

# RÜZGAR TÜNELİ TESTLERİNDE BLOKAJ SEVİYESİNİN KÜÇÜK ÖLÇEKLİ BİR RÜZGAR TÜRBİNİNİN PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

**Burcu Erol<sup>1</sup>, Emre Karabakla<sup>2</sup>, Anas Abdulrahim<sup>1,2</sup>, Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Perçin<sup>1,2</sup>, Prof. Dr. Oğuz Uzol<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, ODTÜ, <sup>2</sup>Rüzgar Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi (RÜZGEM), ODTÜ

[burcu.erol@metu.edu.tr](mailto:burcu.erol@metu.edu.tr), [emrek@metu.edu.tr](mailto:emrek@metu.edu.tr), [aanas@metu.edu.tr](mailto:aanas@metu.edu.tr),  
[mpercincin@metu.edu.tr](mailto:mpercincin@metu.edu.tr), [uzol@metu.edu.tr](mailto:uzol@metu.edu.tr)

## ÖZET

Rüzgâr tüneli testlerinin güvenilirliğini artırmak ve farklı tünellerde icra edilen testlerde toplanan verilerin değişkenliğini araştırmak için “Round Robin” testleri gerçekleştirilir. Bu testlerde bir test modeli farklı rüzgar tünellerinde veya farklı test bölgelerinde aynı koşullarda testlere tabi tutularak ölçüm sonuçlarındaki -varsa- farklılıklar gözlemlenir. Literatürde pek çok örneği olan bu testlerden biri de ODTÜ Rüzgar Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi’nde (ODTÜ-RÜZGEM) gerçekleştirilmiştir.

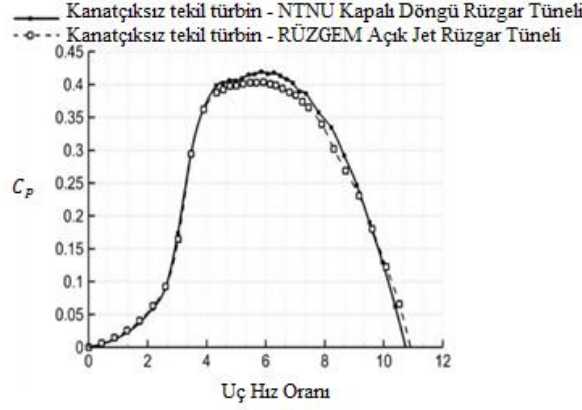
Bu çalışmada, küçük ölçekli, yatay eksenli bir rüzgar türbini ODTÜ-RÜZGEM bünyesinde bulunan farklı rüzgar tünelleri içerisindeki farklı test kesitlerinde, serbest akış hızı 11.5 m/s de sabit tutularak test edilmiştir. İlk olarak 1.7 m çaplı açık-jet test kesitinde, daha sonra ise ODTÜ-RÜZGEM Büyük Rüzgar Tüneli (BRT) içerisinde bulunan 3 m x 7 m kesit alanı ve 20 m uzunluğa sahip sınır tabaka test kesitinde, ve 3 m çaplı açık-jet test kesitinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu test kesitlerinin türbülans şiddetleri sırasıyla %2.23, %2.3 ve %0.26’dır.

Bu ölçümlerden elde edilen boyutsuz güç ve itki katsayılarının, uç hız oranı ile değişimleri gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, blokaaj oranı arttıkça performans katsayılarının da arttığını göstermiştir. Öte yandan hız ölçümlerini yapan pitot-statik tüpün konumunun önemi de bu çalışmada test edilmiştir ve konuma göre davranışın değiştiği görülmüştür. Son olarak, gerçek akış hızını tahmin edebilmek için bir prosedür geliştirilmiş ve bu prosedür bütün blokaaj seviyelerine uygulanmıştır. Sonuçlar, tüm blokaaj seviyelerinde aynı uç hız oranlarında boyutsuz katsayıların değerlerinin, maksimum noktalardaki küçük farklılıklar dışında, aynı olduğunu göstermektedir.

## 1. GİRİŞ

Dünya nüfusu hızlı bir şekilde artmaktadır ve enerji kaynaklarının tüketimi ise hızlanmaktadır. Bu da insanları yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmiştir. Rüzgar enerjisi, sürdürülebilir, çevre dostu ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Ayrıca fosil yakıtlara olan bağımlılığımızı azaltır ve maliyeti nispeten düşüktür. Rüzgar enerjisine talebin artmasıyla birlikte rüzgar türbini tasarım optimizasyonunun önemi de artmıştır [1]. Rüzgar tüneli testleri tasarım ve optimizasyon aşamasında kolaylık sağlamaktadır. Fakat bu testlerden elde edilen verilerin güvenilirliği de önemlidir. “Round Robin” testleri bu güvenilirliği sağlamada büyük öneme sahiptir ve literatürde pek çok örneği vardır. Aubrun ve arkadaşları tarafından 2019 yılında 9 farklı enstitüde gerçekleştirilmiş olan homojen ve homojen olmayan gözenekli diskin iz bölgesi ölçümleri deneyleri buna bir örnektir [2]. Bir diğer örnek ise, 2016 yılında Ostovan ve Uzol tarafından gerçekleştirilmiş olan rüzgâr türbinlerinde uç kanatçığı kullanımı ile ilgili çalışmadır [3]. Bu deneyde, 0.95 metre rotor çapına sahip yatay eksenli bir rüzgar türbini ODTÜ RÜZGEM’de bulunan açık-jet test kesitinde ve Norveç Bilim ve Teknoloji Üniversitesi (NTNU) yer alan büyük

ölçekli rüzgar tünelineki 3m x 2m kesit alanlı kapalı test kesitinde test edilmiştir. Ölçülen değerler Şekil 1’de gösterilmiştir. İki farklı tünelden alınmış veriler arasında genel bir uyum gözlenmekle beraber uç hız oranı (TSR) 4’ten büyük yerlerde küçük farklılıklar gözlemlenebilir. Bu farklılıkların sebebi iki tünel arasındaki blokaj oranı ve türbülans yoğunluğu farklılıkları olabilir.



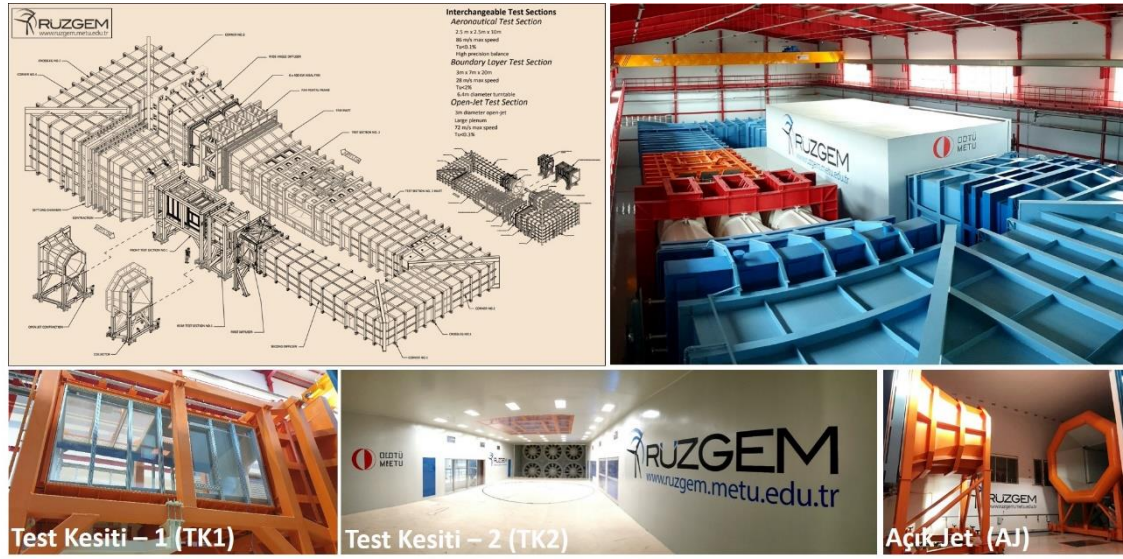
Şekil 1. Boyutsuz güç katsayısı ölçümlerinin karşılaştırması (NTNU ve RÜZGEM) [4]

Bu bildiriye, 0.96 m çapında bir rüzgar türbininin, ODTÜ-RÜZGEM bünyesindeki iki farklı test altyapısında ve üç farklı test kesitinde test edilerek aerodinamik performans karakteristiklerinin seçilen uç hız oranları ile değişimleri incelenecektir. Elde edilen veriler ve verilerdeki farklılıklar blokaj oranları göz önünde bulundurularak yorumlanacaktır. Ayrıca gerçek akış hızını hesaplamak için kullanılan yöntem ve bu yöntem sonucunda elde edilen boyutsuz performans katsayılarının uç hız oranı ile değişimleri de gösterilecektir.

## 2. RÜZGAR TÜNELİ ALTYAPILARI

Bu çalışma kapsamındaki testler ODTÜ-RÜZGEM bünyesindeki 2 farklı test altyapısında yapılmıştır. Bu altyapılardan birincisi, ODTÜ-RÜZGEM Büyük Rüzgâr Tüneli (BRT) olup bu tünel kapalı döngü, atmosferik bir rüzgar tünelidir. İki metre çaplı, her biri 400 kW gücünde 6 adet eksenel fan tarafından sürülen bu tünel 2.4 MW toplam güce ve Şekil 2’de gösterildiği gibi farklı testlerde kullanılabilen 3 ayrı test odasına sahiptir. Bu test odalarının özellikleri aşağıda verilmektedir:

- **Test Kesiti 1 (TK1):** 2.5 m x 2.5 m kesit alanı olan bu test kesiti modüler olarak tasarlanmıştır ve hava yastıkları üzerinde hareket edebilmektedir. En yüksek hız değeri 101 m/s’dir. Türbülans yoğunluğu değeri %0.1’den küçüktür.
- **Test Kesiti 2 (TK2):** 3 m x 7 m kesit alanı olan bu test kesiti 20 m uzunluğunda atmosferik sınır tabaka akışı yaratılabilmesi için tasarlanmıştır. En yüksek hız değeri 31 m/s’dir. Türbülans yoğunluğu %2.3’tür.
- **Açık Jet (AJ):** 3 m çapındaki bu kesitin maksimum hızı 78 m/s’dir. Türbülans yoğunluğu ise %0.26’dır.



Şekil 2. ODTÜ-RÜZGEM Büyük Rüzgar Tüneli (BRT) ve 3 farklı test odası

ODTÜ-RÜZGEM Büyük Rüzgâr Tüneli'nin özellikleri Tablo 1'de özetlenmiştir. BRT akış şeması ise Şekil 3'te verilmiştir.

Tablo 1. ODTÜ-RÜZGEM BRT özellikleri

<b>Tünel tipi</b>	Kapalı döngü, atmosferik, kayarak yer değiştiren modüler test kesitleri
<b>Fan türü</b>	Her biri 2 m çaplı 6 adet eksenel fan
<b>Fan gücü</b>	2.4 MW (6x400 kW)
<b>Daralma oranı</b>	8
<b>Akış koşullandırma</b>	2 bal peteği ve 5 elek
<b>Test odaları</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 2.5m x 2.5m x 10m (TK1)</li> <li>○ 3m x 7m x 20m (TK2)</li> <li>○ 3 m çapında açık-jet (AJ)</li> </ul>
<b>En yüksek hız ve türbülans yoğunluğu tasarım değerleri</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ TK1: 101* m/s, TY &lt;% 0.1</li> <li>○ TK2: 31* m/s, TY: %2.3</li> <li>○ AJ: 78* m/s, TY: %0.26</li> </ul>
<b>Soğutma</b>	750 kW ısı eşanjörü ve soğutma ünitesi

\* Bu tablodaki hız değerleri son ölçümlere dayalı olarak güncellenen değerlerdir.



### 3. MODEL RÜZGAR TÜRBİNİ

Bu çalışmada kullanılan rüzgar türbini, yatay eksenli, 3 palli bir rüzgar türbinidir. Kanatlar hassas CNC’de işlenmiş alüminyumdan yapılmıştır ve rotor çapı 0.95 metredir. Paller, NREL S826 kanat profilindedir, doğrusal olmayan burulma ve veter dağılımına sahiptir. Devir kontrolü 1.5 kW servo-motor ile yapılmıştır. Rotor shaftı üzerindeki tork, HBM T20WN/5Nm tork transdüseri ile, itki kuvveti ise naselin altına yerleştirilmiş 6 eksenli ATI Gamma kuvvet-moment transdüseri ile ölçülmüştür. Veri toplama işlemi National Instruments veri toplama sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Model rüzgâr türbini Şekil 5’te gösterilmiş ve bütün özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.



Şekil 5. Model rüzgar türbini

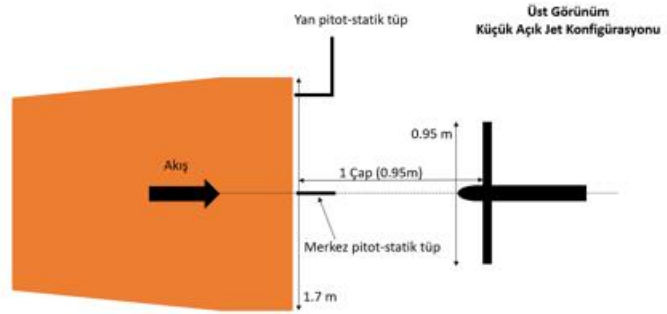
Tablo 2. Model rüzgar türbini özellikleri

<b>Kanat Sayısı</b>	3
<b>Rotor Çapı</b>	950 mm
<b>Kanat Profili</b>	NREL S826
<b>Kanat Üretim Malzemesi</b>	Hassas işlenmiş alüminyum
<b>Kanat Genişliği</b>	431 mm
<b>Göbek Çapı</b>	130 mm
<b>Kule Çapı</b>	114 mm
<b>Sürücü</b>	1.5 kW Panasonic servo-motor
<b>Tork Transdüseri</b>	HBM T20WN/5Nm
<b>Kuvvet-Moment Transdüseri</b>	ATI Gamma IP60 (6 eksenli)
<b>Veri Toplama Sistemi</b>	National Instruments DAQ

#### 4.DENEYSEL ÖLÇÜM YÖNTEMİ

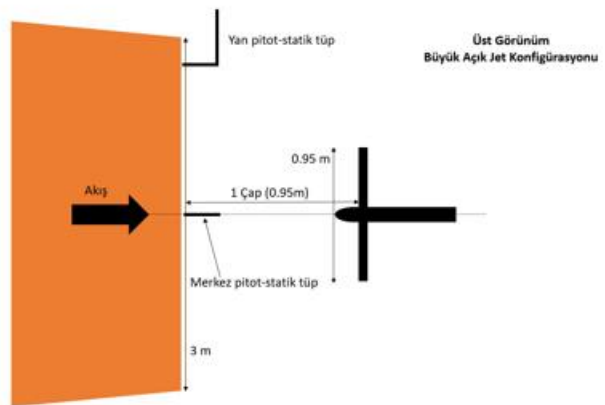
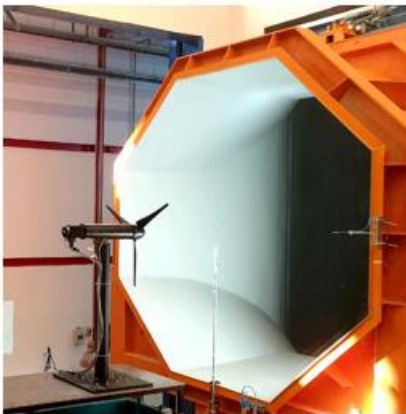
Model rüzgâr türbini 3 farklı test kesitinde test edilmiştir. Şekil 6 küçük açık-jet rüzgâr tüneli önüne yerleştirilen model rüzgâr türbinini göstermektedir. Türbin, jet çıkışından bir çap uzaklığa, türbinin ve tünelin merkezleri aynı olacak şekilde yerleştirilmiştir. Şekil 7 büyük açık-jet önüne yerleştirilen türbini temsil etmektedir ve burada da türbinin yerleşimi küçük açık-jetteki gibidir. Şekil 8’de ise sınır tabaka test kesitine yerleştirilmiş olan türbin gösterilmektedir. Türbülans yoğunlukları ve blokaj oranları bahsi geçen şekillerin her birinde sırasıyla verilmiştir. Küçük açık-jet test kesiti en fazla blokaj oranına sahipken, sınır tabaka test kesiti en düşük blokaj oranına sahiptir; fakat türbülans yoğunluğu en çok burada gözlemlenir. Türbülans yoğunluğu en az olan test kesiti ise büyük açık-jet test kesitidir.

Küçük Açık Jet (TY=%2.23)  
BO =% 30

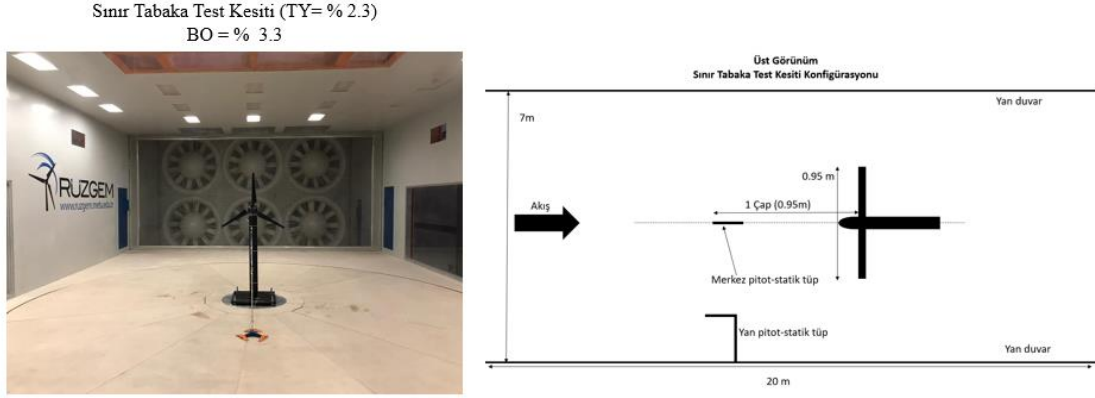


Şekil 6.Model rüzgâr türbininin küçük açık-jet test kesitindeki yerleşimi

Büyük Açık Jet (TY=%0.26)  
BO = % 9.4



Şekil 7.Model rüzgâr türbininin büyük açık-jet test kesitindeki yerleşimi



Şekil 8. Model rüzgâr türbininin sınır tabaka test kesitindeki yerleşimi

Hız ölçümleri iki farklı Pitot-statik tüp kullanılarak yapılmıştır. Bir tüp, göbek yüksekliğinde yerleştirilmiştir (Şekil 6-8’de “Merkez Pitot-statik tüp” olarak gösterilmiştir) diğeri ise test kesiti duvarına yerleştirilmiştir (Şekil 6-8’de “Yan Pitot-statik tüp” olarak gösterilmiştir). Her iki tüp de model türbinin bir çap önüne yerleştirilmiştir. Ölçümler sırasında, merkezdeki tüpten ölçülen hız 11.5 m/s’de sabit tutulmuştur.

Elde edilen hız verileri, uç hız oranı ve performans karakteristiklerini hesaplamak için kullanılmıştır. Uç hız oranı, kanat ucundaki hız ile serbest akış hızı arasındaki ilişkidir ve aşağıdaki formülle bulunur.

$$TSR (Uç Hız Oranı) = \frac{\Omega R}{U_{\infty}} \quad (1)$$

Burada,  $\Omega$  model rüzgâr türbini rotorunun dönüş hızını,  $R$  dönme ekseninden kanatların ucuna kadar olan mesafeyi,  $U_{\infty}$  ise serbest akış hızını ifade etmektedir.

Bir rüzgâr türbinin rotor alanından geçen serbest akıştan elde edebileceği enerji,

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

denklemlerle bulunur.  $A$  rotor alanını,  $\rho$  ise havanın yoğunluğunu ifade eder. Model rüzgâr türbininin harcadığı güç ve rüzgardan elde edilen güç arasındaki ilişki boyutsuz güç katsayısı ile bulunur ve denklemi aşağıdaki haliyle ifade edilebilir.

$$C_p = \frac{\text{Rotor gücü}}{\text{Rüzgardan elde edilen güç}} = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^3 A} = \frac{Q \Omega}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^3 A} \quad (3)$$

$Q$ , mil üzerindeki torku gösterir. Türbinin performansının değerlendirilmesine yardımcı olan bir diğer parametre ise boyutsuz itki katsayısıdır.

$$C_T = \frac{\text{İtke kuvveti}}{\text{Dinamik kuvvet}} = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 A} \quad (4)$$

## 5. BLOKAJ ETKİSİ DÜZELTME YÖNTEMİ

Türbinin tünel çıkışında veya içerisinde yarattığı blokajdan dolayı, serbest akış hızı ölçümü için kullanılan her iki Pitot-statik tüp de türbinin varlığından etkilenmektedir. Dolayısıyla hem merkez tüpü hem de yan tüp aracılığıyla ölçülen serbest akış hızları ve ölçülen itki katsayısı kullanılarak, gerçek serbest akış hızı hesaplanmış ve bu gerçek akış hızı ile güç ve itki katsayıları düzeltilmiştir. Bu işlem bütün blokaj senaryoları için yapılmıştır. Bu yöntemde türbin bir aktüatör disk kabul edilmiştir. Kullanılan yöntemde kullanılan parametreler Şekil 9’da verilmiştir. Yöntem aşağıdaki işlem sırasına göre yapılır:

1. Öncelikle akış alanı içerisindeki merkez Pitot-statik tüpten ölçülen hız serbest akış hızına eşit kabul edilmiştir.

$$U_{\infty} = u_i \quad (5)$$

2. Ölçülen  $C_T$  (itki katsayısı) değerlerinden aşağıdaki formül kullanılarak indüksiyon faktörü ( $a$ ) hesaplanmıştır.

$$C_T = 4a(1 - a) \quad (6)$$

3. Hesaplanan indüksiyon katsayısı kullanılarak disk üzerindeki hız hesaplanmıştır.

$$u_{disk} = (1 - a)U_{\infty} \quad (7)$$

4. Akış alanı içinde ve dışında kalan alanlar hesaplanmıştır.

$$A_{disk} = \frac{\pi D^2}{4} \quad (8)$$

$$A_i = \frac{u_{disk} \times A_{disk}}{u_i} \quad (9)$$

$$A_t = \frac{\pi D_{tünel}^2}{4} \quad (10)$$

$$A_o = A_t - A_i \quad (11)$$

5. Bu alanlar kullanılarak hacimsel akış debisi hesaplanmıştır.

$$\dot{V} = u_i A_i + u_o A_o \quad (12)$$

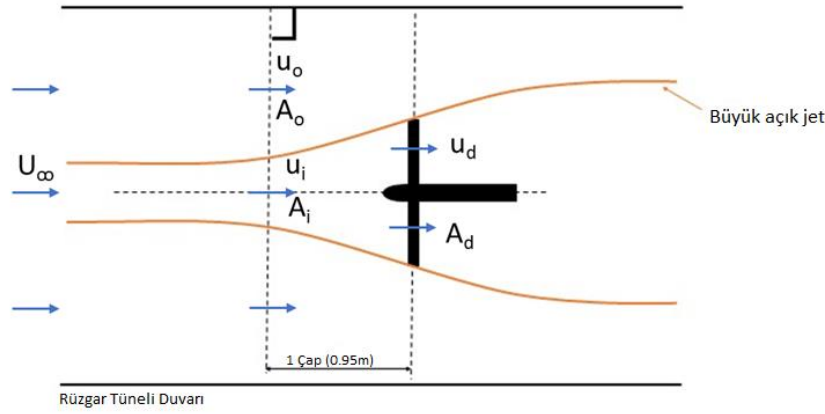
6. Serbest akış hızı hesaplanmıştır.

$$U_{\infty} = \frac{\dot{V}}{A_t} \quad (13)$$

7. Gerçek serbest akış hızı kullanılarak boyutsuz güç, itki katsayıları ve uç hız oranı güncellenmiştir.

8. Serbest akış hızı yakınsayana kadar yukarıdaki işlemler tekrarlanmıştır.

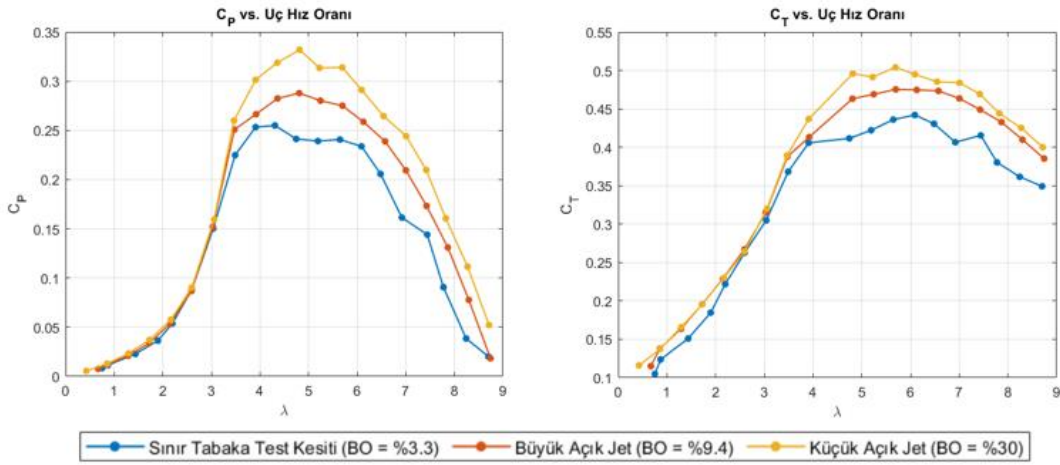




Şekil 9. Model rüzgâr türbini üzerindeki akış şeması

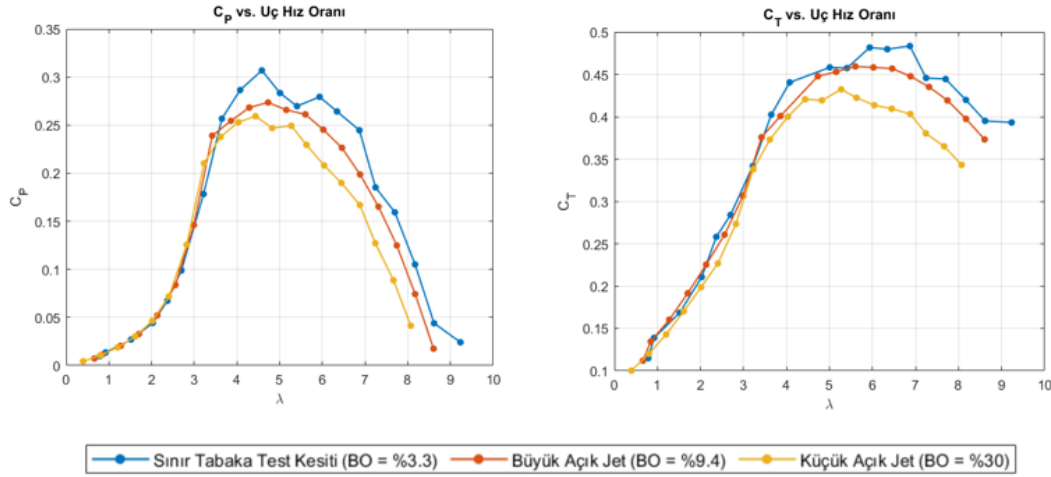
## 6. BULGULAR VE YORUM

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler Şekil 10'da gösterilmiştir. Buradaki grafikler değişen uç hız oranlarına göre farklı blokaj oranlarında elde edilen boyutsuz güç ve itki katsayılarını temsil etmektedir. Bu iki grafiğin verileri merkez tüpten alınan hız değeri üzerinden hesaplanmıştır. Sarı çizgi küçük açık-jeti, turuncu çizgi büyük açık-jeti, mavi çizgi ise sınır tabaka test kesitini göstermektedir. Şekilde görüldüğü üzere, blokaj oranları arttıkça boyutsuz güç ve itki katsayıları artmaktadır. Ayrıca uç hız oranının 3.5'ten küçük olduğu durumlarda blokaj etkisi görülmemektedir. Elde edilen bu sonuçlar literatür ile uyumludur [3,5].



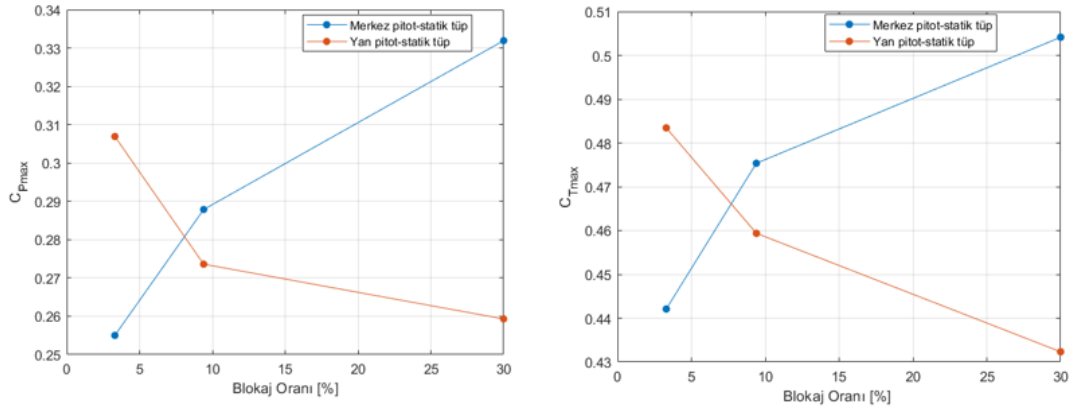
Şekil 10. Boyutsuz itki ve güç katsayıları (Merkez tüp kullanılarak elde edilmiştir)

Şekil 11'de yan tüpten ölçülen hız değerleri kullanılarak hesaplanmış boyutsuz performans katsayıları verilmiştir. Burada davranış tersine dönmüştür. Blokaj oranı arttıkça boyutsuz katsayılar azalmış fakat uç hız oranının 3.5'ten küçük olduğu durumlarda blokaj etkisi gözlemlenmemiştir.



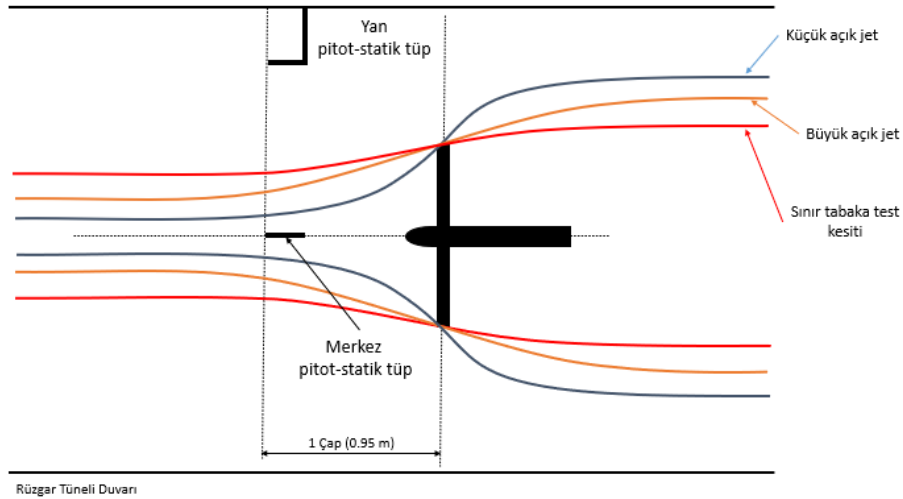
Şekil 11. Boyutsuz itki ve güç katsayıları (Yan tüp kullanılarak elde edilmiştir)

Blokaj etkisi boyutsuz güç ve itki katsayılarının maksimum değerlerinde daha rahat gözlemlenebilir. Şekil 12’de görüldüğü üzere, merkez tüp kullanılarak alınan sonuçlarda blokaj oranı arttıkça boyutsuz katsayıların maksimum değerleri artarken, yan tüpten alınan hız ölçümleri sonucunda elde edilen boyutsuz katsayıların maksimum değerleri azalmıştır. Bu zıt hareketin sebebi ise akış alanı sınırlarının blokaj ile değişmesiyle açıklanabilir.



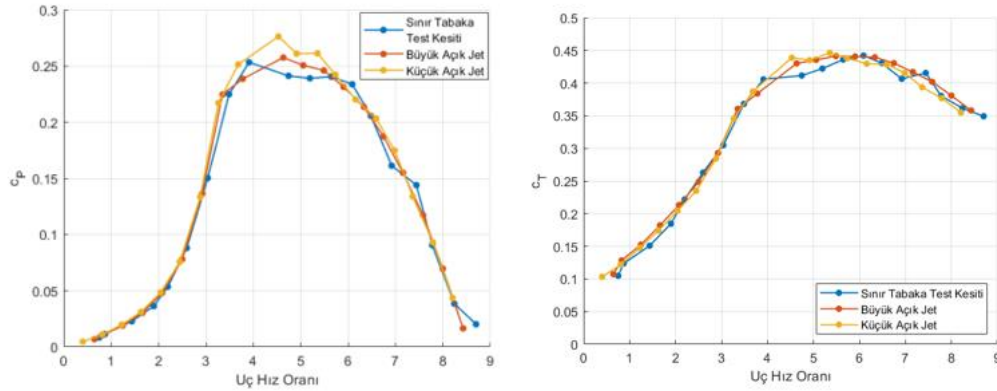
Şekil 12. Maksimum  $C_p$  ve  $C_T$  değerlerinin blokaj oranları ile değişimleri

Şekil 13, değişen blokaj oranlarına göre temsili olarak çizilen akış alanı çizgilerini göstermektedir. Akış alanı değişmesinden dolayı indüksiyon oranı farklı blokaj oranlarında farklı değere sahip olur. Blokaj oranı arttıkça indüksiyon da artar. Diskin bir çap mesafe önünde, merkezdeki tüp hızı 11.5 m/s’de sabit tutulduğunda ve bu değer  $C_p$ ,  $C_T$  ve uç hız oranı hesabı için kullanıldığında, yüksek blokajda daha yüksek indüksiyon olması nedeniyle, bu çalışmada da örneği görüldüğü üzere, yüksek boyutsuz katsayılar elde edilmektedir. Fakat, farklı blokaj seviyelerinde yan tüp hızı sabit değildir. Blokaj seviyesi arttıkça yan tüpten ölçülen hız ve merkezdeki tüpten ölçülen hız arasındaki fark, yan tüpteki hız verisi daha yüksek olmak kaydıyla, artar. Dolayısıyla bu değer  $C_p$  ve  $C_T$  hesaplarında kullanıldığında, artan blokajla  $C_p$  ve  $C_T$  azalır.



Şekil 13. Temsili akış alanı çizgileri

Şekil 14, gerçek serbest akış hızı hesaplandıktan sonra blokaj düzeltmesi uygulanan boyutsuz güç ve itki katsayılarını göstermektedir. Bu uygulamadan sonra görülmektedir ki tüm blokaj seviyelerindeki değişimler üst üste binmiştir. Sadece maksimum  $C_p$  ve  $C_T$  noktalarında bazı değişkenlikler gözlemlenmiştir.



Şekil 14. Boyutsuz güç ve itki katsayıları (güncellenen gerçek serbest akış hızı kullanılarak elde edilmiştir)

## 7. SONUÇLAR

Bu çalışmada küçük ölçekli, yatay eksenli bir rüzgâr türbinin ODTÜ RÜZGEM imkanları dahilinde bulunan 3 farklı test kesitinde performans ölçümleri yapılmıştır. Türbin göbeği yüksekliğine yerleştirilen pitot-statik tüpten elde edilen hız, boyutsuz katsayıların hesabında kullanıldığında, blokaj etkilerine ilişkin sonuçların literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür. Akış alanı dışına yerleştirilen pitot-statik tüpten alınan hız kullanıldığında, tam tersi davranış gözlenmiş ve bu hareket blokaj değişimleri sonucu etkilenen akış alanı değişimleriyle açıklanmıştır. Ölçülen verilere dayalı olarak, verileri yeniden ölçeklendirmek için yinelemeli bir gerçek serbest akış hızı tahmin prosedürü uygulanmış ve farklı blokaj seviyeleri için makul bir uyum elde edilmiştir.

**KAYNAKLAR**

- [1] **Ning, S. A., Damiani, R., ve Moriarty, P. J.** 2014. *Objectives and constraints for wind turbine optimization*. *Journal of Solar Energy Engineering* 136, 4, 041010.
- [2] **Aubrun, S., Bastankhah, M., Cal, R., Conan, B., Hearst, R., Hoek, D., Hölling, M., Huang, M., Hur, C., Karlsen, B., Neunaber, I., Obligado, M., Peinke, J., Percin, M., Saetran, L., Schito, P., Schliffke, B., Sims-Williams, D., Uzol, O., Vinnes, M.K., Zasso, A.** (2019). Round-robin tests of porous disc models. *Journal of Physics: Conference Series*, 1256, 012004. doi:10.1088/1742-6596/1256/1/012004
- [3] **Ostovan, Y., & Uzol, O.** (2016). Experimental study on the effects of winglets on the performance of two interacting horizontal axis model wind turbines. *Journal of Physics: Conference Series*, 753, 022015. doi:10.1088/1742-6596/753/2/022015
- [4] **Ostovan, Y.** (2017). Winglets for Wind Turbines: An Experimental Study on Aerodynamic Performance and Tip Vortex Behavior, Y.Lisans Tezi, ODTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2017
- [5] **Ryi, J., Rhee, W., Chang Hwang, U., & Choi, J.-S.** (2014). Blockage effect correction for a scaled wind turbine rotor by using wind tunnel test data. *Renewable Energy*, 79, 227–235. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.057>