

## Küçük dikey eksenli rüzgar türbinlerinin gürültüsünün azaltılması için sayısal model

Wen-Yu Wang<sup>1</sup>, Yuh-Ming Ferng<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Yeşil Enerji Bölümü, Tainan Ulusal Üniversitesi, Tainan Şehri, Tayvan

<sup>2</sup> Mühendislik ve Sistem Bilimi Bölümü, Ulusal Tsing Hua Üniversitesi, Hsinchu Şehri, Tayvan

5 \*Yazışmalar için: Wen-Yu Wang (wywang@mail.nutn.edu.tw)

Özet Rüzgar türbinleri sürdürülebilir enerji için umut verici bir çözümdür, ancak gürültü emisyonları halkın kabulü için bir zorluk teşkil etmektedir. Çok sayıda kanat tasarımı gürültüyü azaltmayı hedeflemiştir, ancak genellikle rüzgar türbini aerodinamik verimliliğinde bir azalma ile birlikte gelir. Bu çalışmada, 5 kW dikey eksenli bir rüzgar türbininin (VAWT) akustik gücü ve torku, farklı ağ boyutları ve türbülans modelleri kullanılarak simüle edilmiştir.

- 10 Türbinin simüle edilen torku ve gürültüsü ağ boyutuna önemli ölçüde duyarlıdır, bu nedenle benzer çalışma koşullarına sahip gelecekteki türbinler için bir tasarım referansı olarak kullanılabilir duvara yakın ve dönen bölgeler için uygun ağ boyutları belirlenmiştir. Türbülans modelinin seçiminin öngörülen torku yaklaşık %10 ve öngörülen uç gürültüsünü yaklaşık 2 dB etkilediği bulunmuştur. Seçilen ağ boyutu ve türbülans modeli daha sonra üç yaygın gürültü azaltma yönteminin etkinliğini simüle etmek için uygulanmıştır
- 15 teknik: maske, deflektör ve duvar pürüzlülüğü. Sonuçlar, sapırcıların küçük VAWT'lerin gürültüsünü azaltmak için uygun olduğunu göstermiştir. Bu makale, küçük VAWT'lerden kaynaklanan gürültü yayılımının simülasyonu ve optimum gürültü azaltma teknikleri hakkında değerli bilgiler sağlamaktadır.

### 1. Giriş

Tayvan'ın petrokimyasal enerji kaynakları zayıftır ve enerjisinin yaklaşık %98'ini ithalatla karşılamaktadır

- 20 ihtiyacı bulunmaktadır. Bu nedenle, yeşil enerjinin aktif olarak geliştirilmesi giderek daha önemli bir konu haline gelmiştir. Tayvan'ın coğrafyası ve muson iklimi sayesinde büyük miktarda rüzgar enerjisi mevcuttur. Rüzgar enerjisi üretimi önemli çevresel faydalar sağlar ve yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak uygulanabilir bir seçenektir. Aerodinamik teorisi, malzemeler ve üretim teknolojilerindeki gelişmeler, rüzgar türbinlerinin performansını ve güvenilirliğini artırırken elektrik üretim maliyetini de düşürmüştür. Dünya çapında
- 25 dünyada, yüksek yoğunluklu şehirlerin yükselişi, yüksek binaların giderek artmasına neden olmuş ve bu da kentsel ortamlar için rüzgar enerjisine olan ilgiyi artırmıştır. Dikey eksenli bir rüzgar türbini (VAWT), geleneksel yatay eksenli rüzgar türbininden daha az güç sunar, ancak basit bir tasarıma sahiptir, düşük rüzgar hızlarında çalışabilir ve düşük gürültü emisyonlarına sahiptir. Bu nedenle, VAWT'ler çok sayıda binanın bulunduğu kentsel ortamlar için uygundur. Kentsel alanlardaki küçük rüzgâr türbinlerinin küresel kurulu kapasitesi 2010 yılından bu yana her yıl artarak
- 30 2020 yılında 1427,5 MW (Li vd., 2022). Bununla birlikte, rüzgar enerjisi üretiminin yayılması sadece arazi ile değil, aynı zamanda rüzgar ve türbin kanatlarının ürettiği ve yakınlardaki sakinleri etkileyebilecek gürültü ile de sınırlıdır. Çalışma sırasında, bir rüzgar türbini yaklaşık 95 ses basınç seviyesi (dB) gürültü üretebilir ve bu gürültü mesafe arttıkça kademeli olarak azalarak 300 m veya daha fazla mesafede 40 dB'lik kabul edilebilir bir seviyeye iner. Bu nedenle, rüzgar türbinlerinin genellikle yerleşim alanlarından en az 300 m uzakta inşa edilmesi gerekir.
- 35 Hava kaynaklı gürültünün analizi olgunlaşmış bir araştırma konusudur. Lighthill (1952), ses kaynağı teriminin deneysel olarak veya hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) ile elde edilebildiği akışkanlar mekaniği teorisini kullanarak bir akustik dalga denklemi türetmiştir. Analiz için akış ve ses alanlarını

ayırma yöntemine akustik analogi teorisi denir. Proudman ve arkadaşları (1952) Lighthill'in çalışmasını geliştirerek izotropik türbülansın neden olduğu ses kaynağını türetmiştir. Pradera ve diğerleri (2007) çeşitli aerodinamik parametreleri hesaplamıştır

40 ve bir silindir üzerinden geçen düşük ve yüksek Reynolds sayılarına sahip viskoz akışkanlar tarafından üretilen gürültü ve ses basıncını tahmin etmek için Ffowcs Williams-Hawkings (FW-H) denklemini kullandılar ve daha sonra gürültü analizi için hızlı Fourier dönüşümü yoluyla ses basıncı seviyesine dönüştürdüler. Analitik sonuçları deneysel verilerle iyi bir uyum göstermiştir. Tadamas ve diğerleri (2011) CFX CFD yazılımını kullanarak



NREL Faz VI kanadını analiz etti ve aerodinamik katsayıyı deneysel verilerle karşılaştırarak doğruladı.

45 Sorensen ve diğerlerinden (2001) alınan veriler.

Rüzgar türbinlerinin aero-akustik özelliklerine dayalı olarak gürültü emisyonlarını azaltmak için çeşitli deneysel ve sayısal teknikler geliştirilmiştir. Baskın gürültü kaynaklarını hedef alan bazı umut verici gürültü azaltma teknikleri tartışılmıştır; bunlar arasında giriş türbülans gürültüsünün, firar kenarı gürültüsünün ve uç gürültüsünün azaltılması yer almaktadır. Uç gürültüsü, rüzgar türbinlerinin baskın bir gürültü kaynağıdır. Maizi ve diğerleri (2018)

50 köpekbalığı ucunun uç gürültüsünü referans uca kıyasla %7 oranında azalttığını, ancak %3 daha az güce sahip olduğunu gösteren sayısal bir analiz gerçekleştirmiştir. Bununla birlikte, hesaplama yaklaşımları, akış alanını ve akustik hesaplamalar için FW-H denklemini çözmek için ayrılmış bir girdap simülasyonu kullanmayı içeriyordu ve bu da hesaplama açısından çok yoğundu. Deshmukh ve arkadaşları (2018), aerodinamik ve aero-akustik parametrelerdeki iyileşmeyi değerlendirmek için uç bölgesini dairesel bir etki alanına dahil etmişlerdir.

55 performans göstermiştir. Metodolojileri hesaplama maliyetini önemli ölçüde azaltmış ve elde ettikleri sonuçlar, gürültü emisyonlarının orta-yüksek frekanslarda yaklaşık %25 oranında azaldığını ve tork çıkışının arttığını göstermiştir. Mohamed (2016), farklı hız oranlarında farklı aralıklara sahip H-rotorlu Darrieus VAWT'nin gürültü ve verimliliğini analiz etmek için kararsız gerçekleştirilebilir bir  $k-\epsilon$  türbülans modeli ile birleştirilmiş bir CFD modeli kullanmıştır. Sonuçlar, tek bir kanatla karşılaştırıldığında, %60 aralıklı bir çift kanadın gürültüyü etkili bir şekilde azalttığını göstermiştir.

60 gürültüsünü tüm frekans aralığında %40 oranında azaltmıştır, ancak verimlilik ve tork azalmıştır. Buna ek olarak, aşırı büyük veya küçük bir aralık (örneğin, %20 veya %90) gürültü emisyonlarını artırmıştır. Botha ve diğerleri (2017) deneylerde ölçülen altı kanatlı 2 kW VAWT'nin gürültü emisyonlarını iki boyutlu analitik çözüm ve HAD tahminleri ile karşılaştırmıştır. Elde ettikleri sonuçlar, HAD modelinin güvenilir olduğunu, analitik çözümün ise yetersiz kaldığını göstermiştir. Daha sonra HAD sonuçlarını analitik çözümü iyileştirmek için uygulamışlardır.

65 bazı analitik matematiksel modellerin boyutsuz parametreleri ve doğruluklarının iyileştirilmesi. Naccache ve diğerleri (2017) CFD modellerini doğrulamak için 2D deneyler gerçekleştirmiştir. Sonuçlar,  $y^+ < 15$ 'lik bir duvara yakın ağa sahip bir kayma gerilimi taşıma SST  $k-\omega$  türbülans modelinin kullanılmasının, farklı azimut açılarında ve dönüş hızı oranlarında kaldırma katsayısını, kaldırma-sürükleme oranını ve güç katsayısını doğru bir şekilde tahmin edebileceğini göstermiştir. Bu model daha sonra derinlemesine 3D simülasyonlar yapmak için uygulanmıştır. Naccache ve diğerleri (2018)

70 Çift Dikey Eksenli Rüzgar Türbini (D-VAWT), küçük VAWT'lerin aerodinamik verimliliğini artırmak için önerilen yenilikçi bir türbindir. D-VAWT'nin iki eksenli vardır, bu da kanatların oval şekilli bir yolda hareket etmesini sağlar ve böylece tipik VAWT'lerin maksimum güç üretim bölgesini genişletir. Ayrıca, CFD simülasyonlarına dayanarak, D-VAWT'nin VAWT'lere kıyasla uç hız oranının değişimine karşı nispeten düşük bir duyarlılığa sahip olduğunu bulmuşlardır.

75 Önceki çalışmalar, 5 MW'lık genel bir rüzgâr türbininin düşük frekanslı emisyonlarını sayısal olarak araştırmış ve tekdüze akış koşulları altında bir kulenin ve sabit kanat deformasyonunun etkisini değerlendirmiştir. Klein ve arkadaşları (2018) CFD çözücüsü FLOWer'ı çok gövdeli simülasyon (MBS) çözücüsü SIMPACK ile birleştirmiş ve bunu bir rüzgar çiftliğinin gürültü emisyonlarını en aza indirmek için tek tek rüzgar türbinlerinin çalışma modlarını değiştirerek uygulamışlardır. Nyborg ve diğerleri (2023), aşağıdaki gibi daha yüksek doğruluklu bir ses yayılım modeli kullanmanın

80 WindSTAR, basit ISO 9613-2 modeline kıyasla, rüzgar çiftliklerinin gürültü kısıtlı optimizasyonunda önemli bir iyileşme sağlamıştır. Abreu ve diğerleri (2022), bir rüzgar türbini ile sismik istasyon arasındaki dalga yolu üzerindeki zemin yapısının rüzgar türbininin gürültü emisyonlarını azaltmak veya hafifletmek için değiştirilip değiştirilemeyeceğini incelemek için gelişmiş 3D sayısal teknikler kullanmıştır. Hendekleri suyla doldurmanın ve topografyada nispeten basit değişikliklerin gürültü emisyonlarını azaltmaya yardımcı olduğunu göstermişlerdir. Chen ve diğerleri (2021) iki rüzgar türbini tasarlamıştır.

85 tip deflektör kullanarak üç kanatlı bir VAWT'nin performansını artırmış ve optimize edilmiş üst deflektörün performansı %20, optimize edilmiş alt deflektörün ise performansı %17 artırdığını tespit etmiştir.

Bu çalışmanın amacı, 5 kW'lık bir VAWT'nin gürültü emisyonlarını ve farklı gürültü azaltma tekniklerinin sadece gürültü emisyonları üzerindeki etkilerini değil, aynı zamanda aerodinamik tork ve

90 akustik güç. Farklı kararlı durum türbülans modellerinin ve ağ boyutunun sonuçlar üzerindeki etkileri değerlendirilmiş ve optimum ağ boyutu ve modeli daha sonra üç farklı gürültü azaltma tekniğini analiz etmek için uygulanmıştır. Genel olarak, çok az sayıda çalışma gürültü emisyonlarını simüle etmek için Darrieus VAWT kullanmıştır, ancak gürültü



Küçük ölçekli rüzgar türbinlerinin azaltım teknikleri çok sınırlıdır. Bu çalışma, kentsel ortamda küçük ölçekli rüzgar türbinlerinin yaygınlaşmasına katkıda bulunabilir.

## 95 2. Yöntemler

### 2.1 Sayısal yöntem

Küçük VAWT'ler için kanat tasarımında hem üretilen güç hem de yayılan gürültü dikkate alınmalıdır. CFD kodu, ANSYS FLUENT, ticari olarak mevcuttur ve rüzgar türbini kanatlarının aerodinamik performansını simüle etmek ve aeroakustik analiz yapmak için kullanılan endüstriyel lider bir yazılımdır. (Yao vd., 2012, Zaareer vd., 2023) Bu çalışmada, gürültü emisyonlarının nedenlerini analiz etmek amacıyla türbülans ve akustik modelleri simüle etmek için ANSYS FLUENT kullanılmıştır. Yönetici denklemler aşağıdaki gibidir. Akış hızı ses hızından çok daha azdı, bu nedenle aerodinamik akış alanı sıkıştırılamaz olarak kabul edilebilir. Buna ek olarak, sürtünmeli ısıtma tek olası ısı kaynağıdır ve son derece küçüktür, bu nedenle termal genişleme ve büzülmenin akışkanın yoğunluğu üzerindeki etkisi ihmal edilebilir. Bu nedenle, süreklilik denklemi şu şekilde yazılabilir

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + k \cdot (\rho v) = 0 \quad (1)$$

Burada  $\rho$  yoğunluk ve  $v$  hızdır. Momentum denklemi şu şekilde yazılır

$$\frac{\partial (\rho u u)}{\partial x_i} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \rho g_i \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = (\mu + \mu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3)$$

Burada  $P$  statik basınç,  $\tau_{ij}$  gerilme tensörü,  $\mu$  viskozite,  $\mu_t$  türbülanslı viskozite,  $\rho g_i$  cisim kuvveti,  $x_i$  koordinatı,  $x_j$  y-koordinatı,  $u_i$  x-bileşenli hız ve  $u_j$  y-bileşenli hızdır.

### 2.2 Türbülans modelleri

İlgili araştırmaların gözden geçirilmesine dayanarak, gerçekleştirilebilir  $k-\epsilon$  modeli ve SST  $k-\omega$  modeli türbülans modelleri olarak seçilmiştir. Bu modeller orijinal iki denklemlilik versiyonlarını değiştirerek girdaplar, uyanık akışlar ve akış ayrılması gibi olguları ele almaktadır. Bu modeller, rüzgar alanından geçen bir kanat tarafından üretilen türbülansı güvenilir ve ekonomik bir şekilde simüle etmek için kullanılabilir. Gerçekleştirilebilir  $k-\epsilon$  modelinin, ayrılmış ve devridaim yapan akışların dağılıma oranı dağılımını ve sınır tabaka özelliklerini tahmin etmede standart  $k-\epsilon$  modelinden daha doğru olduğu düşünülmektedir. Türbülans kinetiği şu şekilde ifade edilir

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

Yayıma oranı şu şekilde ifade edilir

$$\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \epsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\epsilon} S \epsilon - \rho C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{3\epsilon} \frac{\epsilon}{\epsilon_b} G + S_\epsilon \quad (5)$$

SST  $k-\omega$  modeli duvara yakın ve uzak alanlarda iyi çalışır ve düşük ve yüksek Reynolds sayılarında kullanılabilir.  $K-\epsilon$  modeline göre daha doğrusal değildir ve yakınsamada daha fazla zorluk yaşar. Model çoğu Reynolds ortalama Navier-Stokes (RANS) modelinden daha iyi bir akış ayrımı tahmini sağlar, bu da olumsuz basınç gradyanları ile iyi performansını açıklar ve aerodinamikte sıklıkla uygulanmasının nedenidir. Türbülans kinetiği şu şekilde ifade edilir (Menter, 1994)

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \Gamma \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k \quad (6)$$



Spesifik dağılım oranı şu şekilde ifade edilir

$$130 \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho\omega u) = \frac{\partial}{\partial \theta} \left[ \Gamma \frac{\partial \omega}{\partial \theta} \right] + G \frac{Y}{\omega} + D \frac{S}{\omega} \quad (7)$$

### 2.3 Aero-akustik formülasyon

Proudman (1952), Lighthill'in akustik teorisini ilk kez tam akış alanlarına uygulayarak  
135 Düşük Mach sayıları ( $M_t$ ) ve yüksek Reynolds sayıları ile izotropik türbülansın kaynaklanan gürültü.  
Bununla birlikte, türbülanslı akış tarafından üretilen gürültü kaynağı şu şekilde tanımlanabilir:  
(Lilley, 1994)

$$p_A = \alpha \rho_0 \varepsilon M_t^5 \quad (8)$$

Burada  $p_A$ ,  $\alpha$  ve  $\rho_0$  sırasıyla akustik gücü, uzak alan yoğunluğunu ve ampirik bir sabiti ( $=0.1$ ) temsil eder.  
Türbülanslı  $M_t$  şu şekilde ifade edilebilir:

$$140 \quad M_t = \frac{\sqrt{2k}}{a_0} \quad (9)$$

Burada  $a_0$  ses hızı ve  $k$  türbülans kinetik enerjisidir. Bu ses kaynağı modelinin izotropik türbülanslı  
varsaydığı ve sadece türbülans bozukluklarının enerjisini dikkate aldığı unutulmamalıdır. Buna rağmen  
frekans spektrumu üzerinde ses kaynakları sağlayamaz, gürültünün büyüklüğünü ve sonraki gürültü azaltma  
sonuçlarını değerlendirmek yeterlidir. Öte yandan, oluşan türbülanslı sınır tabaka

145 Bir nesnenin hareketinden kaynaklanan bozulmalar nedeniyle nesne yüzeyinde gürültü kaynakları da  
üretecektir. Büyüklük şu şekilde tanımlanabilir: (Curle, 1955)

$$p_A = \int_S I dS \quad (10)$$

Burada  $p_A$ ,  $I$  ve  $S$  sırasıyla akustik güç, ses yoğunluğu ve hareketli nesne üzerindeki kontrol yüzeyidir.  $I$  şu  
şekilde ifade edilebilir:

$$150 \quad I = \frac{A}{12\rho_0\pi a_0^3} \left( \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \right) \quad (11)$$

Burada  $A_c$  korelasyon alanıdır. Genel olarak, kanat yüzeyinden kaynaklanan gürültü ana gürültü  
kaynağıdır, türbülansın kaynaklanan gürültü ise nispeten küçüktür. Bu nedenle, bu çalışma esas olarak  
kanat tarafından üretilen gürültüye odaklanmaktadır.

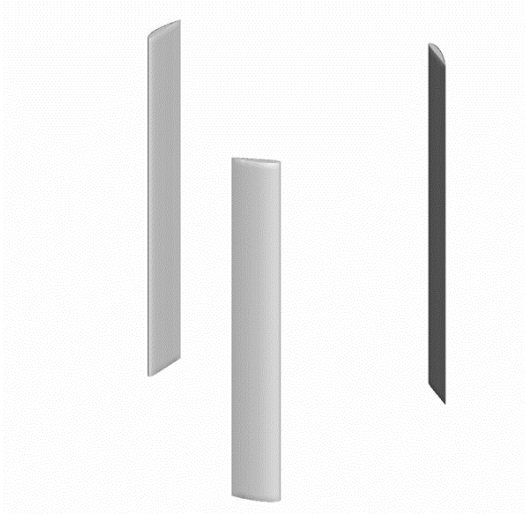
155

### 2.4 CFD modeli

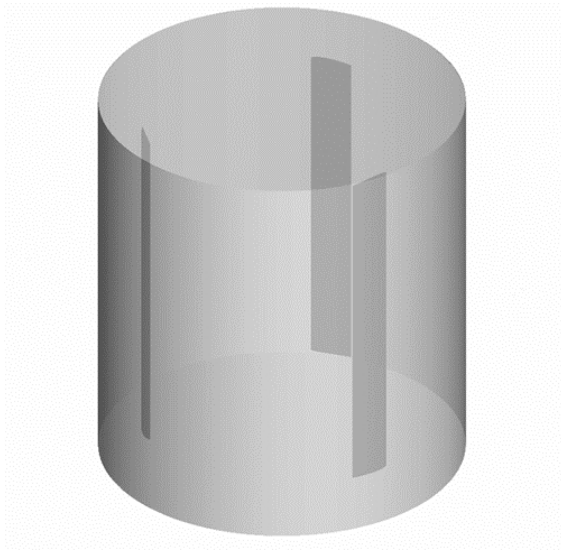
Bu çalışmada ele alınan Darrieus H-VAWT, Şekil 1(a)'da gösterildiği gibi, her biri S4415 kanat şekline,  
0,7 m akor uzunluğuna, 5,5 m yüksekliğe ve 2,235 m dönüş yarıçapına sahip üç kanada sahiptir. CFD  
160 modeli için tüm kanatlar hesaplama alanına dahil edilmiş ve kanat yüzeyleri sınır koşulu için sabit duvarlar  
olarak ayarlanmıştır. Bir VAWT'nin dönüşünü simüle etmek için, hesaplama alanı dönen bir bölgeye ve dış  
akış bölgesine bölünmüştür. Şekil 1(b)'de gösterildiği gibi, dönen bölge, 3 m yarıçap ve 6,5 m yüksekliğe  
sahip dikey bir silindir şeklinde 60 rpm frekansta dönen dinamik bir ağıd ve üç kanadı içeriyordu. Dönen  
bölge ile dış akış bölgesi arasındaki arayüz, aralarındaki hız ve basıncın sürekliliğini sağlamak için  
arayüze ayarlanmıştır. Dış akış bölgesinin geometrik şekli, kanatlardan neredeyse hiç etkilenmediği için  
165 sonuçlar üzerinde çok az etkiye sahip olmalıdır. Şekil 1(c) dış akış bölgesini göstermektedir; ağ oluşturma  
sürecini basitleştirmek için, 40 m uzunluğunda ve 5 m yarıçapında yatay bir silindir olarak ayarlanmıştır,  
burada üst yüzey hız girişi olarak a

standart rüzgar hızı 12 m/s, alt yüzey 0 Pa basınç ile basınç çıkışı olarak ayarlanmış ve yan yüzeyler simetrik sınır koşuluna ayarlanmıştır.

170

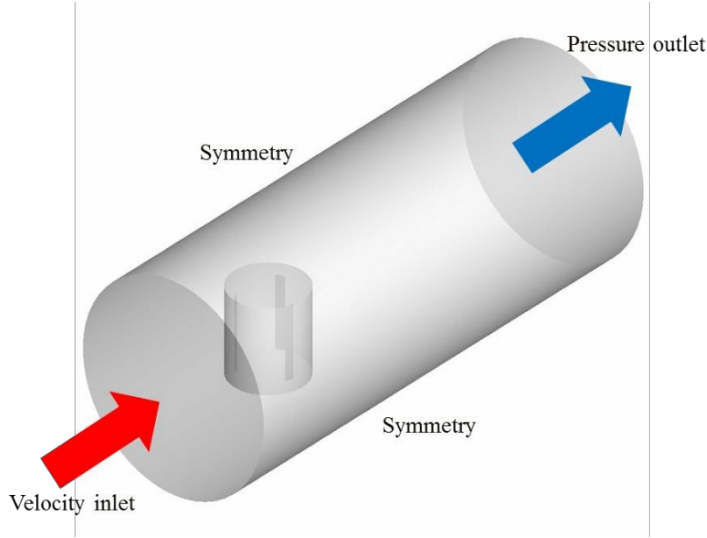


(a)



(b)





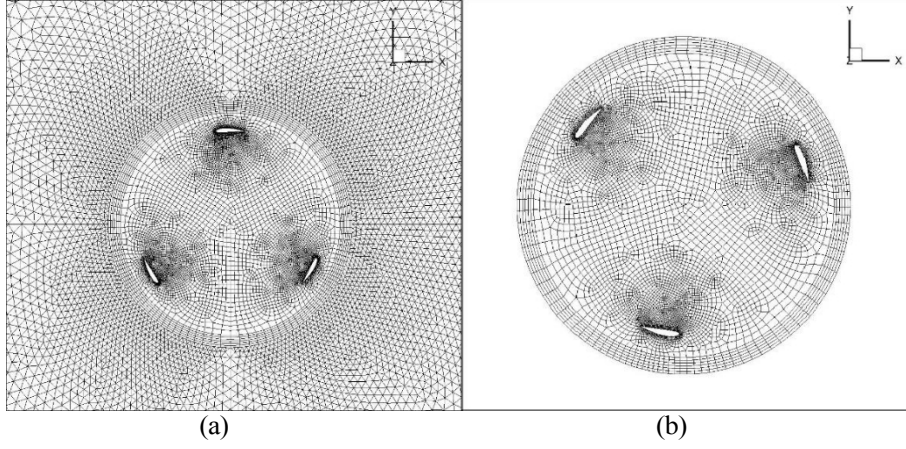
(c)

Şekil 1: CFD modeli: (a) kanat geometrisi, (b) dönen bölge ve (c) dış akış bölgesi.

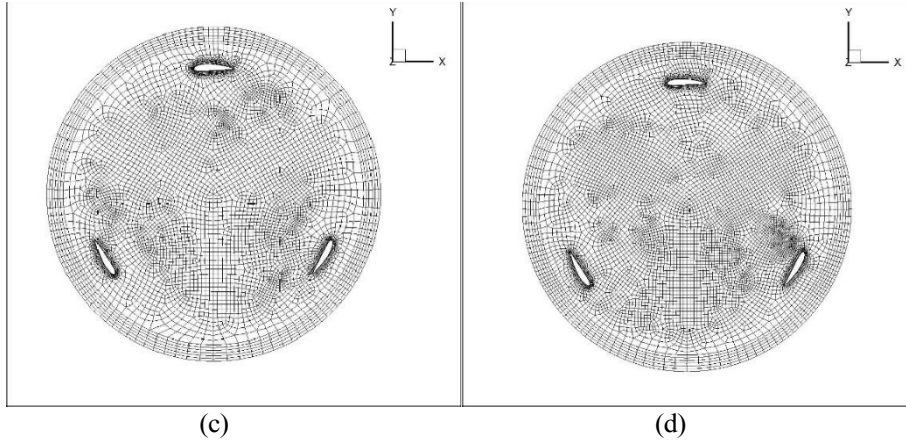
## 2.5 Ağ bölümü

180 Momentum denkleminin rüzgar türbini torku üzerinde önemli bir etkisi vardır. Bu nedenle, hem basınç  
hem de hız ikinci dereceden yukarı rüzgar şeması kullanılarak ayrıklaştırılmış ve basınç ve hızı birleştirmek  
için SIMPLE algoritması kullanılmıştır. Türbülanslı kinetik enerji ve dağılım birinci dereceden yukarı  
rüzgar şeması kullanılarak ayrıklaştırılmıştır. Zaman, 0,01 sn'lik bir zaman adımıyla birinci dereceden  
örtük diferansiyel denklem kullanılarak ayrıklaştırılmıştır. Akış alanı sınır tabakanın içinde ve dışında  
185 farklı karakteristik uzunluklara sahip olduğu için uzamsal ayrıklaştırma daha karmaşıktır. Bu nedenle,  
tüm alan, hepsi farklı ağ boyutlarına sahip üç bölgeye ayrılmıştır: duvara yakın bölge, dönen bölge ve dış  
akış bölgesi. Duvara yakın bölge, kanat yüzeyindeki ilk ağ tabakasıydı ve duvar yüzeyindeki hız  
gradyanının ve kayma gerilmesinin simülasyonunu kolaylaştırmak için ağın çok yoğun olması  
gerekliyordu. Dönen bölge, hava akışı kanadın etrafından geçtikten sonra oluşan girdap ve dümeni  
190 yakalamak için de yoğun bir ağ gerektiriyordu. Dış akış bölgesi kanatlardan etkilenmediği gibi kanatları da  
etkilememiştir. Bu nedenle, burada daha kaba ve yapılandırılmamış bir dört yüzlü ağ kullanılabilirdi. Şekil  
2'de gösterildiği gibi, simülasyon sonuçları üzerindeki etkiyi değerlendirmek için duvara yakın ve dönen  
bölgelerdeki ağ boyutları değiştirilmiştir. Ağ tipi değiştirilmemiştir. Dış akış bölgesinde yapılandırılmamış  
bir ağ kullanılmış (Şekil 2(a)) ve daha karmaşık dönen bölgede daha yüksek kaliteli yapılandırılmış bir ağ  
195 kullanılmıştır (Şekil 2(a)-(d)). Tablo 1, yakın duvar ve dönen bölgelerdeki dört ağ boyutunun karakteristik  
uzunluklarını göstermektedir. ASME standardına göre (ASME V&V 20-2009), farklı ağ boyutlarının  
önemini değerlendirmek için ağın karakteristik uzunluğu yaklaşık 1,3 kat değiştirilmelidir.





205



Şekil 2: (a) Mesh 1, (b) Mesh 2, (c) Mesh 3 ve (d) Mesh 4'ün bölümleri.

210 Tablo 1. Her bölgedeki farklı ağların karakteristik uzunlukları.

	Duvara yakın bölge (m)	Dönen bölge (m)	Dış akış bölgesi (m)
Ağ 1	0.01	0.1	1
Mesh 2	0.003	0.1	1
Mesh 3	0.003	0.08	1
Mesh 4	0.003	0.06	1

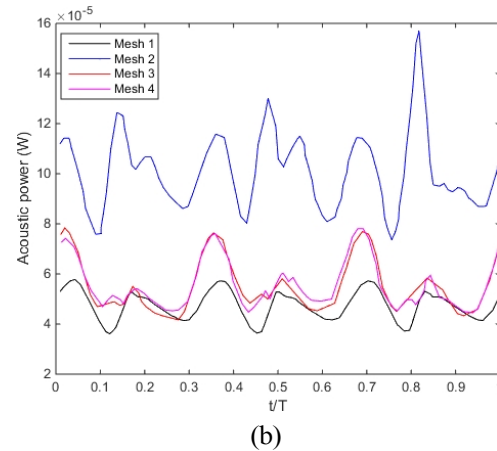
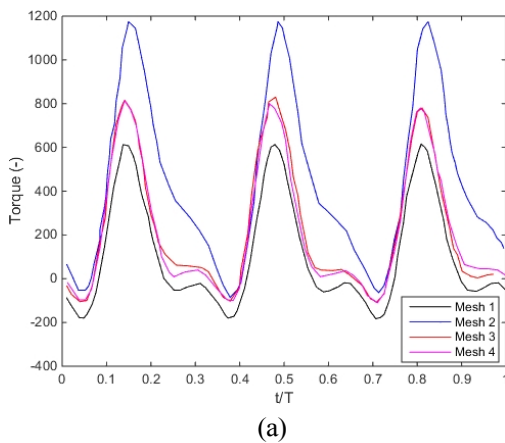


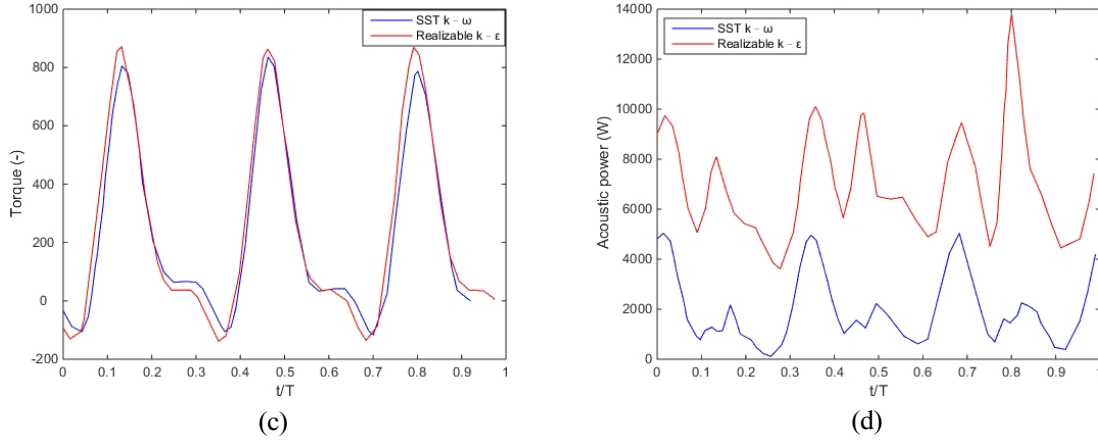
### 3. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada standart rüzgar hızı 12 m/s ve dönüş hızı 60 rpm olan küçük bir VAWT'nin tork ve akustik güç dağılımlarını simüle etmek için CFD kullanılmıştır. Ağ ve türbülans modellerinin etkileri analiz edilmiş ve en iyi kombinasyon akış alanını analiz etmek ve tork azalması ve artan gürültü için mekanizmaları belirlemek için uygulanmıştır. Son olarak, yaygın olarak kullanılan üç gürültü azaltma tekniği etkinlikleri açısından değerlendirilmiştir.

#### 3.1 Ağ ve türbülans modellerinin etkileri

Şekil 3(a) ağ bağımsızlık testinin sonuçlarını göstermektedir. T, bir dönüş için geçen süredir. Tahmin edilen tork, %50'nin üzerinde farklılıklara neden olabilecek ağ boyutuna oldukça duyarlıydı. Neyse ki, farklı bölgelerdeki ağ boyutunu ayarlayarak ağ bağımsızlığı hala elde edilebilir ve Ağ 3 ve Ağ 4 ile ağ bağımsızlığı elde edilmiştir. Şekil 3(b)'de gösterildiği gibi, kanat üzerinde tahmin edilen akustik güç için de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Mesh 3 ve Mesh 4 neredeyse aynı tahminlerle sonuçlandı, bu nedenle Mesh 3 daha küçük bir ızgara sayısına sahip olduğu ve dolayısıyla hesaplama açısından daha az yoğun olduğu için sonraki analiz için seçildi. Şekil 3(c), gerçekleştirilebilir  $k-\epsilon$  ve SST  $k-\omega$  türbülans modelleri tarafından tahmin edilen torkun çok benzer olduğunu göstermektedir. Her iki model de bir döngüde üç tepe ve vadi elde etmiştir ve ilgili zaman noktaları, gerçekleştirilebilir  $k-\epsilon$  türbülans modeli tarafından tahmin edilen maksimum değer in SST  $k-\omega$  türbülans modeli tarafından tahmin edilenden %11 daha yüksek olması dışında neredeyse aynıdır. Buna ek olarak, gerçekleştirilebilir  $k-\epsilon$  türbülans modeli, SST  $k-\omega$  türbülans modeli tarafından tahmin edilen 207,2 değerinden biraz daha yüksek olan 227,7'lik bir zaman ortalamalı tork öngörmüştür. Bununla birlikte, Şekil 3(d)'de gösterildiği gibi, iki türbülans modeli tahmin edilen akustik güçte önemli farklılıklar göstermiştir. Gerçekleştirilebilir  $k-\epsilon$  türbülans modeli tarafından tahmin edilen zaman ortalamalı enerji, SST  $k-\omega$  türbülans modeli tarafından tahmin edilenden %57 daha yüksekti. Bununla birlikte, akustik açıdan bakıldığında, iki tahmin arasındaki fark yaklaşık 1,9 dB'dir ve bu hala kabul edilebilir düzeydedir. Önceki çalışmalar, SST  $k-\omega$  türbülans modelinin  $y^+$  için daha yüksek bir toleransa sahip olduğunu ve farklı gürültü azaltma tekniklerinin geometrisi için daha uygun olduğunu göstermiştir. (Menter, 1994; Menter, 2012) Bu nedenle, bu çalışmada sonraki analizler için SST  $k-\omega$  türbülans modeli seçilmiştir.





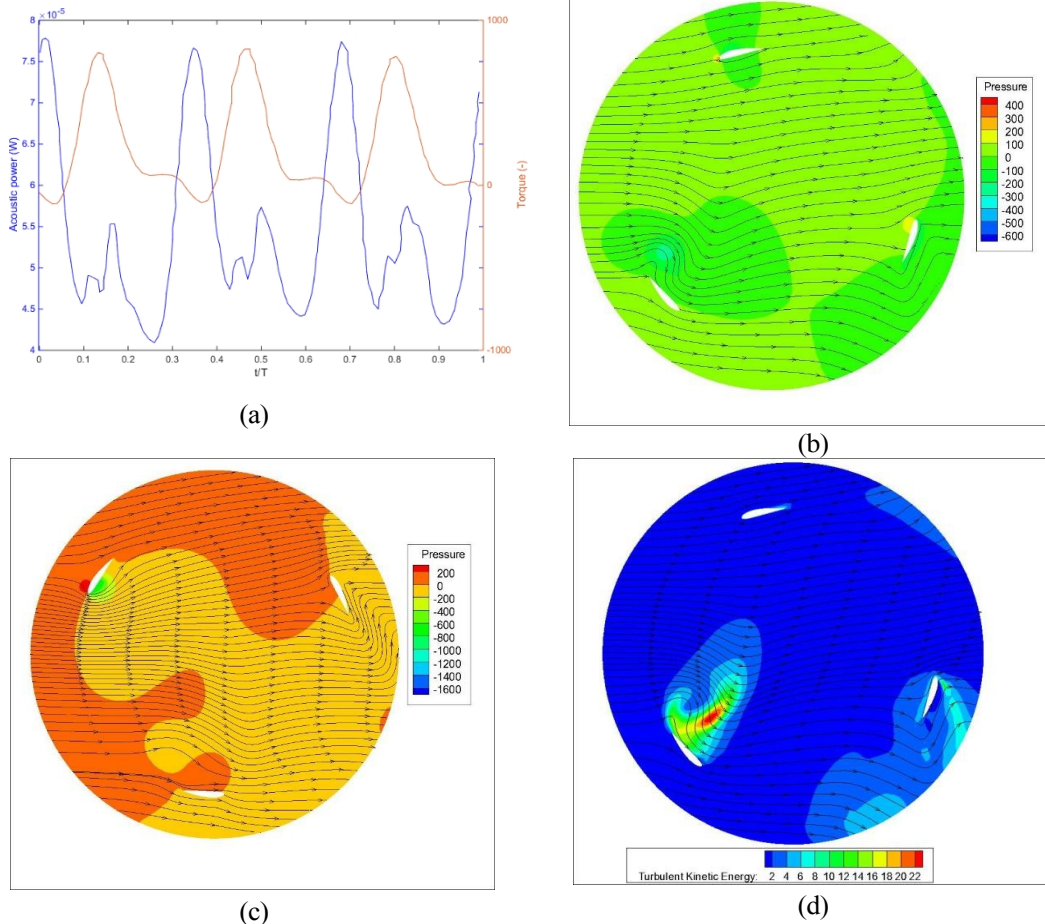
**Şekil 3: Ağın tahmin edilen (a) tork ve (b) akustik güç üzerindeki etkileri. Türbülans modelinin tahmin edilen (c) tork ve (d) akustik güç üzerindeki etkileri.**

245

### 3.2 Gürültü azaltma olmadan simülasyon

Şekil 4(a) gürültü azaltma olmadan bir döngü için öngörülen tork ve gürültüyü göstermektedir. Kanat yüzeyindeki zaman ortalamalı tork ve gürültü kaynakları sırasıyla 207,2 ve  $5,8 \times 10^{-5}$  W idi. Bu değerler gürültü azaltma tekniklerini değerlendirmek için ölçüt olarak kullanılmıştır. Maksimum gürültü minimum torkla çakışırken, maksimum tork gürültüyü minimum torktan çok daha az oranda artırmıştır. Bu olgu, akış alanının özelliklerini daha iyi anlamak için türbülanslı kinetik enerji dağılımı ile birlikte kesit üzerindeki basınç ve akım çizgisi dağılımları ile daha fazla analiz edilmiştir. Şekil 4(b) ve (c) sırasıyla  $t/T = 0.70$  ve  $0.82$ 'deki basınç dağılımlarını ve akım çizgilerini göstermektedir. Rüzgar soldan sağa doğru akmış ve kanat saat yönünün tersine dönmüştür.  $t/T = 0.70$ 'te üç kanadın hücum açıları  $-132^\circ$ ,  $-12^\circ$  ve  $108^\circ$ 'dir. Hava  $-132^\circ$  hücum açısına sahip kanadın üzerinden geçtiğinde, iç kenarın arkasında bir girdap oluşmuş ve bu da kanadın dönmelerini zorlaştıran bir düşük basınç bölgesine neden olmuştur. Benzer şekilde, hava kanatların üzerinden  $-12^\circ$  ve  $108^\circ$  hücum açılarıyla geçtiğinde, ön tarafta kanatların dönmelerini zorlaştıran yüksek basınç bölgeleri oluşmuştur. Bu da negatif torka neden olmuştur, yani dönme hızını korumak için harici bir kuvvete ihtiyaç duyulmuştur. Üç kanadın simetrisi nedeniyle, bu olay  $t/T = 0,04$  ve  $0,37$ 'de de meydana gelmiştir.  $t/T = 0.82$ 'de kanatların hücum açıları  $-55.2^\circ$ ,  $-175^\circ$  ve  $64.8^\circ$  olmuştur. Hücum açısı  $-55.2^\circ$  olan kanat için, hava akışı dış tarafta nispeten yüksek bir basınç ve iç ön kenarda büyük bir düşük basınç bölgesi oluşturarak kanadın pozitif bir tork üretmesini sağlamıştır.  $175^\circ$  ve  $64.8^\circ$  hücum açılarına sahip kanatlar için önemli bir basınç farkı gözlenmemiştir. Türbülansın neden olduğu gürültü kaynağı, türbülanslı kinetik enerjinin beşinci kuvvetiyle orantılıydı. Bu nedenle, türbülanslı kinetik enerji dağılımı, Şekil 4(d)'de gösterildiği gibi akış alanının neden olduğu gürültüyü daha fazla analiz etmek için kullanılabilir.  $t/T = 0,70$ 'de,  $-132^\circ$  hücum açısına sahip kanadın iç kenarında oluşan girdap sadece rüzgar türbininin torkunu azaltmakla kalmamış, aynı zamanda en büyük gürültü kaynağını üreten büyük miktarda türbülanslı kinetik enerji de üretmiştir. Tork ve gürültünün zıt dağılımları, VAWT'nin aynı anda hem torku artıracak hem de gürültüyü azaltacak şekilde tasarlanabileceğini göstermektedir.

270



Şekil 4: Gürültü azaltma olmadan simülasyon sonuçları: (a) (b)  $t/T = 0.70$  ve (c)  $t/T = 0.82$ 'de akustik güç ve tork, basınç dağılımları ve akış çizgileri arasındaki karşılaştırma ve (d) türbülanslı  $t/T = 0.7$ 'de kinetik enerji dağılımı.

### 3.3 Gürültü azaltma ile simülasyon

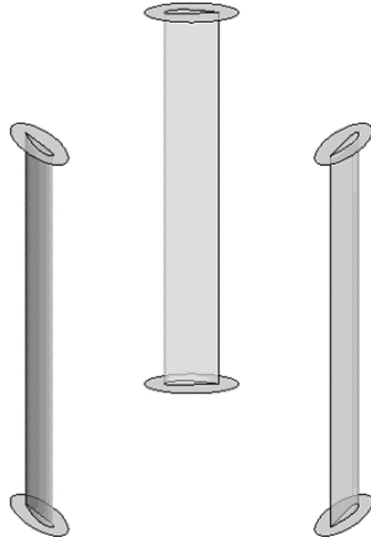
Yaygın olarak kullanılan üç gürültü azaltma tekniği dikkate alınmıştır: maske, deflektör ve duvar pürüzlülüğü. Mesh 3 ve SST  $k-\omega$  türbülans modeli, gürültü azaltma olmadan simülasyon için aynı rüzgar hızı ve dönüş hızı koşulları altında kullanılmıştır. Simüle edilen tork ve kanat akustik gücü, her bir gürültü azaltma tekniğinin etkinliğini değerlendirmek için referans değerlerle karşılaştırılmıştır.

#### 3.3.1 Maske

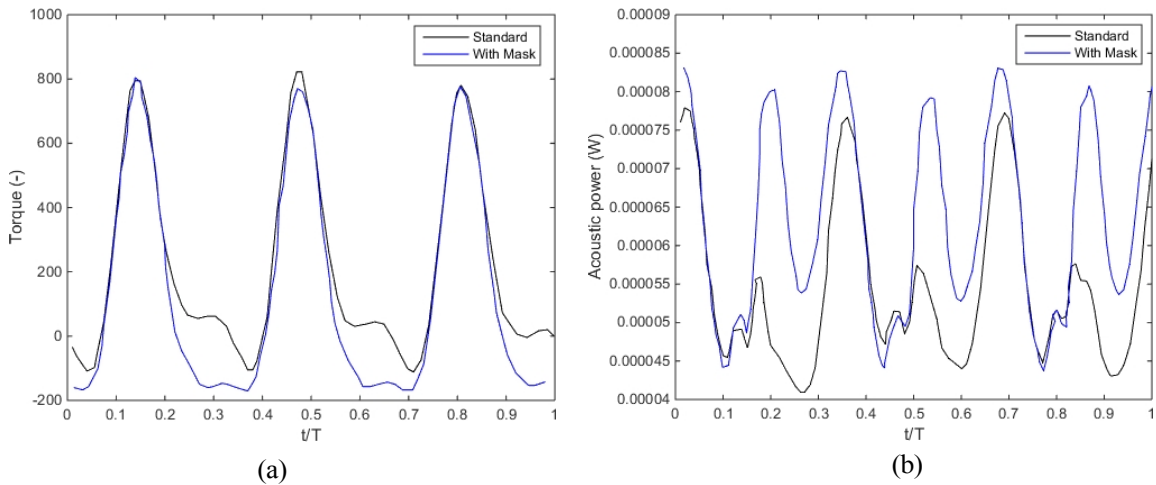
Kanat yüzeyinin üst ve alt uçlarına bir maske takılması, güçlü ayrılma veya girdaplara neden olan keskin açılarını önler. Bu çalışmada, Şekil 5'te gösterildiği gibi kanatların üst ve alt uçlarına uzun eksenli 1,2 m ve kısa eksenli 0,5 m olan bir maske takılmıştır. Şekil 6(a), maskenin takılmasının ortalama torku %40 ila 124 oranında azalttığını göstermektedir. Ancak, Şekil 6(b) maskenin gürültüde buna karşılık gelen bir azalmaya yol açmadığını göstermektedir. Kurulumdan sonra ortalama akustik güç  $6,34 \times 10^{-5}$  W olmuştur.



16'lık bir artıştır. Bölüm 3.2'de tartışıldığı gibi 3.2'de tartışıldığı gibi, gürültü kaynağı kanat rüzgar alanını  
kestikten sonra kanadın içinde oluşan girdaptır. Bu nedenle, her iki uca da bir maske eklemek sadece  
gürültüyü azaltmakla kalmamış, aynı zamanda hava ile sürtünme alanını da artırarak gürültüyü ve direnci  
artırmıştır.



**Şekil 5: Maskenin geometrik tasarımı.**



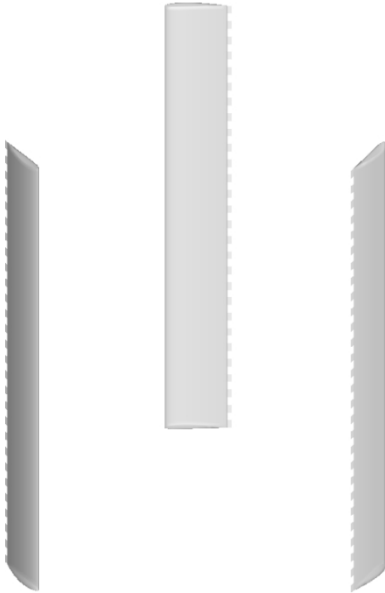
**Şekil 6: Maskenin (a) tork ve (b) akustik güç üzerindeki etkileri.**

### 3.3.2 Deflektör

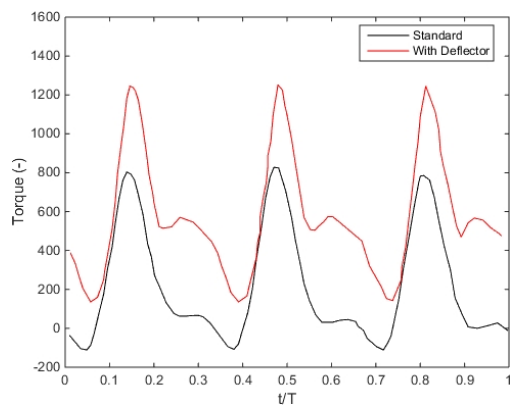
Şekil 7, 0,1 m uzunluğunda, 0,2 m genişliğinde ve 0,2 m aralıklı dikdörtgen bir bölme olan  
deflektörü göstermektedir. Şekil 8(a) ve (b), deflektörün takılmasının sırasıyla tork ve kanat gürültüsü  
üzerindeki etkilerini göstermektedir. Deflektörün takılması ortalama torku %169 artırarak 564'e çıkarmış  
ve kanat gürültüsünü %98 azaltarak  $7,86 \times 10^{-7}$  W'a düşürmüştür. Şekil 8(c), tork minimumdayken (yani  
 $t/T = 0,7$ ) deflektör takıldıktan sonraki akım çizgilerini ve basınç dağılımını göstermektedir. Basınç ile  
karşılaştırıldığında

dağılımı (Şekil 4(b)), kanat iç kenarındaki girdap, kanat hücum açısı  
-132° kanat yüzeyinden daha uzağa ayrılmış, bu da kanat yüzeyinde daha az önemli bir etkiye neden olmuş  
ve torku artırmıştır. Şekil 8(d) bu andaki türbülans kinetik enerji dağılımını göstermektedir ve girdabın  
305 kanattan ayrıldığını açıkça göstermektedir. Bunun aksine, saptırıcı olmadan türbülans dağılımı (Şekil 4(c))  
girdabın kanadın iç kısmına sıkıca yapıştığını ve kanat yüzeyini etkilemeye devam ettiğini  
göstermektedir. Bununla birlikte, deflektörün takılması dönme alanı boyunca daha fazla türbülanslı kinetik  
enerji üretmiş, bu da türbülans gürültüsünü artırmış ve bu nedenle değerlendirilmesi gerekmiştir. Şekil 8(e),  
310 dönen bölgedeki türbülansın neden olduğu gürültü enerjisini göstermektedir. Deflektörün takılması  
ortalama türbülanslı gürültü kinetik enerjisini yaklaşık 10,6 kat artırarak  $2,95 \times 10^{-6}$  değerine  
yükseltmiştir. Deflektörün takılmasından sonra, ana gürültü üreten mekanizma sınır tabaka  
bozukluğundan türbülans kaynaklı gürültüye dönüşmüştür. Bununla birlikte, deflektör kurulumundan sonra  
türbülans tarafından üretilen gürültü, kurulumdan önceki kanat gürültüsünden hala bir büyüklük sırası daha  
azdı. Bu, bir deflektör takmanın gürültüyü azaltmada etkili olacağını göstermektedir.

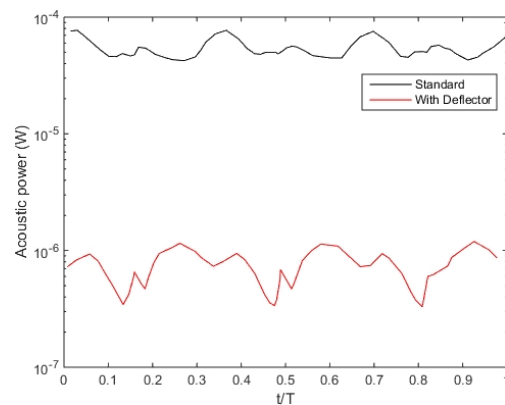
315



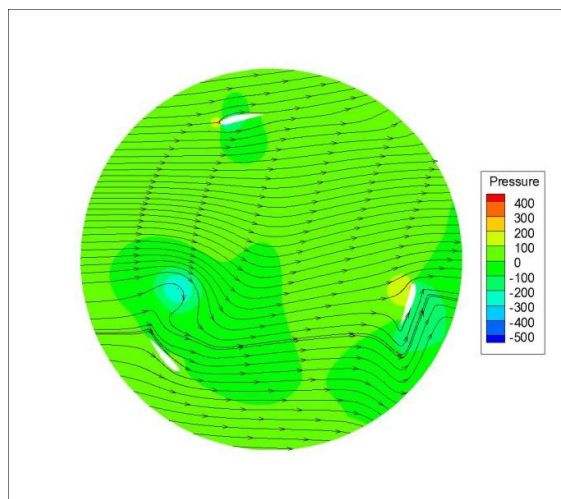
**Şekil 7: Deflektörün geometrik tasarımı.**



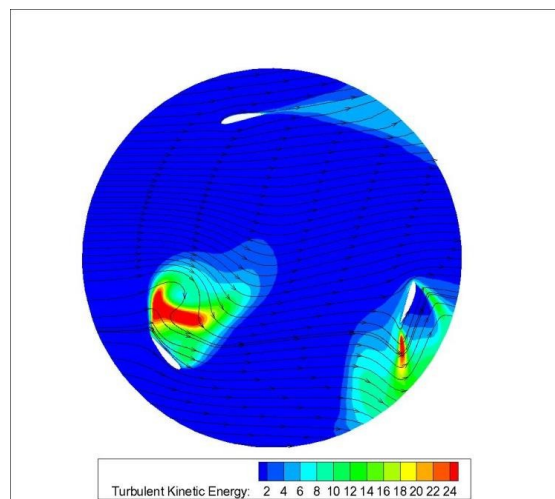
(a)



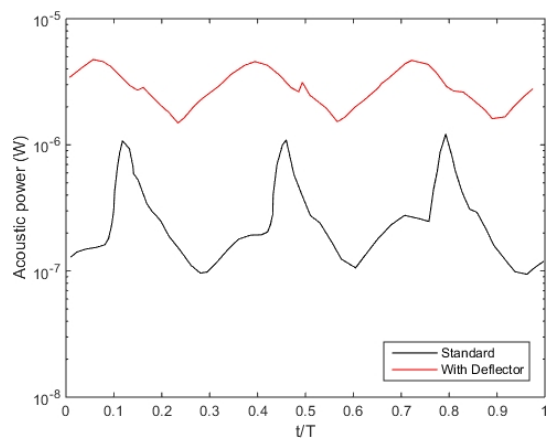
(b)



(c)



(d)



(e)

320





**Şekil 8: Saptırıcının (a) tork, (b) kanat yüzeyi gürültüsü, (c)  $t/T = 0,7$ 'de basınç dağılımı ve akım çizgileri, (d)  $t/T = 0,7$ 'de türbülanslı kinetik enerji dağılımı ve (e) türbülanslı akış gürültüsü üzerindeki etkileri.**

325

### 3.3.3 Duvar pürüzlülüğü

Gürültünün azaltılmasını sağlamak için kanat yüzeyi golf topuna benzer şekilde pürüzlendirilebilir. Bu, sınır tabaka ayrılmasını bastırır ve girdap ölçeğini azaltır, bu da gürültü emisyonlarını azaltır. Bu çalışmada, pürüzlü kanat yüzeyi için sınır koşulları, duvar fonksiyonu şu şekilde değiştirilerek tanımlanmıştır

330 pürüzlü yüzeylerde daha büyük duvar kayma gerilimini hesaba katar:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \log y^+ \Delta B \quad (12)$$

Burada  $\kappa$  ve  $\Delta B$  Von Karman sabiti ve pürüzlülük fonksiyonudur. Farklı pürüzlülüklerde,  $\Delta B$  olarak ifade edilebilir

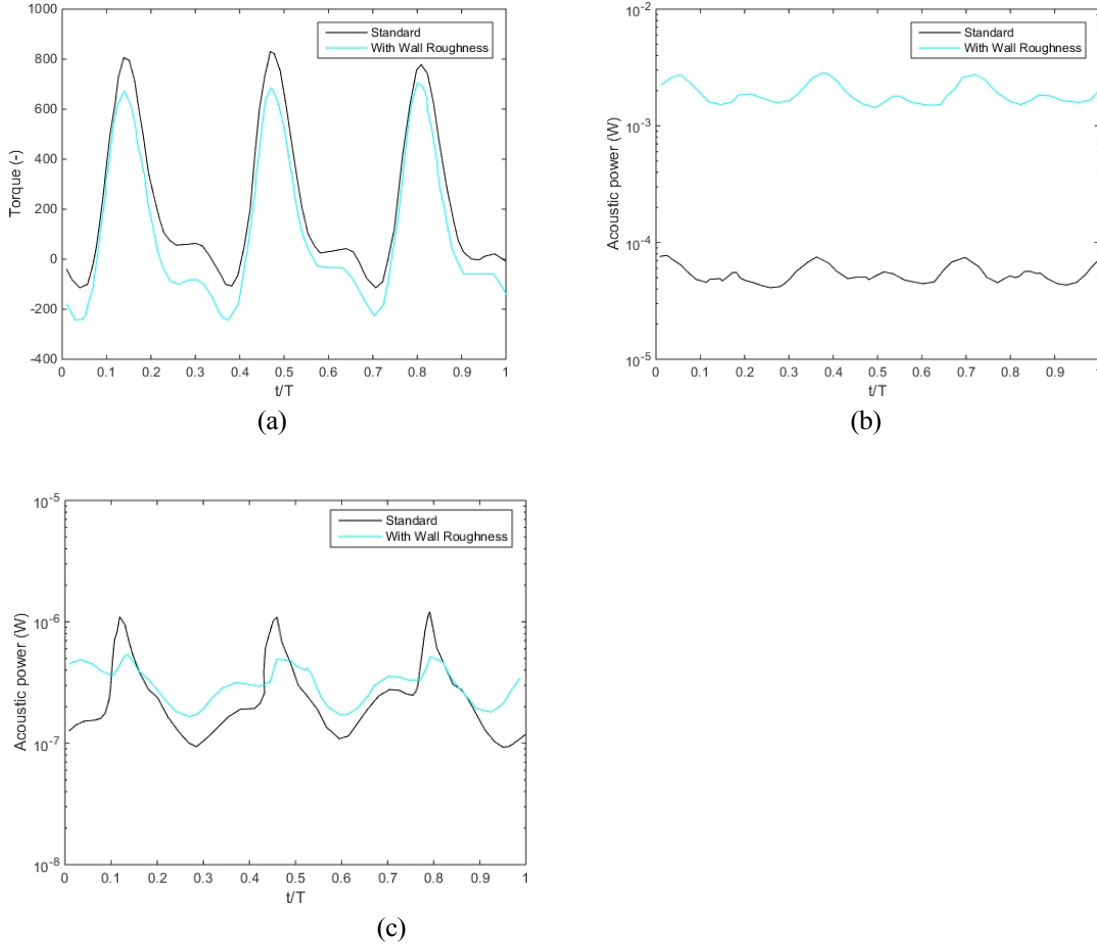
$$\Delta B = \begin{cases} \frac{1}{\kappa} \left( \ln \left( \frac{K^+}{2,25} + C_s K_s \right) \right) & K \text{ için }^+ \leq 2,25 \\ \frac{1}{\kappa} \left( \ln \left( \frac{K^+}{2,25} + C_s K_s \right) \right) \sin \left[ 0,4258 \left( \ln \left( \frac{K^+}{2,25} + C_s K_s \right) - 0,811 \right) \right] & 2,25 \leq K_s \text{ için }^+ \leq 90 \\ \frac{1}{\kappa} \ln \left( 1 + C_s K_s \right) & K \text{ için }^+ > 90 \end{cases} \quad (13)$$

335 Burada  $K^+$  boyutsal olmayan pürüzlülüktür

$$K_s^+ = \frac{\rho K u^*}{\mu} \quad (14)$$

Eşitlik (14)'te pürüzlülük yüksekliğinin 0,01 m olduğu varsayılmıştır. Şekil 9(a) ve (b) sırasıyla pürüzlü yüzeyin tork ve kanat gürültüsü üzerindeki etkilerini göstermektedir. Pürüzlülüğün artırılması torku 209'dan 100'e yaklaşık %50 oranında azaltmıştır. Bununla birlikte, kanat yüzeyindeki gürültü  $5,45 \times 10^5$  'dan 1,9'a önemli ölçüde artmıştır.

340  $\times 10^{-3}$  W. Şekil 9(c) türbülanslı akışın maksimum akustik gücünün hafifçe azaldığını göstermektedir. Bu sonuçlar, pürüzlülüğün artırılmasının sınır katmanını ve girdabı azalttığını, ancak ana gürültü kaynağının türbülans ve girdabın salınımından ziyade kanat yüzeyi ile hava arasındaki salınımlı etkileşim haline geldiğini göstermektedir.



Şekil 9: Duvar pürüzlülüğünün (a) tork, (b) kanat yüzeyi gürültüsü ve (c) türbülanslı akış gürültüsü üzerindeki etkileri.

#### 4. Sonuç

Bilgisayar bilimi ve teknolojisinin hızla ilerlemesiyle birlikte, CFD teknolojisinin kullanımı, rüzgar türbinlerinin aerodinamiğini keşfetmenin zorlu bir yolu olarak giderek yaygınlaşmıştır. Bununla birlikte, VAWT'lerin performansını artırmak ve gürültüsünü azaltmak, karmaşık aerodinamik özellikleri nedeniyle zor bir görev olmaya devam etmektedir. ANSYS FLUENT, rüzgar türbinlerinin aerodinamik ve aeroakustik davranışlarını araştırmak için güçlü bir araçtır, düşük maliyet ve dağılımın yüksek görselleştirme etkisi gibi avantajlar sunar. Bu çalışmada, farklı gürültü azaltma tekniklerinin kentsel ortamlara uygun küçük bir VAWT üzerindeki etkilerini değerlendirmek için CFD simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Uygun bir ağ boyutu ve türbülans modeli belirlenmiş ve VAWT başlangıçta tork azalması ve gürültü artışının nedenlerini belirlemek için değerlendirilmiştir. Türbülans modelinin seçimi, rüzgar türbininin çalışma koşulu ve  $y^+$  toleransı ile ilgilidir. SST  $k-\omega$  türbülans modeli, gürültü azaltma teknikleri olsun ya da olmasın rüzgar türbini etrafındaki akış alanı özelliklerini daha iyi tahmin edebilmektedir. Ardından, üç farklı gürültü azaltma tekniği test edilmiş ve bir deflektör eklenmesinin toplam torku artırdığı ve



kanat gürültüsü. Aynı zamanda türbülans gürültüsünü de artırmıştır, ancak bu hala orijinal kanat gürültüsünden yaklaşık %90 daha düşüktür. Deflektör takıldıktan sonra kanatların torku %169 oranında artmış, kanatların akustik gücü %98 oranında azalmış ve türbülanslı akustik güç %964'e kadar artmıştır. Dolayısıyla, deflektör küçük VAWT için uygun bir gürültü azaltma tekniğidir. Bu çalışmanın sonuçları, benzer çalışma koşulları altındaki diğer rüzgar türbinleri için önemli bir referans olabilir ve kentsel ortamda küçük VAWT'lerin daha geniş bir alana yayılmasına katkıda bulunabilir. Deflektör kullanılarak küçük VAWT'nin aerodinamik performansının artırılması gelecekteki bir çalışma olarak yapılabilir ve bir Akışkan-Yapı-Etkileşim çalışması ile binalar arasındaki geçide ve çatı boyunca kurulabilir. Bu çalışma sadece CFD teknikleri ve kararlı durum simülasyonları kullanılarak yapılan sayısal bir çalışma ile sınırlıdır. Hava akışındaki kararsızlık ve rüzgar hızı ile dönüş hızının aralıklı ve değişken oluşu detaylı olarak dikkate alınmamıştır. Ayrıca, kentsel bir alanda tek tip ve tek tip olmayan bina düzenlemelerinin etkileri henüz dikkate alınmamıştır. Kararsız rüzgar koşullarına sahip daha yüksek dereceli modeller, tüberkül genlik-dalga boyu optimizasyonu, deneysel analiz ve rüzgar türbini parametrelerinin tasarım optimizasyonu gelecekteki çalışmalar olacaktır.

#### Rekabet eden çıkarlar

İrtibat yazarı, yazarlardan hiçbirinin rekabet eden bir çıkarı olmadığını beyan etmiştir.

#### Teşekkür

Tayvan Atom Enerjisi Konseyi'nin (AEC) desteğine teşekkür ederiz.

#### Referanslar

- Shoutu Li ve diğerleri: Küçük ölçekli dikey eksenli rüzgar türbinlerinin gürültü karakteristikleri üzerine deneysel araştırma içinde kentsel ortamlar, Yenilenebilir Enerji., 200, 970-982, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.099>, 2022.
- Lighthill Michael James: Aerodinamik olarak üretilen ses üzerine I. Genel teori Proc, R. Soc. Lond, A211564-587, <http://doi.org/10.1098/rspa.1952.0060>, 1952.
- Proudman I.: İzotropik türbülans tarafından gürültü üretimi Proc. R. Soc. Lond, A214119-132, <http://doi.org/10.1098/rspa.1952.0154>, 1952.
- A. Pradera, G. Keith, F. Jacobsen, N. Gil-Negrete ve A. Rivas: Re = 3900'de dairesel bir silindirden geçen sıvı akışının sayısal bir çalışması ve gürültü tahminine pratik bir yaklaşım, 14<sup>th</sup> International Congress on Sound and Vibration, 2007.
- A. Tadamas ve M. Zangeneh: Numerical prediction of wind turbine noise, Renewable Energy., 36, 7, 1902-1912, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.11.036>, 2011.
- N. N. Sorensen, J. A. Micheksen ve S. Schreck: NASA Ames 80ftx120ft Rüzgar Tünelinde NREL Faz VI Rotorunun Navier-Stokes Tahminleri, Rüzgar Enerjisi., 5, 151-169, <https://doi.org/10.1002/we.64>, 2002.
- Maizi M, Mohamed M, Dizene R ve Mihoubi M.: Farklı kanat şekilleri kullanılarak yatay bir rüzgar türbininin gürültüsünün azaltılması. Renewable Energy., 117, 242-256, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.058>, 2018.



- 400 Deshmukh S, Bhattacharya S, Singh V, Kumar R.: Kanatçıklı yatay eksenli rüzgar türbininin aerodinamik ve aeroakustik çalışması. B.Tech. Tez; Makine Mühendisliği Bölümü, MNNIT Allahabad, 2018.
- Mohamed, M. H.: Dikey eksenli bir rüzgar türbininin ürettiği aero-akustik gürültünün CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) teknikleri kullanılarak azaltılması, Energy., 96, 531-544, 405 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.100>, 2016.
- Botha, J. D. M., A. Shahroki, ve H. Rice: CFD bilgilendirilmiş bir metodoloji kullanarak dikey eksenli bir rüzgar türbininden kaynaklanan geniş bant gürültüsü için bir aeroakustik tahmin modelinin uygulanması, Journal of Sound and Vibration., 410, 389-415, 10.1016/j.jsv.2017.08.038, 2017.
- Gabriel Naccache, Marius Paraschivoiu: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Kullanılarak Çift Dikey 410 Eksenli Rüzgar Türbininin Geliştirilmesi. ASME. J. Fluids Eng., 139(12), 121105, <https://doi.org/10.1115/1.4037490>, 2017.
- Gabriel Naccache, Marius Paraschivoiu: CFD kullanarak çift dikey eksenli rüzgar türbininin parametrik çalışması. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 172, 244-255, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.11.007>, 2018.
- 415 Klein, L., Gude, J., Wenz, F., Lutz, T. ve Krämer, E.: Rüzgar türbinlerinden kaynaklanan düşük frekanslı emisyonları değerlendirmek için gelişmiş hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD)-çok gövdeli simülasyon (MBS) bağlantısı, Wind Energ. Sci., 3, 713-728, <https://doi.org/10.5194/wes-3-713-2018>, 2018.
- Nyborg, C. M., Fischer, A., Réthoré, P.-E. ve Feng, J.: Gürültü kısıtı ile rüzgar çiftliği operasyonunun 420 optimizasyonu, Wind Energ. Sci., 8, 255-276, <https://doi.org/10.5194/wes-8-255-2023>, 2023.
- Abreu, R., Peter, D., ve Thomas, C.: Rüzgar türbini kaynaklı sismik gürültünün yapısal önlemlerle azaltılması, Wind Energ. Sci., 7, 1227-1239, <https://doi.org/10.5194/wes-7-1227-2022>, 2022.
- W.-H. Chen, J.-S. Wang, M.-H. Chang, et al., Modifiye katkı yöntemi ile Taguchi yaklaşımı ile optimize edilmiş bir deflektör kullanarak dikey eksenli bir rüzgar türbininin verimliliğinin iyileştirilmesi, Energy 425 Convers. Manag., 245, 114609, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114609>, 2021.
- Ji Yao, Weibin Yuan, jianliang Wang, Jianbin Xie, Haipeng Zhou, Mingjun Peng, Yong Sun: İki boyutlu rüzgar türbini kanatçıkları için aerodinamik performansın sayısal simülasyonu, Procedia Engineering., 31, 80-86, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.994>, 2012.
- Moath N. Zaareer, Abdel-Hamid Ismail Mourad, Tariq Darabseh, Kassim Abdullah, Mostafa S.A. ElSayed: 430 Araç yan ayna tabanı için aeroakustik rüzgar gürültüsü optimizasyonu, International Journal of Thermofluids., 18, 100332, <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100332>, 2023.
- Shih,T.-H., Liou, W. W. Shabbir, A. Yang, Z. ve Zhu, J.: A New - Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation, Computers Fluids., 24(3). 227-238, [https://doi.org/10.1016/0045-7930\(94\)00032-T](https://doi.org/10.1016/0045-7930(94)00032-T), 1995.
- 435 Menter F. R.: Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, AIAA Journal., 32(8), 1598-1605, <https://doi.org/10.2514/3.12149>, 1994.
- Lilley, G.M.: İzotropik türbülans yayılan gürültü. Teorik. Hesaplama. Fluid Dynamics 6, 281-301, <https://doi.org/10.1007/BF00311842>, 1994.



Curle, N.: Katı Sınırların Aerodinamik Ses Üzerindeki Etkisi. Proceedings of the Royal Society of London. Seri A, Matematiksel ve Fiziksel Bilimler, 231(1187), 505-514, <http://www.jstor.org/stable/99804>, 1955.

440 Amerikan Makine Mühendisleri Derneği: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ve Isı Transferinde Doğrulama ve Geçerleme Standardı, ASME V&V 20-2009, 2009.

Menter, F. R.: Aerodinamik akışlar için bölgesel iki denklemlili  $k-\omega$  türbülans modelleri, AIAA Paper 93- 2906, <https://doi.org/10.2514/6.1993-2906>, 2012.