



# **Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinde Uç Enjeksiyonu Kullanılarak Aktif Uç Girdabı Kontrolü Yönteminin Deneysel İncelenmesi**

**Program Kodu: 1001**

**Proje No: 112M105**

Proje Yürütücüsü:  
**Doç. Dr. Oğuz UZOL**

OCAK 2016  
ANKARA

## ÖNSÖZ

Kanat uç girdapları kanatların oluşturduğu kaldırma kuvvetinin bir yan ürünü olarak ortaya çıkan akış olaylarıdır. Kaldırma kuvvetinin oluşmasını sağlayan kanat alt ve üst yüzeyleri arasındaki basınç farkı, kanat uçlarında havanın alt yüzeyden üst yüzeye doğru akmasına sebep olur. Bu akış, kanat üzerine gelen ana akışla birleştiği zaman kanat ucunda konsantre bir şekilde dönen girdaplara dönüşür. Bu girdap yapıları yatay eksenli rüzgar türbinlerinde performans kayıplarına, gürültü problemlerine yol açmakta ve rüzgar çiftliklerinde art arda dizilen türbinlerde girdap-türbin etkileşimlerinin yol açtığı ciddi yapısal ve performans problemlerine sebep olmaktadır. Kanat uç girdap kontrolü, oluşacak bu problemleri en aza indirgeyebilmek amacıyla son yıllarda üzerinde çalışılan konuların başında gelmektedir. Rüzgar türbinlerinde ise genelde kanat uç girdapları kanat ucu kanatçıkları yardımıyla pasif olarak kontrol edilmeye çalışılmaktadır. Bu proje kapsamında, yatay eksenli rüzgar türbinlerinde uygulanabilecek, uç enjeksiyonu ile aktif uç girdabı kontrolü yöntemi önerilmektedir. Bu yöntem daha önce rüzgar türbini uygulamaları kapsamında araştırılmamıştır. Bu proje çerçevesinde önerilen bu teknik dönen model rüzgar türbini palleri üzerinde uygulanmış, uç girdabı yapısı, akış karakteristikleri, türbin iz bölgesi karakteristikleri ve türbin tork/güç karakteristikleri üzerindeki etkisi deneysel yöntemler kullanılarak incelenmiş ve pasif uç girdabı kontrolü yöntemleriyle karşılaştırma yapılmıştır. Bu proje TÜBİTAK 1001 Akademik Destek Programı kapsamında 112M105 no'lu proje olarak TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ .....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGE VE KISALTMALAR .....	vii
ÖZET .....	viii
ABSTRACT .....	ix
1. GİRİŞ .....	1
1.1 Literatür Özeti .....	2
1.2 Proje Kapsamında Planlanan ve Gerçekleştirilen Çalışmalar .....	6
2. GEREÇ VE YÖNTEM.....	8
2.1 Açık-jet Rüzgar Tüneli Tasarımı, Kurulumu ve Karakterizasyonu.....	8
2.1.1 Mevcut Rüzgar Tünellerinin Uygunluğunun Değerlendirmesi .....	8
2.1.2 Yeni Açık-Jet Rüzgar Tüneli Tasarımı ve Kurulumu .....	10
2.1.3 Açık-jet Rüzgar Tüneli Karakterizasyonu .....	17
2.2 Uç Girdabı Kontrollü Yatay Eksenli Rüzgar Türbini Tasarımı ve Kurulumu .....	20
2.2.1 Referans (Baseline) Rotor Tasarımı.....	21
2.2.2 Uç enjeksiyon sistemi ve nasele tasarımı.....	23
2.2.3 V-tipi uç kanatçıklı (Mie vane) kanat tasarımı.....	31
2.3 Deneysel Yöntem .....	35
2.3.1 Performans Ölçümleri .....	35
2.3.2 Türbin İz Bölgesi Ölçümleri .....	36
2.3.3 Kanat Uç Akış PIV Ölçümleri .....	37
2.3.4 Enjeksiyon Senaryoları .....	39
3. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	40
3.1 Tork ve İtme Kuvveti Ölçümleri .....	40
3.2 İz Bölgesi Ölçümleri .....	42
3.3 Kanat Ucu Akış Ölçümleri .....	46
3.4 Güç Verimlilik Analizi .....	64
4. SONUÇLAR .....	68
KAYNAKLAR.....	70

## Şekiller Listesi

Şekil 1. Modifikasyonu planlanan STWT2 tüneli .....	8
Şekil 2. STWT1 tünelinin görünümü .....	9
Şekil 3. STWT1 tünelinin fan arkasından sabit sıcaklıklı tel anemometresi ile alınan ölçümler, fan kesit alanının ortası (sol), fan pallerinin orta noktası (sağ).....	10
Şekil 4. Açık-jet rüzgar tüneli difüzör kesiti için yapılan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizi için hazırlanan düzensiz ağ yapısı .....	11
Şekil 5. Açık-jet rüzgar tüneli için farklı genişleme açılarında yapılan 2-Boyutlu HAD analizleri (a) 3 derece, (b) 4 derece, (c) 5 derece, (d) 6 derece .....	13
Şekil 6. Farklı difüzör genişleme açılarında HAD analizleri sonucunda tünel çıkışında elde edilen hız dağılımları.....	14
Şekil 7. Ön tasarımı yapılan açık-jet rüzgar tünelinin üç boyutlu çizimleri .....	15
Şekil 8. Açık jet rüzgar tünelinin üç boyutlu üretim katı modeli .....	15
Şekil 9. Açık jet rüzgar tünelinin yandan görünüşü (üst), kullanılan fan sistemi (alt)	16
Şekil 10. Üretilen açık jet rüzgar tüneli resimleri .....	17
Şekil 11. Açık-jet rüzgar tüneli karakterizasyonu .....	18
Şekil 12. Rüzgar tüneli karakterizasyonu ve referans ölçümler için belirlenen koordinat sistemi.....	19
Şekil 13. 6 m/s ve 8 m/s jet çıkışı hızları için tünel karakterizasyonu sonuçları. (a) Yatay ekseninde ortalama rüzgar hızı. (b) Dikey ekseninde ortalama rüzgar hızı. (c) Yatay ekseninde türbülans yoğunluğu. (d) Dikey ekseninde türbülans yoğunluğu. ....	20
Şekil 14. NTNU Model türbini (Blomhoff, 2012).....	21
Şekil 15. NREL S826 kanat profili (Somers, 2005).....	21
Şekil 16. Kanat açıklığı boyunca (a) veter, (b) burulma açısı dağılımı (Karlsen, 2009) .....	22
Şekil 17. Uç enjeksiyon kanallarına sahip kanat geometrisi .....	23
Şekil 18. Rotor pali üretimi katı modeli .....	24
Şekil 19. Hızlı prototipleme ile ABS plastikten üretilen rotor pali .....	24
Şekil 20. Metal kanatlar .....	25
Şekil 21. (a) Basıncılı oda, (b) delikli şaft, (c) basıncılı rotor göbeği, (d) hava kanallı rotor pali .....	26
Şekil 22. Basıncılı hava transferi şeması (a) Basıncılı oda ve hub, (b) hub ve kanatlar .....	26



Şekil 23. (a) Basıncılı oda elemanları katı modeli (b) Basıncılı oda katı modeli (c) Üretilen basıncılı oda.....	27
Şekil 24. Delikli şaft (a) katı model, (b) üretilen şaft.....	27
Şekil 25. (a) Basıncılı hub katı modeli, (b) üretilen basıncılı hub.....	28
Şekil 26. (a) Model türbin için temin edilen elektrik motoru, (b) motor, nasele ve torkmetre bağlantıları.....	29
Şekil 27. (a) Hub-Şaft-Torkmetre bağlantıları, (b) basıncılı oda yerleşimi .....	29
Şekil 28. Nasele-göbek bölgesi bağlantı tasarımı.....	30
Şekil 29. (a) Temin edilen torkmetre, (b) Temin edilen 6 eksenli yük ve moment ölçer .....	31
Şekil 30. (a) Model türbin elemanları katı modeli, (b) Üretilen model türbin .....	31
Şekil 31. Mie Üniversitesi bünyesinde yapılan araştırmalarda kullanılan V-tipi kanatçık geometrisi (Shimizu vd. (1995)) .....	32
Şekil 32. V-tipi kanatçık tasarımı. (a) önden görünüş, (b) izometrik görünüş, (c) üstten görünüş, (d) yandan görünüş .....	33
Şekil 33. V-tipi kanatçıklar (a) üretim için hazırlanan alüminyum kalıp, (b) tel erozyon ile üretilen V-tipi kanatçıklar, (c,d) V-tipi kanatçığın kanat ucundaki yerleşimi, (e) türbin rotoruna entegre edilmiş durum.....	34
Şekil 34. Sistem üzerindeki tork yükleri .....	35
Şekil 35. Türbin iz bölgesi ölçüm alanı .....	37
Şekil 36. Türbin iz bölgesi ölçüm düzeneği.....	37
Şekil 37. PIV deney düzeneği.....	38
Şekil 38. Kanat uç bölgesi PIV ölçüm düzlemi .....	38
Şekil 39. Referans rotor (baseline), üç farklı uç enjeksiyonu durumu ve V-tipi kanatçıklı (Mie vane) durum için , güç katsayısının Uç Hız Oranı (Tip Speed Ratio-TSR) ile değişimi. $R_M$ : Enjeksiyon momentum katsayısı. $U_\infty=5$ m/s rüzgar hızı.....	41
Şekil 40. Referans rotor (baseline), üç farklı uç enjeksiyonu durumu ve uç kanatçıklı (Mie vane) durum için , itki kuvveti katsayısının Uç Hız Oranı (Tip Speed Ratio-TSR) ile değişimi. $R_M$ : Enjeksiyon momentum katsayısı. $U_\infty=5$ m/s rüzgar hızı. ....	41
Şekil 41. Türbin rotoru iz bölgesindeki hız dağılımı. (Soldan sağa) 1. sütun: Referans ölçümler, 2. sütun: Mie Vane'li ölçümler, 3. sütun: $R_M=0.2$ enjeksiyonlu ölçümler, 4. sütun: $R_M=1.3$ enjeksiyonlu ölçümler. (Yukarıdan aşağıya) 1. satır: 0.25D, 2. satır: 0.5D, 3. satır: 1D, 4. satır: 2D. Akış yönü sayfanın dışına doğrudur ve konturlardaki daireler açık-jet tünelin dış sınırını göstermektedir. ....	43

Şekil 42. Türbin rotoru iz bölgesindeki türbülans yoğunluğu dağılımı. (Soldan sağa) 1. sütun: Referans ölçümler, 2. sütun: Mie Vane'li ölçümler, 3. sütun: $R_M=0.2$ enjeksiyonlu ölçümler, 4. sütun: $R_M=1.3$ enjeksiyonlu ölçümler. (Yukarıdan aşağıya) 1. satır: 0.25D, 2. satır: 0.5D, 3. satır: 1D, 4. satır: 2D. Akış yönü sayfanın dışına doğrudur ve konturlardaki daireler açık-jet tünelin dış sınırını göstermektedir. ....	44
Şekil 43. Akış yönündeki farklı aksenal noktalarda radyal çizgi boyunca hız (sol) ve türbülans yoğunluğu (sağ) dağılımları. (yukarıdan aşağıya) 1. satır: 0.25D, 2. satır: 0.5D, 3. satır: 1D, 4. satır: 2D. "s" veri alınan çizgi (Şekil 42, sol-üst) üzerindeki mesafeyi göstermektedir. ....	45
Şekil 44. Örnek bir faz açısında ( $\varphi=30^\circ$ ), referans durumu için elde edilen örnek bir PIV imajı (üstte), Bu imaj çifti kullanılarak hesaplanan anlık hız alanı ve hız vektörleri (ortada) ve anlık düzlem dışı vortisite bileşeni dağılımı. ....	47
Şekil 45. Farklı faz açılarında ( $\varphi$ ) düzlem-içi ortalama hız büyüklükleri. 1. satır: Referans ölçümler, 2. satır: Mie Vane'li ölçümler, 3. satır: $R_M=0.2$ enjeksiyonlu ölçümler, 4. satır: $R_M=0.7$ enjeksiyonlu ölçümler, 5. satır: $R_M=1.3$ enjeksiyonlu ölçümler. 1. sütun: $\varphi=0^\circ$ , 2. sütun: $\varphi=6^\circ$ , 3. sütun: $\varphi=12^\circ$ . Akış yönü soldan sağadır ve siyah cisim türbin kanat ucunun kapladığı bölgeyi temsil etmektedir. ....	49
Şekil 46. Farklı faz açılarında ( $\varphi$ ) düzlem-dışı vortisite bileşeni değerleri. 1. satır: Referans ölçümler, 2. satır: Mie Vane'li ölçümler, 3. satır: $R_M=0.2$ enjeksiyonlu ölçümler, 4. satır: $R_M=0.7$ enjeksiyonlu ölçümler, 5. satır: $R_M=1.3$ enjeksiyonlu ölçümler. 1. sütun: $\varphi=0^\circ$ , 2. sütun: $\varphi=6^\circ$ , 3. sütun: $\varphi=12^\circ$ . Akış yönü soldan sağadır ve katı siyah cisim türbin kanadını göstermektedir. ....	54
Şekil 47. Farklı faz açılarında ( $\varphi$ ) türbülans kinetik enerjisi büyüklükleri. 1. satır: Referans ölçümler, 2. satır: Mie Vane'li ölçümler, 3. satır: $R_M=0.2$ enjeksiyonlu ölçümler, 4. satır: $R_M=0.7$ enjeksiyonlu ölçümler, 5. satır: $R_M=1.3$ enjeksiyonlu ölçümler. 1. sütun: $\varphi=0^\circ$ , 2. sütun: $\varphi=6^\circ$ , 3. sütun: $\varphi=12^\circ$ . Akış yönü soldan sağadır ve katı siyah cisim türbin kanadını göstermektedir. ....	59
Şekil 48. Tüm faz açılarının grup ortalama hız (sol sütun), vortisite (orta sütun) ve türbülans kinetik enerjisi (sağ sütun) dağılımları ( $\varphi=0^\circ-60^\circ$ ). 1. satır: Referans ölçümler, 2. satır: Mie Vane'li ölçümler, 3. satır: $R_M=0.2$ enjeksiyonlu ölçümler, 4. satır: $R_M=0.7$ enjeksiyonlu ölçümler, 5. satır: $R_M=1.3$ enjeksiyonlu ölçümler. Akış yönü soldan sağadır ve katı siyah cisim türbin rotorunu göstermektedir. ....	63

## SİMGE VE KISALTMALAR

**HAD:** Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

**PIV:** Parçacık İmajlı Hız Ölçer (Particle Image Velocimetry)

**STWT:** Emiş prensibi ile çalışan rüzgar tüneli (Suction Type Wind Tunnel)

**A:** Rotor alanı [ $m^2$ ]

**D:** Türbin rotor çapı [m]

**R:** Türbin rotor yarıçapı [m]

**TSR:** Uç Hız Oranı (Tip Speed Ratio)

**$C_P$ :** Güç katsayısı

**$C_T$ :** İtme katsayısı

**$\dot{m}$ :** Debi [kg/s]

**$\rho$ :** Özkütle [ $kg/m^3$ ]

**P:** Güç [Watt]

**T:** İtme [N]

**$U_\infty$ :** Akış hızı [m/s]

**$\Omega$ :** Vortisite [1/s]

**$\phi$ :** faz açısı [ $^\circ$ ]

**TI:** Türbülans yoğunluğu [%]

**$R_M$ :** Enjeksiyon Momentum Oranı

**$R_{TS}$ :** Enjeksiyon Uç Hız Oranı

**x:** aksenal yön (akış yönü)

**y:** yatay eksen

**z:** dikey eksen

**s:** radyal eksen

## ÖZET

Kaldırma kuvvetinin oluşmasını sağlayan kanat alt ve üst yüzeyleri arasındaki basınç farkı, kanat uçlarında havanın alt yüzeyden üst yüzeye doğru sızmasına sebep olur. Bu sızma, kanat üzerine gelen ana akışla birleştiği zaman kanat ucunda konsantre bir şekilde dönen girdaplara dönüşür. Bu girdap yapıları yatay eksenli rüzgar türbinlerinde performans kayıplarına, gürültü problemlerine yol açmakta ve rüzgar çiftliklerinde art arda dizilen türbinlerde girdap-türbin etkileşimlerinin yol açtığı ciddi yapısal ve performans problemlerine sebep olmaktadır. Kanat uç girdap kontrolü, oluşacak bu problemleri en aza indirgeyebilmek amacıyla son yıllarda üzerinde çalışılan konuların başında gelmektedir. Rüzgar türbinlerinde genelde kanat uç girdapları kanat ucu kanatçıkları yardımıyla pasif olarak kontrol edilmeye çalışılmaktadır. Bu proje kapsamında, yatay eksenli rüzgar türbinlerinde uygulanabilecek, uç enjeksiyonu ile aktif uç girdabı kontrolü yöntemi incelenmiştir. Bu yöntem daha önce rüzgar türbini uygulamaları kapsamında araştırılmamıştır. Proje kapsamında, pasif uç girdabı yöntemleriyle karşılaştırma ve bu aktif yöntemin uç girdabı ve türbin aerodinamik karakteristikleri üzerindeki etkisinin incelenmesine yönelik bir araştırma projesi yapılmıştır. Uç enjeksiyonu ile aktif uç girdabı kontrolü daha önce izole kanatlarda ve turbofan motorları düşük-basınç türbin kanatçıklarında, tarafımızdan yürütücülüğü yapılan bir TÜBİTAK 1001 projesi çerçevesinde araştırılmıştı (Proje No: 108M232). Bu proje çerçevesinde ise bu teknik dönen model rüzgar türbini palleri üzerinde uygulanmış, uç girdabı yapısı, akış karakteristikleri, türbin iz bölgesi karakteristikleri ve türbin tork/güç karakteristikleri üzerindeki etkisi deneysel yöntemler kullanılarak incelenmiş ve pasif uç girdabı kontrolü yöntemleriyle karşılaştırmalar yapılmıştır. Deneyler bu proje çerçevesinde kurulan açık-jet rüzgar tüneline, yük ölçümleri, sıcak-tel anemometresi ile iz bölgesi ölçümleri ve Particle Image Velocimetry (PIV) kullanılarak uç girdabı ölçümleri şeklinde gerçekleştirilmiştir. Uç enjeksiyonunun türbin tork ve itme kuvveti üzerinde bu değerleri artırıcı yönde bir etkisi olduğu görülmüş, bu artışın artan enjeksiyon miktarı ile arttığı görülmüştür. Güç katsayısının maksimum enjeksiyon oranı uygulandığında %44'e kadar arttığı hesaplanmıştır. İz bölgesindeki hız ve türbülans alanlarını ve kanat ucu kenarındaki uç girdabı yapılarını, enjeksiyon miktarına bağlı olarak ciddi bir şekilde değiştirdiği gözlemlenmiştir. Buna göre artan enjeksiyon oranına bağlı olarak, uç girdabının etkilerinin azaldığı, girdapların daha çok yayıldığı, türbin iz bölgesinin ise genişlediği ortaya çıkmıştır.

### Anahtar kelimeler:

Rüzgar türbini, uç girdabı, uç girdabı kontrolü, uç enjeksiyonu

## **ABSTRACT**

The pressure difference between the upper and lower surfaces of the wing, which generates the lift, results in the leakage of the flow from lower to upper surfaces at the wing tip. When this leakage flow combines with the main stream, concentrated vortical structures are generated at the wing tips. These vortex structures cause performance losses and noise problems for horizontal axis wind turbines, and these vortical structures cause critical structural and performance problems due to vortex-turbine interactions in successively arranged wind turbines in wind farms. Control of these vortices in order to minimize the effect of various problems is a subject that has attracted attention in recent years. For wind turbines, tip vortex control has been done by passive methods such as winglets in general. Within the scope of this project, application of active tip vortex control for horizontal axis wind turbines is investigated. Application of this method for wind turbines has never been investigated before. In this project, comparison of proposed method with the passive methods, and the effects of the proposed method on the tip vortices and the wind turbine aerodynamics are studied. Previously we investigated the active control of tip vortices by means of tip injection method for an isolated wing and low pressure blades of turbofan engines as a TÜBİTAK-1001 project (Project No: 108M232). Within the scope of this project, this technique is applied to the blades of a rotating wind turbine, and its effects on structure of the tip vortices, flow characteristics, characteristics of the turbine wake region and characteristics of turbine torque/power is studied experimentally, and comparisons with the passive tip vortex control methods are performed. The experiments, which are force measurements, measurements of wake region via hot-wire anemometry, and tip vortex measurements by means of Particle Image Velocimetry (PIV), are conducted in the open-jet wind tunnel, which is designed and constructed as a part of this project. It is observed that the tip injection has an increasing effect on wind turbine torque and thrust force as the injection ratio increases. It is calculated that maximum power coefficient increases up to 44% at maximum injection scenario. It is also observed that the tip injection significantly changed the velocity and vorticity fields, and the structure of tip vortices near the blade tip, depending on the injection rate. Accordingly, with increasing injection ratio, tip vortices get weakened, are more diffused and the turbine wake region gets enlarged.

### Keywords:

Wind turbine, tip vortex, tip vortex control, tip injection

## 1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze gelişen teknoloji ve artan ihtiyaçlar doğrultusunda enerji ihtiyacı giderek artmıştır. Bu ihtiyacı karşılamak için fosil yakıtlar başta olmak üzere, kömür, nükleer enerji, hidroelektrik santraller, termik santraller gibi birçok enerji kaynaklarının kullanımı yaygınlaşmıştır. Ancak bu enerji kaynakları, özellikle fosil yakıtlar ve kömür çabuk tükenmekte, çevreyi kirletmekte ve doğayı ve insanı tehdit etmektedir. Rüzgardan enerji elde etme fikri, ilk kez 20. yüzyılın başlarında çevre kirliliğinin etkileri ile gelişmeye başlamış ve zaman içerisinde birçok devletin yerel enerji kaynağı politikası haline gelmiştir (Manwell, J. F., McGowan, & Rogers, A., 2009). Zamanla yenilenebilir ve temiz enerjiye olan ihtiyacın artmasıyla, rüzgar türbinleri ve rüzgar çiftlikleri gelişmeye ve yaygınlaşmaya başlamıştır. Rüzgar enerji santrallerinin artmasıyla ise bu santrallerin performans ve verimliliklerinin önemi de artmaya başlamıştır.

Rüzgar türbini, rüzgardaki mevcut kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye, oradan da bir jeneratör yardımıyla mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirmektedir. Teorik olarak bir rüzgar türbini, rüzgarın bütün enerjisini çekebilirse, maksimum gücü üretmiş olur. Bu da Eşitlik 1'de de belirtildiği üzere türbin rotorunun arkasındaki hızın sıfır olması anlamına gelmektedir. Ancak gerçekte türbin gerisinde rüzgar sıfır olmadığından bu mümkün değildir.

$$P_{rüzgar} = \frac{1}{2} \rho A U_{\infty}^3 \quad [1]$$

Betz limite göre, bir rüzgar türbininin rüzgardan çekebileceği maksimum güç, türbine gelen hava akımının kütle ve enerji korunumu kanunlarıyla ilişkilidir ve bu güç Eşitlik 2'de belirtildiği gibi rüzgarda mevcut bulunan gücün bir güç katsayısı ile çarpılmış halidir (Ragheb & Ragheb, 2011). Buna göre türbinden elde edilebilecek en fazla güç, rüzgarda mevcut bulunan gücün ancak %59,3'ü kadardır.

$$P_{max} = \frac{1}{2} \rho A U_{\infty}^3 C_{pmax} \quad [2]$$

Araştırmalara göre günümüzde rüzgar türbinlerinin, rüzgardan elde edebileceği güç katsayısı en fazla 0.5'e çok yakın olarak belirtilmiştir (Hansen, 2008). Bunun nedeni sistemdeki kayıplardan kaynaklanmaktadır. Bu kayıpların başlıcaları aerodinamik kayıplardır. Aerodinamik kayıplar rüzgar türbinlerinde, akış kopmaları, sınır tabakası ayrılması ve uç girdapları gibi çeşitli nedenlerden kaynaklanabilmektedir. Uç girdapları birçok aerodinamik sistemde ciddi performans kayıplarına neden olmaktadır. Literatürde sıkça uç girdabı oluşma mekanizmaları ve bu kayıpların olumsuz etkilerini azaltmak için birçok çalışma mevcuttur. Uç girdabının etkilerini azaltmak amacıyla, kanat ve kanatçık uçlarında pasif ve aktif akış kontrol

yöntemleri uygulanmaktadır. Bu yöntemlere ve etkilerine literatür özetinde detaylıca yer verilmiştir.

## 1.1 Literatür Özeti

Kanat uç girdapları, genel olarak kanat aerodinamiğini ve performansını olumsuz yönde etkileyen ve esas olarak kanadın oluşturduğu kaldırma kuvvetinin bir yan ürünü olarak ortaya çıkan akış olaylarıdır. Kaldırma kuvvetinin oluşmasını sağlayan kanat alt ve üst yüzeyleri arasındaki basınç farkı, kanat uçlarında havanın alt yüzeyden üst yüzeye doğru akmasına/sızmasına sebep olur. Bu sızma, kanat etrafından geçen ana hava akışı ile birleştiği zaman, kanat ucunda konsantre bir şekilde dönen girdap yapılarına sebebiyet verir.

Bu uç girdapları, çeşitli havacılık sistemlerinde farklı performans problemlerine yol açabilmektedir. Bu ana problemler şu şekilde özetlenebilir:

1) Ticari yolcu uçakları gibi kanat uzunluğu ve veteri büyük olan sistemlerde, oluşan yüksek kaldırma kuvvetinin bir sonucu olarak çok kuvvetli ve büyük uç girdapları oluşmaktadır. Bu güçlü girdaplar özellikle havaalanlarında birbiri ardı sıra kalkış-iniş yapan uçaklar üzerinde tehlikeli durumlara yol açabilmektedir. Bundan dolayı, güvenlik açısından, kalkan ve inen uçaklar arasındaki mesafe belli bir değerin altına düşürülmemekte ve bu da havaalanlarının kullanım kapasitesini azaltmaktadır. Dolayısı ile kanat uç girdaplarının, oluşan kaldırma kuvvetini etkilemeden kontrol edilebilmesi (hem büyüklük hem de güç açısından) önemli ve son senelerde üzerinde yoğunlukla çalışılan bir problemdir.

2) Helikopterlerde, rotor palleri tarafından oluşturulan uç girdaplarının arkadan takip eden pale çarpması, pal üzerinde zamana göre değişen (unsteady) basınç değişimlerine yol açmakta ve bu olay pallerin üzerinde hem dinamik yapısal yüklemelere hem de Pal-Girdap-Etkileşimi (Blade Vortex Interaction-BVI) gürültüsüne yol açmaktadır. Bu gürültü özellikle düşük hızlı alçalmalar ve manevralar sırasında ortaya çıkmaktadır. Bu problemlerin en aza indirgenebilmesi ve dolayısı ile daha sessiz ve güvenilir helikopterlerin yapılabilmesi, pal uç girdaplarının kontrol edilebilmesi ile mümkün olabilmektedir.

3) Son senelerde, özellikle minyatür elektronik teknolojisinin gelişmesi ile popüler hale gelen Mikro Hava Araçları (Micro Air Vehicles-MAV) aerodinamiğinde kanat uç girdaplarının etkisi çok önemli bir yer tutmaktadır. Bu hava araçlarının kanat açıklıkları genel olarak 15 cm'nin altında olmaktadır. Ayrıca kanat açıklığının kanat genişliğine oranı (aspect ratio) da genel olarak 1'e yakındır. Bu kanat özelliklerinden dolayı, yani kanatların kısa ve şekil olarak kareye yakın olmalarından dolayı, oluşan uç girdapları kanat performansını oldukça olumsuz yönde etkilemektedir. Dolayısı ile bu küçük sistemlerde de uç girdabı aerodinamiği ve kontrolü oldukça kritik bir hale gelmektedir.

4) Rüzgar türbinleri, yenilenebilir ve temiz enerji üretme araçları olmalarından dolayı, enerji üretim sektöründe son yıllarda oldukça önemli bir yer almaktadırlar. Bu araçların aerodinamik açıdan en önemli problemlerinden biri yine uç girdaplarıdır. Özellikle birçok rüzgar türbininin arka arkaya sıralandığı rüzgar türbini çiftliklerinde, oluşan uç girdaplarının arkadaki türbinlerle etkileşmesi performans kayıplarına yol açabilmektedir. Ayrıca bu uç girdaplarından dolayı oluşan gürültü de önemli çevre kirliliği yaratabilmektedir. Dolayısı ile uç girdabı kontrolü rüzgar türbin performansı açısından da önemli hale gelmektedir.

5) Uç girdaplarının performansı en çok etkilediği sistemlerden bir diğeri, gaz türbin motorlarındaki kompresör ve türbin rotor palleridir. Genel olarak rotor palleri ile motorun dış kabuğu (casing) arasında, pal uzunluğunun %1'i ile %3'ü arasında değişebilen bir boşluk olmaktadır, ve bu boşluktan dolayı pal uçlarında, basınç yüzeyinden emme yüzeyine bir sızma olmakta ve bu da uç girdaplarına sebebiyet vermektedir. Oluşan bu girdaplar, pal uç kısmındaki akışı domine etmekte ve kompresör ile türbinlerin basınç yükseltme/düşürme kapasitelerini, verimliliklerini ve çalışma kararlılıklarını olumsuz yönde etkilemektedir. Dolayısı ile bu turbomakinaların performans artırımı açısından en kritik problemlerden biri uç sızması ve girdaplarının aerodinamiği ve kontrolüdür.

Yukarıda bahsedilen farklı havacılık sistemlerindeki bu problemler, uç girdaplarının çeşitli yöntemler kullanılarak kontrol edilebilmeleri ile en aza indirgenebilir. Bu kontrol yöntemleri esas olarak pasif ve aktif yöntemler olarak ikiye ayrılabilir. Pasif yöntemler genelde uygulama açısından daha kolay olmalarına rağmen kontrol mekanizmasının istenildiği zaman, yani değişen akış koşullarında açılıp kapanamaz olması önemli bir dezavantaj oluşturur, ve değişen çalışma koşullarında sürekli aynı performansı verememektedirler. Aktif kontrol teknikleri ise, pasif tekniklerin tersine akış durumuna göre açılıp kapatılabilen sistemlerdir. Bu tekniklerin genel dezavantajı ise aktifliği sağlayabilmek için pasif sistemlere göre daha karmaşık mekanik sistemler gerektirmeleridir. Aktif kontrol sistemlerine örnek olarak ise kanat üzerinden emme ve/veya üfleme, kanat üstü fırlatma lüleleri (ejector nozzle), sentetik jetler, elektrostatik ve plazma yöntemleri, akustik etkileşim yöntemleri verilebilir.

Kanat uç girdaplarının kontrolü, yukarıda detayları verilen çeşitli aerodinamik problemleri en aza indirgeyebilmek ve genel olarak aerodinamik performansı artırabilme açısından son yıllarda üzerinde yoğunlukla çalışılmakta olan bir konudur. Bu girdapların kontrolü sayesinde, oluşturulabilen kaldırma kuvveti ve uçak kontrol yüzeyleri üzerindeki uçuş kontrol yükleri ve momentleri artırılabilir, sürüklenme kuvveti ve gürültü azaltılabilir (Gursul vd. (2007)). Uç girdap kontrolünde katı yüzeylerin hareketlendirilmeleri ile kontrol yapılabileceği gibi (örneğin kanat açıklığı boyunca hareketlendirilen Gurney flapları, Matalanis vd. (2007), aktif firar kenarı tablaları, Panagakos ve Lee (2006), kanat ucu flapları, Greenblatt vd. (2005), gibi daha



çok tercih edilen ve hareketli mekanik sistemlere göre daha az karmaşık olan kanat ucu enjeksiyon sistemleri ile kontrol de yapılabilmektedir. Akışa dik yönde veya açılı uç enjeksiyonu kullanılarak uç girdaplarının güçleri, yerleri ve iç bölge yapıları ile oynanabileceği Margaris ve Gursul (2004) tarafından gösterilmiştir.

Turbomakina akışları açısından da, uç girdabı kontrolü kritik bir önem taşımaktadır. Oluşan uç girdapları, pal uç kısmındaki akışı domine etmekte ve kompresör ile türbinlerin basınç yükseltme/düşürme kapasitelerini, verimliliklerini ve çalışma kararlılıklarını olumsuz yönde etkilemektedir ve bu etkiler literatürde gayet iyi bilinmektedir (Smith (1958), Wisler (1985), Bindon (1987), Cumpsty (1989), Heyes & Hudson (1993)). Dolayısı ile turbomakinalarda da uç sızması ve uç girdabı kontrolü, özellikle bu uygulamaların kompresör/türbin çalışma kararlılıkları açısından etkisi üzerinde yoğunlukla çalışılan konulardır (örneğin Bae vd. (2005), Lu vd. (2006), Nie vd. (2006), Geng vd. (2007)). Bu projede önerilen aktif uç enjeksiyonu yöntemi, düşük basınçlı türbin kaskat deney düzeneğinde de denenmiş ve %15'e kadar basınç kaybı azalması tespit edilmiştir (Mercan (2012), Mercan vd. (2012)).

Uç girdapları, helikopter rotorlarının aerodinamik ve aeroakustik özelliklerini belirlemede de önemli bir rol oynar. Helikopter rotorlarındaki uç girdaplarının etkisini azaltmak için önerilen yöntemlerden biri uç üflemesidir ve bu konu 1980'lerden beri araştırılmaktadır. Yapılan iki boyutlu deneysel ve sayısal çalışmalar ve üç boyutlu sayısal çalışmalar, uç üflemesinin uç girdaplarını kontrolünde etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. Uç jet üflemesi ile yüksek basınçlı havanın uç girdaplarının merkezlerine verilmesi, uç girdaplarının dönme hızı ve şiddetini azaltmakta ve uç girdaplarının difüzyonunu arttırmaktadır (Duraisamy ve Baeder (2004), Vasilescu (2004)). Bu konuda yapılan çalışmalardan birinde, rotor palinin hücum kenarına açılan deliklerden, palin uç veteri boyunca açılan deliklere doğru yüksek basınçlı hava akışı sağlanmıştır. Bu çalışmada, hover durumundaki helikopter için girdap dönme hızının %60 azaldığı ve girdap difüzyonunun ise 3 kat arttığı sonuçlarına varılmıştır (Han vd. (2004)). Uç girdaplarını kontrol etmede kullanılan bir diğer uç üfleme yöntemi de piezoelektrik uyarıcılar ile aktif kontrol sağlayan sentetik jet yöntemidir. Sayısal çalışmalar, rotor palinin %68'i ile %94'ü arasında, palin üst yüzeyine yerleştirilen sentetik jetlerin, uç girdaplarının gücünü %14 azalttığını göstermektedir (Liu vd. (2000)). Bir başka sayısal çalışmada, piezoelektrik uyarıcılarla kontrol edilen üfleme, iki farklı konfigürasyon için incelenmiştir. Birinci konfigürasyonda, rotor paline teğet verilen üflemenin, ikincisinde ise rotor palinin uç veterinin merkezinden verilen üflemenin uç girdabına etkileri araştırılmıştır. Ayrıca, her iki durum için üfleme, zamana bağlı kontrol edilebilen (unsteady modulated) ve zamana bağlı değişmeyen (steady) şekilde incelenmiştir. İki boyutlu ve üç boyutlu sayısal analizler, üflemenin uç girdabının rotorla etkileşimini azaltarak gürültüyü azalttığını, uç

girdabının yapısını bozarak uç girdabının gücünü azalttığını ve uç girdabının difüzyonunu arttırdığını ve bu etkilerin üfleme deliklerinin geometrisine bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Ayrıca zamana bağlı değişen ve kontrol edilebilen üflemenin, girdap dönme hızını %20 oranında düşürerek uç girdabının etkisini azaltmada daha etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Duraisamy ve Baeder (2004), Vasilescu (2004)).

Rüzgar enerjisi, yenilenebilir ve temiz olması nedeniyle günümüzün en hızlı gelişen enerji kaynaklarından biridir. Bu sebeple rüzgar türbinleri, enerji sektöründe önemli bir yere sahiptir. Yapılan araştırmalar, rüzgar türbini kanatlarında meydana gelen uç kayıplarının rüzgar türbinlerinin verimliliğini olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir. Kanat uç kayıpları, kanat alt ve üst yüzeyleri arasındaki basınç farkının kanat ucunda uç girdaplarına sebep olmasından dolayı oluşmaktadır (Shen vd. (2005), Bai vd. (2011)).

Rüzgar türbinlerinin aerodinamik performansını arttırmak için kanat uç girdaplarının kontrolü üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Kanat uçlarına eklenen V tipi kanatçıkların (V-type Mie vane) uç girdaplarının etkisini azalttığı ve rüzgar türbininin güç katsayısını %15'e kadar arttırdığı deneysel ve sayısal çalışmalarla kanıtlanmıştır (Shimizu vd. (1990), Shimizu et al (1995)). Ayrıca, V tipi kanatçıklarının küçük kanat açıklık oranına sahip rüzgar türbinlerinin aerodinamik performansı üzerinde daha etkili olduğu gözlemlenmiştir (Shimizu vd. (2003)). Rüzgar türbinlerinde uç girdaplarını kontrol etmek için kullanılan bir diğer yöntem de kanadın altına yerleştirilen üçgen şeklindeki girdap difüzörüdür. Girdap difüzörlerinin basınç katsayısını arttırdığı, uç girdabının etkisini azalttığı ve buna bağlı olarak türbin verimini artırıp gürültüyü azalttığı sayısal çalışmalarla gösterilmiştir (Bai vd. (2011)). Kanatçık (winglet) üzerine yapılan çalışmalarda, kanatçıkların rüzgar türbini gücünü en fazla %2.77 oranında arttırdığı ve bu artışın kanatçık yüksekliği, ok ve burkulma açıları ve eğrilik yarıçapına bağlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Johansen (2006)). Kanatçık ve V tipi Mie kanatçık verimlilikleri karşılaştırıldığında, V tipi kanatçıkların rüzgar türbininin güç katsayısını daha çok arttırdığı görülmüştür. Bunun nedeni, V tipi kanatçıkların uç girdaplarının etkisini azaltmasının yanı sıra rüzgar türbininin önünde halka girdabı yaratarak türbinden geçen birim zamandaki akış miktarını artırmasıdır. Her iki neden de rüzgar türbininin güç katsayısının artmasında etkilidir. Ayrıca, yapılan araştırmalarda pal ucuna kanatçık eklemenin veya pali kanatçık boyutunda uzatmanın rüzgar türbini uç girdabı etkisini azaltmada aynı derecede etkili oldukları görülmüştür (Gaunaa vd. (2007)).

Literatür araştırmasında rüzgar türbinleri uç girdaplarının pasif kontrolü üzerine yapılan çalışmalar yukarıda özetlenmiştir. Ancak literatürde rüzgar türbinleri uç girdaplarının aktif kontrolü ile ilgili yapılan deneysel ya da sayısal herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Yukarıda kısa bir literatür analizi şeklinde sunulan bu çalışmaların hepsinde uç girdabı kontrolü kanatçıkları yardımıyla pasif olarak yapılmıştır. Bu proje kapsamında önerilen ve çalışılması planlanan uç enjeksiyonunun rüzgar türbini pal uç girdaplarına etkileri literatürde incelenmiş bir konu değildir ve bu proje çerçevesinde yapılan deneyler ile bu boşluğun doldurulması planlanmaktadır.

## 1.2 Proje Kapsamında Planlanan ve Gerçekleştirilen Çalışmalar

Tablo 1. Proje aşamaları ve gerçekleştirilme durumları

<b><u>Proje Aşamaları</u></b>	<b><u>Gerçekleştirilme Durumu</u></b>
Rüzgar tüneli modifikasyonu, çalıştırılması, karakterizasyonu	Açık jet kesitli rüzgar tüneli detay tasarımı yapılmış, üretilmiş, kurulmuş ve başarıyla çalıştırılmıştır. Rüzgar tüneli jet çıkışındaki akış özellikleri sabit sıcaklıklı tel anemometresi ve pitot statik probu kullanılarak karakterize edilmiştir.
Model rüzgar türbini, enjeksiyon ve yükleme sistemi tasarımı, üretilmesi ve testleri	Model türbinin kanat uçlarından hava enjekte edebilmek için özel bir enjeksiyon sistemi ve enjeksiyon kanallarına sahip kanatlar ile yük ölçüm sistemi tasarlanmış, üretilmiş kurulmuş ve başarıyla çalıştırılmıştır.
Uç girdap kontrolü olmadan rüzgar türbini akış karakteristiğinin, yüklerinin belirlenmesi	Uç girdap kontrolü olmadan (baseline ya da referans testler) rüzgar türbini akış karakteristikleri ve yükleri belirlenmiştir.
Pal ucu kanatçıkları kontrol yöntemi uygulanarak türbini akış özelliklerinin, yüklerinin ve verimliliğinin incelenmesi	Pal ucu kanatçıkları kontrol yöntemi uygulanarak (Mie-vane ya da V-tipi kanatçık yöntemi) rüzgar türbini akış özellikleri, yükleri ve verimliliği başarıyla incelenmiştir.
Uç enjeksiyonu kontrol yöntemi uygulanarak türbini akış özelliklerinin, yüklerinin ve verimliliğinin incelenmesi	Uç enjeksiyonu kontrol yöntemi uygulanarak, üç farklı uç enjeksiyonu momentum oranında, rüzgar türbini akış özellikleri, yükleri ve verimliliği başarıyla incelenmiştir.

Toplanan verilerin analizi ve sonuçların karşılaştırılması	Referans, pal ucu kanatçıkları ve uç enjeksiyonu deneylerinden elde edilen veriler başarıyla analiz edilmiş ve sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.
--	--

## 2. GEREÇ VE YÖNTEM

### 2.1 Açık-jet Rüzgar Tüneli Tasarımı, Kurulumu ve Karakterizasyonu

#### 2.1.1 Mevcut Rüzgar Tünellerinin Uygunluğunun Değerlendirmesi

Proje kapsamında ilk olarak, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan, 90 kW gücünde fan ile sürülen ve üç-boyutlu bir hava alığına sahip rüzgar tünelinin (STWT2) arka kısmında kalan açık-jet test kısmının modifiye edilerek kullanılması düşünülmüştür (Şekil 1).



Şekil 1. Modifikasyonu planlanan STWT2 tüneli

Ancak bu tünelin açık-jet test kısmında yapılan karakterizasyon çalışmaları sonucunda, serbest-jet çıkış bölgesinin akış kalitesinin düşük, türbülans seviyelerinin ise beklenenin çok üstünde olduğu gözlemlenmiştir. Bu tünelde akış düzenleyiciler kullanılsa dahi istenen akış kalitesine ulaşılamayacağı ve proje kapsamında yapılması planlanan ölçümlerin kalitesini düşüreceği sonucuna varılmıştır. Dolayısıyla bu proje kapsamında bu tünelin kullanılmasından vazgeçilmiş, onaylanan proje başvurusunda olduğu gibi STWT1 tünelinin modifiye edilerek kullanılmasına karar verilmiş ve çalışmalar bu çerçevede yürütülmüştür.

STWT2 tüneline yapılan karakterizasyon çalışmalarından elde edilen sonuçlar ve tecrübe doğrultusunda, yine Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan STWT1 tünelinin (Şekil 2) fan kısmının arkasında bir serbest-jet test düzeneği oluşturmak amacı ile yeni bir difüzör ve akış düzenleyici sistem tasarlanmış, analizleri yapılmış ve gerekli üretim

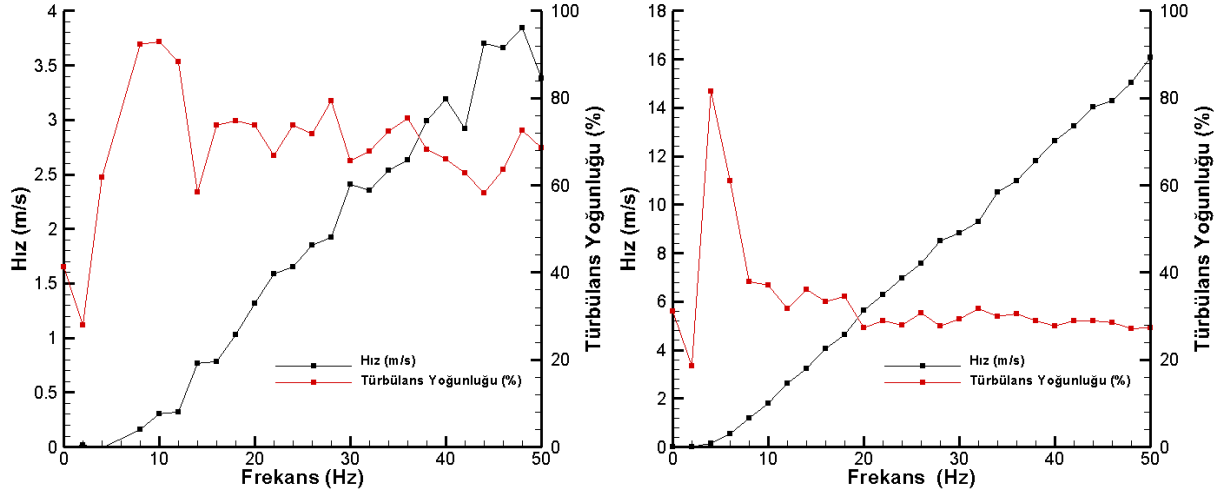
ve temin süreçleri tamamlanmıştır. Yeni plan çerçevesinde yapılan tasarım aşamaları aşağıda sıralanmıştır:

- STWT1 fan kısmının hemen çıkışında sabit sıcaklıklı tel anemometresi ile ön karakterizasyon ölçümlerinin yapılması
- Akış düzenleyici sistem tasarımının yapılması
- Yeni difüzörün geometrisinin (genişleme açısı ve uzunluk) belirlenmesi için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri yapılması
- Tünelin ön tasarım çizimlerinin oluşturulması, üretim ve temin süreçlerinin başlatılması



Şekil 2. STWT1 tünelinin görünümü

Şekil 2’de gösterilen tünelin fan bölgesinin hemen çıkışında sabit sıcaklıklı tel anemometresi kullanılarak iki farklı noktada ölçümler alınmıştır. Bunlardan birincisi fan kesit alanı ortası, diğeri ise fan pal boyu ortasına denk gelen noktalardır. Ölçümler 5 kHz ölçüm örnekleme hızında ve her noktada 20 saniye boyunca alınmıştır. Şekil 3’te yapılan ölçümlerin sonuçları gösterilmektedir. Bu şekilde ölçüm noktalarındaki hız ve türbülans yoğunluğu değerleri farklı fan dönüş hızlarına göre sunulmaktadır.



Şekil 3. STWT1 tünelinin fan arkasından sabit sıcaklıklı tel anemometresi ile alınan ölçümler, fan kesit alanının ortası (sol), fan pallerinin orta noktası (sağ)

Şekil 3'te sağ figürde gösterilen ölçümler fan pallerinin orta noktasından alınmıştır. Türbülans yoğunluğu, motor çalışma frekansı 8 ile 50 arasında iken bütün çıkış hızları için %30 civarında seyrettiği görülmüştür.

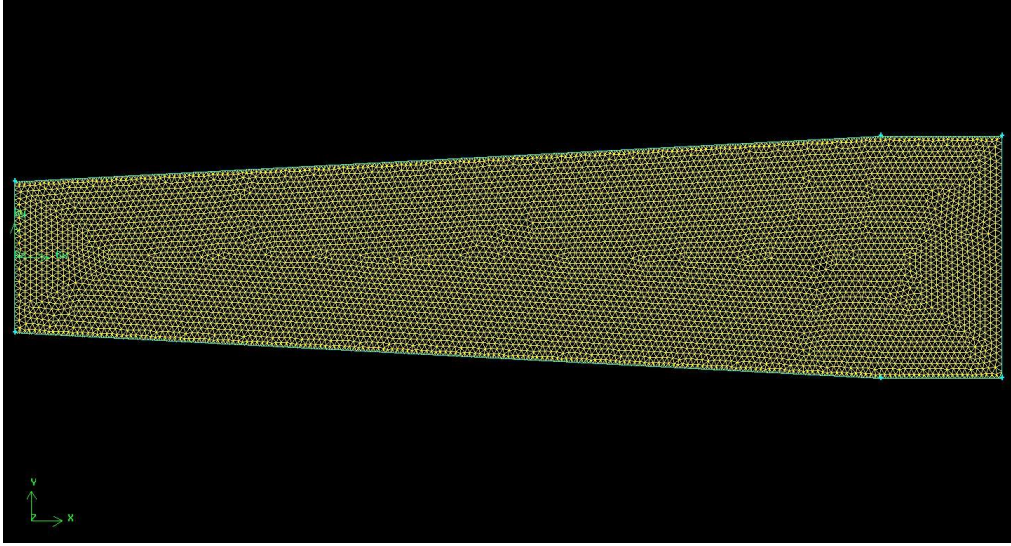
Yapılan çalışmalar sonucunda STWT1 tünelinin fan performansının daha kabul edilebilir olduğu gözlemlenmiş, hiçbir akış düzenleyici veya difüzör olmadan hemen fan arkasında dahi makul seviyelerde türbülans seviyesi olduğu ve akış hızının stabil ve lineer şekilde arttığı bulunmuştur. Dolayısı ile benzer bir fan kullanılarak uygun difüzör ve akış düzenleyiciler ile akış kalitesi yüksek bir açık-jet rüzgar tüneli test düzeneği kurulması mümkün gözükümüştür.

### 2.1.2 Yeni Açık-Jet Rüzgar Tüneli Tasarımı ve Kurulumu

Yukarıda detayları verilen, mevcut rüzgar tünellerinin kullanımı ile ilgili uygunluk çalışması sonucunda STWT1 tünelinin fanına benzer bir fan kullanan yeni bir açık-jet rüzgar tünelinin tasarım süreci başlatılmıştır. Bu projede kullanılacak olan model türbinin çapı yaklaşık 1 m olarak öngörülmüştür, dolayısıyla 2 m çaplı serbest-jet tünelinin kullanılmasının ölçüm güvenilirliği açısından daha uygun olacağı değerlendirilmiştir. Yeni tünel, çapı 1.25 m'den 2 m'ye değişen daire kesitli bir difüzör ve içerisinde akış düzenleyicilerin bulunacağı daire kesitli modüler bir düz kısımda oluşmaktadır. Akış düzenleyiciler yani bal peteği ve perde tasarımları ve pozisyonları proje kapsamında belirlenen tasarım kriterleri çerçevesinde seçilmiş ve temin edilmiştir.

Tasarlanan difüzörün genişleme açısının doğru olarak belirlenebilmesi için 2-Boyutlu (2B) HAD analizleri yapılmıştır. Teorik olarak akış kopmalarının yaşanmaması için genişleme açısı en fazla 7 derece olabilir. HAD analizleri sırasıyla 3, 4, 5 ve 6 derece genişleme açısı

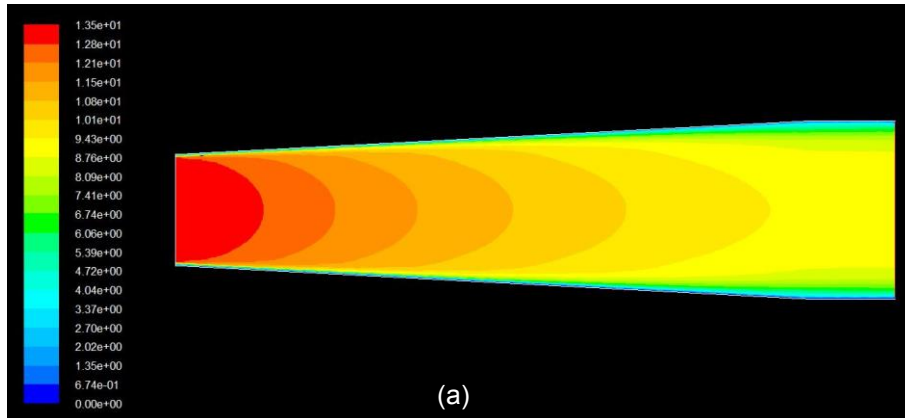
için yapılmıştır. Bu amaçla yapılan HAD analizlerinde düzensiz ağ yapısı kullanılmıştır (Şekil 4). Düzensiz ağ yapısı oluşturulurken hücre büyüme oranı 1.2 olarak alınmıştır. Giriş sınır koşulu olarak kütle girişi kullanılmış olup, kullanılan veri fan performans eğrisinden elde edilmiştir. Çıkış sınır koşulu olarak da basınç çıkışı bilgisi kullanılmış olup, bu değer Ankara bölgesi için hesaplanmıştır. HAD çözümlerinde akışkanın yoğunluğu ve sıcaklığı yine Ankara bölgesi referans alınarak hesaplanmıştır.



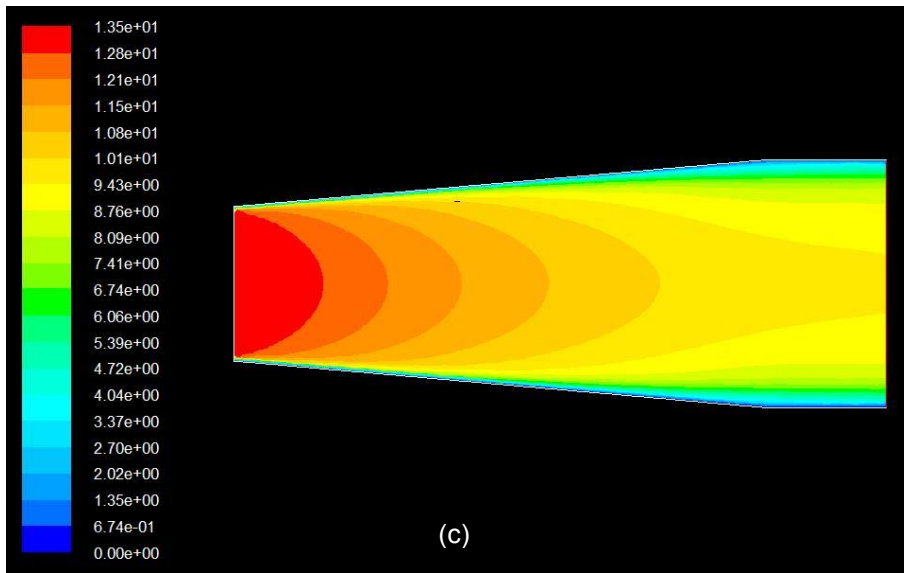
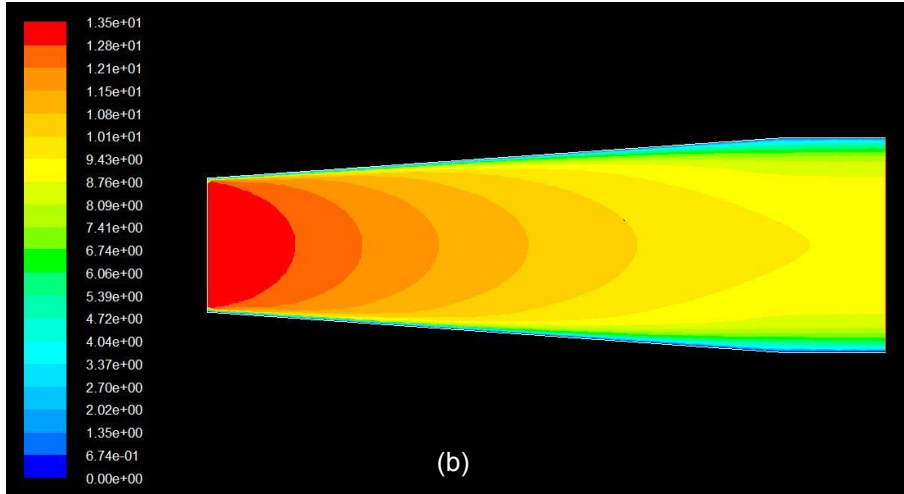
Şekil 4. Açık-jet rüzgar tüneli difüzör kesiti için yapılan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizi için hazırlanan düzensiz ağ yapısı

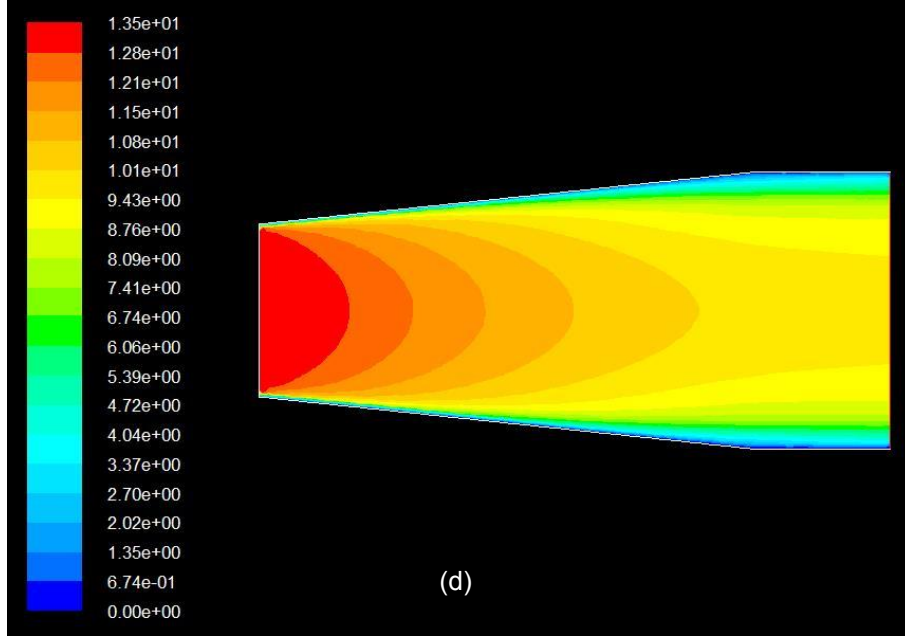
Yapılan HAD analizlerinde, 2 boyutlu zamandan bağımsız çözümler üretilmiştir. Çözüm metodu olarak akış yönünde ikinci dereceden çözüm metodu kullanılmış olup, türbülans modeli olarak Spalart-Almaras modeli kullanılmıştır.

Şekil 5'te gösterilen sonuçlara bakıldığında, özellikle 5 ve 6 derecelik genişleme açılarında akış kopmaları ihtimali olacağı öngörülmektedir.









Şekil 5. Açık-jet rüzgar tüneli için farklı genişleme açılarında yapılan 2-Boyutlu HAD analizleri (a) 3 derece, (b) 4 derece, (c) 5 derece, (d) 6 derece

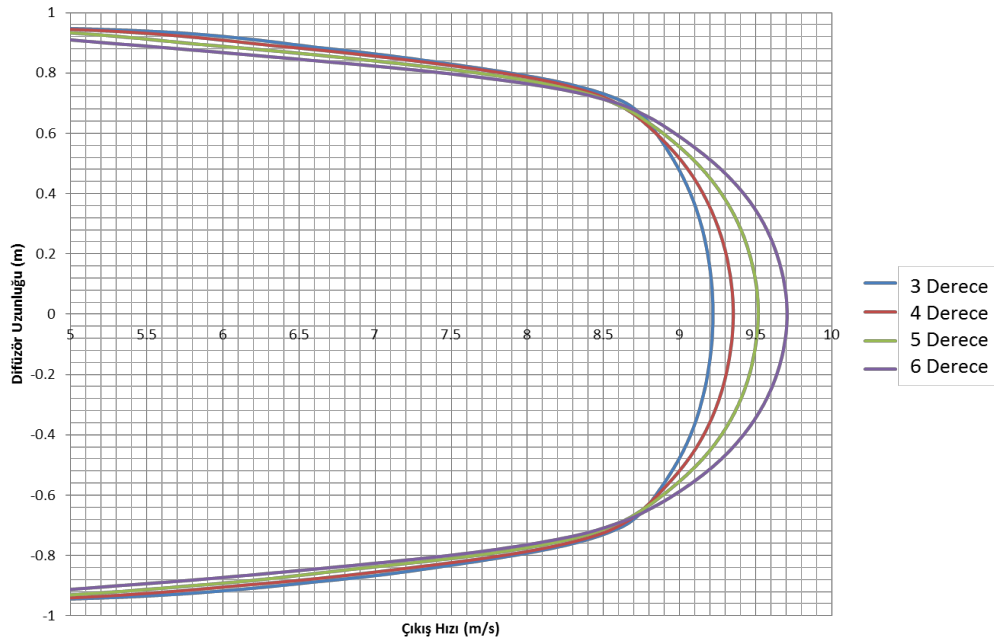
Difüzör bölümündeki genişleme açısı tünelin toplam boyunu da etkilemektedir. Mevcut hangar binasının konum planı ele alındığında tünelin toplam uzunluğu da önem kazanmaktadır. Tablo 2’de farklı difüzör genişleme açlarına göre tünel boyu uzunlukları gösterilmektedir. Mevcut hangar binasında yeni serbest-jet tüneli için 12 metre uzunluğunda yer ayrılabilir.

Tablo 2. Farklı difüzör genişleme açıları için toplam tünel boyu uzunlukları

Difüzör genişleme açısı (derece)	Tünel uzunluğu (m)
3	7.16
4	5.36
5	4.29
6	3.57

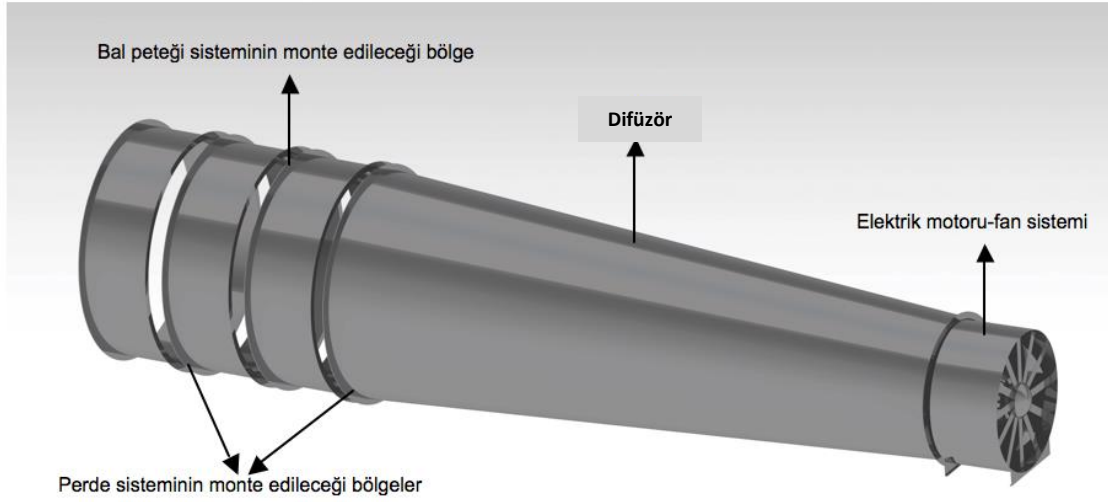
Şekil 6’da tünelin çıkış kısmında HAD analizleri sonucu elde edilen hız profilleri gösterilmiştir. Buna göre 3 ve 4 derece genişleme açılarındaki akış kalitesi kabul edilebilir seviyede olup, akış düzenleyiciler de sisteme eklendiğinde yeterli genişlikte üniform bir akış bölgesi oluşturulabileceği öngörülmüştür. Özellikle model türbinin yerleştirileceği kısımdaki akış kalitesi göz önüne alınarak difüzör genişleme açısının 3 derece olmasına karar verilmiştir.

Toplam tünel uzunluğu da 7.16 m olarak hesaplanmış olup, bu durum mevcut bina düzeninde bir sorun teşkil etmemektedir.



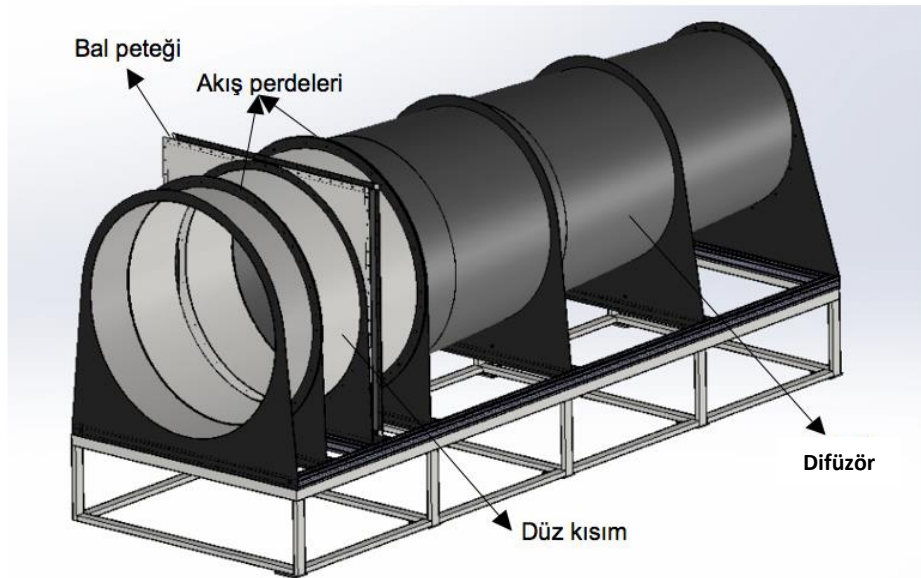
Şekil 6. Farklı difüzör genişleme açılarında HAD analizleri sonucunda tünel çıkışında elde edilen hız dağılımları

Tünelin difüzör ve düz bölgesinin ön tasarımının mühendislik çizimleri 3 derecelik genişleme açısı göz önüne alınarak hazırlanmıştır. Ön tasarım iki ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm 1.25 m çapındaki fan çıkışından 2 m'lik dairesel kesite genişleyen genişleme bölgesidir. İkinci bölüm akış düzenleyicilerin yerleştirileceği düz kısımdır. Tünelin yapısal olarak daha güçlü olması ve akış düzenleyici sistemlerin daha rahat monte edilebilmesi için düz kısım üç benzer parçadan oluşmaktadır. Yapılan akış düzenleyici seçimi çalışmalarının sonucunda genişleme kısmı ve düz kısmın birleştiği noktaya bir adet akış perdesi yerleştirilmiştir. Perdenin 0.3 m arkasına ise bir bal peteği yapı yerleştirilmiş, en son olarak da akışın istenilen düzenliliğe getirilebilmesi için bal peteği yapının 0.3 m arkasına ikinci ve daha sık bir perde daha yerleştirilmiştir. Perdeler ve balpeteği alüminyumdan üretilmiş, tünelin taşıyıcı yapısı ise sigma profillerle oluşturulmuştur. Ön tasarımın 3 boyutlu çizimleri Şekil 7'de gösterilmiştir.

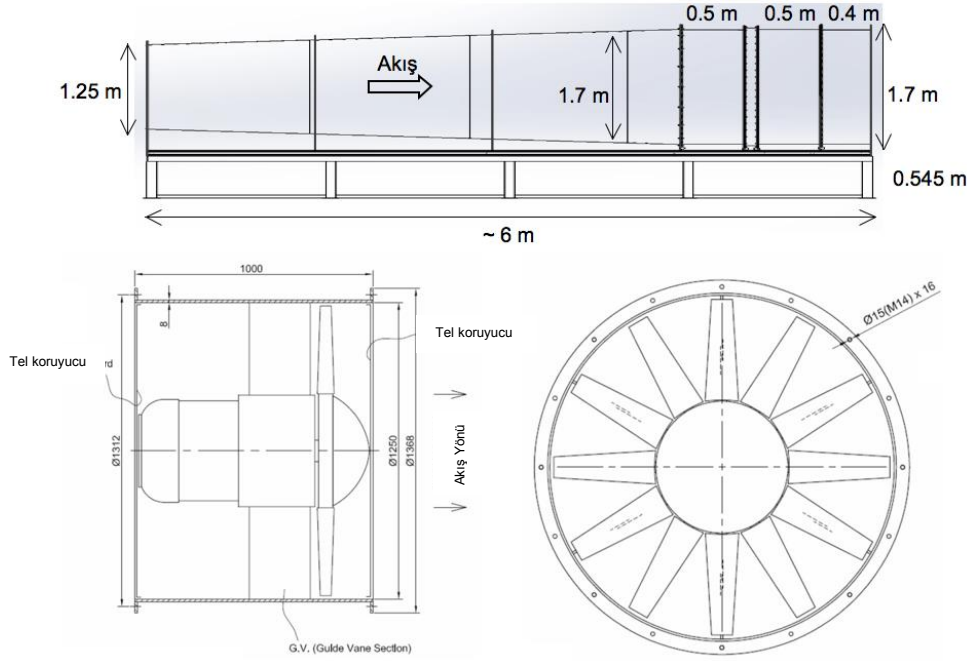


Şekil 7. Ön tasarımı yapılan açık-jet rüzgar tünelinin üç boyutlu çizimleri

Üretim aşamasında, açık jet test düzeneğinde 4.3 m uzunluğunda, giriş alanı 1.25 m ve çıkış alanı 1.7 m olan difüzör kullanılmıştır. Çıkış alanının 1.7 m seçilmesinin nedeni yapısal kısıtlamalar ve akış düzenleyicilerin tek parça üretim boyutlarının sınırlı olmasından kaynaklanmıştır. Difüzör kısmından sonra 1.4 m olan ve üç parçadan oluşan düz kısım gelmektedir. Bu kısmın üç parçadan yapılmasının sebebi, akış düzenleyicilere bakım yapılma kolaylığının artırılmak istenmesidir. Açık jet çıkışındaki akış kalitesini arttırmak ve olabildiğince üniform bir akış elde etmek için akış düzenleyiciler (1 adet bal peteği ve 2 adet akış perdesi) kullanılmıştır. Rüzgar tünelinin toplam uzunluğu yaklaşık olarak 7 m'dir. Şekil 8'de detay tasarımı yapılan açık jet rüzgar tünelinin üç boyutlu üretim katı modeli gösterilmiştir.



Şekil 8. Açık jet rüzgar tünelinin üç boyutlu üretim katı modeli



Şekil 9. Açık jet rüzgar tünelinin yandan görünüşü (üst), kullanılan fan sistemi (alt)

Tablo 3. Açık-jet rüzgar tünelinin detaylı ölçülendirmeleri ve diğer özellikleri

Kısım	Ölçüler (m)	Özellikler
Fan	1.25 x 1.25 x 1	Eksenel fan, 45 kW güç
Difüzör	$D_{giriş} = 1.25$ m $D_{çıkış} = 1.7$ m Uzunluk = 4.5 m	Difüzyon açısı = 3 derece
Düz kısım 1	$D = 1.7$ m Uzunluk = 0.5 m	
Düz kısım 2	$D = 1.7$ m Uzunluk = 0.5 m	
Düz kısım 3	$D = 1.7$ m Uzunluk = 0.4 m	
Akış perdesi 1 (iri aralıklı)		Difüzör çıkışına yerleştirilmiştir
Bal peteği		Düz kısım 1'in çıkışına yerleştirilmiştir.
Akış perdesi 2 (küçük aralıklı)		Düz kısım 2'nin sonuna yerleştirilmiştir.





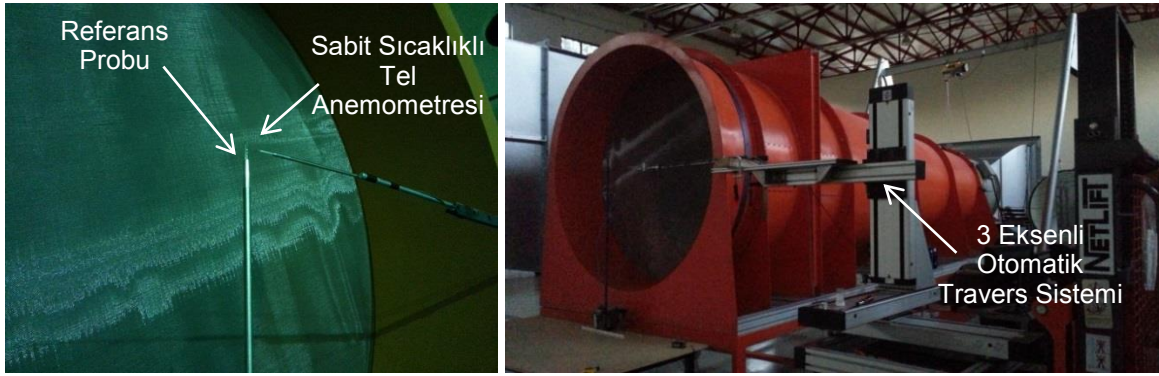
Şekil 10. Üretilen açık jet rüzgar tüneli resimleri

Şekil 9'da tünelin yandan görünüşü ve ölçülendirmeleri ve kullanılan fanın detayları gösterilmiştir. Tablo 3'te ise tasarımı yapılan tünelin detayları verilmektedir. Şekil 10'da üretilen açık jet rüzgar tünelinin resimleri gösterilmiştir.

### 2.1.3 Açık-jet Rüzgar Tüneli Karakterizasyonu

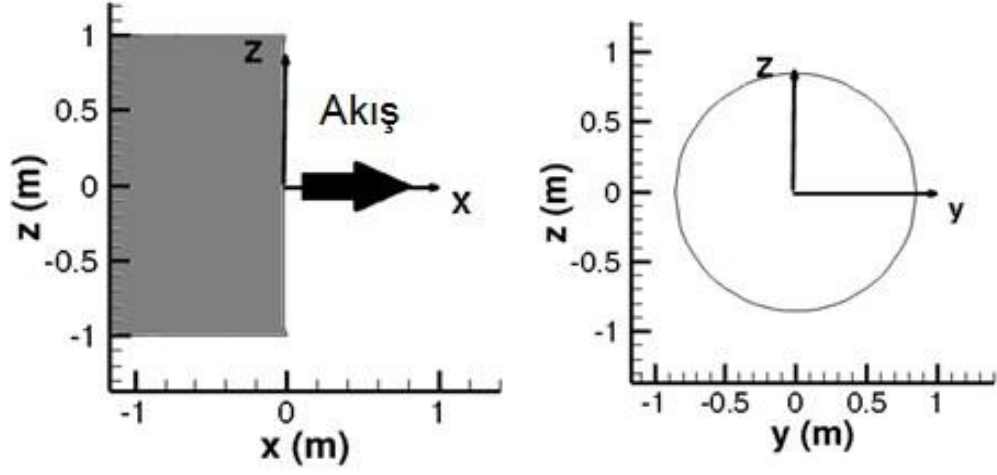
Açık jet çıkışında ortalama akış hızı ve türbülans yoğunluğu (turbulence intensity, TI) ölçümleri yapılmıştır. Bahsi geçen ölçümlerin yapılabilmesi için tek eksenli sabit sıcaklıklı tel

anemometresi kullanılmıştır. Ölçümlerin güvenilirliğini arttırabilmek için her testten önce anemometre kalibrasyonu yapılmıştır. Sabit sıcaklıklı tel anemometresi kalibrasyonu için Dantec firması tarafından kalibre edilmiş referans hız probu kullanılmıştır. Kalibrasyon ölçümleri, ODTÜ-RÜZGEM bünyesinde bulunan düşük hızlı emme tipi rüzgar tüneline gerçekleştirilmiştir. Sabit sıcaklıklı tel anemometresi kalibrasyon verisi elde edildikten sonra açık jet çıkışında ortalama akış hızı ve türbülans yoğunluğu ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler tünel çıkışında hem yatay ekseninde hem de dikey ekseninde, tünel duvarından başlayarak tünel çıkış kesit alanının merkezine kadar yapılmıştır. Anemometre hareketi 3 eksenli otomatik travers sistemi yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Ölçümler iki farklı çıkış hızında (6 m/s ve 8 m/s) yapılmıştır. Şekil 11'de sabit sıcaklıklı tel anemometresinin konumu gösterilmektedir.

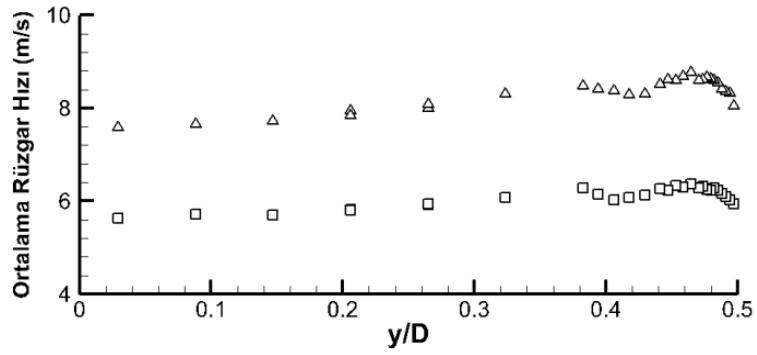


Şekil 11. Açık-jet rüzgar tüneline karakterizasyonu

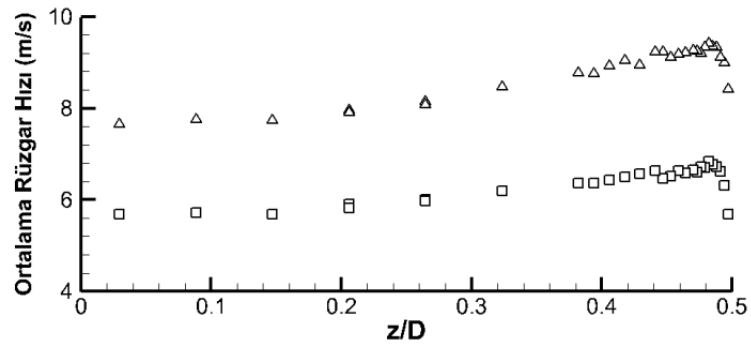
Ölçümler hem yatay hem de dikey ekseninde tünel duvarından başlayarak çıkış alanının merkezine kadar yapılmış, sınır tabakasında ise sınır tabakasının daha iyi çözümlenmesi için daha küçük aralıklarla ölçüm alınmıştır. Ölçümlerin alındığı koordinat sistemi Şekil 12'de tanımlanmış ve bu raporda sunulan bütün grafikler bu koordinat sistemine göre sunulmuştur.



Şekil 12. Rüzgar tüneli karakterizasyonu ve referans ölçümler için belirlenen koordinat sistemi

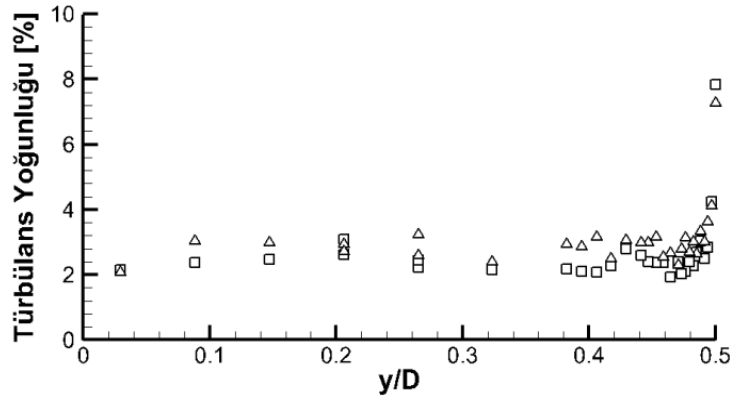


(a)

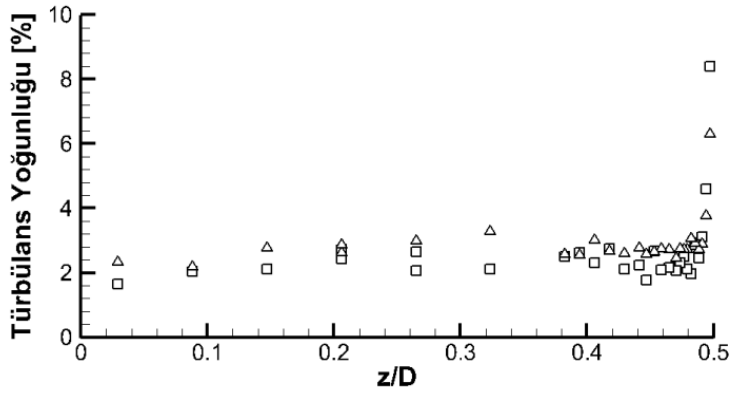


(b)





(c)



(d)

Şekil 13. 6 m/s ve 8 m/s jet çıkışı hızları için tünel karakterizasyonu sonuçları. (a) Yatay ekseninde ortalama rüzgar hızı. (b) Dikey ekseninde ortalama rüzgar hızı. (c) Yatay ekseninde türbülans yoğunluğu. (d) Dikey ekseninde türbülans yoğunluğu.

Sonuçlarda (Şekil 13) jet çıkışında akışın, özellikle 1 m çaplı model türbin testlerinin yapılacağı  $0 < y/D < 0.3$  ve  $0 < z/D < 0.3$  aralığında oldukça üniform olduğu, sınır tabakası kalınlığının 7 mm'nin altında (tünel çapının %0.4'ü), ve türbülans yoğunluğunun da %2.5 civarında olduğu görülmektedir.

## 2.2 Uç Girdabı Kontrollü Yatay Eksenli Rüzgar Türbini Tasarımı ve Kurulumu

Proje kapsamında kullanılacak olan model türbin sisteminin NTNU (Norwegian University of Science and Technology) tarafından tasarlanan ve testlerde kullanılan model türbin ile benzer bir rotor geometrisine sahip olmasına karar verilmiştir. Bahsi geçen bu türbinde pal uçlarından enjeksiyon yapılabilmesi için NTNU üniversitesinde kullanılan türbin baz alınarak yeni model türbinin pal, rotor göbeği ve nasel tasarlanmış, ve türbine uygun olarak yükölçer, torkmetre ve elektrik motoru seçimleri yapılmıştır.

## 2.2.1 Referans (Baseline) Rotor Tasarımı

### NTNU Rotoru

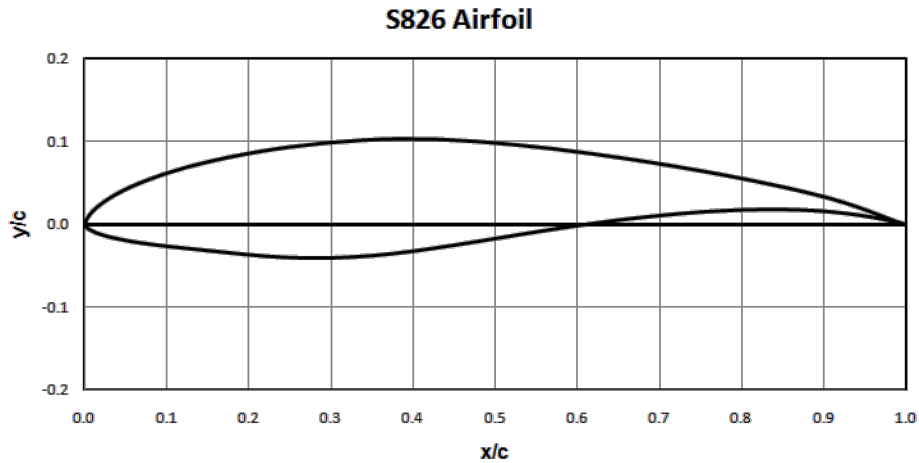
Referans rotor tasarımında, rotor geometrisi Şekil 14'te verilen ve NTNU üniversitesinde kullanılan model türbini temel alınmıştır. Model türbin 0.9 m çapında rotora ve 0.09 m çapında rotor göbeğine sahiptir.



Şekil 14. NTNU Model türbini (Blomhoff, 2012)

### NREL S826 Kanat Profili

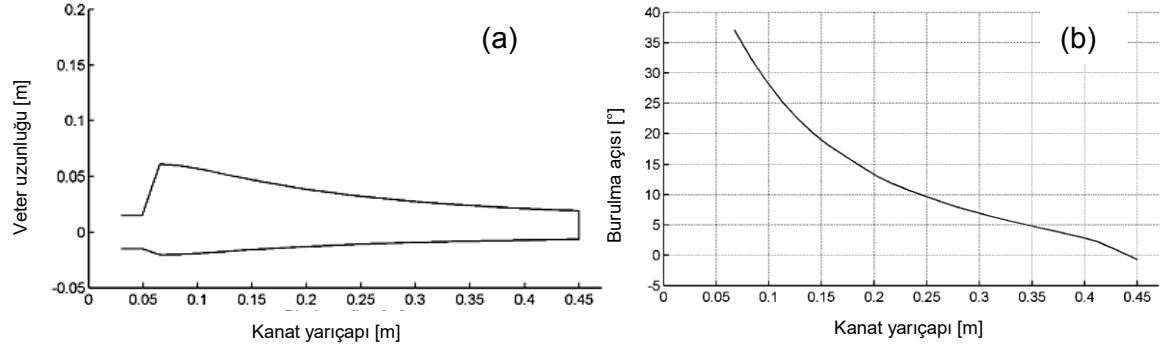
Bahsi geçen rotor NREL S826 kanat profili geometrisine sahiptir (Şekil 15). Bu profil maksimum %14 kalınlığa sahiptir ve rüzgar türbinlerinde uç kanat profili olarak kullanılmak üzere tasarlanmıştır (Somers, 2005).



Şekil 15. NREL S826 kanat profili (Somers, 2005)

### Veter ve Burulma Açısı Dağılımı

Geometrisi temel alınan rotor pali, kanat açıklığı boyunca değişken veter boyu ve burulma açısına sahiptir. Aşağıdaki tabloda ve Şekil 16'da temel alınan rotor pali geometrisinin kanat açıklığı boyunca veter ve burulma açısının dağılımı verilmiştir.



Şekil 16. Kanat açıklığı boyunca (a) veter, (b) burulma açısı dağılımı (Karlsen, 2009)

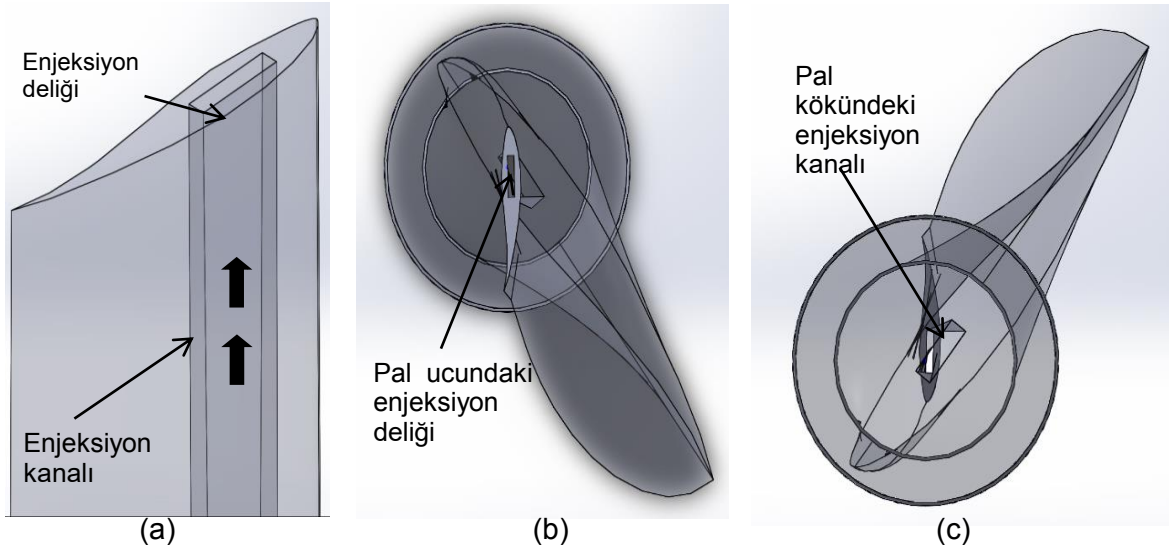
Tablo 4: Kanat açıklığı boyunca veter ve burulma açısı dağılımı (Karlsen, 2009)

Yarıçap (m)	Veter (m)	Burulma Açısı [°]
0.0075000	0.013500	120.00
0.022500	0.013500	120.00
0.049000	0.013500	120.00
0.055000	0.049500	38.000
0.067500	0.081433	37.055
0.082500	0.080111	32.544
0.097500	0.077012	28.677
0.11250	0.073126	25.262
0.12750	0.069008	22.430
0.14250	0.064952	19.988
0.15750	0.061102	18.034
0.17250	0.057520	16.349
0.18750	0.054223	14.663
0.20250	0.051204	13.067
0.21750	0.048447	11.829
0.23250	0.045931	10.753
0.24750	0.043632	9.8177
0.26250	0.041529	8.8827
0.27750	0.039601	7.9877
0.29250	0.037831	7.2527
0.30750	0.036201	6.5650
0.32250	0.034697	5.9187
0.33750	0.033306	5.3045
0.35250	0.032017	4.7185
0.36750	0.030819	4.1316
0.38250	0.029704	3.5439
0.39750	0.028664	2.9433
0.41250	0.027691	2.2185
0.42750	0.026780	1.0970
0.44250	0.025926	-0.7167

## 2.2.2 Uç enjeksiyon sistemi ve nasel tasarımı

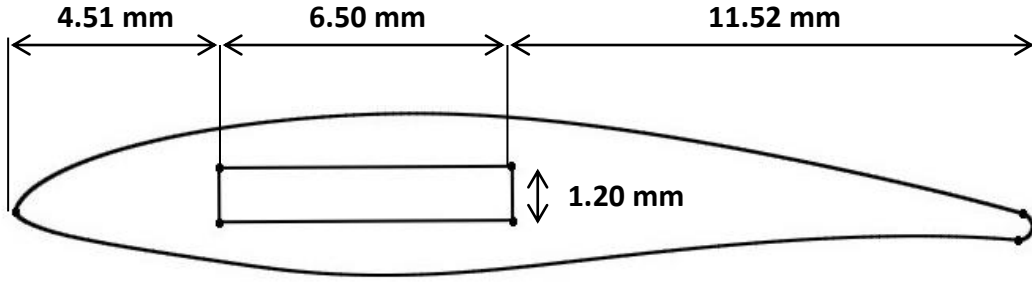
### Uç enjeksiyonlu kanatlar

Proje kapsamında kullanılacak olan referans türbinden uç enjeksiyonu yapabilmek için, rotor pal geometrisi uygun şekilde modifiye edilmiş ve tasarlanmıştır. Uç enjeksiyonu yapabilmek için kanatlara boydan boya basınçlı havanın geçebileceği hava kanalları açılmıştır. Kanat geometrisinin kompleks ve veterin pal ucunda 2.6 cm ve maksimum kalınlığının 0.36 cm olması nedeniyle kanat boyunca dikdörtgen tek bir hava kanalı açılabilmiştir. Tasarlanan hava kanallı paller Şekil 17'de gösterilmiştir.



Şekil 17. Uç enjeksiyon kanallarına sahip kanat geometrisi

İlk kanatlar Almanya'da "Microwave sintering of aluminum alloys" üretim tekniğiyle ürettirilmiş ancak palın kanat profilinde ciddi geometrik sapmalar tespit edilmiştir dolayısıyla bu yöntemden vazgeçilmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda kanatların üretim hassasiyeti ve hızı bakımından pallerin 3D hızlı protipleme makineleri kullanılarak ABS plastikten tek parça halinde katı modele uygun olarak ürettirilmiştir. Kanatların geometrisi üretim tekniği hassasiyetinden dolayı değiştirilmiştir. Kanadın firar kenarı pal boyunca firar kenarının en küçük boyutu 0.6 mm'nin altına düşmeyecek şekilde yuvarlatılmış ve bu şekilde ürettirilmiştir (Şekil 18 ve Şekil 19). Bu geometrisel değişiklik pal ucu veterininde %25'lik bir kısalmaya neden olmuştur.



Şekil 18. Rotor pali üretimi katı modeli



Şekil 19. Hızlı prototipleme ile ABS plastikten üretilen rotor pali

Ancak daha sonra yapılan deneylerde plastik kanatların malzemeden kaynaklanan zayıflıkları olduğu ortaya çıkmıştır. Kanatlar yüksek rüzgar hızlarında ve rotor dönüş hızlarında tehlikeli derecede esnemekte ve titremektedirler. Bu nedenden dolayı özellikle yük ölçümlerinde yüksek hızlara çıkılamamıştır. Plastik kanatlar ile ilgili esneklik sıkıntılarını gidermek için kanatları metalden üretebilecek bir firma araştırılmış ve Belçika'da LayerWise isimli şirketle irtibata geçilmiştir. Kanatlar TI-Grade 6 titanyum alaşımından metal sinterleme yöntemi kullanılarak  $\pm 0.4$  mm (Şekil 20). Ayrıca rotor göbek bağlantısı açısından metal kanatlarda kök kısmında enjeksiyon kanalı yuvarlak olacak şekilde değiştirilmiştir. Bu kanatların üretim hassasiyeti plastik kanatlara göre daha yüksek olduğundan kanadın firar kenarı üretim kolaylığı açısından 0.4 mm çapta yuvarlanmıştır. Dolayısıyla özellikle kanat ucunda meydana gelen ve üretim hassasiyeti kısıtlaması nedeniyle 0.6 mm'ye yuvarlanan plastik kanatların aksine metal kanatların uç veter boyu plastik olanlara göre ortalama %6 daha uzundur. Kanat kökü bağlantı noktasında da üretim ile ilgili ufak farklılıklardan dolayı metal rotor çapı plastik rotor çapından %0.3 kısa olmuştur. Metal kanatlar Şekil 20'de gösterilmiştir.

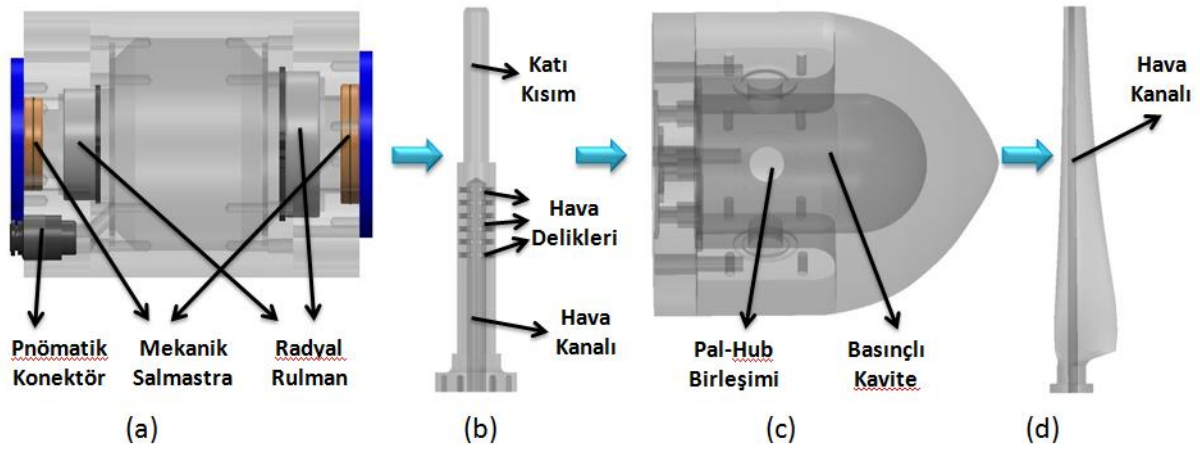


Şekil 20. Metal kanatlar

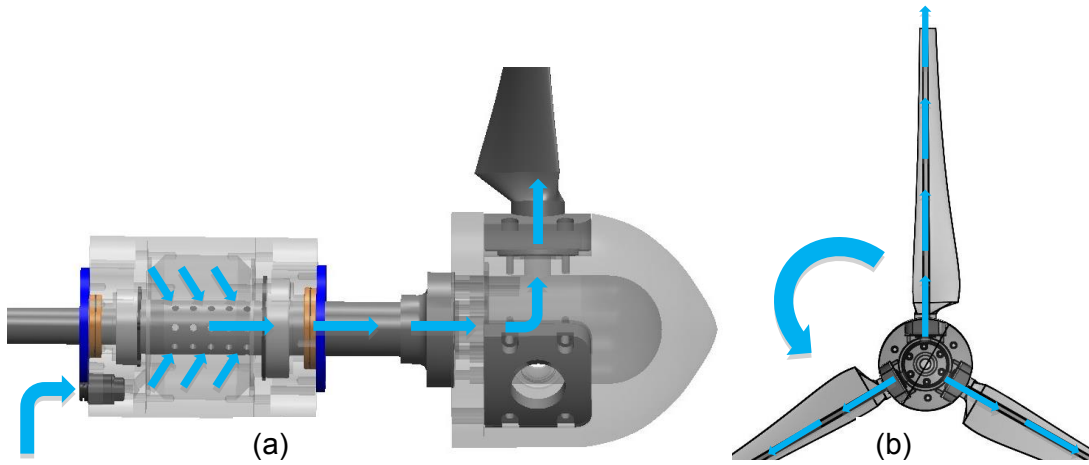
### Basıncılı hava transfer sistemi

Pal uçlarından enjeksiyon yapabilmek için, sabit yapıdan dönen yapıya basınçlı hava transferini iletecek bir sisteme ihtiyaç duyulmuştur. Yapılan ilk tasarımda, uç enjeksiyonunda kullanılacak olan basınçlı hava akışı şaft boyunca sağlanacak, böylece basınçlı hava türbinin göbek bölgesini izleyerek kanat uçlarına ulaşması planlanmıştır. Ancak yapılan piyasa araştırmalarında içi boş olan ya da içinden basınçlı hava geçen bir şaftın üzerindeki torku ölçen uygun bir torkmetre bulunmaması nedeniyle bu tasarımdan vazgeçilmiş ve ayrı bir basınçlı bölmeye sahip yeni bir tasarıma gidilmiştir. Yapılan iterasyonel çalışmalar neticesinde tasarım en genel hatlarıyla bir basınçlı oda, basınçlı odanın içine yerleşecek iki bölmeli delikli ve içi boş bir şaft, basınçlı rotor göbeği ve enjeksiyon kanallarına sahip kanat pallerinden oluşmasına karar verilmiştir. Basınçlı hava transfer parçaları ve çalışma prensibi Şekil 21 ve Şekil 22'de verilmiştir.





Şekil 21. (a) Basıncı oda, (b) delikli şaft, (c) basınçlı rotor göbeği, (d) hava kanallı rotor pali

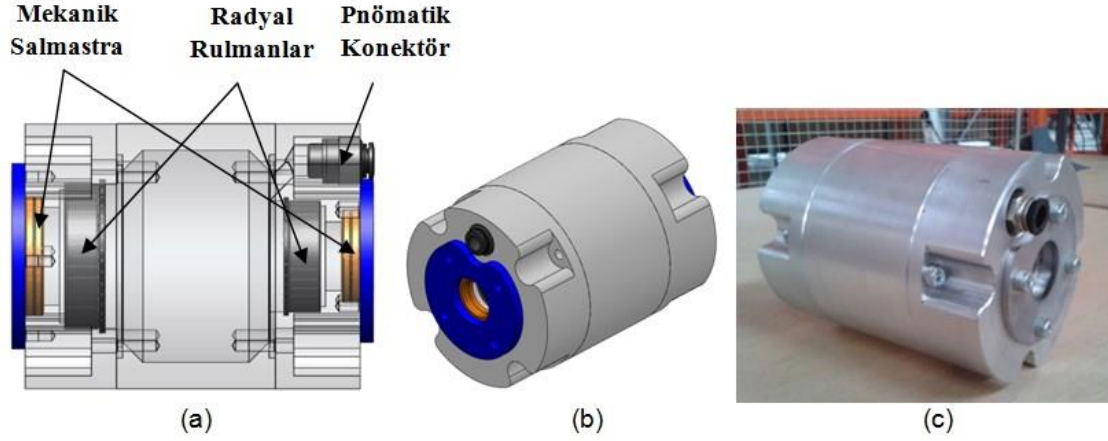


Şekil 22. Basıncı hava transferi şeması (a) Basıncı oda ve hub, (b) hub ve kanatlar

#### Basıncı oda:

Naselin içerisindeki parçaları basınç yüzünden oluşabilecek herhangi bir etkiden korumak, nasele ve nasele içerisinde bulunan parçalara erişilebilirliği arttırmak ve basınçlı havanın dönen şafttan pal göbeği ve kanatlara daha az kayıpla ve daha sağlıklı bir şekilde aktarılabilmesini sağlamak amacıyla sistem için, pal göbeği ve torkmetre üzerindeki şaftta oturacak şekilde bağımsız bir basınç odası tasarlanmıştır. Şekil 23'te gösterilen basınçlı oda naselden bağımsız ve pal göbeği ve torkmetre arasındaki iki parçalı şaftın delikli kısmı üzerine oturacak şekilde ve şaftın iki parçalı yapısına uygun olarak tasarlanmıştır. Basıncı odanın bir tarafı 20mm iken diğer tarafı 35mm olarak tasarlanmıştır. Basıncı odanın şaftı üzerine düzgün oturabilmesi ve şaftın basınçlı oda içinde sürtünmeyi en aza indirerek dönebilmesi ayrıca basınçlı odaya entegre edilen mekanik salmastraların bu odanın ağırlığından dolayı deforme olmaması için, basınçlı oda içerisine iki adet radyal rulman eklenmiştir. Basıncı odanın içerisine hava 5mm'lik pnömatik konektör yardımıyla iletilmektedir. Basıncı oda; rulmanlara, mekanik salmastralara ve pnömatik konektöre ulaşımı sağlamak açısından üç

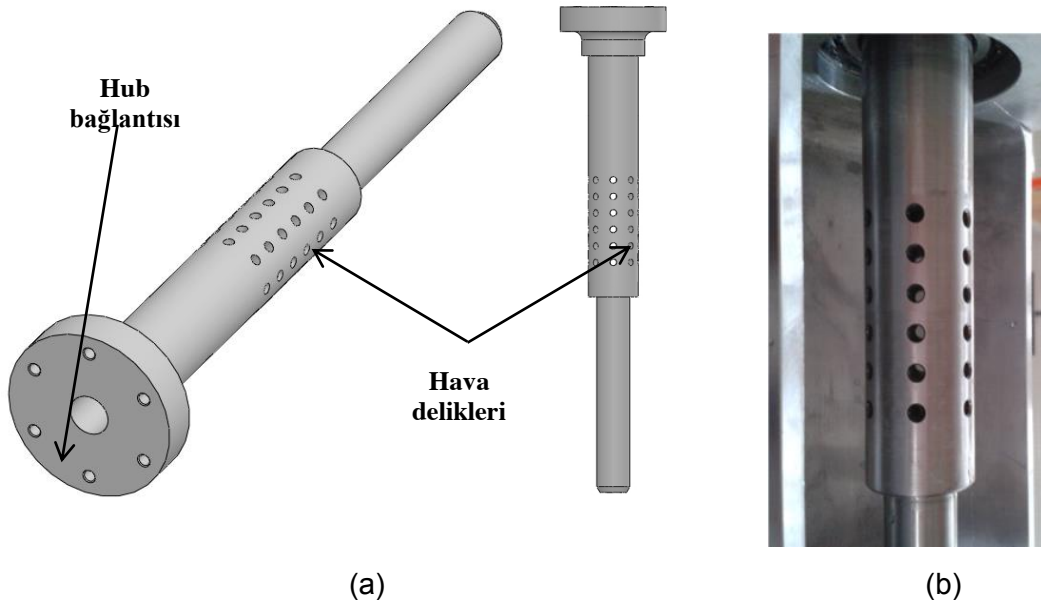
parça halinde tasarlanmıştır. Bu parçaların bağlantılarından dolayı oluşabilecek herhangi bir hava kaçağına karşı birleşim yerlerine halka salmastra kanalları eklenmiştir. En dışta ise basınca dayanıklı mekanik salmastralarla basınç odası sızdırmalara karşı kapatılmıştır.



Şekil 23. (a) Basınçlı oda elemanları katı modeli (b) Basınçlı oda katı modeli (c) Üretilen basınçlı oda

#### Şaft:

Tasarlanan şaft iki bölgeden oluşmaktadır. İlk bölümdeki şaftın içi dolu ancak ikinci bölgedeki şaftın içi boş ve üzerinde delikler bulunmaktadır. Bu delikler sayesinde nasel içinde bulunan basınçlı hava basınca dayanıklı göbek bölgesine iletilmektedir Şaftın katı kısmı torkmetreye bağlanırken, delikli ve içi boş kısmı Şekil 24'de görüldüğü gibi basınçlı odanın içerisinde kalmaktadır.



Şekil 24. Delikli şaft (a) katı model, (b) üretilen şaft



### Hub (rotor göbeği):

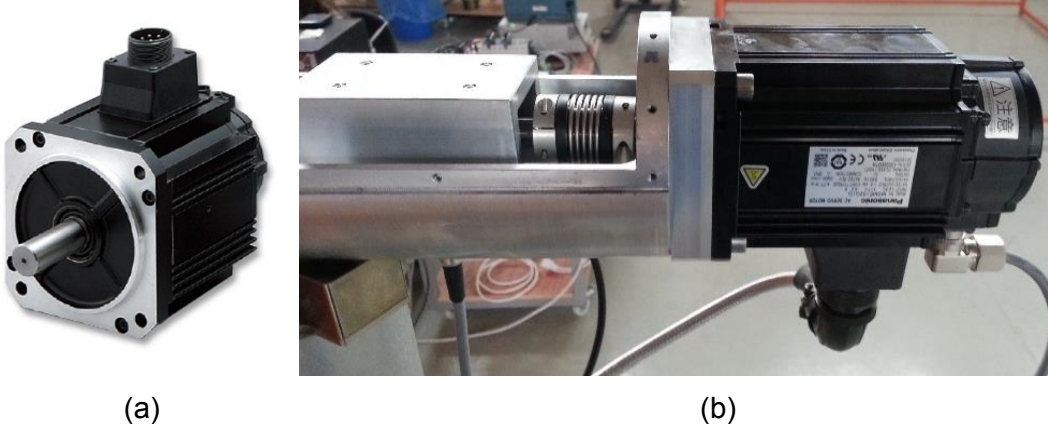
Daha önce bahsedildiği gibi basınçlı hava nasel bölgesinden giriş yaparak göbek bölgesine doğru ilerleyecektir (Şekil 25). Bu iletimin sağlanması için göbek bağlantı plakası tasarlanmıştır. Göbek bağlantı plakası hem basınçlı havanın naselden göbeğe iletilmesini sağlayacak hem de şaftın dönme hareketini göbek bölgesine iletacaktır. Kanat bağlantı noktalarının etrafında ise basınçlı hava geçiş kanalları yerleştirilmiştir. Bu kanallar yalıtılmış dönen flanş yatağı geometrisi göz önüne alınarak yerleştirilmiştir. Yere göre sabit duran nasel bölgesi ve dönmekte olan şaft ve göbek bölgesi arasındaki hava yalıtımlı bağlantı ise yalıtılmış dönen flanş yatağı yardımıyla gerçekleştirilmektedir.



Şekil 25. (a) Basınçlı hub katı modeli, (b) üretilen basınçlı hub

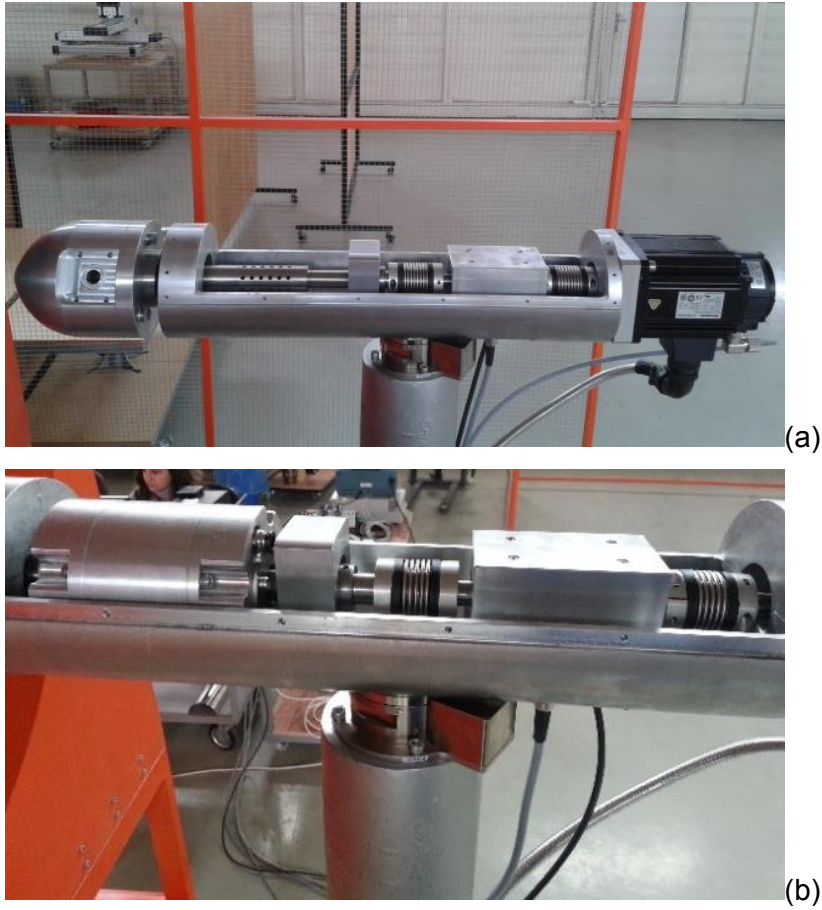
### Elektrik motoru, şaft ve yatak bağlantıları

. Model türbin testleri sırasında elde edilmek istenilen Uç Hız Oranı (Tip Speed Ratio) değerleri, seçilecek elektrik motorunun hız kontrolü ile gerçekleştirilecektir. RPM kontrollü elektrik motoru sayesinde türbin istenilen hızda döndürülecek böylece Uç Hız Oranı kontrol edilebilecektir. Elektrik motoru seçilirken maksimum dönme hızı, üretebildiği maksimum tork değerleri ve motor boyutları göz önüne alınmıştır. Araştırmalar sonucu PANASONIC MINAS A5 serisi 4.7N ve 3000 RPM kapasiteli Şekil 26'da gösterilen motor seçilmiştir. Elektrik motoru hemen naselin arkasında konumlandırılmış olup, boyutsal olarak akışın düzenini bozmayacak şekilde seçilmiştir. Motorun doğrudan nasele ve torkmetre şaftına esnek kaplin ile bağlanması uygun görülmüştür.



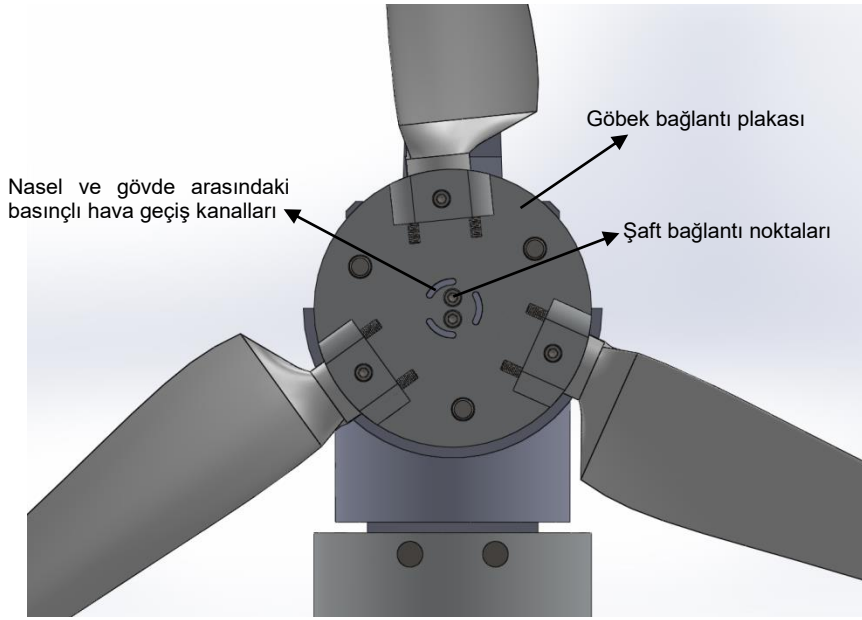
Şekil 26. (a) Model türbin için temin edilen elektrik motoru, (b) motor, nasele ve torkmetre bağlantıları

Yukarıda tasarımı anlatılan iki parçalı şaft torkmetreye esnek kaplin ile huba ise göbek bağlantı plakası ile bağlanmıştır. Ayrıca şaft, basınçlı odanın içerisinde geçmektedir. Şaftın yatak bağlantıları bir adet torkmetre ile şaft arasında bir adet de şaft-hub arasına yerleştirilmiştir (Şekil 27).



Şekil 27. (a) Hub-Şaft-Torkmetre bağlantıları, (b) basınçlı oda yerleşimi

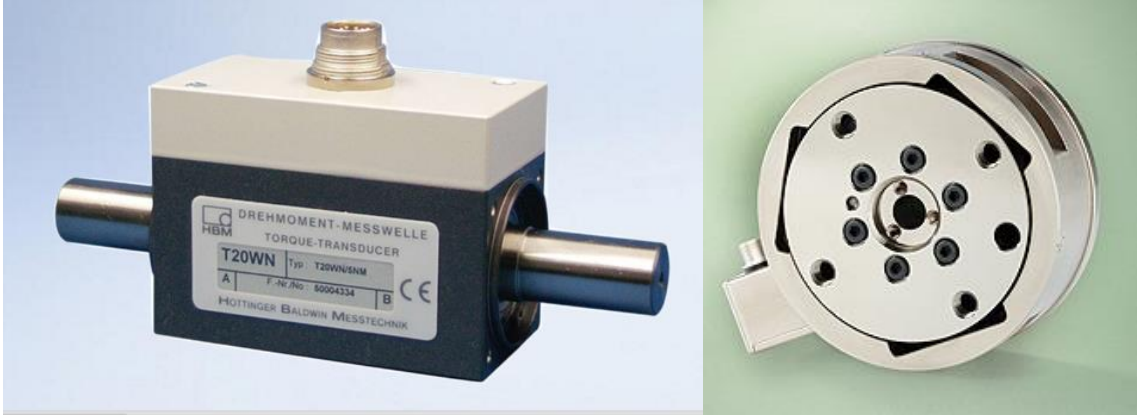
Göbek bölgesi de basınçlı hava ile dolacağından ve bu basınçlı havanın kanat genişliği boyunca ilerleyen hava kanalına geçişinin sağlanması gerektiğinden, pal-göbek bağlantı noktalarında NTNU rotundan farklı olarak tasarlanmıştır. Bunun nedeni model rüzgar türbinin montajı bir çok parça olmasından dolayı zor olduğundan, diğer hiç bir parça sökülmeden kanatlara müdahale edilebilmesi amaçlanmıştır. Paller göbek bölgesine bir taban yardımıyla bağlanmaktadır. Pal tabanı da göbek bölgesine monte edilmektedir (Şekil 28)



Şekil 28. Nasel-göbek bölgesi bağlantı tasarımı

#### Torkmetre ve 6 eksenli yük hücresi

Proje kapsamında model türbinde güç ve yük ölçmek için piyasada mevcut bulunan torkmetre ve yükölçer seçimi yapılmıştır. Seçilen torkmetre ve yükölçer Şekil 29'da gösterilmiştir. Torkmetre seçiminde NTNU'da yapılan ölçümlerden alınan maksimum tork değerleri ve türbinin dönebileceği maksimum dönme hızı göz önüne alınmıştır. Torkmetre bir önceki kısımda da bahsedildiği üzere motor ve ana şaft arasına yerleştirilmiş ve bu elemanlara esnek kaplinlerle bağlanarak sistem üzerindeki net torku ölçmesi amaçlanmıştır. Türbinin akış yönünde üreteceği itme kuvvetinin ölçülebilmesi için ise nasel ve türbin kulesi arasına 6 eksenli yük/moment ölçer sistem (loadcell) yerleştirilmiştir. Seçilen yükölçer, hem türbinin üretebileceği maksimum itme kuvvetini ölçebilmekte hem de pal, göbek, nasel ve elektrik motoru sisteminin toplam ağırlığına dayanabilmektedir. Ek olarak yükölçerin akışı bozmaması için türbin kulesi ile aynı çapta seçilmesine özen gösterilmiştir.

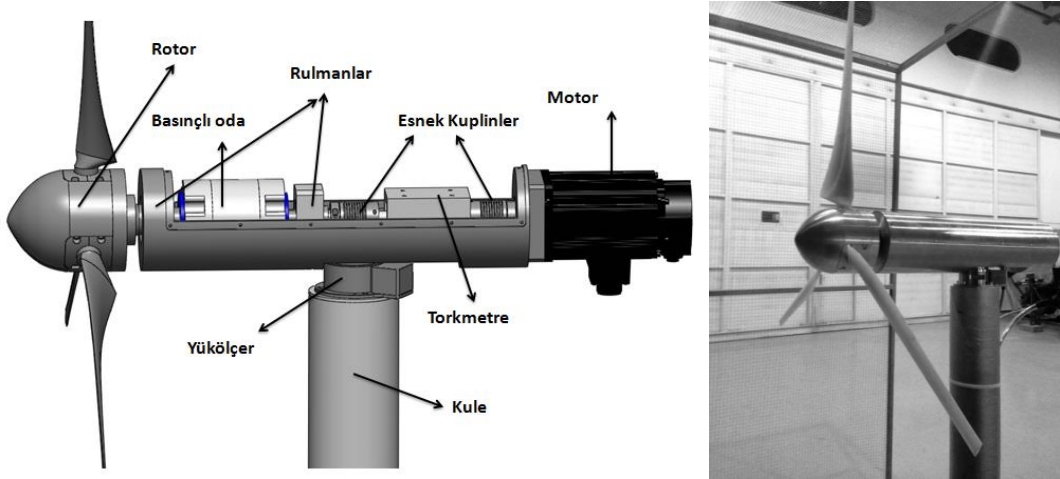


(a)

(b)

Şekil 29. (a) Temin edilen torkmetre, (b) Temin edilen 6 eksenli yük ve moment ölçer

Üretimi ve montajı tamamlanan model türbin Şekil 30'da verilmiştir.



(a)

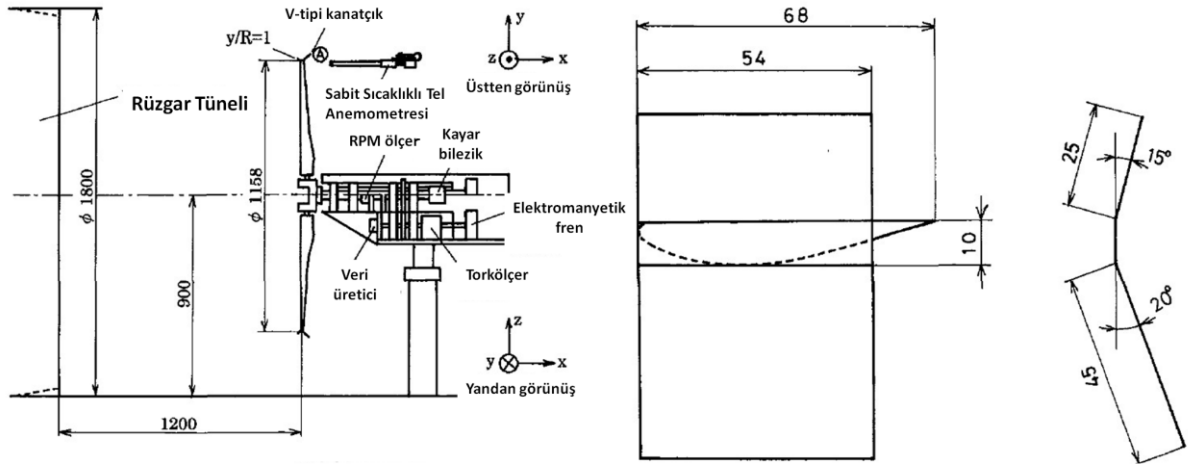
(b)

Şekil 30. (a) Model türbin elemanları katı modeli, (b) Üretilen model türbin

### 2.2.3 V-tipi uç kanatçıklı (Mie vane) kanat tasarımı

Proje kapsamında referans ölçümler ve enjeksiyonlu ölçümlerle karşılaştırılmak üzere, pasif kontrol yöntemi olarak türbin kanatlarının uç kısmına yerleştirilecek olan V-tipi kanatçıklar (Mie Vanes) seçilmiştir. Bu seçimin nedeni, proje önerisinde de açıklandığı gibi, kanat uçlarına eklenen V-tipi kanatçıklarla literatürde yapılan deneylerde bu kanatçıkların uç

girdabı etkisini azaltması ve ek olarak türbin güç katsayısını da %15'e kadar arttırmasıdır (Shimizu vd. (1990), Shimizu vd. (1995), Shimizu vd. (2003)). Literatürde bunun sebebi olarak Şekil 31'de gösterilen ve iki parçadan oluşan V-tipi kanatçıkların uç girdabının etkilerini azaltmanın yanı sıra türbin rotor düzleminde geçen birim zamandaki akış miktarını arttırması (Shimizu vd. (1994)) ya da benzer bir şekilde türbine gelen stream tube'de genişlemeye sebep olarak gelen akışta mevcut bulunan gücün artmasına neden olarak türbin güç katsayısında artışa neden olduğu sonucuna varılmıştır (Shimizu vd. (1995)). Proje kapsamında kullanılmak üzere mevcut düzeneğe ve kanat boyutlarına uygun V-tipi kanatçıklar Shimizu vd. (1995)'teki yöntem takip edilerek bu proje döneminde tasarlanmış, üretilmiş ve kanatlara entegre edilmiştir.

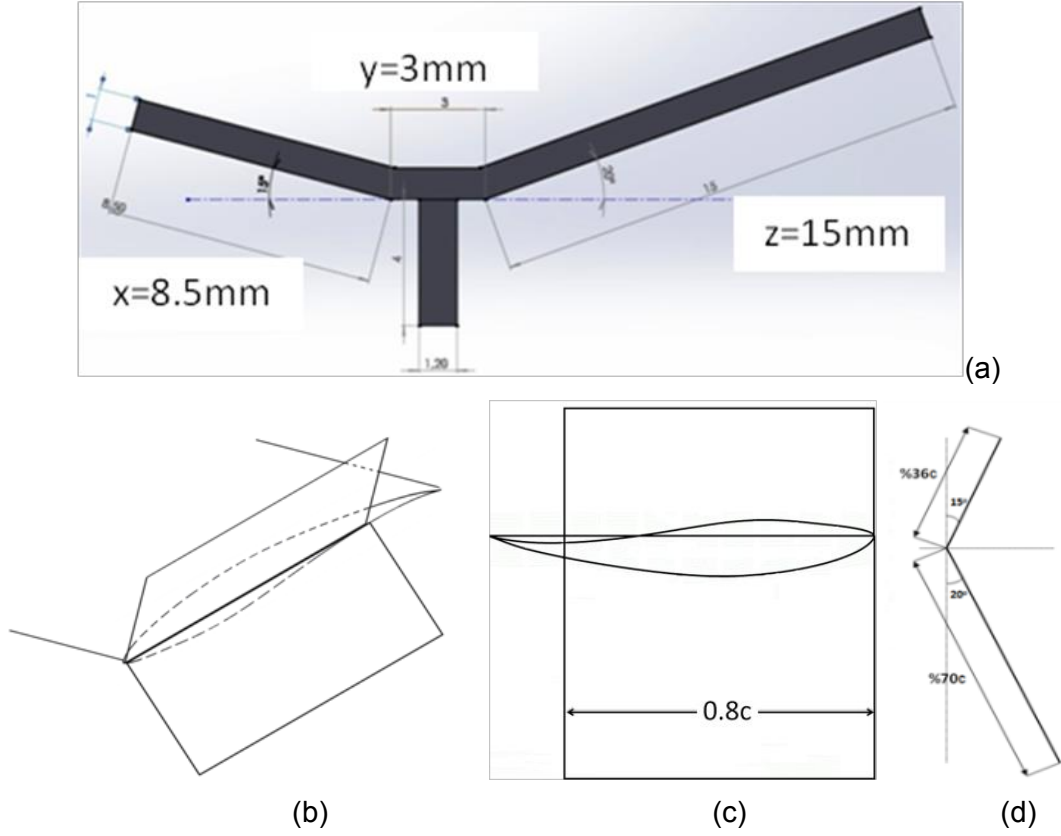


Şekil 31. Mie Üniversitesi bünyesinde yapılan araştırmalarda kullanılan V-tipi kanatçık geometrisi (Shimizu vd. (1995))

### Tasarım:

Shimizu vd. ((1990), (1995), (2003)) tarafından Mie Üniversitesinde araştırılan V-tipi kanatçıkların genel geometrisi Şekil 31'de gösterildiği gibi kanat ucundaki veterin boyutlarıyla orantılıdır. Bu geometriye bakıldığında kanatçık veterin yaklaşık %80'ini kaplamaktadır. Kanat ucuna oturan kısmı, uç kanat profilinin en büyük kalınlığına eşittir. Kanatçığın uzun olan kısmı kanat ucundaki kanat profilinin emiş yüzeyiyle 20 derecelik açı yapmaktadır ve uzunluğu veterin uzunluğunun yaklaşık %70'ine denk gelmektedir. Kısa olan kısmı ise basınç yüzeyiyle 15 derecelik bir açığa sahiptir ve uzunluğu uç veterin uzunluğunun yaklaşık %36'sı kadardır. Bundan yola çıkılarak mevcut düzenekte bulunan ve yeni üretilen titanyum kanatların uç veterine uygun ve aynı oranlarda olacak şekilde V-tipi kanatçıklar tasarlanmıştır. Tasarlanan kanatçıkların boyutları Şekil 32'de görülebilir. Şekil 32'de görülebileceği gibi tasarlanan V-tipi kanatçıkların alt kısmında ek bir parça daha vardır. Bu parça kanatta mevcut bulunan enjeksiyon kanalıyla aynı boyutta olup, kanatçıkların kanat

ucuna daha sağlam ve düzgün takılabilmesi için tasarlanmıştır. Böylece, V-tipi kanatçıkların kanat ucunda herhangi bir modifikasyona ihtiyaç duyulmadan takılıp çıkarılabilir olması sağlanmıştır.

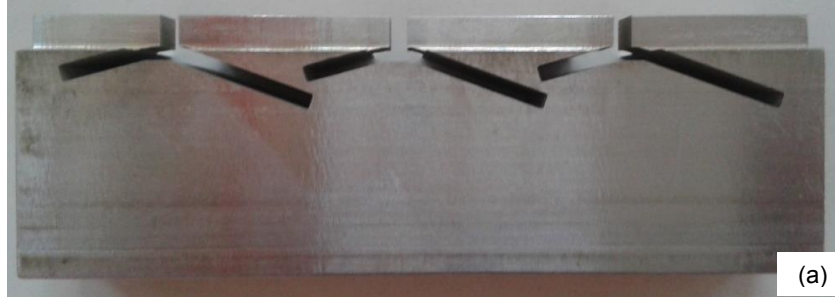


Şekil 32. V-tipi kanatçık tasarımı. (a) önden görünüş, (b) izometrik görünüş, (c) üstten görünüş, (d) yandan görünüş

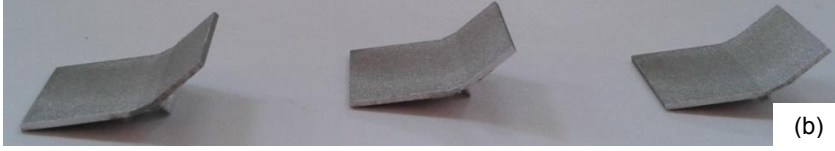
#### Üretim ve Entegrasyon:

V-tipi kanatçıklar oluşturulan alüminyum kalıptan tel erezyon yöntemi ile kesilerek çıkarılmıştır. Parçalardaki üretim hassasiyeti farklılığından dolayı kanala yerleştirilmesi planlanan kısımlar kanala göre büyük kalmıştır. Bu kısımlar elle törpülenerek kanala geçecek boyutlara getirilmiştir (Şekil 33). Kanatların ucuna yerleştirilen V-tipi kanatçıklar silikon yapıştırıcı ile sağlamlaştırılmıştır. Silikon yapıştırıcı parçalara zarar vermediği ve kalıcı birleşme sağlamadığı için kanatçıkların istenildiği zaman çıkarılıp takılması sağlanmaktadır.

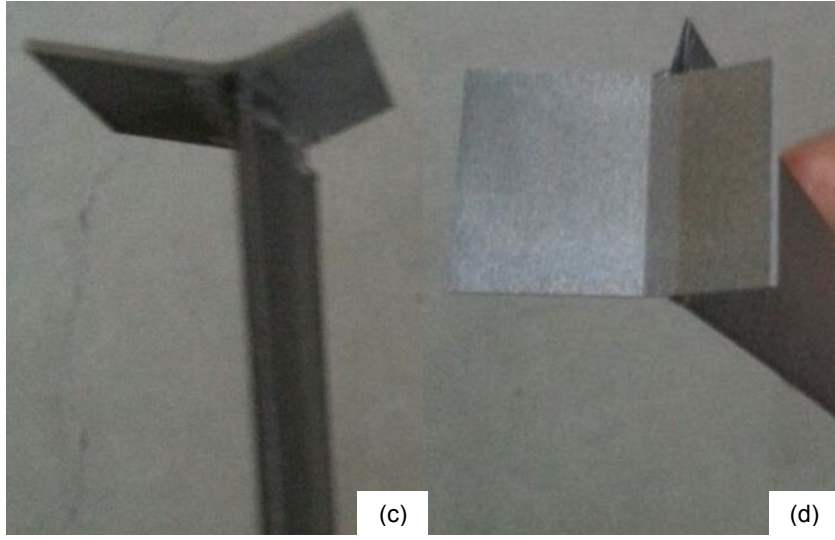




(a)



(b)



(c)

(d)



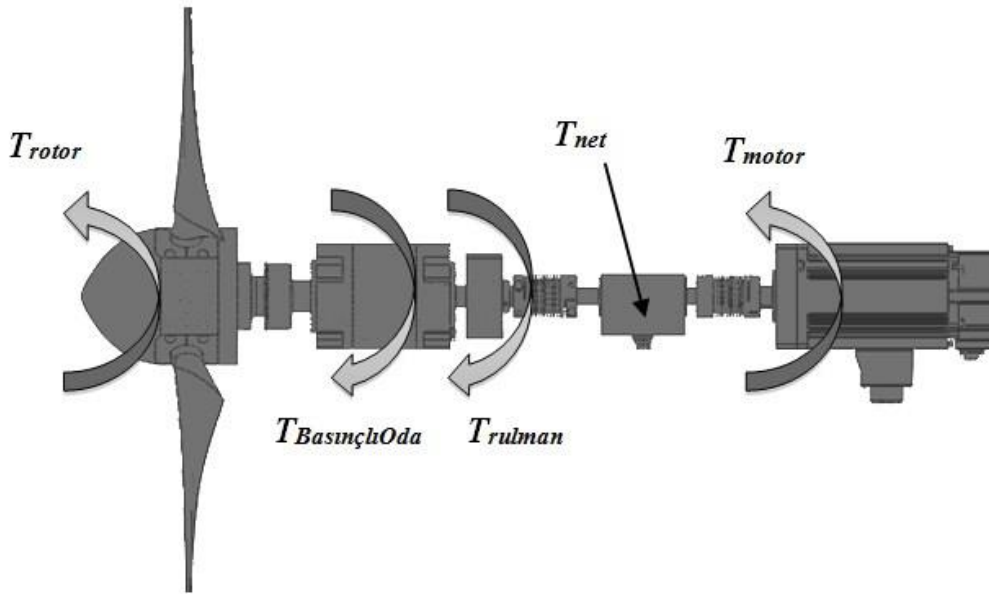
(e)

Şekil 33. V-tipi kanatçıklar (a) üretim için hazırlanan alüminyum kalıp, (b) tel erozyon ile üretilen V-tipi kanatçıklar, (c,d) V-tipi kanatçığın kanat ucundaki yerleşimi, (e) türbin rotoruna entegre edilmiş durum

## 2.3 Deneysel Yöntem

### 2.3.1 Performans Ölçümleri

Rotor göbeği ve tokmetre arasındaki şaftın üzerinde bulunan rulman ve benzeri mekanik elemanlar şaft üzerinde mekanik sürtünmeye yol açarlar. Bu elemanlar rotor göbeği ve tokmetre arasında bulunduğu için, ölçüm sırasında tokmetrede ölçülen tork değeri net torktur. Bu da türbinin oluşturduğu tork ve buna bağlı sistemdeki mekanik elemanların oluşturduğu sürtünme kaynaklı direnç torkunun toplamıdır. Türbinin gerçek tork değerinin elde edilebilmesi için bu sürtünme kaynaklı tork değerlerinin ölçülmesi ve bu değerlere göre ölçülen değerlerin düzeltilmesi gerekmektedir. Genellikle rulmanlardan kaynaklanan sürtünme torku türbin rotorunun torkuna kıyasla oldukça küçüktür ve ihmal edilebilir. Ancak basınçlı odada bulunan mekanik salmastralar göz ardı edilemeyecek bir sürtünme torku yaratmaktadırlar. Ayrıca yapılan çalışmalarda bu sürtünme torkunun rotorun dönme hızı ve enjeksiyon miktarı (yani basınçlı oda içerisindeki basınç miktarı) ile de değişme gösterdiği saptanmıştır. Dolayısıyla her farklı ölçüm senaryosu için bu sürtünme torku değerlerinin saptanması ve tokmetreden ölçülen değerlerden çıkartılarak gerçek türbin rotor torkunun elde edilmesi gerekmektedir. Şekil 34'te düzenek üzerindeki tork yükleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 34. Sistem üzerindeki tork yükleri

Yapılan ölçümlerde mekanik salmastra kaynaklı torkun artan motor devri ile neredeyse doğrusal olarak arttığı, enjeksiyonlu ölçümlerde de bu torkun referans değerlere göre daha yüksek ve yine doğrusal arttığı gözlemlenmiştir. Elde edilen bu veriler farklı hızlardaki tork

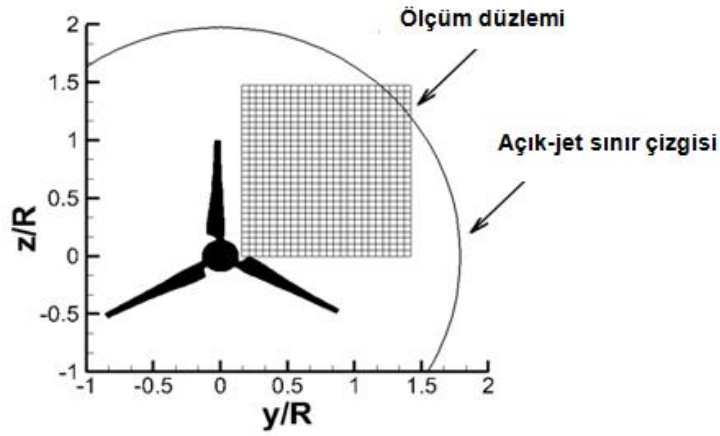


ölçümlerinden elde edilen verilerden çıkartılarak türbin rotor torkunun gerçek değeri bulunmuştur.

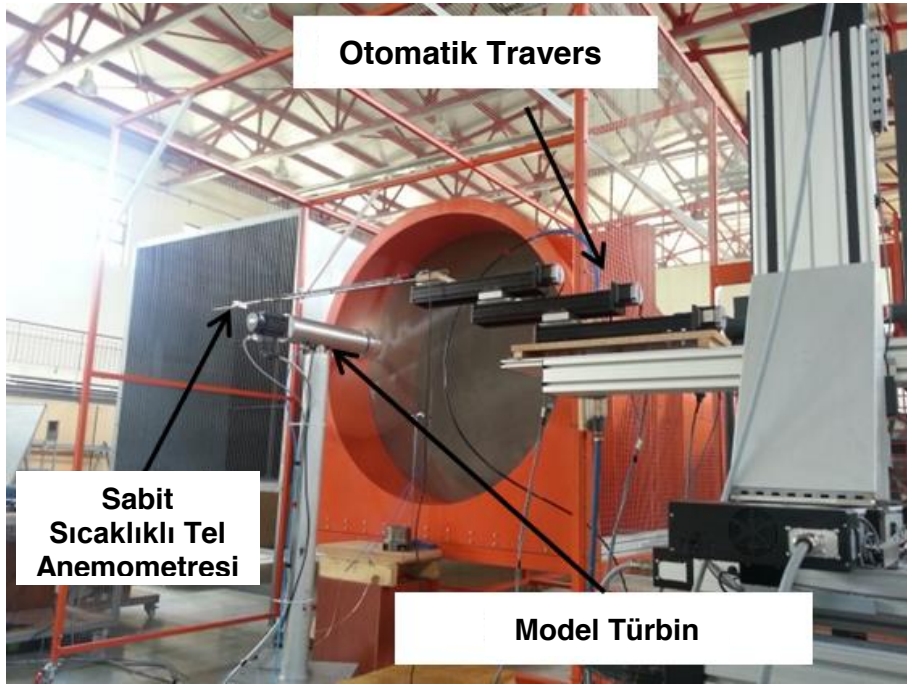
Bir önceki bölümde tasarımı, üretimi ve kurulumu anlatılan deney düzeneğinde performans ya da yük ve güç ölçümleri temin edilmiş olan torkmetre ve 6 eksenli yükölçer kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Performans ölçümleri 5 m/s rüzgar hızında, 0'dan 1000 RPM'e elliser birim değiştirilerek, referans (baseline) ölçümler ile üç farklı enjeksiyon senaryosu ve V-tipi kanatçık kontrol yöntemleri kullanılarak yapılmıştır. Tork ölçümleri için 5 kHz ve yük ölçümleri için 10kHz örnekleme hızında 20 saniye boyunca her bir RPM için ayrı ayrı veri kaydedilerek elde edilmiştir. Elde edilen değerler doğrultusunda model türbin için güç ( $C_p$ ) ve itki ( $C_T$ ) katsayılarının uç hız oranına (TSR) göre değişim eğrileri çizilmiştir.

### 2.3.2 Türbin İz Bölgesi Ölçümleri

Türbin iz bölgesi ölçümleri, rotor diskinden 0.25, 0.5, 1 ve 2 rotor çapı uzaklıklarda, akışa dik ve rotor diskinde paralel olan düzlemde tek sensörlü sabit sıcaklıklı tel anemometresi kullanılarak yapılmıştır. Sabit sıcaklı tel anemometresi tünel karakterizasyonu kısmında bahsedildiği gibi her ölçümden önce kalibre edilmiştir. İz bölgesi ölçümleri rotor diskinin arkasında Şekil 35'te görüldüğü gibi sağ üst kesimde, türbin iz bölgesinin  $\frac{1}{4}$ 'lük bir alanını kaplayan bölgede, nasele ve türbin kulesinden kaynaklanan iz bölgesini dışarıda bırakacak şekilde seçilmiş ve ölçüm alanı 750 mm x 750 mm bir alanda eşit aralıklı ölçüm noktaları kullanılarak, 5 kHz örnekleme oranında ve her noktada 4 saniye örnekleme süresi ile yapılmıştır. Sabit sıcaklıklı tel anemometresi (CTA) Şekil 36'da gösterilen düzeneğe de görülebileceği gibi otomatik travers sistemi ile kontrol edilmektedir. Ölçüm alanı  $\Delta y = \Delta z = 25$  mm aralıklarla taranmış ve her düzlem üzerinde toplam 961 noktada ölçüm alınmıştır. Türbin iz bölgesi ölçümleri 5 m/s rüzgar hızında, TSR=5 için, referans (baseline) ölçümler ile iki farklı enjeksiyon senaryosu ve V-tipi kanatçık kontrol yöntemleri kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ortalama hız ve türbülans yoğunluğu dağılımı olarak sunulmuştur.



Şekil 35. Türbin iz bölgesi ölçüm alanı

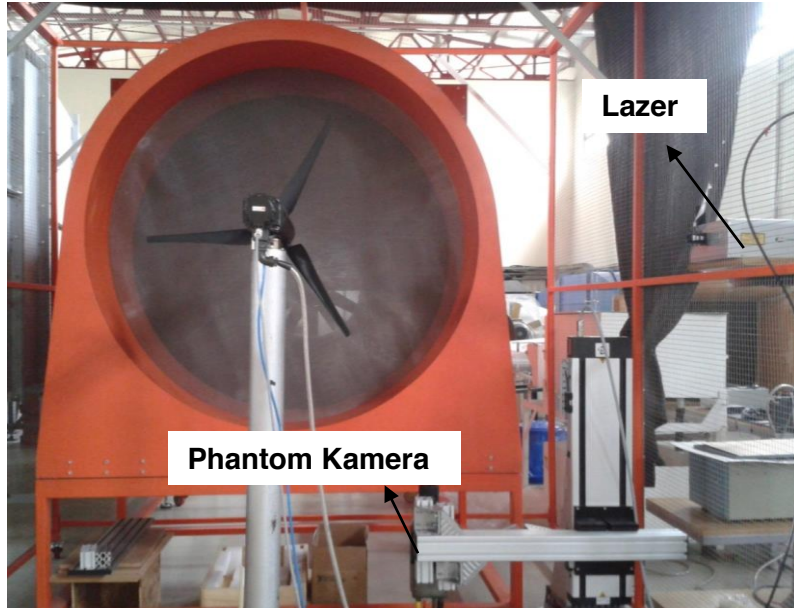


Şekil 36. Türbin iz bölgesi ölçüm düzeneği

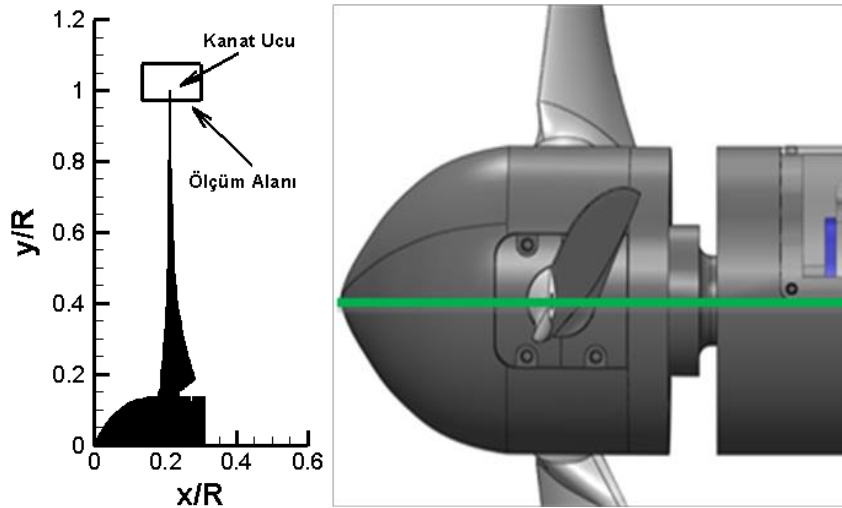
### 2.3.3 Kanat Uç Akış PIV Ölçümleri

Kanat ucu bölgesi akış ölçümleri PIV sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. PIV sistemi bir adet Phantom v640 12-bit 2560x1600 piksel çözünürlüklü yüksek hızlı kamera, New Wave Solo PIV 15 kHz, 120 mJ Nd:YAG lazer ve Dantec zamanlayıcı kutusu ve Dynamic Studio veri toplama ve analiz etme yazılımından oluşmaktadır. PIV deney düzeneği Şekil 37'de gösterilmiştir. Akış parçacıkları olarak duman sistemi kullanılmaktadır. Ölçümler Şekil 38'de belirtilen düzlem üzerinde 5 m/s akış hızı ve TSR=5 için referans ile üç farklı enjeksiyon oranında ve V-tipi kanatçıklı durumlar için  $\Delta t=50 \mu s$  için alınmıştır. Her bir ölçüm senaryosu

için kanadın 11 farklı pozisyonu için faz odaklı (phase locked) data toplanmıştır. Faz odaklı ölçümler için türbin şaftından bir manyetik algılayıcı ile elde edilen ve her döngüde bir kere oluşan tetikleme sinyali PIV sistemi ile senkronize edilmiş, böylece kanatların her turunda kanatlar hep aynı pozisyonda iken kanat ucunda ölçümler alınmıştır. Her bir faz için 300 imaj çifti elde edilmiş ve faz-odaklı ortalama akış alanları elde etmekte kullanılmıştır. Analizler 2560x1600 piksellik bir alanda 64x64 piksellik bir çözünürlük kullanılarak "Cross-Correlation" yöntemiyle yapılmıştır.



Şekil 37. PIV deney düzeneği



Şekil 38. Kanat uç bölgesi PIV ölçüm düzlemi

### 2.3.4 Enjeksiyon Senaryoları

Enjeksiyon miktarları performans ölçümleri için Enjeksiyon Momentum Oranı ( $R_M$ ), türbin iz ve türbin uç bölgesi ölçümleri için Enjeksiyon Uç Hız Oranı ( $R_{TS}$ ) cinsinden verilmiştir. Enjeksiyon Momentum Oranı enjekte edilen toplam havanın momentumunun rotor diskinden geçen toplam havanın momentumuna oranını, Enjeksiyon Hız Oranı ise enjekte edilen havanın hızının rüzgar hızına olan oranını göstermektedir. İlgili tanımlar aşağıda verilmektedir. Yük ölçümleri için enjeksiyon senaryoları Tablo 4'te, türbin iz ve uç bölgesi için enjeksiyon senaryoları ise Tablo 5'te belirtilmiştir.

$$R_M = \frac{\text{Enjekte edilen havanın toplam momentumu}}{\text{Rotor diskinden geçen havanın toplam momentumu}}$$

$$R_M = \frac{\sum \dot{m}_{jetn} U_{jetn}}{\dot{m}_{rotor} U_{\infty}} \quad [3]$$

$$R_{TS} = \frac{\text{Enjekte edilen havanın hızı}}{\text{Türbin uç hızı}}$$

$$R_{TS} = \frac{U_{jet}}{UR} \quad [4]$$

Tablo 4. 5 m/s için yük ölçümleri için enjeksiyon senaryoları

Enjeksiyon Senaryosu	Enjeksiyon Momentum Oranı, $R_M$
Senaryo 1	%0.20
Senaryo 2	%0.70
Senaryo 3	%1.30

Tablo 5. 5 m/s için yük ölçümleri için enjeksiyon senaryoları

Enjeksiyon Senaryosu	Enjeksiyon Uç Hız Oranı, $R_{TS}$
Senaryo 1	1.16
Senaryo 2	2.45
Senaryo 3	3.26

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

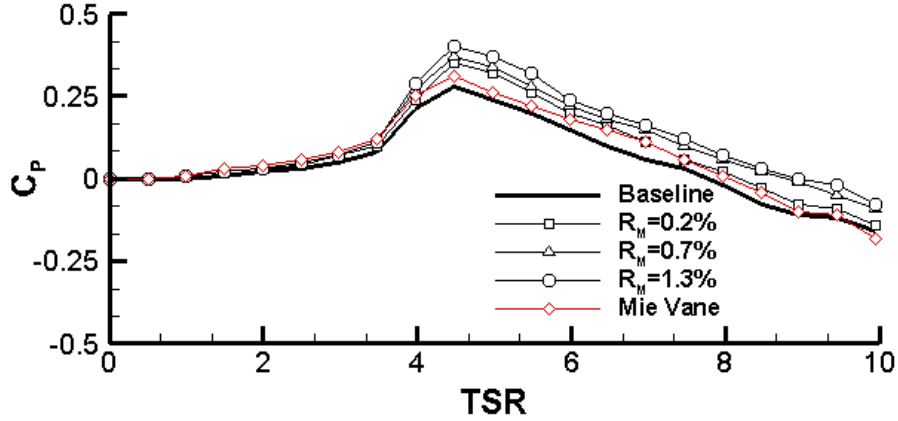
#### 3.1 Tork ve İtke Kuvveti Ölçümleri

Şekil 39'da referans (baseline), V-tipi kanatçık ve enjeksiyonlu ölçümlerin karşılaştırılmaları 0-10 Uç Hız Oranı (Tip Speed Ratio – TSR) aralığında verilmektedir. Enjeksiyonlu ölçümler enjeksiyon momentum katsayısı olarak  $R_M=0.2\%$ ,  $R_M=0.7\%$  ve  $R_M=1.3\%$  değerlerinde yapılmıştır. Bu şekilde kalın siyah çizgi referans enjeksiyonsuz durumu göstermektedir. Uç enjeksiyonunun güç ve itke kuvveti katsayıları üzerinde belirgin bir etkisi vardır. Bu etki özellikle yüksek uç hız oranı değerleri için daha da belirgindir. Elde edilen ölçüm sonuçlarına göre enjeksiyonla birlikte hem güç hem de itme kuvveti katsayıları artış göstermiştir ve bu artışın miktarı artan enjeksiyon oranı ile de artmaktadır.

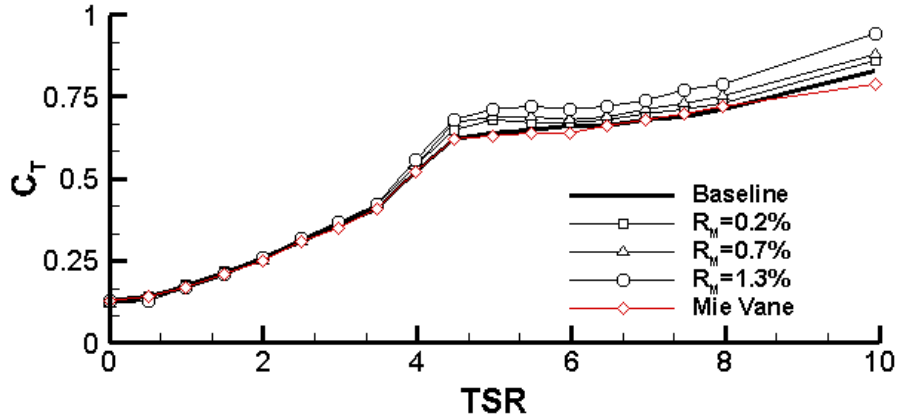
TSR değerinin 3 ve altı olduğu durumlarda hem enjeksiyonun hem de V-tipi kanatçıkların güç katsayısı üzerindeki etkilerinin minimal olduğu görülebilir. Bu durumun ana sebebi düşük TSR değerlerinde kanat açıklığı boyunca lokal hücum açısı değerlerinin çok yüksek olmasından dolayı kanatların akış kopması ve stall altında çalışıyor olmalarıdır (Abdulrahim vd. (2016)). TSR değeri arttıkça ve maksimum  $C_p$  TSR değerine yaklaşıldıkça farklılıklar daha iyi görülebilmektedir. Maksimum  $C_p$  TSR değeri civarında hem enjeksiyon hem de V-tipi kanatçık ölçümlerinde referans değere göre güç katsayısında artışlar görülmektedir. Bu artışlar V-tipi kanatçık için %12 civarında ölçülmüştür ki bu değer literatür ile uyumludur (V-tipi kanatçıklar ile yapılan ölçümlerde güç katsayısının en fazla %15'e kadar arttığı gözlemlenmiştir (Shimizu vd. (1995)). Şekil 39'da gösterilen enjeksiyonlu durumlar için ise %24 ( $R_M=0.2\%$ ) ve %33.5 ( $R_M=0.7\%$ ) ve %44 ( $R_M=1.3\%$ ) artış gözlemlenmiştir. Daha yüksek TSR değerlerine gidildikçe, özellikle 6-7.5 aralığında her üç teknik arasındaki farklar azalmakla birlikte hepsi referans değerden ortalama %30 daha yüksek güç katsayısı vermektedir. TSR değeri 8 ve üzeri olduğunda ise  $R_M=0.2\%$  ve V-tipi kanatçık değerleri birbirine yakın gitmekte ancak  $R_M=0.7\%$  ve  $R_M=1.3\%$  değerleri daha yüksek güç katsayısı göstermektedir. Bu TSR aralığında (8 ve üstü), türbin, kanat açıklığı boyunca lokal hücum açılarının negatif değerlere geçmesinden dolayı literatürde "propeller mode (pervane modu)" olarak bilinen durumda çalışmakta ve dolayısı ile güç katsayıları da beklendiği üzere negatif değerler çıkmaktadır (Bartl J., (2011), Adaramola ve Krogstad (2011)).

Şekil 40'ta verilen itke katsayısı değişimlerine bakıldığında V-tipi kanatçıklar ile referans ölçümler arasında bütün TSR aralığında farkların çok az olduğu görülmektedir. Düşük TSR aralığında (3-3.5 ve altı) enjeksiyon ve referans ölçümler arasındaki farkların da çok az olduğu gözlemlenmektedir. Maksimum  $C_p$  (Şekil 39) TSR değeri civarında ise enjeksiyon durumları referans değerden daha yüksek itke kuvveti yaratmaktadır. Bu TSR aralığında

enjeksiyonlu durumların V-tipi kanatçık durumundan daha yüksek itki kuvveti yarattığı da görülmektedir. Daha yüksek TSR değerlerine gidildiğinde ise genel olarak üç enjeksiyon durumu da daha yüksek itki kuvveti yaratmaktadır.



Şekil 39. Referans rotor (baseline), üç farklı uç enjeksiyonu durumu ve V-tipi kanatçıklı (Mie vane) durum için , güç katsayısının Uç Hız Oranı (Tip Speed Ratio-TSR) ile değişimi.  $R_M$ : Enjeksiyon momentum katsayısı.  $U_\infty=5$  m/s rüzgar hızı.



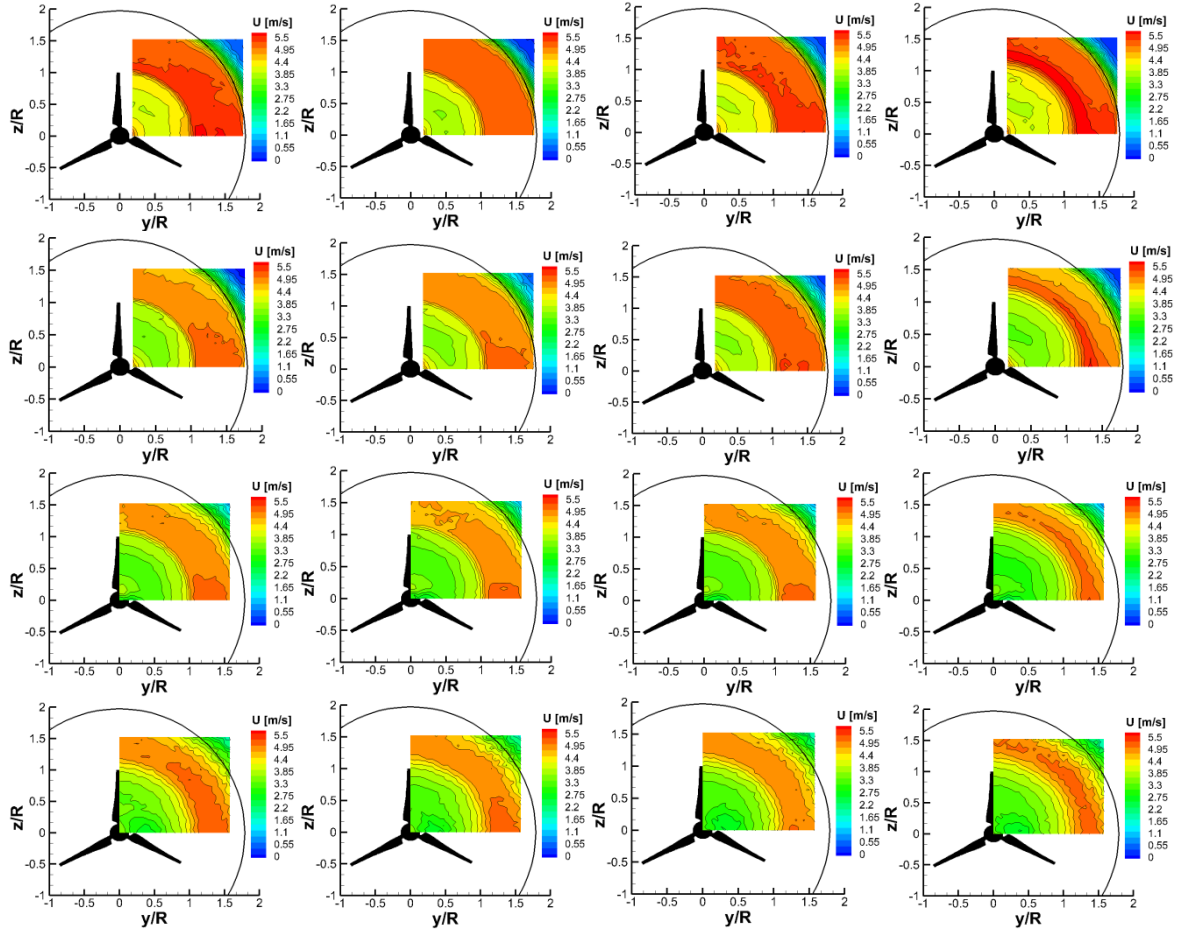
Şekil 40. Referans rotor (baseline), üç farklı uç enjeksiyonu durumu ve uç kanatçıklı (Mie vane) durum için , itki kuvveti katsayısının Uç Hız Oranı (Tip Speed Ratio-TSR) ile değişimi.  $R_M$ : Enjeksiyon momentum katsayısı.  $U_\infty=5$  m/s rüzgar hızı.

### 3.2 İz Bölgesi Ölçümleri

Şekil 41'de sıcak-tel anemometresi ile elde edilen, türbin iz bölgesi içindeki akış hızı dağılımları gösterilmektedir. Bu dağılımlar referans ve farklı uç girdabı kontrolü durumları için türbinden 0.25D, 0.5D, 1D ve 2D uzaklıklar için sunulmuştur. Elde edilen verilere bakıldığında akış alanı içerisinde üç ana bölge olduğu görülmektedir. Bu bölgeler sırasıyla uç girdabı iziyle sınırları çizilmiş olan türbin iz bölgesi, serbest rüzgar akış bölgesi ve açık jet tünelinin sınır bölgesinden kaynaklanan kayma tabakası bölgesidir. Ortalama hız ve türbülans yoğunluğu grafiklerine bakıldığında hem referans hem de enjeksiyonlu ölçümler için türbin iz bölgesinin sınırlarının ölçüm alanı rotor düzleminde uzaklaştıkça genişlediğini ve ana rüzgar akışı içerisinde dağıldığı gözlemlenmektedir. Türbin iz bölgesinin giderek genişlemesi ve dağılması beklenen bir sonuçtur ve yapılan ölçümlerle de ortaya konulmuştur.

Enjeksiyonlu ölçüm sonuçlarına bakıldığında ise referans ölçümlere göre özellikle türbin uç bölgesindeki akışta önemli değişiklikler olduğu saptanmıştır. Herhangi bir ölçüm uzaklığı için, enjeksiyonlu ölçümlerde türbin iz bölgesinin referans ölçümlere göre daha geniş bir yer kapladığı görülmektedir. En büyük etki ise doğal olarak türbin uç bölgesinde saptanmıştır. Buna göre yoğunlaşmış halkalar şeklinde beliren uç girdabı iz bölgesinde görülen kontur çizgileri uç enjeksiyonu ile daha belirginleşmiş, birbirlerinden uzaklaşmış ve türbin uç bölgesinden radyal olarak dışarı doğru itilmişlerdir. Bu olgu rotor düzleminde 1 ve 2 rotor çapı uzaklıklarında daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Sonuçlar göstermiştir ki uç enjeksiyonu rüzgar türbininin yalnızca güç ve itme karakteristiklerini etkilemekle kalmamakta aynı zamanda türbin etrafındaki ve iz bölgesindeki akışı da etkileyerek yapısını değiştirmektedir. Bu durum rüzgar çiftliklerinde birbiri ardı sıralanmış rüzgar türbinlerinin performansını da etkileyecektir.

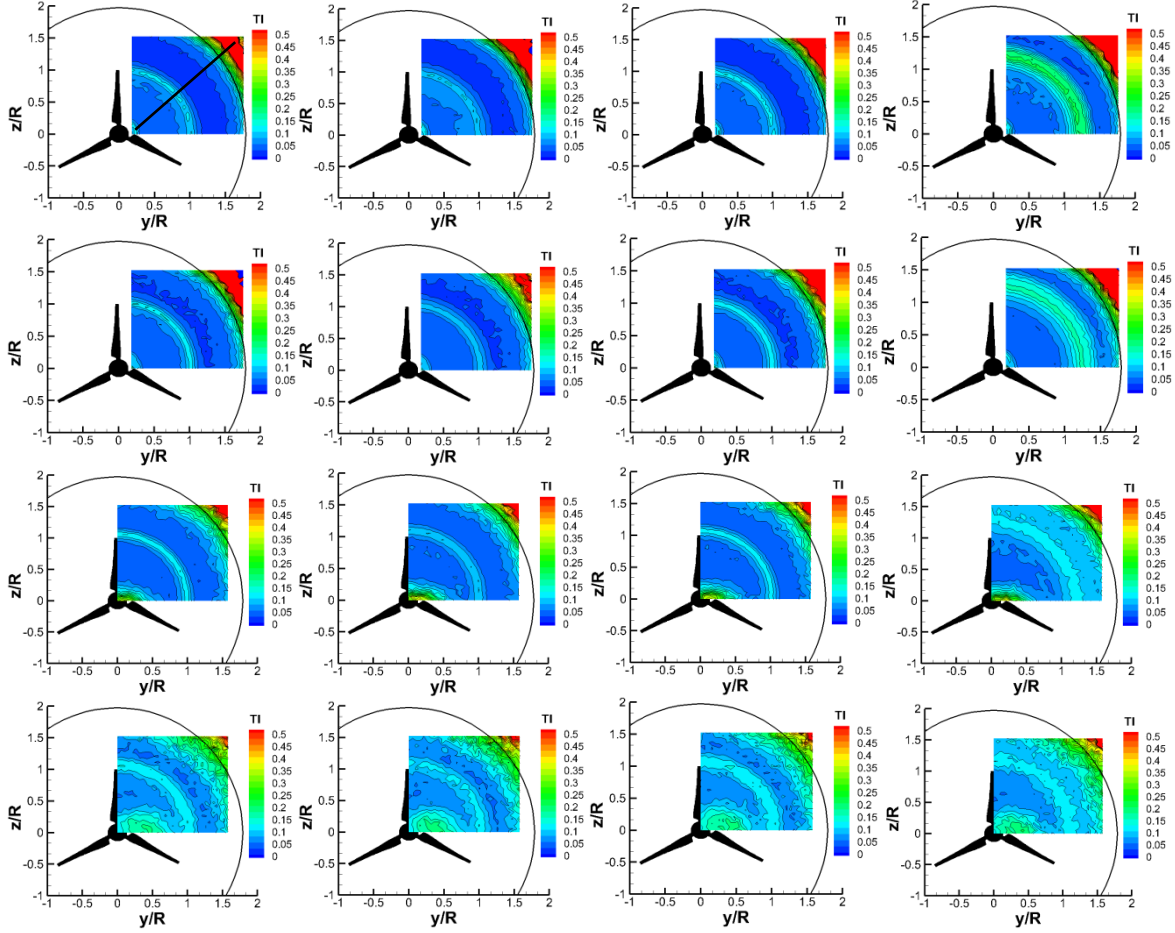
Şekil 42'deki türbülans yoğunluğu sonuçlarına bakıldığında uç enjeksiyonunun etkileri daha da net anlaşılmaktadır. Uç enjeksiyonuna bağlı olarak uç girdabı iz bölgesinin enjeksiyonsuz ölçümlere göre daha geniş bir alan kapladığı ve rotor düzleminde uzaklaştıkça ana akımın içinde dağılarak rotor düzleminde iki rotor çapı uzaklıkta ise neredeyse kaybolduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca, enjeksiyon ile birlikte uç girdabı ile belirlenmiş olan halka şeklindeki iz bölgesi referans ölçümlerdekine kıyasla genişlemiş ve uç girdap sınırını belirleyen akış çizgileri arasındaki geçişler yumuşamıştır. Şekil 42'deki kontur çizimlerine bakıldığında rotor düzleminde 1 ve 2 rotor çapı uzaklıktaki sonuçlarda sol alt köşede yüksek türbülanslı bir bölge görülmektedir. Bu kısım nasele ve pal kökünden kaynaklanan iz bölgesini göstermektedir.



Şekil 41. Türbin rotoru iz bölgesindeki hız dağılımı. (Soldan sağa) 1. sütun: Referans ölçümler, 2. sütun: Mie Vane'li ölçümler, 3. sütun:  $R_M=0.2$  enjeksiyonlu ölçümler, 4. sütun:  $R_M=1.3$  enjeksiyonlu ölçümler. (Yukarıdan aşağıya) 1. satır:  $0.25D$ , 2. satır:  $0.5D$ , 3. satır:  $1D$ , 4. satır:  $2D$ . Akış yönü sayfanın dışına doğrudur ve konturlardaki daireler açık-jet tünelin dış sınırını göstermektedir.

Elde edilen sonuçlarda V-tipi kanatçıkların hem hız alanı hem de türbülans yoğunluğu dağılımlarına etkisi olduğu görülmektedir. Uç enjeksiyonu etkilerine benzer bir şekilde V-tipi kanatçıklar da uç girdabı bölgesini radyal yönde dışarı doğru itmekte ve bu bölgedeki hız kontur çizgileri arasındaki mesafeleri artırmaktadır. Bu sonuç V-tipi kanatçıkların da uç girdaplarının şiddetini kısmen azalttığını göstermektedir. Ayrıca V-tipi kanatçıklar kullanıldığında uç girdabı bölgesindeki türbülans şiddeti referans duruma göre biraz daha düşük çıkmaktadır. Bu sonuç V-tipi kanatçıkların uç sızmasını kısmen engellediğini ve daha düşük şiddette uç girdapları yarattığını teyit etmektedir.

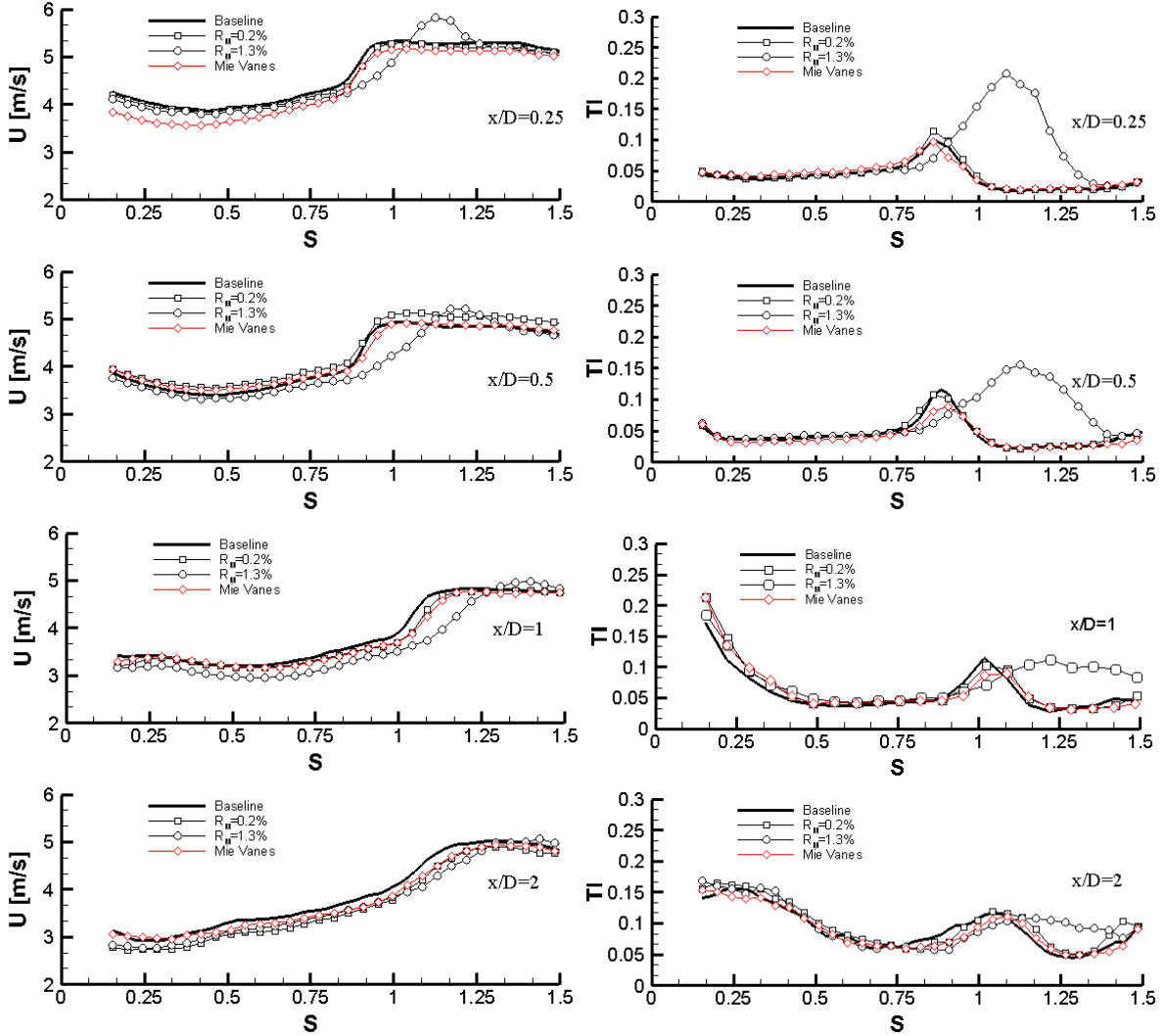




Şekil 42. Türbin rotoru iz bölgesindeki türbülans yoğunluğu dağılımı. (Soldan sağa) 1. sütun: Referans ölçümler, 2. sütun: Mie Vane'li ölçümler, 3. sütun:  $R_M=0.2$  enjeksiyonlu ölçümler, 4. sütun:  $R_M=1.3$  enjeksiyonlu ölçümler. (Yukarıdan aşağıya) 1. satır:  $0.25D$ , 2. satır:  $0.5D$ , 3. satır:  $1D$ , 4. satır:  $2D$ . Akış yönü sayfanın dışına doğrudur ve konturlardaki daireler açık-jet tünelin dış sınırını göstermektedir.

Şekil 43'te türbin iz bölgesi içerisinde ve rotor düzleminde farklı akışboyu uzaklıklarda (downstream) Şekil 42'de sol üst çizimde gösterilen radyal çizgi üzerinde hız ve türbülans yoğunluğu değerlerinin referans, V-tipi kanatçık ve enjeksiyonlu ölçümler için karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 43'teki "s" parametresi bu radyal çizgi boyunca olan koordinatı göstermekte,  $s=0$  değeri türbin şaft eksenine ve  $s=1$  değeri de kanat ucu pozisyonuna denk gelmektedir. Bu karşılaştırmalar sonucu türbin iz bölgesinin enjeksiyon ile değişimi açıkça görülmektedir. Türbülans yoğunluğu değişimine bakıldığında referans ölçümlerde rotor sınırında uç girdaplarından kaynaklanan ani artış ve azalışın olduğu gözlemlenmektedir. Bu hızlı değişim tam olarak pal ucu ile belirlenen bölgede oluşmaktadır. Enjeksiyon ile birlikte bu artışın rotor palinden dışarıya doğru itildiği ve daha yavaş bir değişim sergilediği görülmektedir. Bu da türbin iz bölgesi alanında bir artışa sebep olmuştur. Her iki ölçümde de, referans ve enjeksiyonlu, uç girdabının ve jet akışının etkisinin rotor düzleminde uzaklaştıkça azaldığı

açıkça görülebilir. Benzer bir şekilde hız değişimi grafiklerine bakıldığında rotor çapından 0.25 rotor çapı uzaklık için jet akışından kaynaklanan hız artışı görülmektedir. Bu artış uzaklığa bağlı olarak azalma göstermekte, 2 rotor çapı uzaklık içinse neredeyse ana akış ile aynı değişimi göstermektedir.

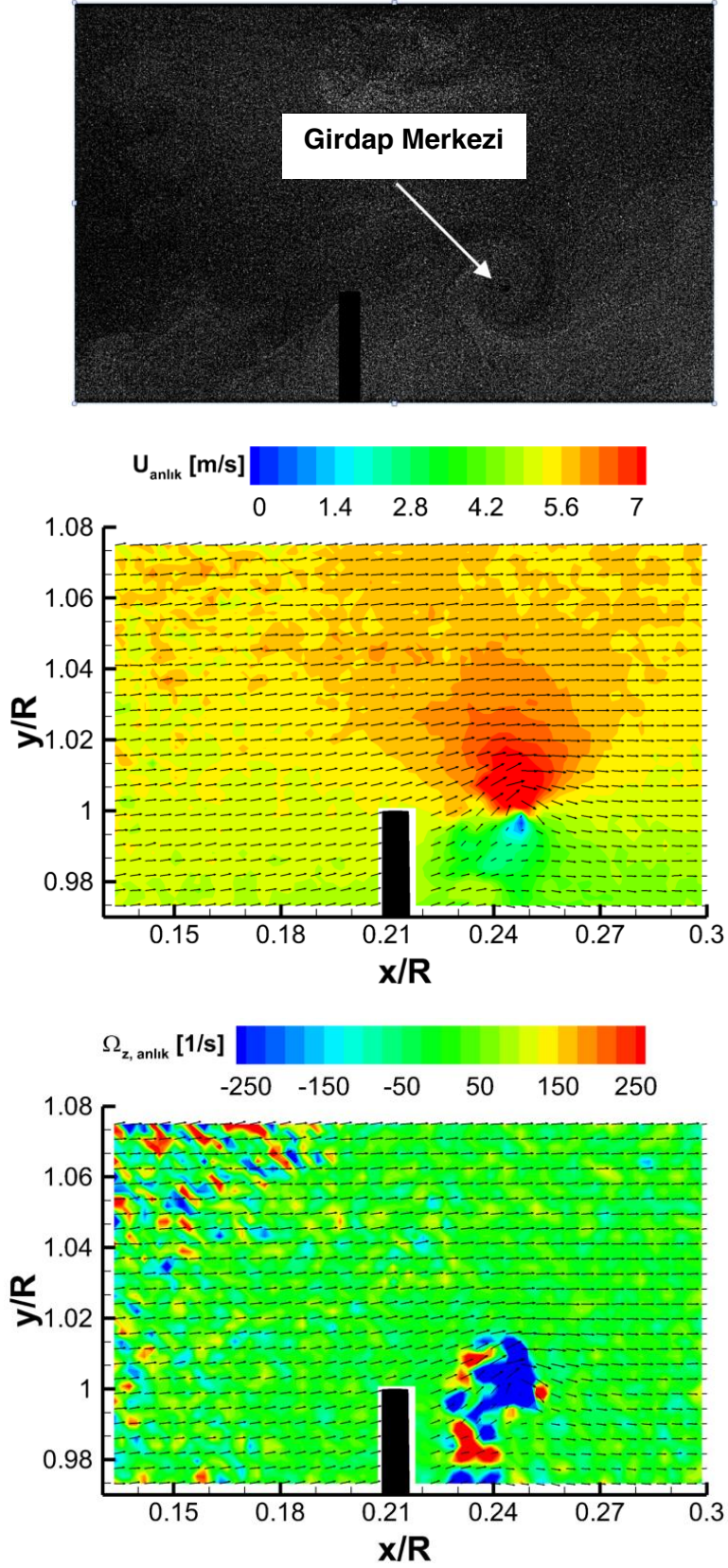


Şekil 43. Akış yönündeki farklı aksel noktalarda radyal çizgi boyunca hız (sol) ve türbülans yoğunluğu (sağ) dağılımları. (yukarıdan aşağıya) 1. satır: 0.25D, 2. satır: 0.5D, 3. satır: 1D, 4. satır: 2D. “s” veri alınan çizgi (Şekil 42, sol-üst) üzerindeki mesafeyi göstermektedir.

### 3.3 Kanat Ucu Akış Ölçümleri

Çeşitli uç girdabı kontrol durumları için türbin kanat ucu yakınında Particle Image Velocimetry (PIV) tekniği kullanılarak faz odaklı akış ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerin detayları daha önceki kısımda verilmiştir. Bu kısımda ölçüm sonuçları ve ilgili bulgular tartışılacaktır.

Ölçümler her bir uç girdabı kontrol senaryosu için (referans, Mie vane,  $R_M=0.2\%$  enjeksiyon,  $R_M=0.7\%$  enjeksiyon ve  $R_M=1.3\%$  enjeksiyon) 11 farklı faz açısında yapılmıştır ( $\varphi=0^\circ-60^\circ$  aralığında ve her  $6^\circ$ 'de bir). Her bir faz açısı lazer düzlemine göre kanadın farklı bir konumuna denk gelmektedir.  $\varphi=0^\circ$  açısında kanat tam lazer düzlemini kesmekte olup uç girdabı henüz oluşmaya başlamaktadır. Takip eden diğer fazlarda ise oluşan uç girdabı ve/veya diğer akış yapıları akış içerisinde ilerlemektedirler. Bütün kontrol senaryoları için hep aynı fazlarda veri toplandığından aynı fazlarda kanat ucu çevresinde oluşan akış alanı farklılıkları açıkça gözlemlenebilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi her bir kontrol senaryosunun her bir fazı için 300 adet vektör alanı toplanmış ve faz ortalamalarını elde etmekte kullanılmıştır. Faz odaklı PIV ölçümleri 5 m/s rüzgar hızında ve TSR=5 durumunda yapılmıştır. Şekil 44 örnek bir faz açısında elde edilen ( $\varphi=30^\circ$ ) örnek bir PIV imajını (referans durum için) ve anlık hız ve vortisite dağılımlarını göstermektedir. PIV imajından da görüleceği üzere kanat uçlarında oluşan girdap yapıları orjinal imajlardan bile açıkça gözükmemektedir. Bu imaj çifti analiz edildiğinde elde edilen anlık hız şiddeti ve vortisite dağılımlarından da girdabın olduğu bölgede oluşan ani hız değişimleri ( $0.24 < x/D < 0.26$  arası ve  $y/D=1$  civarı) ve yüksek negatif düzlem-dışı vortisite bileşeni değerleri ( $\Omega_z$ ) olduğu görülmektedir (mavi konturlar). Uç girdabının hemen altında değişken büyüklüklerde ve işaretlerde vortisite dağılımları da gözükmemektedir. Bu dağılımlar esas olarak kanadın oluşturduğu iz bölgesinden kaynaklanmaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi örneğin bu fazda benzer vektör alanı dağılımlarından 300 adet toplanmış ve ortalaması alınarak bu faz için faz-ortalama akış alanları elde edilmiştir. Bundan sonra sunulacak olan şekillerde farklı uç girdabı kontrol senaryoları için faz ortalamalı akış dağılımları her bir faz için sunularak farklılıklar ile ilgili tartışmalar ve gözlemler yapılacaktır.

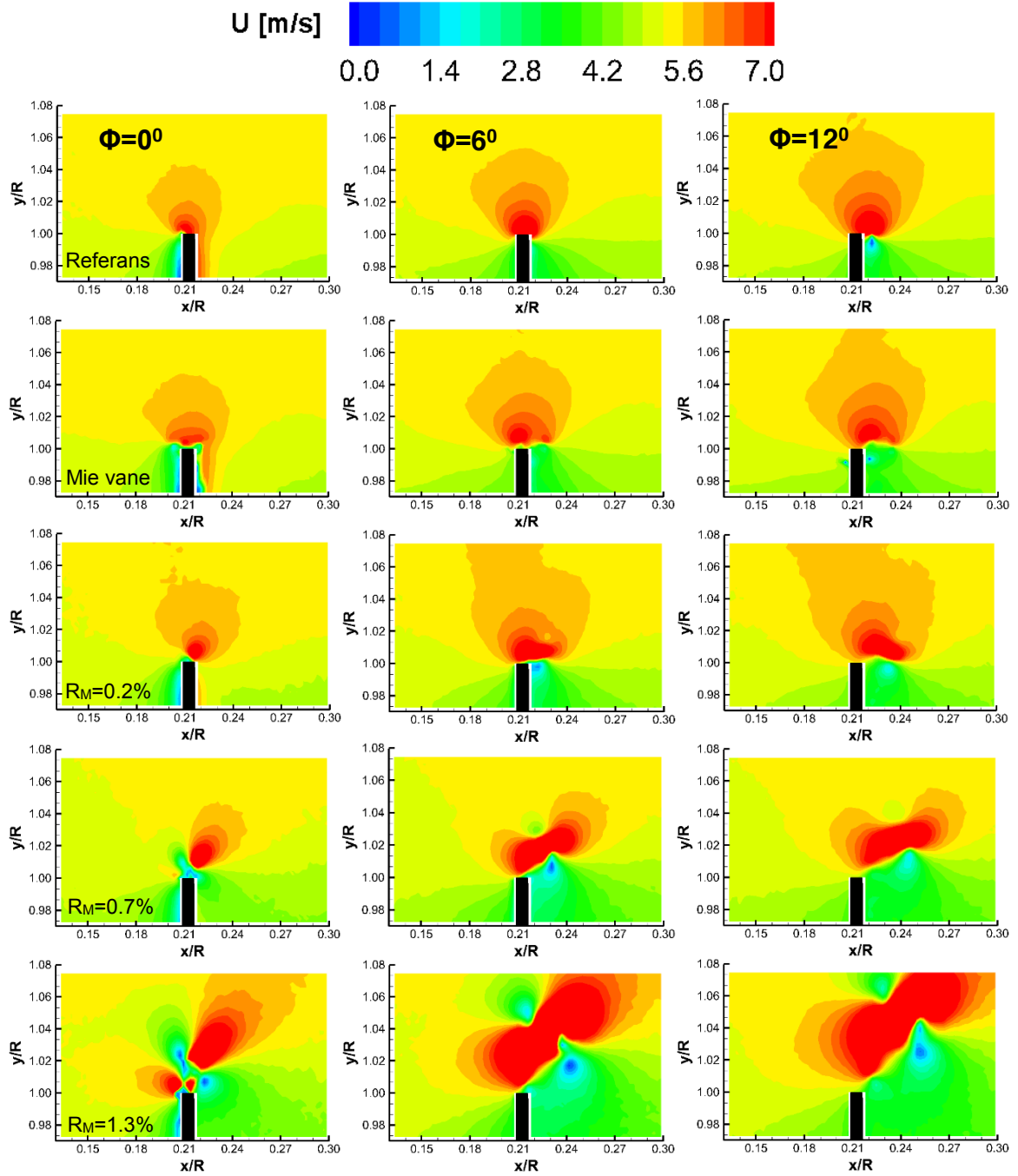


Şekil 44. Örnek bir faz açısında ( $\varphi=30^\circ$ ), referans durumu için elde edilen örnek bir PIV imajı (üstte), Bu imaj çifti kullanılarak hesaplanan anlık hız alanı ve hız vektörleri (ortada) ve anlık düzlem dışı vortisite bileşeni dağılımı.

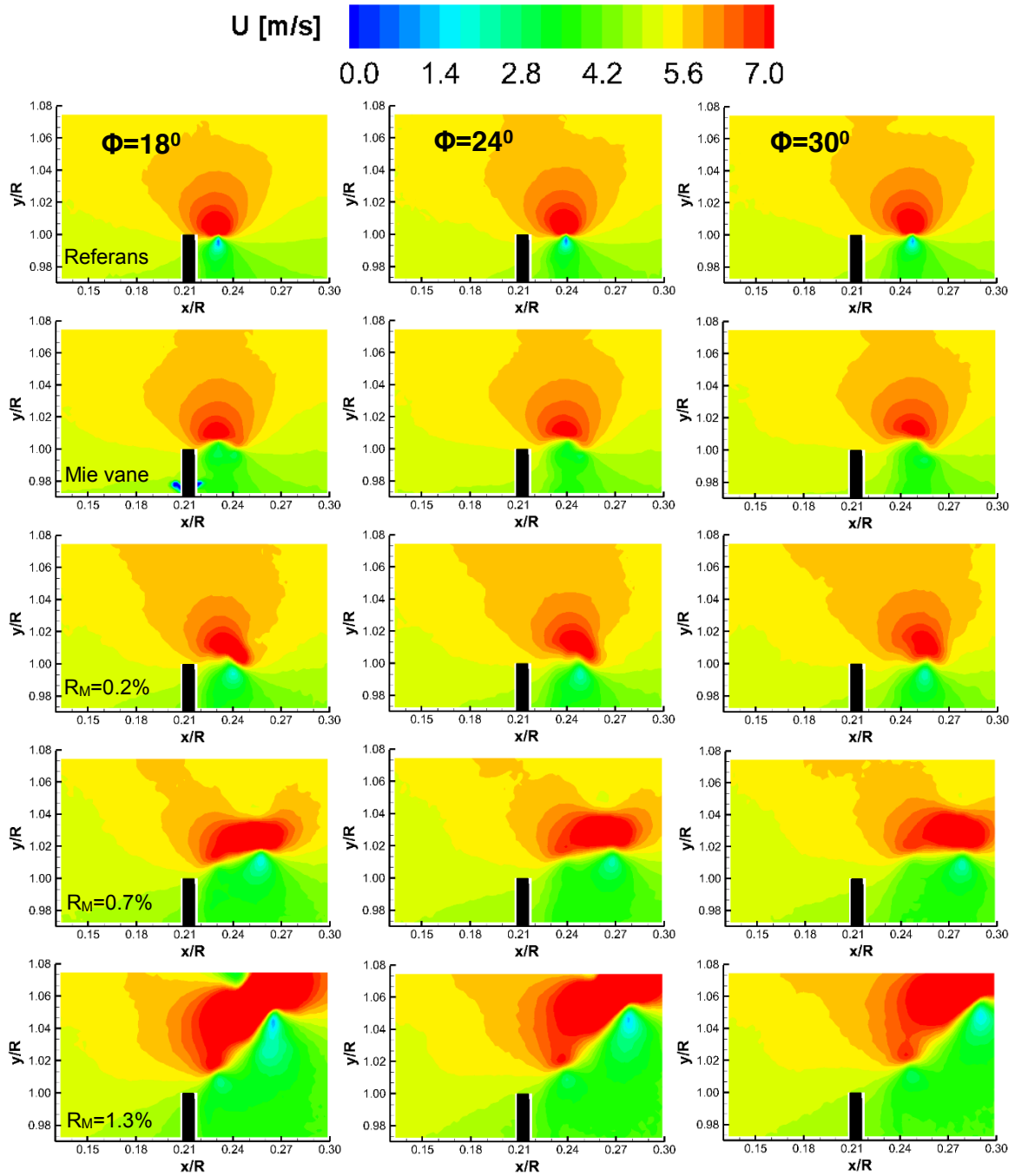
Şekil 45, 46 ve 47’de referans durum ve her bir uç girdabı kontrol senaryosu için 11 farklı faz durumunda PIV ölçümleri ile elde edilen, sırası ile düzlem-içi hız şiddeti dağılımları, düzlem-dışı vortisite bileşeni dağılımları ve türbülans kinetik enerjisi dağılımları sunulmaktadır. Daha önceki kısımda açıklandığı üzere (Şekil 38) bu şekillerde  $x/R$  koordinatının sıfır noktası türbin göbeğinin (hub) en önünde,  $y/R$  koordinatının sıfır noktası ise şaft ekseninde yer almaktadır.  $y/R=1$  koordinatı kanat ucu pozisyonuna denk gelmektedir. Şekillerde akış soldan sağa doğrudur ve siyah dikdörtgen bölge kanat ucunun PIV imajlarında kapladığı bölgeyi temsil etmektedir.

Şekil 45’te sunulan düzlem-içi hız şiddeti dağılımları incelendiğinde, referans durumun ilk fazında ( $\varphi=0^\circ$ ), akışın kanada yaklaştığında yavaşlaması ve hemen akabinde kanat ucunda alt yüzeyden üst yüzeye doğru oluşan akış sızmasının etkisi ile tekrar hızlanması gözlemlenmektedir. Bu sızma sonucunda referans durumunda hemen kanat ucunun arkasında bir girdap yapısı oluşur. Bu girdap yapısı vortisite dağılımlarında açıkça gözükmemekte ve hız dağılımlarında da, örneğin faz  $\varphi=12^\circ$  durumunda,  $0.22 < x/R < 0.23$  arası ve  $y/R=1$  civarı olan bölgede üstte yüksek altta düşük hız olan bir lokal hız dağılımı oluşturmaktadır. Referans durumu için daha sonraki fazlar takip edildiğinde bu lokal dağılımın akışla beraber ilerlediği ve türbinin iz bölgesi ile serbest akış bölgesi arasındaki genişleyen sınırı takip ettiği görülmektedir.

V-tipi kanatçıklar (Mie vane) kullanıldığında veya uç enjeksiyonu yapılan durumlarda ise kanat uçlarında referans durumda elde edilen hız dağılımlarının farklı derecelerde bozulduğu görülmektedir. Hız dağılımlarındaki bu değişiklik esas olarak uç sızmasında meydana gelen farklılıklardan ve enjeksiyon durumları için, enjeksiyon jetinin kendisinin oluşturduğu lokal hız dağılımlarının etkisinden dolayı olmaktadır. V-tipi kanatçıklar kullanıldığında uç girdabı oluşması tamamen engellenmemekte, ancak uç girdabından dolayı oluşan lokal hız dağılımı üzerindeki daha yüksek hızlı bölgeden daha düşük hızlı bölgeye olan geçişin yayıldığı ve lokal hız gradyanlarının azaldığı görülmektedir. Bu da V-tipi kanatçıkların uç girdabı şiddetini azalttığına bir göstergesidir. Örneğin  $\varphi=48^\circ$  deki referans ve V-tipi kanatçık hız dağılımları karşılaştırıldığında, referans durumda olan, girdap etrafındaki ani hız değişimlerinin çok daha yumuşak bir biçimde oluştuğu görülebilir. V-tipi kanatçık kullanıldığı durumda oluşan girdap yapılarının akışboyu konveksiyon hareketi ve hızı referans durumdakine yakın olmakla beraber örneğin  $\varphi=54^\circ$  ve  $\varphi=60^\circ$  fazlarındaki dağılımlara bakıldığında V-tipi kanatçık kullanıldığında oluşan girdap yapılarının referans duruma göre bir miktar daha fazla ilerlemiş olduğu görülebilir.

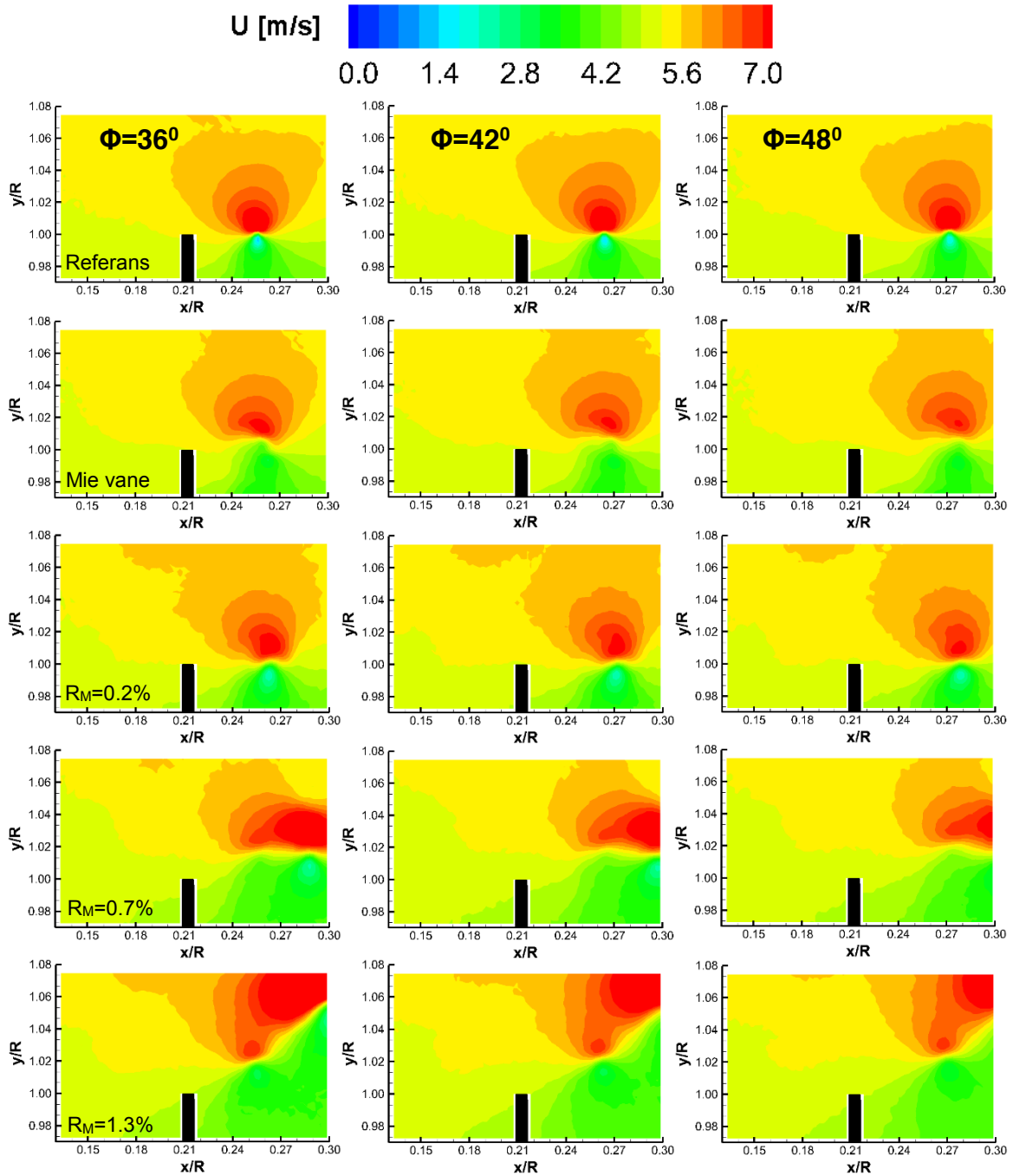


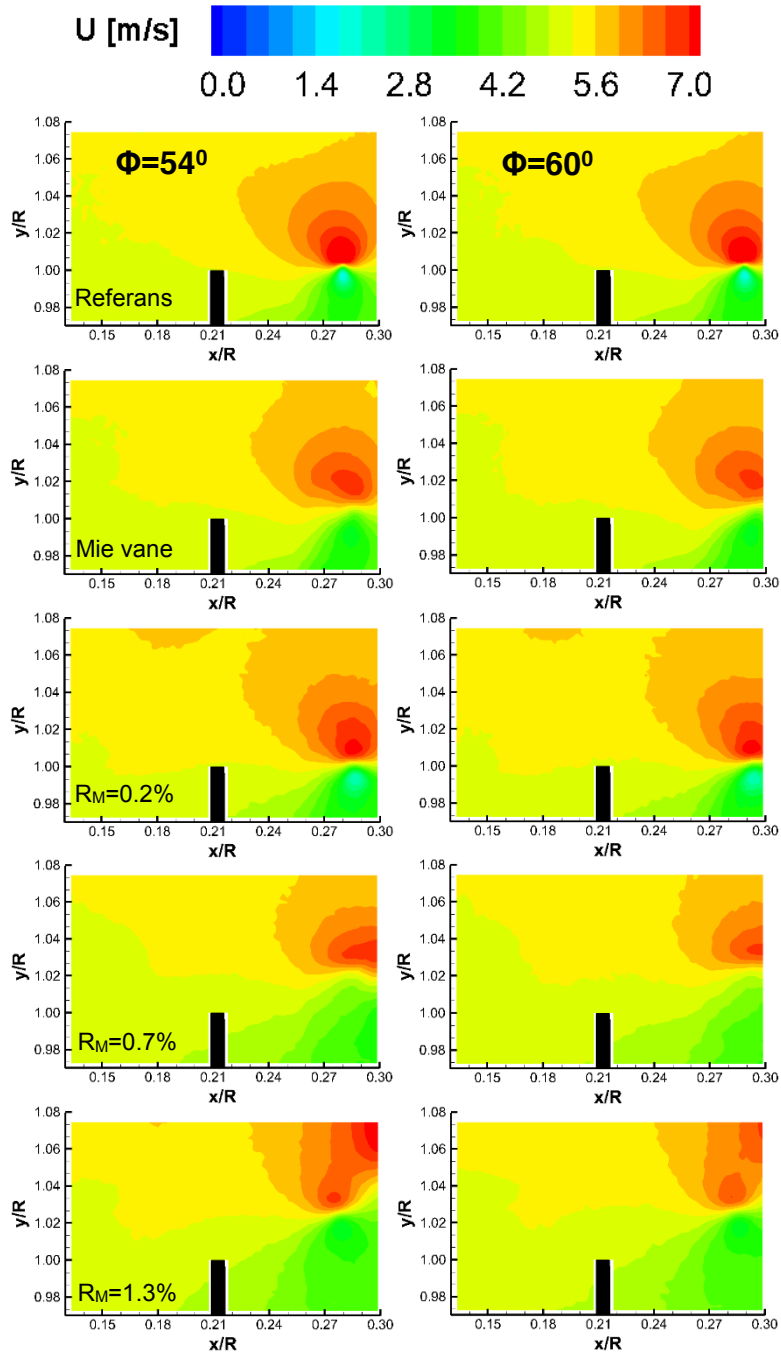
Şekil 45. Farklı faz açılarında ( $\phi$ ) düzlem-içi ortalama hız büyüklükleri. 1. satır: Referans ölçümler, 2. satır: Mie Vane'li ölçümler, 3. satır:  $R_M=0.2\%$  enjeksiyonlu ölçümler, 4. satır:  $R_M=0.7\%$  enjeksiyonlu ölçümler, 5. satır:  $R_M=1.3\%$  enjeksiyonlu ölçümler. 1. sütun:  $\phi=0^\circ$ , 2. sütun:  $\phi=6^\circ$ , 3. sütun:  $\phi=12^\circ$ . Akış yönü soldan sağdır ve siyah cisim türbin kanat ucunun kapladığı bölgeyi temsil etmektedir.



Şekil 45 devamı. 1. sütun:  $\varphi=18^\circ$ , 2. sütun:  $\varphi=24^\circ$ , 3. sütun:  $\varphi=30^\circ$



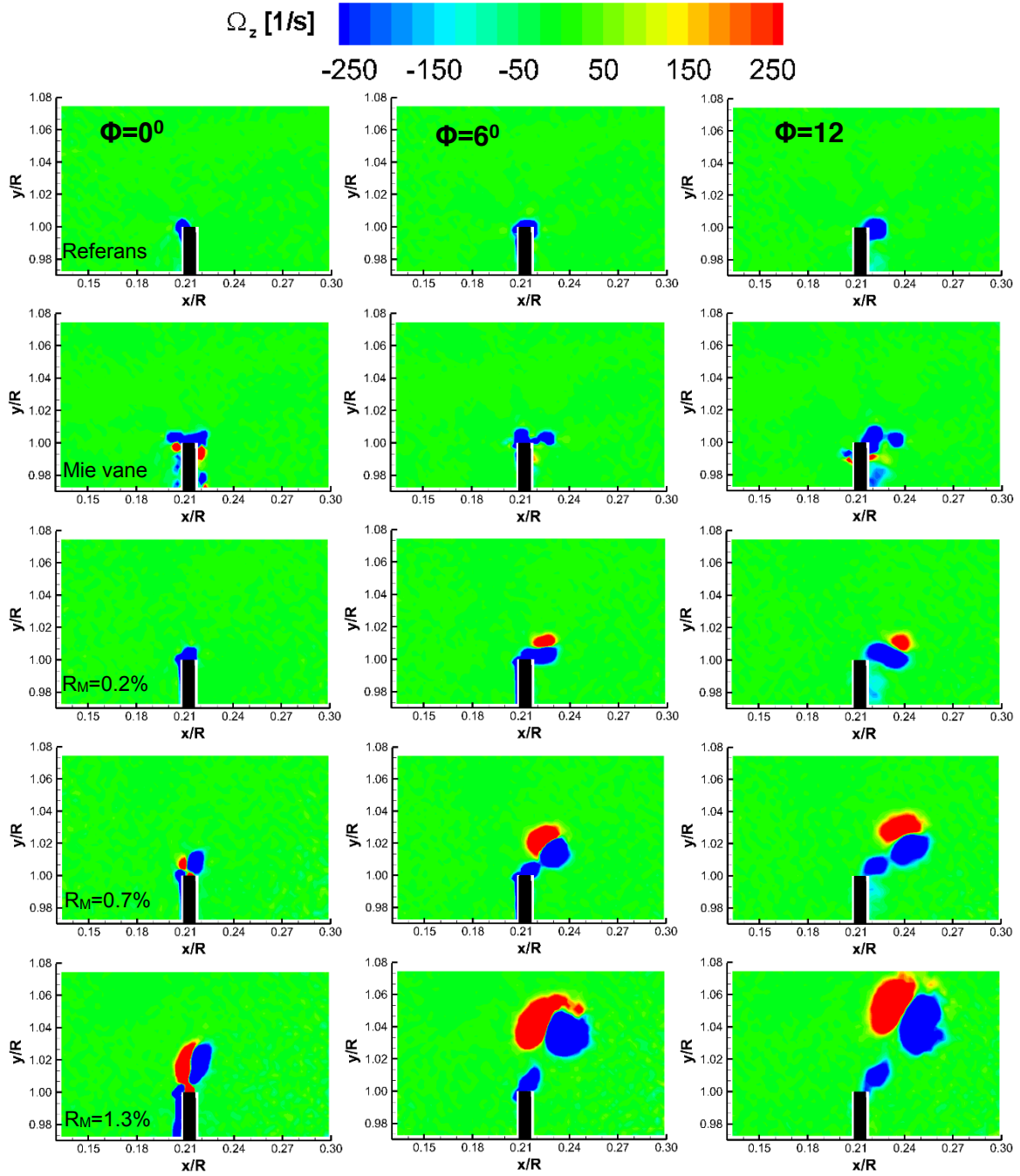




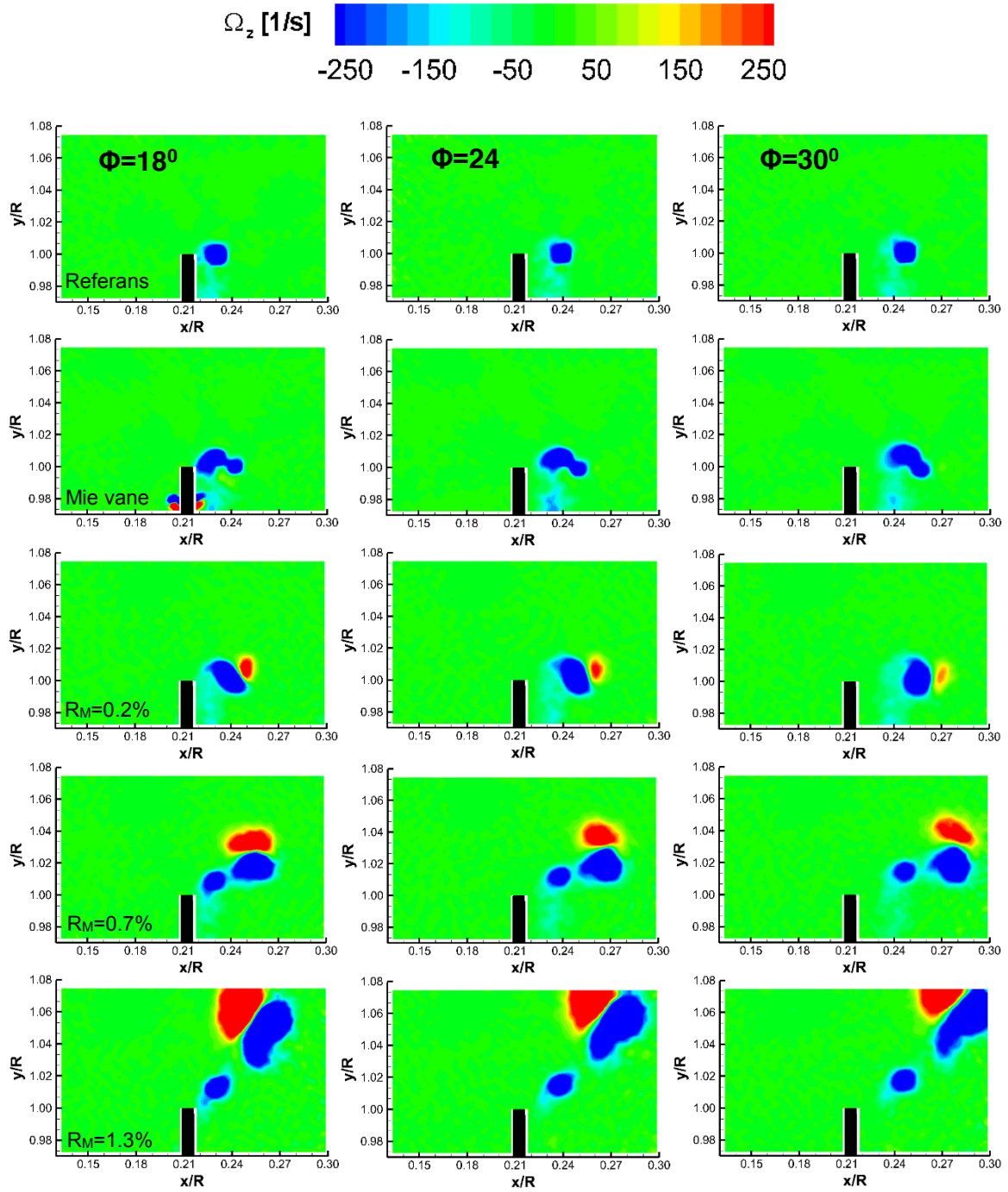
Şekil 45 devamı. 1. sütun:  $\varphi=54^\circ$ , 2. sütun:  $\varphi=60^\circ$

Enjeksiyon durumlarında ise kanat ucu etrafında uç sızmasından dolayı oluşan hız alanlarının, enjeksiyon miktarına göre, çok değişime uğradığı görülmektedir. Kanat ucundan çıkan jetin de etkisi ile oldukça karmaşık ve düzgün olmayan (non-uniform) akış alanı oluşmaktadır. Uç jetinin etkisi ile özellikle en yüksek enjeksiyon durumu olan  $R_M=1.3$  durumunda türbin iz bölgesi ve serbest akış sınırı referans duruma göre çok değişmekte ve oldukça yukarı çekilmektedir. Bu gözlem daha önce sunulan iz bölgesi ölçümleri ile de uyumluluk göstermektedir. Bu olay büyük ihtimalle jetin kendine doğru çekme (entrainment) özelliğinden dolayı olmaktadır. Enjeksiyon yapıldığında uç girdabı oluşumu tamamen engellenememekte ancak uç girdabının şiddeti, akış yolu boyunca takip ettiği güzergah ve konveksiyon hızı çok farklılıklar göstermektedir.

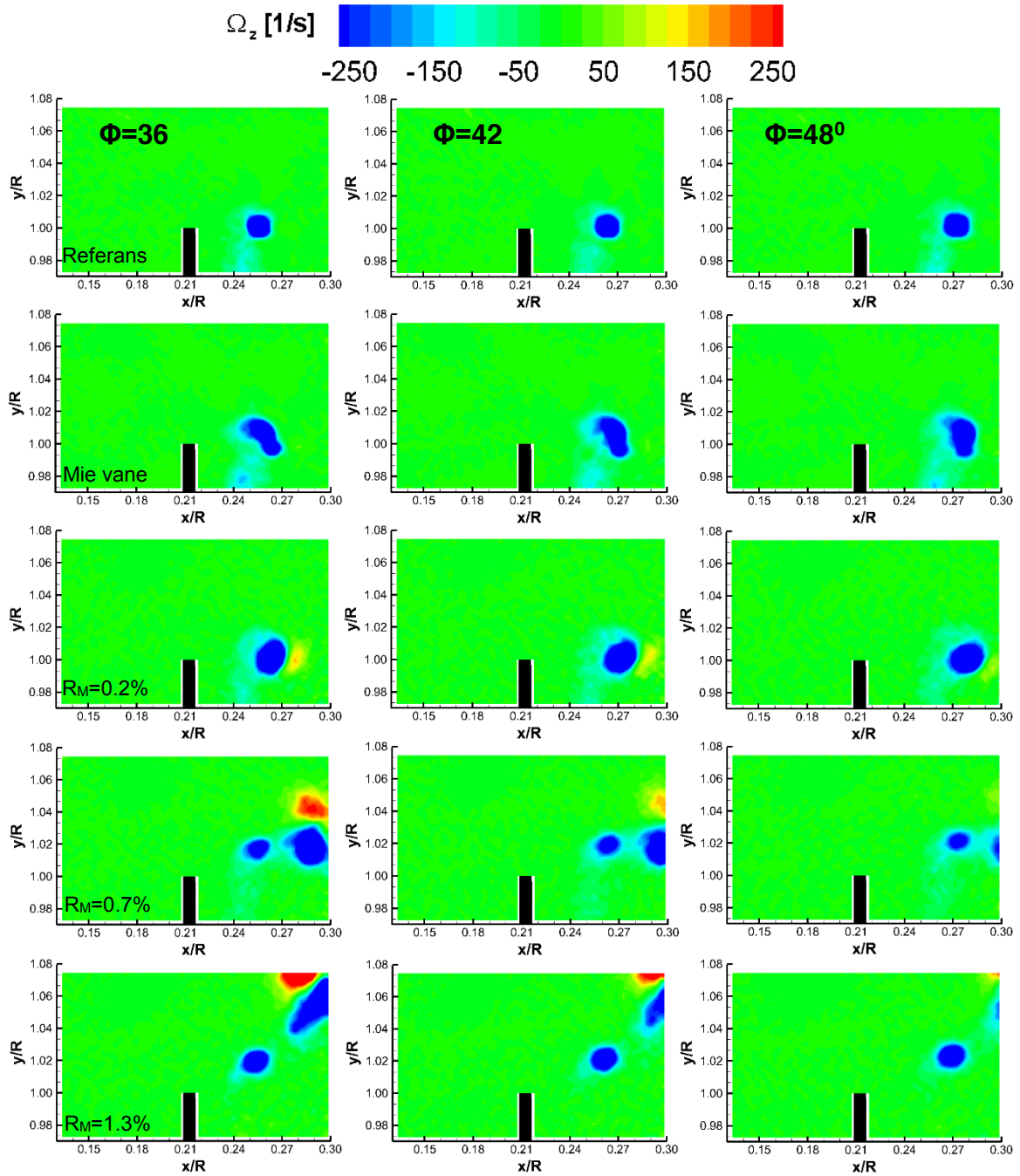
Şekil 46'da, referans durum ve bütün uç kontrol durumlarının her bir fazı için düzlem-dışı vortisite bileşeni dağılımları verilmiştir. Referans durum için uç girdabının oluşumu ve akış boyunca ilerlemesi açıkça gözükmemektedir. Uç girdabının alt tarafında kalan açık mavi renkli konturlar da kanat iz bölgesi etkisinden dolayı oluşmaktadır. V-tipi kanatçık kullanıldığında ise referans durumda olduğu gibi konsantre tekli bir girdap yapısı yerine yan yana ikili bir girdap yapısı gözlemlenmektedir. Bu ikili girdap yapısı fazlar ilerledikçe birbiri ile birleşmekte ve dar ve uzun bir girdap yapısına dönüşmektedir.  $R_M=0.2\%$  durumu için konsantre bir girdap yapısı halen mevcut olmakla beraber referans duruma göre daha büyük bir girdap yapısı oluşmaktadır. Bu girdap yapısının hemen yanında uç enjeksiyon jeti etkisinden dolayı oluşan pozitif değerli ve daha küçük bir girdap yapısının oluştuğu da görülmektedir. Bu pozitif-negatif şiddetli girdap yapıları yaklaşık olarak referans durumdaki iz bölgesi sınırını takip ederek akış boyunca ilerlemektedirler. Uç enjeksiyon jetinin daha güçlü çıkmaya başladığı  $R_M=0.7\%$  ve  $R_M=1.3\%$  durumlarında ise uç jeti akışından dolayı beklendiği şekilde oluşan pozitif-negatif jet kenarı girdap yapıları bulunmaktadır. İlginç olan, enjeksiyonun artmasının girdap oluşmasını tamamen engellemediğidir. Enjeksiyon jetinin oluşturduğu girdapları takip eden uç girdabı yapısı hem  $R_M=0.7\%$  hem de  $R_M=1.3\%$  durumlarında görülmektedir. Bu uç girdapları güzergah olarak daha yüksek bir açı ile yukarı doğru hareket etmekte ve enjekte edilen jetin çekimine maruz kalarak jet girdaplarını takip etmektedirler.



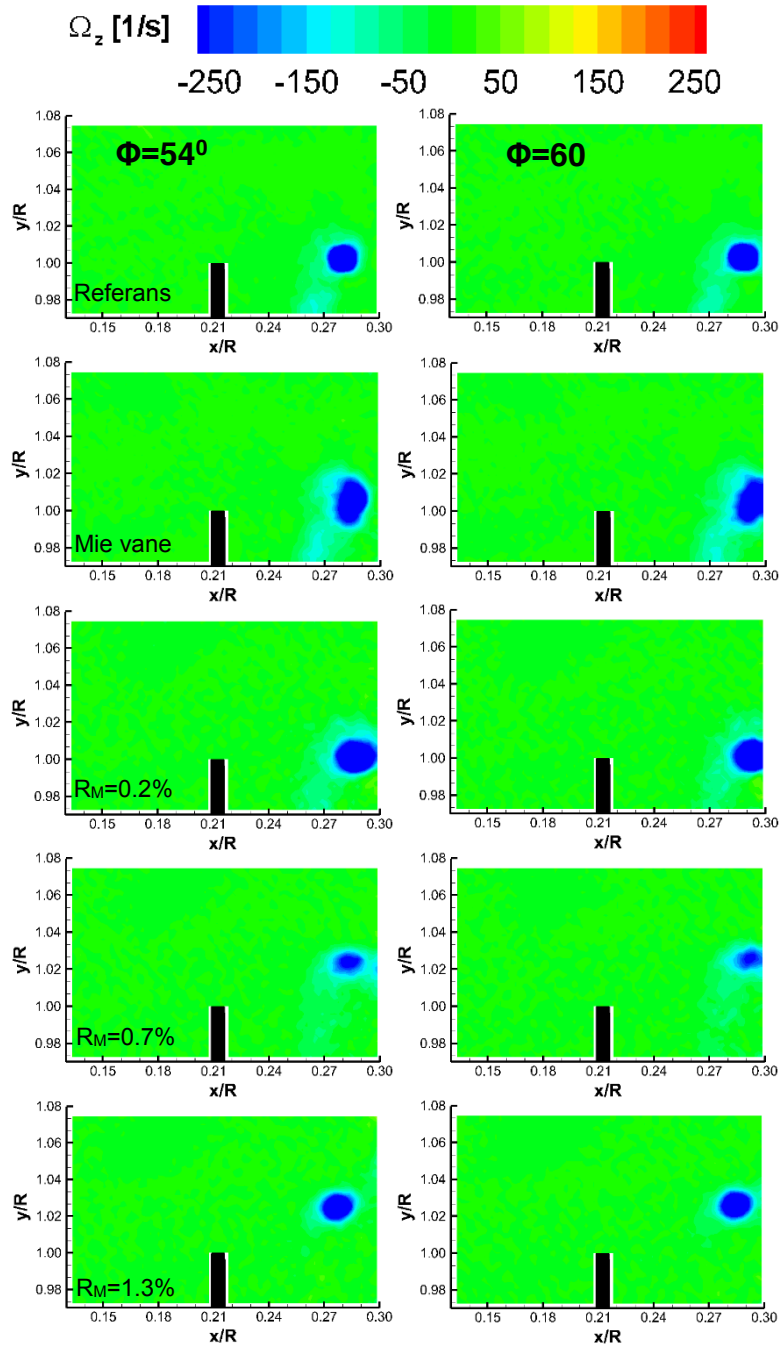
Şekil 46. Farklı faz açılarında ( $\phi$ ) düzlem-dışı vortisite bileşeni değerleri. 1. satır: Referans ölçümler, 2. satır: Mie Vane'li ölçümler, 3. satır:  $R_M=0.2\%$  enjeksiyonlu ölçümler, 4. satır:  $R_M=0.7\%$  enjeksiyonlu ölçümler, 5. satır:  $R_M=1.3\%$  enjeksiyonlu ölçümler. 1. sütun:  $\phi=0^\circ$ , 2. sütun:  $\phi=6^\circ$ , 3. sütun:  $\phi=12^\circ$ . Akış yönü soldan sağdır ve katı siyah cisim türbin kanadını göstermektedir.



Şekil 46 devamı. 1. sütun:  $\phi = 18^\circ$ , 2. sütun:  $\phi = 24^\circ$ , 3. sütun:  $\phi = 30^\circ$



Şekil 46 devamı. 1. sütun:  $\phi = 36^\circ$ , 2. sütun:  $\phi = 42^\circ$ , 3. sütun:  $\phi = 48^\circ$

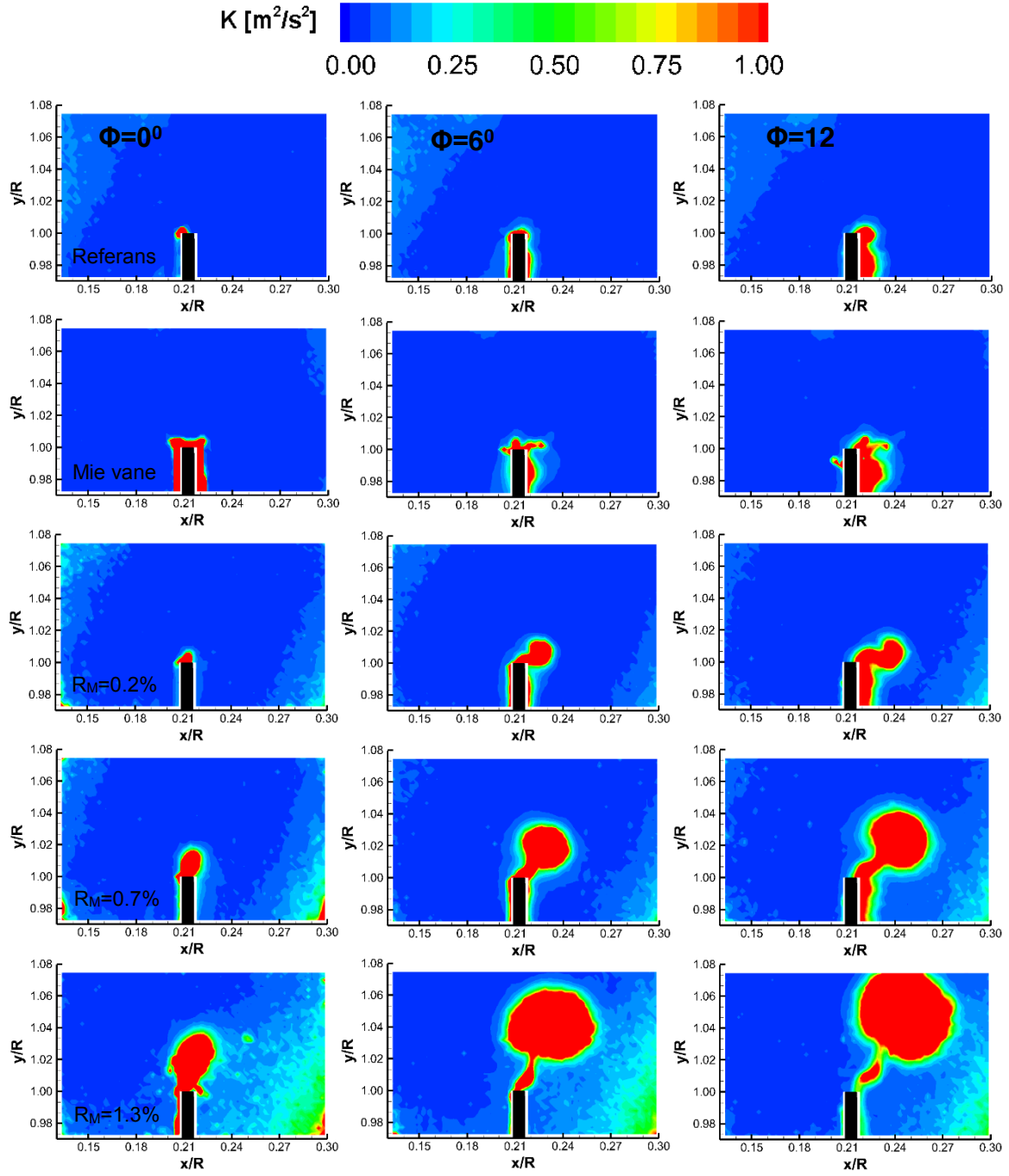


Şekil 46 devamı. 1. sütun:  $\phi=54^\circ$ , 2. sütun:  $\phi=60^\circ$

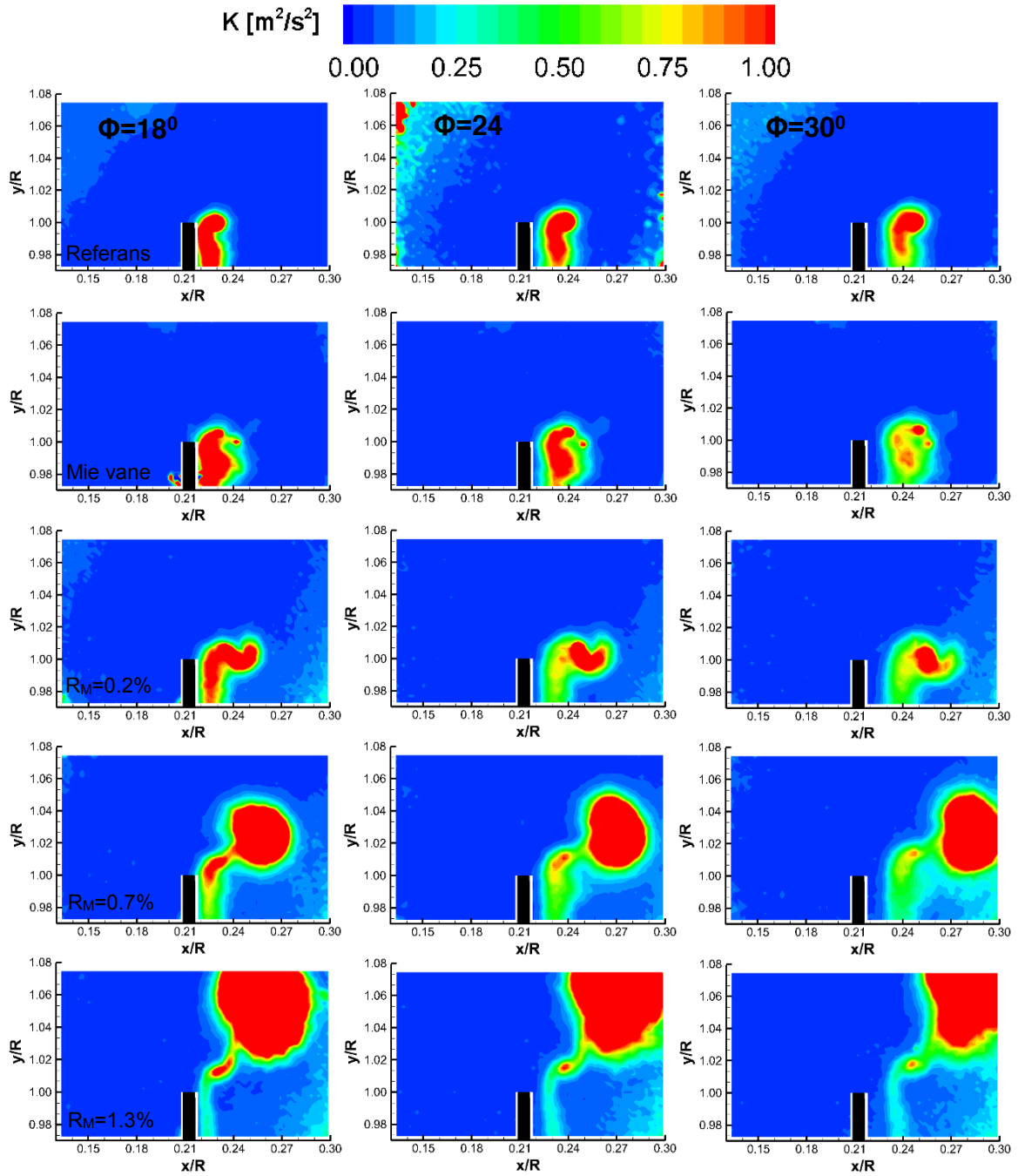


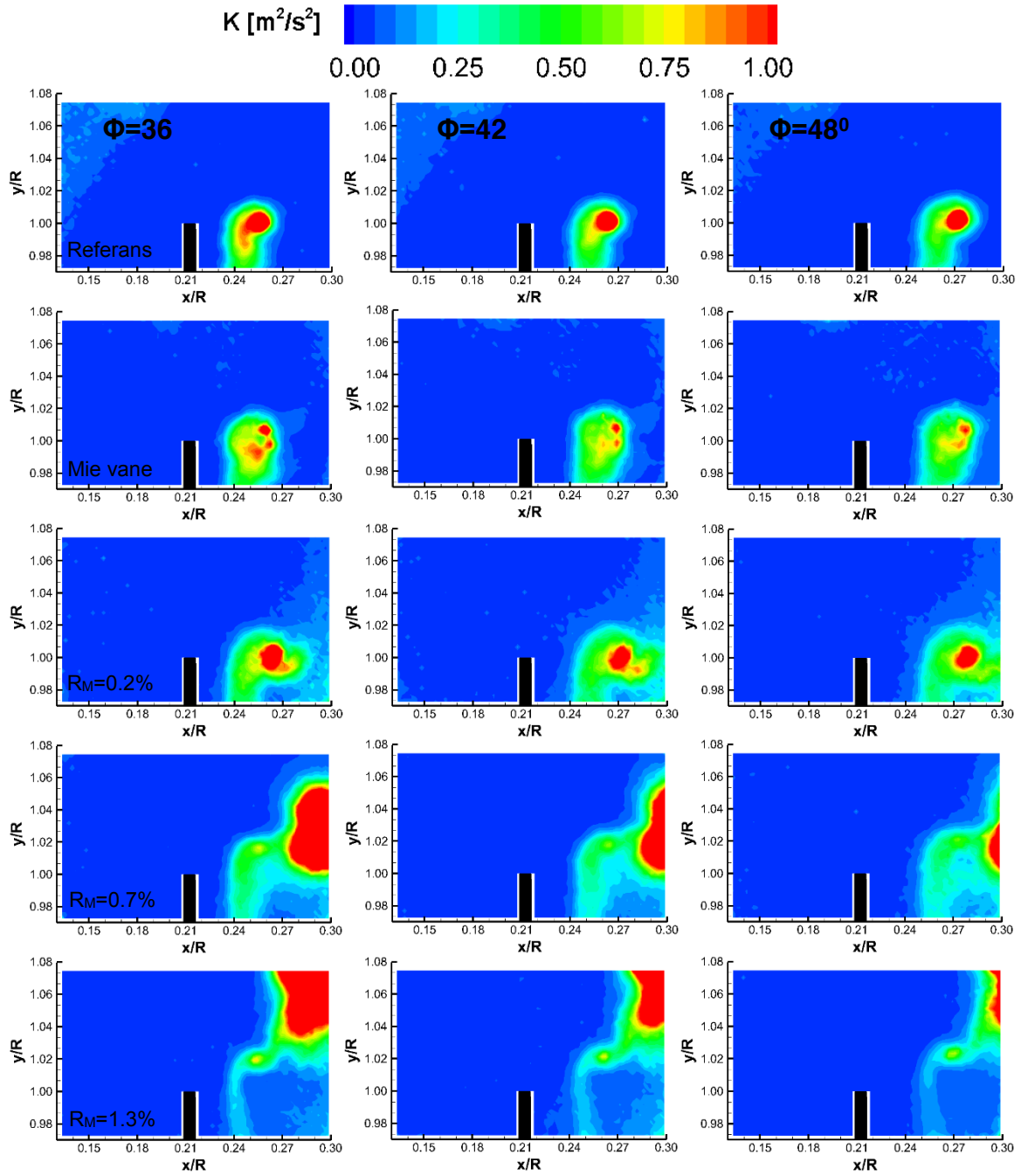
Şekil 47'de farklı fazlarda ve farklı uç senaryoları için elde edilen türbülans kinetik enerjisi dağılımları verilmiştir. Genel olarak bu dağılımlarda hem uç girdabının, hem kanat iz bölgesinin hem de enjeksiyon jetinin etkileri açıkça görülmektedir. Referans durum için uç girdabının olduğu bölgede genellikle konsantre yüksek türbülans kinetik enerjisi görülmekte, girdabın hemen altında ise bir çizgi boyunca kanat iz bölgesinden kaynaklanan yüksek türbülanslı bölge görülebilir (örneğin  $\varphi=30^\circ$ ). V-tipi kanatçıklı sonuçlara bakıldığında aynı bölgelerde yüksek türbülans olduğu ancak şiddetinin referans duruma göre daha az olduğu görülebilir. Dolayısı ile V-tipi kanatçıklar kullanıldığında referans duruma göre kanat uç bölgesinde türbülans şiddeti düşmektedir ki bu sonuç daha önce açıklanan ve sıcak tel anemometresi ile elde edilmiş olan iz bölgesi ölçüm sonuçları ile de uyumluluk göstermektedir (örneğin  $\varphi=42^\circ$ ,  $\varphi=48^\circ$ ). Jet enjeksiyonlu durumlarda ise jetin kendisinin de oluşturduğu ek türbülans dolayısı ile genel olarak daha yüksek türbülans seviyeleri gözlemlenmektedir. Örneğin  $R_M=0.2\%$  durumu için türbülanslı bölge referans ve V-tipi kanatçık durumlarına göre biraz daha geniş bir bölgeyi kaplamakta ve özellikle girdap bölgesinde lokal olarak türbülans seviyeleri daha yüksek çıkmaktadır. Bu sonuçta yine daha önce sunulan iz bölgesi ölçümleri ile uyumludur. Jet enjeksiyon miktarı arttıkça türbülans seviyeleri ve yüksek türbülanslı alanın büyüklüğü de ciddi şekilde artmaktadır. En yüksek enjeksiyon durumunda kanat ucundan oldukça yukarıda çok yüksek türbülanslı bir bölge oluşmakta, bu bölgenin hemen altında ise şiddeti düşmüş olsa da yine de var olan küçük uç girdabından dolayı olan lokal bir yüksek türbülanslı bölge yer almakta, onun da alt kısmında yine kanat iz bölgesinden kaynaklanan ince uzun yüksek türbülanslı bölge görülmektedir. Bu türbülans dağılımı fazlar ilerledikçe bir miktar yayılarak akış boyunca ilerlemektedir. Bu gözlemler daha önce iz bölgesi ölçümlerinde de gözlemlenen kanat ucundan daha yukarıda ve türbin rotoru çevresinde oluşan yüksek türbülanslı bölgeyi oluşturan etkenlerdir. Esas olarak güçlü jet etkisinden dolayı oluşan bu dağılım girdap yapısının daha çabuk yok olmasına yol açabilecektir.

Şekil 48'de tüm fazlar kullanılarak elde edilen grup ortalamalı düzlem-içi hız şiddeti, düzlem-dışı vortisite bileşeni ve türbülans kinetik enerjisi dağılımları verilmektedir. Bu şekilde sunulan sonuçlar yukarıda tartışılan detayları daha açık bir şekilde göstermektedir. Örneğin referans durum ve V-tipi kanatçık sonuçları karşılaştırıldığında uç girdap şiddetinin V-tipi kanatçık durumunda azalmış olduğu hem hız dağılımlarındaki gradyanların yumuşamasından hem de vortisite dağılımlarındaki daha açık maviye geçişten görülebilmektedir. Ortalama türbülans dağılımları ise daha geniş bir bölgeye yayılmakta ve lokal konsantre yüksek türbülans değerleri yerine daha üniform bir türbülans dağılımı oluşmaktadır. Minimum enjeksiyon yapıldığında ise girdap şiddeti bir miktar azalmakla beraber genel olarak girdabın akış boyunca takip ettiği yol değişmektedir.

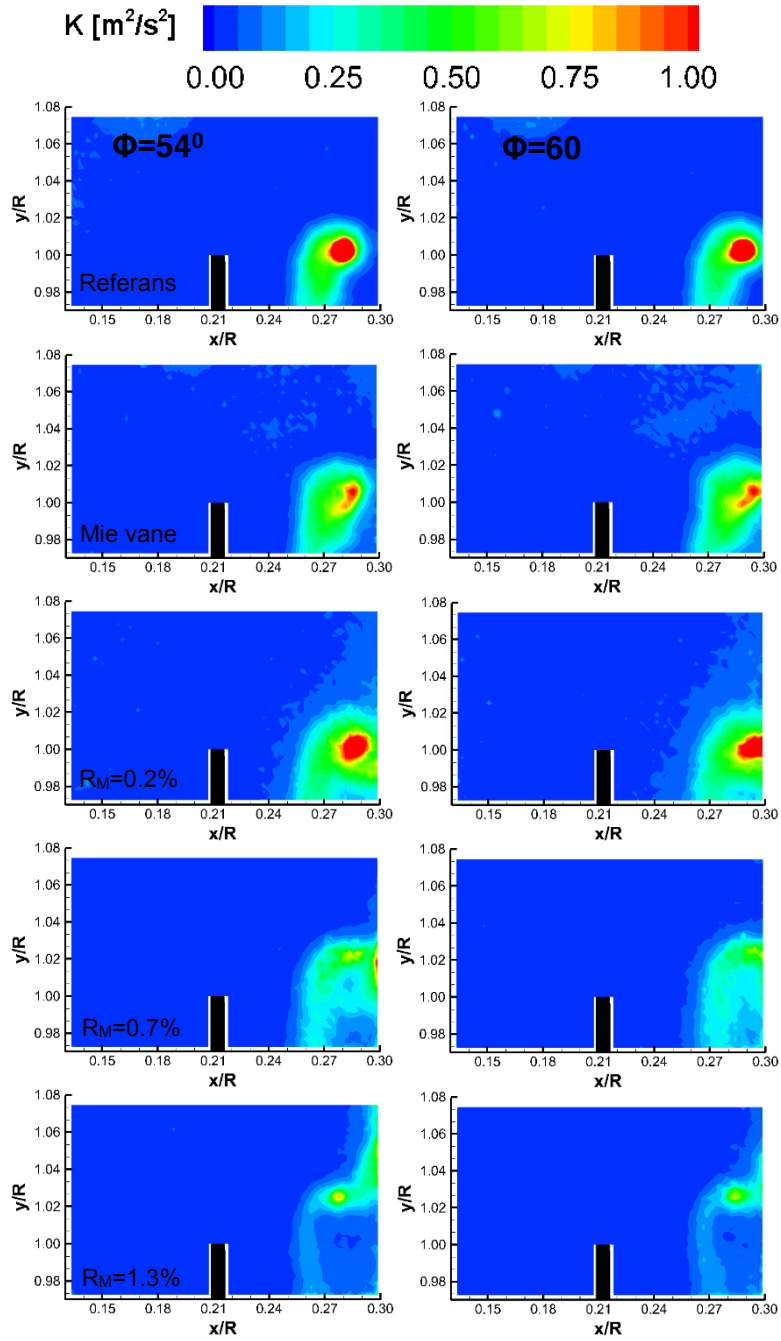


Şekil 47. Farklı faz açılarında ( $\phi$ ) türbülans kinetik enerjisi büyüklükleri. 1. satır: Referans ölçümler, 2. satır: Mie Vane'li ölçümler, 3. satır:  $R_M=0.2$  enjeksiyonlu ölçümler, 4. satır:  $R_M=0.7$  enjeksiyonlu ölçümler, 5. satır:  $R_M=1.3$  enjeksiyonlu ölçümler. 1. sütun:  $\phi=0^\circ$ , 2. sütun:  $\phi=6^\circ$ , 3. sütun:  $\phi=12^\circ$ . Akış yönü soldan sağadır ve katı siyah cisim türbin kanadını göstermektedir.

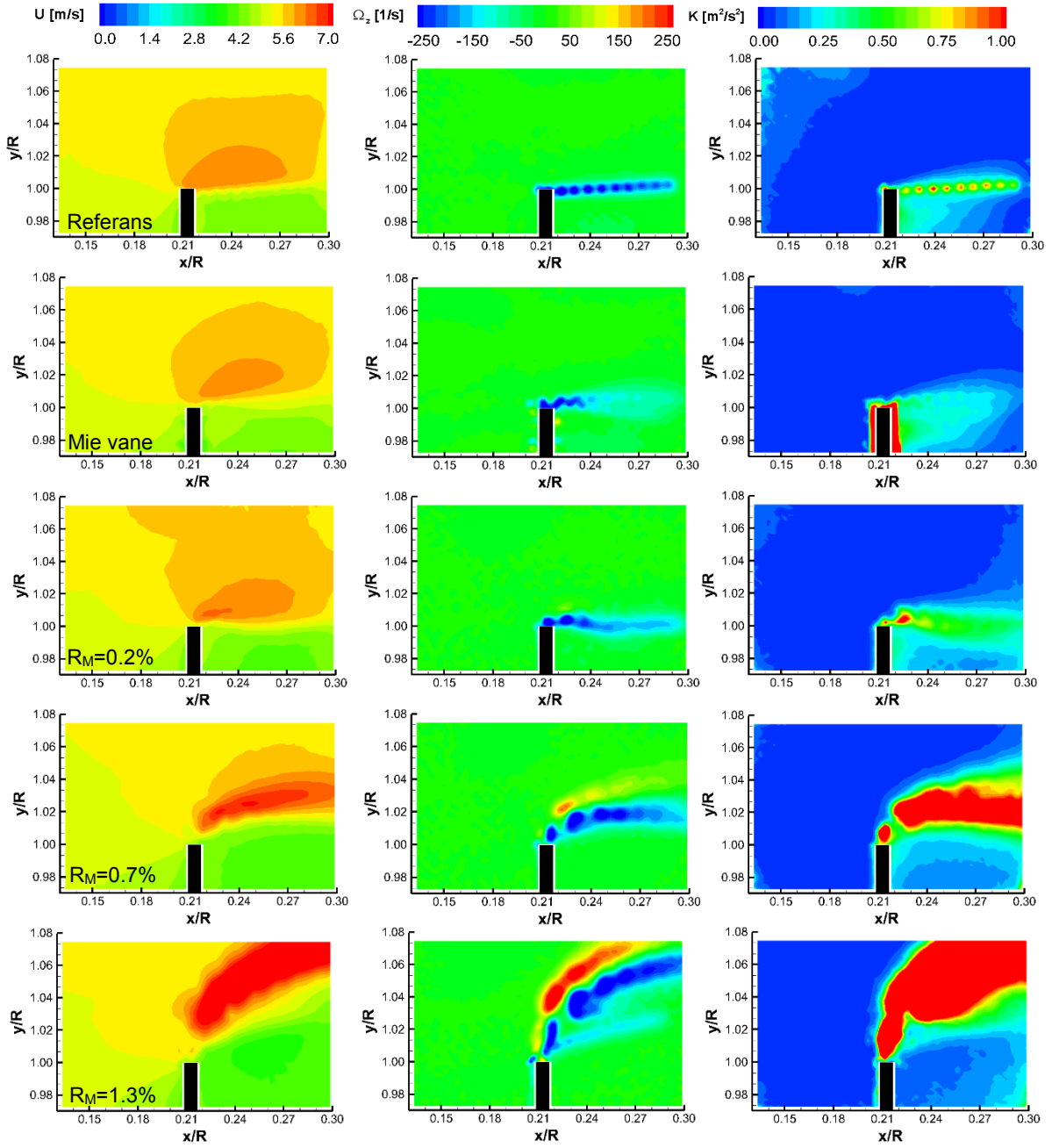




Şekil 47 devamı. 1. sütun:  $\varphi=36^\circ$ , 2. sütun:  $\varphi=42^\circ$ , 3. sütun:  $\varphi=48^\circ$



Şekil 47 devamı. 1. sütun:  $\phi=54^\circ$ , 2. sütun:  $\phi=60^\circ$



Şekil 48. Tüm faz açılarının grup ortalama hız (sol sütun), vortisite (orta sütün) ve türbülans kinetik enerjisi (sağ sütun) dağılımları ( $\varphi=0^\circ-60^\circ$ ). 1. satır: Referans ölçümler, 2. satır: Mie Vane'li ölçümler, 3. satır:  $R_M=\%0.2$  enjeksiyonlu ölçümler, 4. satır:  $R_M=\%0.7$  enjeksiyonlu ölçümler, 5. satır:  $R_M=\%1.3$  enjeksiyonlu ölçümler. Akış yönü soldan sağadır ve katı siyah cisim türbin rotorunu göstermektedir.

Referans durumda beklendiği gibi genişleyen iz bölgesinden dolayı uç girdabı yukarı doğru diyagonal bir güzergah izlerken minimum enjeksiyon yapıldığında bu önce yukarı doğru gidip sonra aşağı inen ve sonrasında da oldukça düz bir şekilde devam eden bir güzergaha dönüşmektedir. Enjeksiyon miktarı arttıkça kanat ucundan jetin etkisi daha belirgin olmaktadır. Özellikle vortisite dağılımlarından da görüleceği üzere jetin bulunduğu bölge kırmızı-mavi kontur bölgeleri olarak açıkça gözükmemektedir. Buna ek olarak en yüksek enjeksiyon durumu için jetin hemen altında uç girdabının takip ettiği güzergahta yukarı doğru diyagonal fakat referans duruma göre daha yüksek açılı bir güzergah olarak oluşmaktadır. Jet enjeksiyon miktarları arttıkça kanat ucundan yukarı doğru uzaklaşan ve oldukça yüksek türbülans seviyeleri olan bölgeler de görülmektedir.

### **3.4 Güç Verimlilik Analizi**

Önceki bölümde farklı oranlardaki uç enjeksiyonlu ile V-tipi kanatçıklı ölçümlerin sonuçlarından bahsedilmiştir. Performans, türbin iz bölgesi ve türbin uç akışları incelendiğinde, her yöntemin türbin performans ve akış karakteristikleri üzerinde önemli değişikliklere neden olduğu gözlemlenmektedir. Özetle uç enjeksiyonlu ölçümler için; enjeksiyonla beraber güç ve itki katsayılarının, artan enjeksiyon oranına ile arttığı, enjeksiyonun türbin iz bölgesinde uç akışı domine ettiği, artan enjeksiyon oranına bağlı olarak uç bölgesinde ortalama hız ve türbülans yoğunluğunu arttırdığı, uç akışta ise uç girdabının etkilerini azalttığı ve jet akışına ve oranına bağlı olarak ikincil girdaplar oluşumuna sebep olduğu gözlemlenmiştir. V-tipi kanatçılardan elde edilen sonuçlara göre ise, kanatçıklı ölçümlerde türbin güç ve yük katsayılarının arttığı, türbin iz bölgesinin uç akışta ortalama hız ve türbülans yoğunluğu değerlerinde azalmaya sebep olduğu ve türbin uç akış bölgesinde uç girdabını bölerek girdabın gücünü azalttığı anlaşılmıştır.

Her ne kadar proje kapsamında incelenen model türbinin özellikle güç katsayısında önemli derecede artışlar gözlemlenmiş olsa da, özellikle kanatçık gibi pasif yöntemlerden farklı olarak enjeksiyonlu durumların aktif uç kontrol yöntemi oldukları için bu yöntemler için de bir miktar enerji harcanması gerektiği unutulmamalıdır. Dolayısıyla türbin performansı için yalnızca enjeksiyonlu ölçümlerden alınan sonuçlara bakarak sağlıklı bir yorum yapmak doğru değildir. Dolayısıyla, uç enjeksiyonun türbin performansı üzerine olan gerçek etkisini bulmak için, uygulanan uç girdabı kontrol yöntemlerinin türbinin yalın (referans) performansına göre verimlilik hesaplarının yapılması gerekmektedir.

Türbin güç verimliliği hesabı enjeksiyonlu ve V-tipi kanatçıklı durumlar için ayrı ayrı incelenmiş ve bütün sonuçlar Tablo 6'da verilmiştir.



### **Enjeksiyon Verimlilik Hesabı**

Uç enjeksiyonu aktif bir kontrol yöntemi olduğundan, belirtilen oranda enjeksiyon yapabilmek için de bir güç harcanması gerekmektedir. Enjeksiyon verimlilik hesabı, türbinde enjeksiyonla elde edilen verimden enjeksiyon için harcanan gücün ve türbinin referans gücünün çıkarılmasıyla elde edilmelidir. Böylece net olarak enjeksiyonun türbinin üzerinde performans açısından nasıl bir etki yarattığı daha sağlıklı anlaşılacaktır. Bunun için, enjeksiyon ile ölçülen güçten (Eşitlik 5), türbinin ölçülen referans gücünü (Eşitlik 4) ve pal uçlarından enjekte edilen havanın toplam gücünü (Eşitlik 6) çıkartıp yine referans güce bölünmesi gerekmektedir. Böylece enjeksiyon yapıldığında referans ölçümlere oranla net yüzde artış hesaplanabilmektedir (Eşitlik 7).

**P<sub>INJ</sub>** : Enjeksiyonlu güç verimliliği

**P<sub>BL</sub>** : Referans güç

**P<sub>INJ</sub>** : Enjeksiyonla ölçülen güç

**P<sub>jet</sub>** : Pal ucundan enjekte edilen havanın toplam gücü

**U<sub>∞</sub>** : Akış hızı

$$P_{BL} = \frac{1}{2} \rho A U_{\infty}^3 C_{BL} \quad [4]$$

$$P_{INJ} = \frac{1}{2} \rho A U_{\infty}^3 C_{PINJ} \quad [5]$$

$$P_{jet} = \frac{1}{2} \rho A U_{jet}^3 \quad [6]$$

$$PB_{INJ} = \frac{(P_{INJ} - P_{BL}) - P_{jet}}{P_{BL}} \quad [7]$$

### **V-tipi Kanatçık (Mie-Vane) Verimlilik Hesabı**

Uç enjeksiyonundan farklı olarak, kanatçıklar pasif yöntemler olduğu için dışarıdan herhangi bir güç harcamaya gerek yoktur. Dolayısıyla kanatçıklı ölçümler için verimlilik hesabı türbinde kanatçık ile elde edilen verimden (Eşitlik 8) türbinin referans gücünün çıkarılmasıyla elde edilebilir (Eşitlik 9).

**P<sub>MV</sub>** : Kanatçıklı güç verimliliği

**P<sub>MV</sub>** : Kanatçık ile ölçülen güç

$$P_{MV} = \frac{1}{2} \rho A U_{\infty}^3 C_{MV} \quad [8]$$

$$PB_{MV} = \frac{P_{MV} - P_{BL}}{P_{BL}} \quad [9]$$

Tablo 6'da üç farklı enjeksiyon ve V-tipi kanatçık ölçümlerinden elde edilen verimlilik analizleri verilmiştir. Enjeksiyonlu verimlilik hesaplamaları,  $PB_{INJ}$ , ve V-tipi kanatçıklı verimlilik hesaplamaları,  $PB_{MV}$ , projede bahsedilen üç ayrı enjeksiyon senaryosu ile V-tipi kanatçıklar için her TSR değeri için ayrı ayrı hesaplanarak sunulmuştur. Sonuçlara bakıldığında, enjeksiyon senaryoları için, performans ölçümleri aksine, enjeksiyon oranı arttıkça verimliliğin düştüğü görülmektedir. Buna göre en verimli enjeksiyon oranı  $R_M=0.2\%$  iken  $R_M=1.3\%$  en verimsiz yöntemdir. Bunun nedeni, yapılan enjeksiyon miktarı ile toplam performansın artmasına rağmen enjeksiyon için harcanan gücün de orantılı olarak artmasıdır. Enjeksiyon oranı arttıkça, enjeksiyon için harcanan güç elde edilen kazançtan büyük olmaya başlamıştır.  $R_M=0.7\%$  ise bu iki değer arasında kalmıştır ve performans sonuçlarında da olduğu gibi etkisini TSR=3.5'tan sonra göstermektedir. Enjeksiyon senaryoları maksimum güç katsayısına karşılık gelen TSR (TSR=4.5) değerinde bir kaymaya neden olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlarla uyumlu olarak  $R_M=0.2\%$  ve  $R_M=0.7\%$  durumları TSR=5 değeri için daha verimli bir artış sağlamaktadırlar. TSR değerleri arttıkça verimliliğin TSR=6 için önce düştüğü daha sonra tekrar arttığı ve referans ölçümlerde güç katsayısının sıfır altına düştüğü yerlerde eksiye düştüğü gözlemlenmiştir. TSR=8'den sonra en düşük ve orta enjeksiyon senaryolarının eksi değer vermelerinin nedeni türbin güç katsayısının eksiye gitmesidir.  $R_M=1.3\%$  oranı için bakıldığında, bu enjeksiyon senaryosunun verimliliği çok yüksek TSR değerlerine kadar kayıp olarak karşımıza çıkmaktadır. TSR=8'den sonra ise bu enjeksiyon senaryosunun verimlilik sağladığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, bu enjeksiyon değeri için türbinin eksi güç katsayısı değerlerine erişmesini geciktiriyor olmasıdır.

V-tipi kanatçıklı sonuçlara bakıldığında beklenildiği üzere V-tipi kanatçıklar TSR=1'den 8'e kadar türbin performansında verimlilik artışına sebep olmaktadır. Bu artış düşük TSR değerlerinde yüksekken maksimum güç katsayısı TSR değerine kadar (TSR=4.5) düşmekte, daha sonra TSR=8'e kadar artmakta, TSR=8'den sonra ise eksi değerler almaktadır.  $R_M=0.2\%$  ile karşılaştırıldığında, V-tipi kanatçıklar düşük TSR değerleri için sistemin verimliliğini daha çok arttırmaktadır. TSR=4.5'dan 6.5'e kadar  $R_M=0.2\%$  enjeksiyon senaryosu, kanatçıklardan daha iyi performans sağlamaktadır. TSR=6.5 değerinden sonra ise  $R_M=0.2\%$  ve V-tipi kanatçıkların sisteme kazancı hemen hemen eşittir.

Yapılan verimlilik analizinden de anlaşılacağı gibi, özellikle enjeksiyon senaryoları için performansın enjeksiyon oranıyla arttığı gözlemlenmiş olmasına karşı, sistemin net verimliliğinin düştüğü anlaşılmıştır. Bu da yüksek oranda enjeksiyon yapmanın sisteme toplamda bir katkı sağlamamasına hatta sistemin verimliliğini düşürmesine yol açmaktadır. Sistemden elde edilebilecek maksimum verimlilik için o sisteme uygun, ideal bir enjeksiyon koşulu olması gerektiği sonucuna varılmıştır. V-tipi kanatçıklı yöntemde bakıldığında ise her

ne kadar toplamda en düşük enjeksiyon senaryosundan daha verimli gibi gözükse de, sisteme fazladan bir parça eklenmesi gerektiğinden sürüklemeyi arttırdığı unutulmamalıdır. Ek olarak, rüzgar türbinleri günlük hayatta tasarım güç katsayısına yakın TSR değerlerinde çalıştığından (maksimum güç katsayısı TSR değeri), bu değerlerde  $R_M=0.2\%$  enjeksiyon senaryosunun daha verimli olduğu gözlemlenmiştir. Bir diğer konu da, kanatçıklar pasif akış kontrol yöntemleri olduğu için istenildiğinde takılıp çıkarılmamaktadır. Öte yandan enjeksiyon aktif bir yöntem olduğunda gerek görüldüğünde, istenilen miktarda uygulanıp, gerek görülüğünde kapatılabilir. Böylece sistemden maksimum verimliliğin elde edilmesi sağlanmış olur.

Tablo 6. Enjeksiyon ( $PB_{INJ}$ ) ve V-tipi kanatçık ( $PB_{MV}$ ) verimlilik hesapları

TSR	$PB_{INJ}$			$PB_{MV}$
	$R_M=0.2\%$	$R_M=0.7\%$	$R_M=1.3\%$	Mie-Vane
0.50	-582.24%	-5883.01%	-13646.60%	-271.00%
0.99	-11.03%	-1712.16%	-4290.59%	260.96%
1.49	21.87%	-471.32%	-1202.34%	140.17%
1.99	30.15%	-270.23%	-769.25%	126.57%
2.49	23.47%	-146.35%	-410.87%	92.22%
2.98	22.62%	-75.10%	-230.15%	63.82%
3.48	20.05%	-35.12%	-133.76%	49.39%
3.98	13.84%	1.55%	-29.23%	18.95%
4.48	22.97%	12.12%	-7.74%	10.64%
4.97	32.64%	16.35%	-2.38%	11.66%
5.47	29.66%	10.72%	-7.55%	13.13%
5.97	27.37%	6.84%	-32.65%	19.87%
6.47	46.81%	14.80%	-45.19%	47.22%
6.96	69.27%	35.74%	-66.75%	68.36%
7.46	97.47%	52.91%	-161.48%	109.63%
7.96	-164.12%	-102.65%	256.38%	-139.62%
8.46	-48.92%	-52.12%	48.53%	-50.43%
8.95	-21.62%	-35.99%	34.73%	-10.88%
9.45	-18.95%	-14.14%	29.59%	-14.20%
9.95	-7.50%	-5.23%	34.09%	8.45%

#### 4. SONUÇLAR

Bu proje kapsamında, yatay eksenli rüzgar türbinlerinde uygulanabilecek, uç enjeksiyonu ile aktif uç girdabı kontrolü yöntemi deneysel yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar hem referans enjeksiyonsuz ölçüm sonuçları ile hem de V-tipi kanatçık kullanılarak yapılan pasif uç girdabı kontrolü sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Uç enjeksiyonu ve V-tipi kanatçıkların hem türbin tork ve itki kuvveti karakteristikleri, hem iz bölgesi karakteristikleri hem de kanat ucu yakınındaki akış ve türbülans alanına olan etkileri çeşitli ölçüm teknikleri ile elde edilen veriler karşılaştırılarak araştırılmıştır. Deneysel bu proje çerçevesinde kurulan açık-jet rüzgar tüneline, yük ölçümleri, sıcak-tel anemometresi ile iz bölgesi ölçümleri ve Particle Image Velocimetry (PIV) kullanılarak uç girdabı ölçümleri şeklinde gerçekleştirilmiştir.

Uç enjeksiyonunun genel olarak türbin tork ve itme kuvveti üzerinde bu değerleri artırıcı yönde bir etkisi olduğu görülmüş, iz bölgesindeki hız ve türbülans alanlarını ve kanat ucu kenarındaki uç girdabı yapılarını, enjeksiyon miktarına bağlı olarak ciddi bir şekilde değiştirdiği gözlemlenmiştir. Özellikle en yüksek güç katsayısına denk gelen Uç Hız Oranı (TSR) civarında enjeksiyon miktarlarına bağlı olarak, güç katsayısında önemli artışlar elde edilmiştir. Benzer şekilde itki kuvvetinde de artışlar gözlemlenmiştir. Uç enjeksiyonunun kanat ucu yakınındaki akış karakteristiğini oldukça değiştirmesinden dolayı türbin uç kayıpları azalmakta, efektif kanat açıklığı artmakta ve dolayısı ile türbin daha yüksek tork üretebilmektedir. Enjeksiyon ayrıca kanat ucu ve türbin rotor çeperi civarında oluşan serbest akış-iz bölgesi sınırını etkilemekte, bu sınırı radyal yönde yukarı doğru itmekte ve sınır bölgesinde çok yüksek türbülanslı bölgeler oluşturmaktadır.

Genel olarak uç enjeksiyonu yapıldığında güç katsayısında önemli artışlar gözükse de uç jetini oluşturmak için de bir güç harcadığı için bir güç bütçe analizi yapılması gerekmektedir. Bu analiz bu proje çerçevesinde yapılmış ve genel olarak en verimli durumların minimum enjeksiyon ( $R_M=0.2\%$ ) ve V-tipi kanatçık durumları olduğu gözlemlenmiştir. Daha yüksek enjeksiyon miktarları güç katsayısını daha fazla artırsa bile daha fazla enerji gerektirdikleri için toplam verimlilik hesapları negatif çıkmaktadır. Sonuç olarak bir aktif uç girdabı ve yük kontrolü tekniği olarak uç enjeksiyonu yeteri kadar yapıldığı takdirde daha yüksek güç katsayısında çalışabilen daha verimli türbinlerin kullanılmasına olanak sağlayabilecektir.

#### Öneriler:

Yapılan çalışmalar sonucunda uç enjeksiyonunun model rüzgar türbini performansı ve iz bölgesi üzerinde olumlu etkileri olduğu görülmüştür. Bu doğrultuda, uç enjeksiyonunun

rüzgar türbini performansı ve uç girdabı üzerindeki etkilerinin daha geniş kapsamlı araştırılması gerektiği düşünülmektedir. Bu amaçla farklı rüzgar hızlarında ve daha farklı enjeksiyon senaryoları için uç enjeksiyonunun etkilerinin incelenmesi yararlı olacaktır. Farklı rüzgar hızlarında ve farklı enjeksiyon oranlarında çalışmak, uç enjeksiyonu mekanizmasının türbin performansı üzerindeki etkisinin birebir anlaşılması açısından faydalı olabilir. Benzer bir şekilde farklı TSR değerleri için türbin iz bölgesi ve uç akışı incelemesi yapılması, uç girdabının temel özelliklerini kavramada ve bu özelliklerin enjeksiyon ile nasıl değiştiğini anlamada büyük yarar sağlayacağı düşünülmektedir. Benzer bir şekilde uç enjeksiyonu türbin iz bölgesini etkilediği ortaya konmuştur. Rüzgar çiftliklerinde birbiri ardına sıralanmış rüzgar türbinleri düşünüldüğünde, uç enjeksiyonunun bir başka rüzgar türbininin iz bölgesinde çalışmakta olan türbinler üzerindeki etkilerinin de araştırılması, rüzgar çiftliklerindeki toplam güç verimliliği üzerindeki etkilerinin anlaşılmasına da yardımcı olacaktır.

## KAYNAKLAR

Abdulrahim A., Anik E., Ostovan Y., Uzol O. 2016. "Effects of Tip Injection on the Performance and Near Wake Characteristics of a Model Wind Turbine Rotor", *Renewable Energy*, 88, 73-82.

Adaramola, M. S., & Krogstad, P.-Å. (2011). Experimental investigation of wake effects on wind turbine performance. *Renewable Energy*, Vol. 36, Issue 8, pp. 2078–2086. doi:10.1016/j.renene.2011.01.024

Bae, J. W., Breuer, K. S., Tan, C. S. 2005. "Active Control of Tip Clearance Flow in Axial Flow Compressors", *ASME Journal of Turbomachinery*, 127, 352-362.

Bai, Y., Ma, X., Ming, X. 2011. "Lift enhancement of airfoil and tip flow control for wind turbine", *Applied Mathematics and Mechanics*, Vol. 37, No. 7, pp. 825-836.

Bartl J. 2011. "Wake Measurements Behind an Array of Two Model Wind Turbines", M.Sc. Thesis, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Norway

Bindon, J. P. 1987. "The Measurement of Tip Clearance Flow Structure on the Endwall and Within the Clearance Gap of an Axial Turbine Cascade", *Proc. ImechE Int. Conference Turbomachinery-Efficiency Prediction and Improvement*, Cambridge, United Kingdom, C273/87

Blomhoff, H. P. 2012. "An experimental investigation of wind turbine wakes", M.Sc. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology, Department of Energy and Process Engineering.

Cumpsty, N. A. 1989. *Compressor Aerodynamics*. London: Longman Group.

Duraisamy, K., Baeder, J. D. 2004, "Control of Helicopter Rotor Tip Vortex Structure Using Blowing Devices", *60th Annual Forum Proceedings, American Helicopter Society*, 2, 1952-1967.

Gaunaa, M., Johansen, J. 2007. "Determination of the Maximum Aerodynamic Efficiency of Wind Turbine Rotors with Winglets", *Journal of Physics: Conference Series*, 75, 0-12.

Geng, S., Zhang, H., Chen, J., Huang, W. 2007. "Numerical Study on the Response of Tip Leakage Flow Unsteadiness to Micro Tip Injection in a Low Speed Isolated Compressor Rotor", GT2007-27779, Proceedings of ASME Turbo Expo 2007, May 14-17 Montreal, Canada.

Gursul, I., Vardaki, E., Margaris, P., Wang, Z. 2007. "Control of Wing Vortices", Active Flow Control, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, 137-151, Springer-Verlag Berlin.

Han, Y. O., Leishan, J. G. 2004. "Investigation of Helicopter Rotor-Blade-Tip-Vortex Alleviation Using a Slotted Tip", AIAA Journal, Vol. 42, 3, 524-535.

Hansen, M. O. L. 2008. Aerodynamics of Wind Turbines (İkinci Basım). Sterling, VA: Earthscan.

Heyes, F. J. G., Hudson, H. P. 1993. "Measurement and Prediction of Tip Clearance Flow in Linear Turbine Cascades", ASME J. of Turbomachinery, 115, 376-382.

Johansen, J., Sørensen, N. N. 2006. "Aerodynamic investigation of Winglets on Wind Turbine Blades using CFD", Risø-R-1543(EN), Risø National Laboratory, Roskilde.

Karlsen, J. 2009. "Performance calculations for a model türbine", M.Sc. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology, Department of Energy and Process Engineering.

Liu, Z., Sankar, L., & Hassan, A. 2000. Alteration of the tip vortex structure of a hovering rotor using oscillatory jet excitation. In *38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibition* (pp. 1–9). Reston, Virginia, American Institute of Aeronautics and Astronautics, January 2000, doi:10.2514/6.2000-259.

Lu, X., Chu, W., Zhu, J., Tong, Z. 2006. "Numerical and Experimental Investigations of Steady Micro Tip Injection on a Subsonic Axial Flow Compressor Rotor", International Journal of Rotating Machinery, 2006, 1-11.

Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A., L. 2009. Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. Chester, UK: John Wiley & Sons.



Margaris, P., Gursul, I. 2004. "Effect of Steady Blowing on Wing Tip Flow Field", AIAA 2004-2619. 2nd Flow Control Conference, Portland, Oregon, June-July 2004.

Matalanis, C. G., Nelson, G. D., Eaton, J. K., 2007. "Novel Aerodynamic Device for Wake Vortex Alleviation", AIAA Journal, 45 (9), 2350-2352.

Mercan, B. 2012. "Experimental Investigation of the Effects of Waveform Tip Injection on the Characteristics of Tip Leakage Vortex in a LPT Cascade", M.Sc. Thesis, Middle East Technical University.

Mercan, B., Doğan, E., Ostovan, Y., Uzol, O. 2012. "Experimental Investigation of the Effects of Waveform Tip Injection in a Low Pressure Turbine Cascade", ASME Turbo Expo 2012, Copenhagen, Denmark, June 11-15 2012.

Nie C., Tong, Z., Geng, S., Zhu, J., Huang, W. 2007. "Experimental Investigations of Micro Air Injection to Control Rotating Stall", Journal of Thermal Science, 16 (1), 1-6.

Panagakos, A., Lee, T., 2006. "Tip Vortex Control via an Active Trailing Edge Tab", Journal of Aircraft, 43 (4), 1152-1158.

Ragheb, M., and Ragheb, A. M. 2011. Wind Turbines Theory - The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio, Fundamental and Advanced Topics in Wind Power, Carriveau R., InTech.

Shen, W. Z., Mikkelsen, R., Sørensen, J. N. 2005. "Tip Loss Corrections for Wind Turbine Computations", Wind Energy, 8, 457-475.

Shimizu, Y., Van Bussel, G. J., Matsumura, S., Bruining, A., Kikuyama, K., Hasegawa, Y. 1990. "Studies on Horizontal Axis Wind Turbines With Tip Attachments", Proc. ECWEC '90, Madrid, Spain, 279-283.

Shimizu, Y., Imamura, H., Matsumura, S., Maeda, T. 1995. "Power Augmentation of a Horizontal Axis Wind Turbine Using a Mie-Type Tip Vane: Velocity Distribution Around the Tip of a HAWT Blade With and Without a Mie-Type Tip Vane", ASME Journal Solar Energy Engineering, 117, 297-303.

Shimizu, Y., Ismaili, E., Kamada, Y., Maeda, T. 2003. "Rotor Configuration Effect on the Performance of a HAWT with Tip-Mounted Mie-Type Vanes", ASME Journal Solar Energy Engineering, 125, 441–447.

Smith, L. H. Jr. 1958. "The Effect of Tip Clearance on the Peak Pressure Rise of Axial Flow Fans and Compressors", ASME Symposium on Stall, ASME, NY, 149-152.

Somers, D. M. 2005. "The S825 and S826 Airfoils Period of Performance: 1994 – 1995", Airfoils, Inc., State College, Pennsylvania.

Vasilescu, R., Dancila, D. S. 2004. "Helicopter Blade Tip Vortex Modifications in Hover Using Piezoelectrically Mounted Blowing", 60th Annual Forum Proceedings, American Helicopter Society, 2, 981-994.

Vasilescu, R., Dancila, D. S. 2004. "Helicopter Blade Tip Vortex Modifications in Hover Using Piezoelectrically Mounted Blowing", PhD Thesis, Georgia Institute of Technology.

Wisler, D. C. 1985. "Loss Reduction in Axial Flow Compressors Through Low Speed Model Testing", ASME Journal of Turbomachinery, 107, 354-363.

**TÜBİTAK**  
**PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

<b>Proje No:</b> 112M105
<b>Proje Başlığı:</b> Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinde Uç Enjeksiyonu Kullanılarak Aktif Uç Girdabı Kontrolü Yönteminin Deneysel İncelenmesi
<b>Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar:</b> Doç. Dr. Oğuz UZOL,
<b>Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:</b> Orta Doğu Teknik Üniversitesi Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü İnönü Blv. 06531 ANKARA
<b>Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:</b> TÜBİTAK Atatürk Bulvarı No:221 06100 Kavaklıdere/ANKARA
<b>Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:</b> 15.11.2012-15.11.2015
<b>Öz (en çok 70 kelime)</b> Bu çalışmada, model bir rüzgar türbininin kanat uçlarından farklı oranlarda uç enjeksiyonu yapılarak, türbin üzerindeki performans, türbin iz bölgesi ile uç girdabı akış karakteristikleri üzerindeki etkisi deneysel yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar model türbinin referans ölçümlerle V-tipi kanatçık yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Model türbinin uç enjeksiyonu ve V-tipi kanatçıklarla performansının arttığı, uç girdabının zayıfladığı ve de uç enjeksiyonu ile iz bölgesinin genişlediği gözlemlenmiştir.
Anahtar Kelimeler: Rüzgar türbini, uç girdabı, uç girdabı kontrolü, uç enjeksiyonu
<b>Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu mu?</b> Evet <input type="checkbox"/> Gerekli Değil <input checked="" type="checkbox"/> Fikri Ürün Bildirim Formu'nun tesliminden sonra 3 ay içerisinde patent başvurusu yapılmalıdır.
<b>Projeden Yapılan Yayınlar:</b> <b><u>SCI Makale</u></b> - Abdulrahim A., Anik E., Ostovan Y., Uzol O., <i>Effects of Tip Injection on the Performance and Near Wake Characteristics of a Model Wind Turbine Rotor</i> , Renewable Energy, 2016, Vol. 88 p73-82. <b><u>Uluslararası Konferans</u></b> - Anik E., Abdulrahim A., Uzol O., <i>Effects of Mie Vanes and Tip Injection on the Performance and Wake Characteristics of HAWT</i> ", 34th ASME Wind Energy Symposium, AIAA SciTech2016, California, USA, 4-8 January 2016. - Anik E., Abdulrahim A., Uzol O., <i>2D-PIV Investigation of the Effects of Tip Injection</i>

*on the Tip Flow Characteristics of a Model HAWT*, 11th EAWE PhD Seminar, Stuttgart, Germany, 23-25 September 2015.

- Abdulrahim A., Anik E., Uzol O., *Effects of Tip Injection and Mie Vanes on the Performance of a Model Wind Turbine Rotor*, NAWEA 2015 Symposium, North American Wind Energy Academy, Blacksburg, Virginia USA, 9-11 June 2015.
- Abdulrahim A., Anik E., Uzol O., *Experimental Investigation of the Wake Flow Field of a Model Wind Turbine Rotor with Tip Injection*, 33rd ASME Wind Energy Symposium, AIAA SciTech2015, Florida, USA, 5-9 January 2015.
- Abdulrahim A., Anik E., Ostovan Y., Uzol O., *Effects of Tip-Injection on the Flow Downstream of a Model Wind Turbine Rotor Blade Tip*, 10th EAWE PhD Seminar on Wind Energy in Europe, 28-31 October 2014, Orléans France.
- Anik E., Abdulrahim A., Ostovan Y., Mercan B., Uzol O., *Active Control of The Tip Vortex: An Experimental Investigation on the Performance Characteristics of a Model Turbine*, The Science of Making Torque from Wind (TORQUE2014), Technical University of Denmark (DTU), Copenhagen, Denmark, June 18-20, 2014.

### **MS Tezleri**

- Abdulrahim A., Experimental Investigation of the Effects of Tip-Injection on the Aerodynamic Loads and Wake Characteristics of a Model Horizontal Axis Wind Turbine Rotor (Yüksek Lisans Tezi), Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği, (Eylül 2014'te sunuldu).
- Anik E., Experimental Investigation of the Effects of Tip Injection on the Characteristics of the Tip Vortex on a Model Wind Turbine (Yüksek Lisans Tezi), Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği, (Şubat 2015'te sunuldu)