksek Reynolds sayısının 10^5 mertebesinde olduğu görülmektedir. Gerek verilen saha şartlarında uygun türbin boyutunu belirlemek için gerekse laboratuvar ölçeğindeki model deneylerine ışık tutmak için Reynolds sayısı etkilerinin yeterince geniş bir aralıkta incelenmesi önem arz etmektedir. Böylesi bir aralığın laboratuvar deneylerinde incelenmesi zahmetli iken, doğrulanmış HAD simülasyonları ile, sonuçlara görece daha hızlı erişmek mümkündür.



Şekil 1: Savonius rüzgar türbini: (a) Türbinin kesiti, (b) Türbinin perspektif görünüşü.

Bu hususlara dayanarak, mevcut çalışmada, Reynolds sayısının bir Savonius rüzgar türbininin performansına etkileri HAD simülasyonlarına dayalı olarak ele alınmaktadır. Bu kapsamda öncelikle, problemin tanımı ve nümerik yöntem detayları sunulacaktır. Daha sonra, Blackwell ve diğerleri (1977) tarafından bir Savonius rüzgar türbininin deneysel olarak belirlenmiş performans karakteristikleri kullanılarak nümerik yöntem doğrulanacaktır. Yöntem ile çeşitli Reynolds sayıları için simülasyonlar yapılacak, moment ve güç faktöründeki değişimler ortaya konacak, türbin kanat kesitinde ve art izindeki akış karakteristikleri detaylı olarak irdelenecektir.

Problemin Tanımı ve Nümerik Yöntem

Bu çalışmada, bir Savonius rüzgar türbini etrafındaki akış karakteristiklerinin, Reynolds sayısına bağlı değişimlerinin nümerik olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Modellenen türbin, Blackwell ve diğerleri (1977) tarafından deneysel olarak incelenen türbin ile özdeş geometrik parametrelere sahiptir. Buna göre, iki adet kanada ait yarıçap $r=0.25$ m, dönme yarıçapı $R=0.45$ m ve kanat bindirme payı $s=0.1$ m'dir (Şekil 1a). Bu ölçüler, mevcut çalışmadaki tüm simülasyonlarda sabit tutulmuşlardır. Deneylerde kanat uzunluğu $L=1$ m'dir. Simülasyonlarda ise sonlu kanat boyu etkileri ihmal edilerek iki boyutlu inceleme yapılmıştır. Referans alınan deney için $Re_D=432000$ ve rüzgar tüneline serbest akım hızı 7 m/s olarak ifade edilmiştir. Doğrulama sürecinde aynı değerler kullanılarak uygun biçimde havanın malzeme özellikleri belirlenmiştir. Sıkıştırılmaz, daimi olmayan, türbülanslı akış kabulleri altında, ANSYS Fluent ticari yazılımı ile yapılan simülasyonlarda, kayan ağlar tekniği (sliding mesh) kullanılmıştır. Problem bölgesi, ağ ve sınır koşulları Şekil 2'de görülmektedir. Giriş sınır koşulunda, yatay hızın değeri verilmiş, çıkışta statik basınç 0 Pa (gösterge) olarak tanımlanmış ve tüm çeperlerde kaymama koşulu uygulanmıştır. Türbülansın modellenmesi için, yazılım kapsamında mevcut olan SST türbülans

modeli (Shear Stress Transport; Menter, 1994) kullanılmıştır. Bu model, $k-\varepsilon$ ve $k-\omega$ türbülans modellerinin üstün yanlarını bir araya getiren bir modeldir. Böylece, çepere çok yakın bölgelerdeki viskoz sönümlenme etkilerinin ampirik çeper fonksiyonları ile temsil edilmesi yerine, yüksek çözünürlüklü bir ağ kullanılarak modellenmesi gerçekleştirilebilmektedir. Bu da, akış ayrılmalarının söz konusu olduğu türbülanslı sınır tabakanın hesaplanmasında fayda sağlamaktadır. Bu amaç için, ilk hücre yüksekliğinin ($y^+ = y\sqrt{\tau_w/\rho/\nu}$) değeri 1 'den küçük kalacak şekilde, türbin çeperlerine şişirme ağ oluşturulmuştur (ANSYS Inc, 2014). Ağ bağımsızlığı için çeşitli ağ çözünürlükleri denenmiş, son durumda şişirme ağ için ilk hücre yüksekliği 4×10^{-3} mm, büyüme oranı 1.2 ve katman sayısı 40 olarak belirlenerek toplam 132000 hücreli problem bölgesi elde edilmiştir. Moment ve güç faktörlerinin devirlik sayısına bağlı değişimlerinin belirlenmesi için, serbest akım hızı sabit tutulmuş ve türbini kapsayan dönme bölgesinin devir sayısı değiştirilmiştir. Çözümde SIMPLE algoritması ile kullanılmış, tüm bilinmeyenlere ikinci mertebe doğruluklu sonlu hacimler ayrıklaştırması uygulanmış, zaman integrasyonu ise birinci mertebeden örtülü ayrıklaştırma yapılmıştır. Her bir devir sayısında, on periyotluk simülasyon yapılarak düzenli rejime geçiş beklenmiş, daha sonra, bir periyotluk zaman aralığı için moment ve güç faktörünün zamana bağlı değişimleri hesaplanarak kaydedilmiştir. Türbin karakteristiklerinin elde edilmesi için bu değerlerin zamansal ortalaması

$$C_{M,P} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} C_{M,P}(t) dt \approx \frac{\Delta t}{T} \sum_i C_{M,P}(t_i) \quad (5)$$

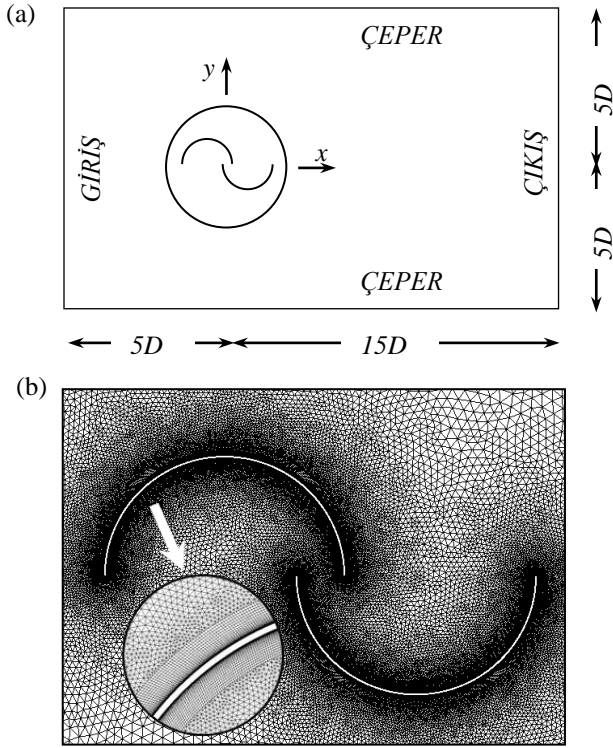
ile hesaplanmıştır.

Yöntemin doğrulanmasının ardından, Reynolds sayısının etkisinin belirlenmesi için, $Re_D=4\times 10^4$, 4×10^5 , 4×10^6 , 8×10^6 ve 20×10^6 değerlerinde simülasyonlar tekrarlanmıştır. Türbinin art izinde görülmesi beklenen türbülanslı akıştan ötürü, $Re_D=4\times 10^4$ değeri de dahil olmak üzere, tüm simülasyonlar

türbülanslı akış kabulü altında gerçekleştirilmiştir. $0.25 \leq \lambda \leq 1.75$ aralığında 0.25 artımlar ile moment ve güç faktörleri bulunmuştur. Reynolds sayısı değişimleri, dinamik viskozite değeri değiştirilerek elde edilmiştir. Çevrinti (vortisite) vektörü, hız alanının (u, v) rotasyoneli olarak tanımlı olup, iki boyutlu akışlar için

$$\zeta_z = \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \quad (6)$$

formunda bir skalerdir. Türbin ard izindeki çevri (vorteks) yapılarının görselleştirilmesi amacıyla kullanılmıştır.

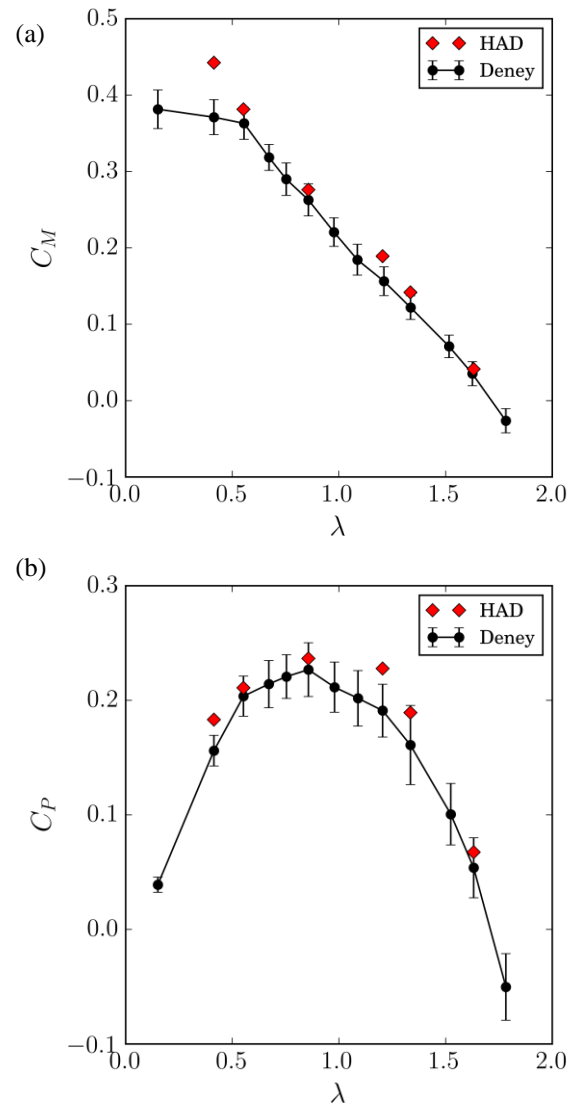


Şekil 2: Simülasyonlara ait ön işlemlerden görüntüler: (a) Problem bölgesi boyutları ve sınır koşulları, (b) Kanat civarında çözüm ağı.

Bulgular ve Değerlendirme

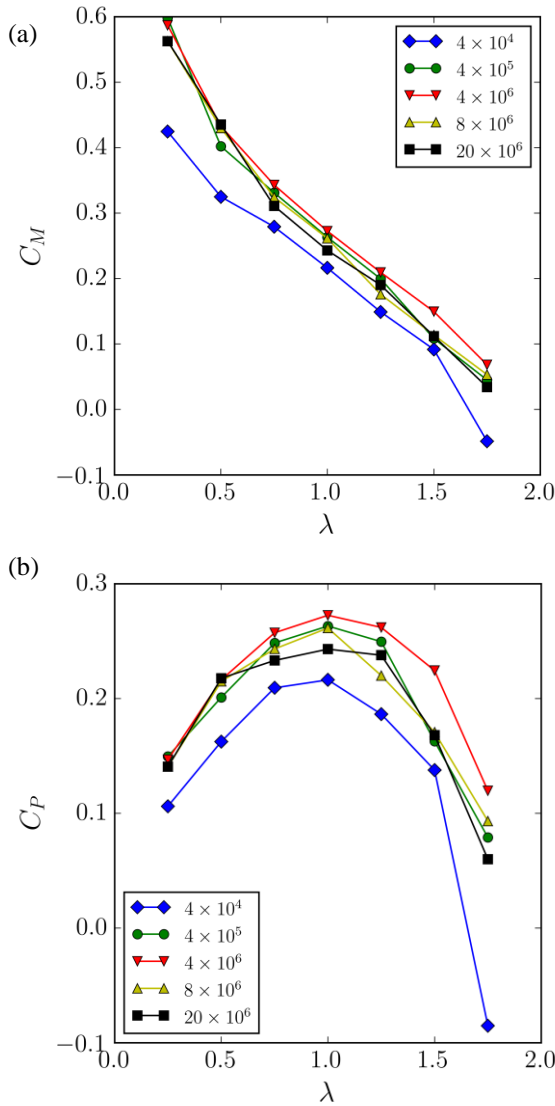
Nümerik yöntemin doğrulanması amacıyla, Blackwell ve diğerleri (1977) tarafından yapılan deneyler referans alınarak hesaplanan türbin karakteristikleri, Şekil 3'te görülmektedir. Burada, HAD simülasyonları ile belirlenen genel trendin deneysel sonuçlar ile çok iyi uyuma sahip olduğu öncelikle göze

çarpmaktadır. Ayrıca, Blackwell ve diğerleri (1977) tarafından verilen ölçüm belirsizlikleri de dikkate alındığında, yüksek doğruluklu moment ve güç faktörü değerlerine ulaşılabildiği görülmektedir. Sonuçlar nicel olarak değerlendirildiğinde, HAD ile bulunan güç faktöründeki bağıl hatanın %3 ila %24 arasında değiştiği ortaya çıkmaktadır. $\lambda = 1.63$ değerine karşılık gelen en yüksek bağıl hata (%24), ölçüm belirsizliği aralığındadır. Sapma değerleri genel olarak iki boyutlu akış kabulü ile ilişkili olmakla birlikte, bu kabulün Savonius türbini için uygun olduğu da ortaya konmuştur.



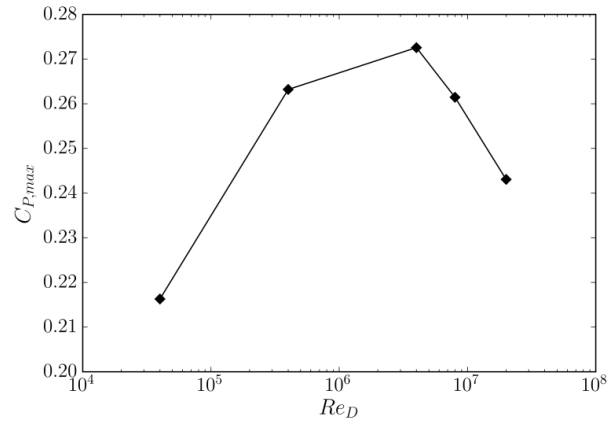
Şekil 3: HAD sonuçlarının Blackwell ve diğerleri (1977) tarafından yapılan deneyler ile karşılaştırılması (a) Moment faktörü, (b) Güç faktörü.

Yöntemin doğrulanmasının ardından Reynolds sayısı etkisinin belirlenmesi için parametrik inceleme gerçekleştirilmiştir. Parametrik incelemeye ilişkin performans karakteristikleri, Şekil 4'te yer almaktadır. Buna göre Reynolds sayısı arttığında, (1) Türbinin güç elde ettiği devirlilik sayısı aralığı değişmemektedir, (2) Moment faktörü (dolayısıyla güç faktörü), önce artmakta ve daha sonra düşmektedir, (3) En iyi verim noktasına karşılık gelen devirlilik sayısı ($\lambda = 1.0$) değişmemektedir.



Şekil 4: Reynolds sayısının performansa etkisine ilişkin HAD sonuçları: (a) Moment faktörü, (b) Güç faktörü.

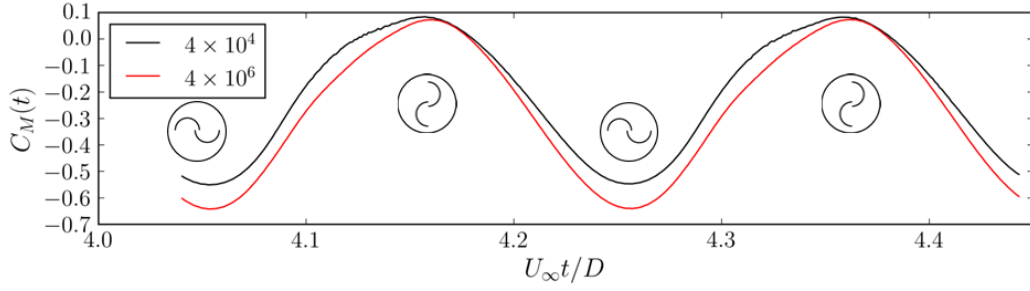
Şekil 5'te, Reynolds sayısının, en iyi verim noktasına etkisi verilmiştir. Buna göre, incelenen Reynolds sayısı değerleri ile sınırlı olmak üzere maksimum güç faktörü, en yüksek değerine $Re_D = 4 \times 10^6$ 'da ulaşmıştır. Bu değer, $Re_D = 4 \times 10^4$ 'de görülen maksimum güç faktöründen yaklaşık 7 puan daha fazladır. Betz limiti göze alındığında bu artışın önemli düzeyde olduğu göze çarpmaktadır. Bu sonucun uygulamadaki etkisi için sayısal bir örnek verilirse, hakim rüzgar hızı 7 m/s olan bir bölgede, standart hava koşullarında (15 °C, 1 atm), en iyi verim için türbin çapı yaklaşık 8.4 m olmalıdır. Ayrıca, ölçeklendirilmiş model üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinde Reynolds benzeşimi sağlanmadığı takdirde bir düzeltme faktörüne gereksinim duyulacağı görülmektedir.



Şekil 5: Reynolds sayısının güç faktörünün en yüksek değerine etkisi.

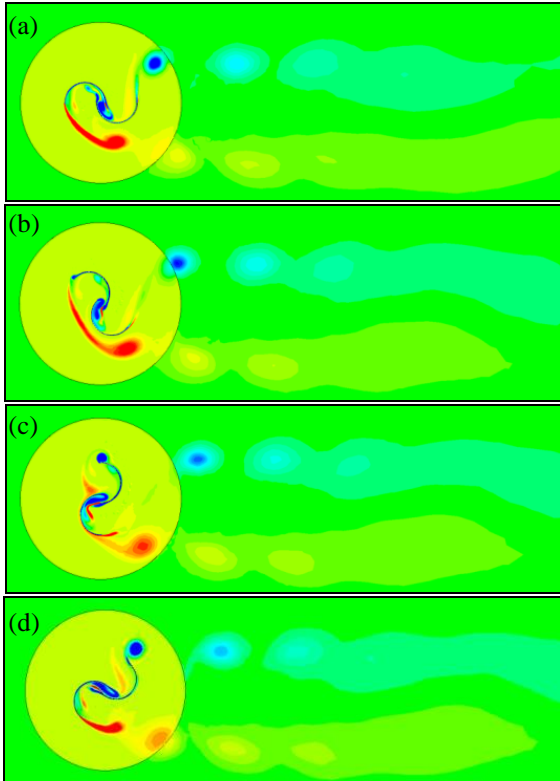
Türbinin bir devirlik hareketi sırasında kaydedilen anlık moment faktörünün zamansal değişimi, Şekil 6'da yer almaktadır. Burada maksimum güç faktörünün en yüksek ve en düşük değerlerine karşılık gelen Reynolds sayıları karşılaştırılmış olup, benzer trendler görülmekle birlikte, optimum Reynolds sayısında moment faktörünün daha yüksek değerler aldığı ortadadır.

Denklem 6 ile verilen çevrinti vektörünün iki boyutlu akış düzlemine dik bileşeni, optimum Reynolds sayısı için akış bölgesinin görselleştirilmesi için kullanılmıştır (Şekil 7).



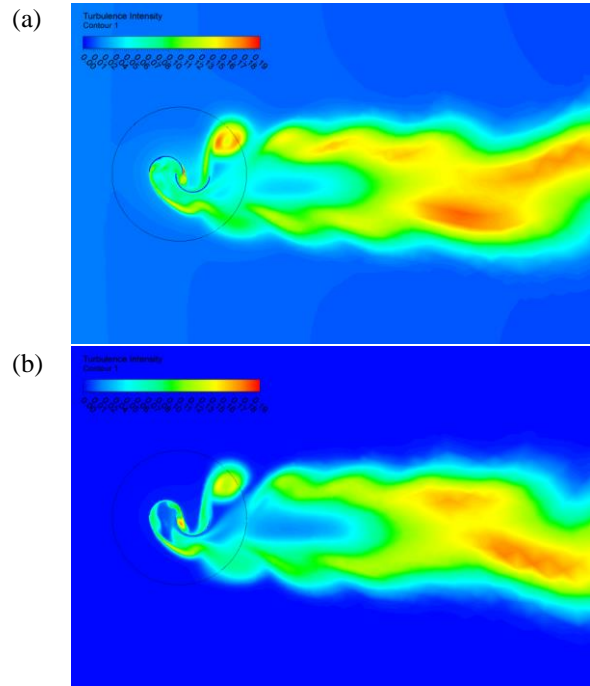
Şekil 6: $Re_D = 4 \times 10^4$ ve $Re_D = 4 \times 10^6$ değerlerinde anlık moment faktörünün zamana bağlı değişimi.

Türbinin Şekil 1a'da görülen konumu referans ($\theta = 0$) alınmak üzere, $\theta = \pi/4$, $\pi/2$ ve $3\pi/4$ değerlerinde akış bölgesi incelendiğinde, kanat uçlarında çevri kopmalarının gerçekleştiği ve bu çevrilerin akış ile birlikte ard izinde taşındığı görülmektedir. Türbinin yarım turuna karşılık gelen bu hareket sırasında, sırayla bir pozitif ve bir negatif yönlü iki çevri oluşmuştur. Geometrinin dönele periyodik olmasından dolayı, ikinci yarım turda da bu etkiler tekrar eder.



Şekil 7: $Re_D = 4 \times 10^6$ için, $[-100, 100]$ aralığında çevrinti (s^{-1}) konturları. Kırmızı renk, maksimum değeri gösterir. (a) $\theta=0$, (b) $\theta=\pi/4$, (c) $\theta=\pi/2$, (d) $\theta=3\pi/4$.

$Re_D = 4 \times 10^4$ değeri de dahil olmak üzere, tüm simülasyonlarda akışın türbülanslı olduğu kabul edilmiştir. Bunun kontrolü için Şekil 8'de, $Re_D = 4 \times 10^4$ ve $Re_D = 4 \times 10^6$ sayılarında hesaplanan türbülans yoğunluğu konturları karşılaştırılmıştır. Beklendiği gibi, özellikle art izinde ve kanat profili civarında olmak üzere, %20'ye ulaşan türbülans yoğunluğu bölgeleri görülmektedir. Bu durum hem düşük hem de yüksek Reynolds sayılarında söz konusu olup, yapılan akış kabulünün uygunluğunu işaret etmektedir.



Şekil 8: $[0, 0.2]$ aralığında türbülans yoğunluğu konturları: (a) $Re_D = 4 \times 10^4$, (b) $Re_D = 4 \times 10^6$.

Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, bir Savonius rüzgar türbinin akış karakteristikleri, HAD simülasyonları aracılığı ile belirlenmiş, Reynolds sayısının türbin performansına olan etkileri incelenmiştir. Yöntem öncelikle, Blackwell ve diğerleri (1977) tarafından verilen deneysel sonuçlar yardımıyla doğrulanmıştır. $Re_D = 4 \times 10^4$, 4×10^5 , 4×10^6 , 8×10^6 ve 20×10^6 değerlerinde yapılan parametrik simülasyonlar sonucunda, $Re_D = 4 \times 10^6$ değerinde en yüksek güç faktörü değerine ulaşılmıştır. Türbinin geometrik parametreleri çalışma kapsamında sabit tutulmuş olup, gelecek çalışmalarda bunların değişimi ele alınarak Reynolds sayısı etkileri incelenebilir. Bulguların, gerek saha uygulamalarına gerekse laboratuvar deneylerine ışık tutacağı düşünülmektedir.

Kaynaklar

- Akwa, J. V., da Silva Júnior, G. A. ve Petry, A. P. (2012). Discussion on the verification of the overlap ratio influence on performance coefficients of a Savonius wind rotor using computational fluid dynamics, *Renewable Energy*, **38**, 1, 141-149.
- Akwa, Vicente, J., Vielmo, H. A. ve Petry, A. P., (2012). A review on the performance of Savonius wind turbines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **16**, 5: 3054-3064.
- Altan, B. D., Atılğan, M. ve Özdamar, A. (2008). An experimental study on improvement of a Savonius rotor performance with curtaining, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **32**, 8, 1673-1678.
- Anonim, (2014). *ANSYS Fluent 14 Theory Guide*, ANSYS Inc, USA.
- Blackwell, B. F., Sheldahl, R. F. ve Feltz, L. V., (1977). *Wind tunnel performance data for two- and three-bucket Savonius rotors*, Albuquerque, NM: Sandia Laboratories.
- D'Alessandro, V., Montelpare, S., Ricci, R. ve Secchiaroli, A. (2010). Unsteady Aerodynamics of a Savonius wind rotor: a new computational approach for the simulation of energy performance. *Energy*, **35**, 8, 3349-3363.
- Driss, Z., Mlayeh, O., Driss, D., Maaloul, M. ve Abid, M. S. (2014). Numerical simulation and experimental validation of the turbulent flow around a small incurved Savonius wind rotor, *Energy*, **74**, 506-517.
- Ducoin, A., Shadloo, M. S. ve Roy, S. (2017). Direct Numerical Simulation of flow instabilities over Savonius style wind turbine blades, *Renewable Energy*, **105**, 374-385.
- Gasch, R., Twele, J. (2011). *Wind power plants: fundamentals, design, construction and operation*. Springer Science and Business Media.
- Menet, J., Bourabaa, N., (2004). Increase in the Savonius rotors efficiency via a parametric investigation, *Proceedings of European Wind Energy*, Londra.
- Menter, F. R., (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, *AIAA Journal*, **32**, 8, 1598-1605.
- Moné, C., Stehly, T., Maples, B. ve Settle, E. (2015), *2014 Cost of Wind Energy*.
- Morshed, K. N., Rahman, M., Molina, G. ve Ahmed, M. (2013). Wind tunnel testing and numerical simulation on aerodynamic performance of a three-bladed Savonius wind turbine, *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, **4**, 1, 1-14.
- Sarma, N. K., Biswas, A. ve Misra, R. D. (2014). Experimental and computational evaluation of Savonius hydrokinetic turbine for low velocity condition with comparison to Savonius wind turbine at the same input power, *Energy Conversion and Management*, **83**, 88-98.
- Sigurd, J. S., (1929). Rotor adapted to be driven by wind or flowing water, U.S. Patent No. 1 697 574, 1 Ocak 1929.
- Sun, X., Luo, D., Huang, D. ve Wu, G. (2012). Numerical study on coupling effects among multiple Savonius turbines, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, **4**, 5, 053107.
- Zhou, T. ve Rempfer, D. (2013). Numerical study of detailed flow field and performance of Savonius wind turbines, *Renewable energy*, **51**, 373-381.

Numerical investigation of the Reynolds number effects on Savonius wind turbines

Extended abstract

Savonius wind turbine is one of many designs that utilize the power in the wind. Compared to the commercialized horizontal axis wind turbines, the Savonius wind turbine has significant differences. The primary differences are:

1. **Energy efficiency:** Modern turbines with airfoil sections are known to be efficient. Recent power coefficient values have reached up to 0.50. However, for the same reason, the unit cost of these turbines is quite high (1221\$ / kW; NREL, 2014). The power factor of the Savonius wind turbines on the other hand, is in the range of 0.25 to 0.30. However it is relatively easier and cheaper to manufacture due to its simple geometry.

2. **Moment characteristics:** The moment coefficient of the Savonius wind turbine is higher than that of the horizontal axis turbines. Thus, the stationary turbine can self-start when immersed in a freestream. In addition to electricity generation, it can also be used for pumping water.

3. **Influence of the dominant wind direction:** Savonius wind turbines are independent of wind direction due to their design. Horizontal axis wind turbines require motors to face the dominant wind direction.

4. **Position of the mechanical components:** In horizontal axis wind turbines, the gearbox, generator and other transmission components are positioned on top of the turbine tower, making installation and maintenance complicated. Since the Savonius wind turbines are vertical axis wind turbines, all components can be placed on the ground.

According to this assessment, Savonius wind turbines are an alternative that can still be preferred, despite low energy efficiency, primarily in areas where the financial resources, as well as production techniques and installation skills are limited.

For a geographical location where the thermophysical properties of the air and the dominant wind speed are given, the turbine size, determines the Reynolds number. Thus, to determine the appropriate turbine size in the given field conditions, the effects of the Reynolds number over a wide enough range should be known. This is also vital for shedding light on the model experiments on the laboratory scale.

In this study, the influence of the Reynolds number on the performance of a Savonius wind turbine is investigated using computational fluid dynamics. The finite-volume based commercial code ANSYS Fluent is used with the assumptions of two-dimensional, incompressible, unsteady and turbulent flow. The validation of the method with the help of available performance test data is followed by the parametric investigation for Reynolds numbers 4×10^4 , 4×10^5 , 4×10^6 , 8×10^6 and 20×10^6 which are based on the turbine diameter. Results show that the highest power coefficient is obtained at $Re_D = 4 \times 10^6$, for which the computed tip-speed ratio and the power coefficient are 1.0 and 0.27, respectively.

Keywords: Savonius, wind energy, computational fluid dynamics, Reynolds number.