

YÖNLENDİRİCİ AÇISININ TERS DÖNÜŞLÜ RADYAL-RADYAL DÖNDÜRÜCÜ PERFORMANSINA ETKİSİ

Ayşe Bay^{1,2} ve Fırat Kıyıcı^{3,4}
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Havacılık ve Uzay Mühendisliği, Ankara

Mustafa Perçin^{5,6}
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Havacılık ve Uzay Mühendisliği, Ankara

ÖZET

Gerçekleştirilen çalışmada yönlendirici açısının ters dönüşlü radyal-radyal döndürücü tarafından yaratılan ortalama akışa olan etkisi deneysel olarak incelenmiştir. İki boyutlu iki bileşenli PIV ölçümleri reaktif olmayan düzlemsel yanma odası test düzeneğinde gerçekleştirilerek dönüş sayıları özdeş ve 1.2 olan üç farklı yönlendirici geometrisine sahip zıt dönüşlü döndürücüler test edilmiştir. Yönlendirici geometrisine sahip döndürücüler sırasıyla, yuvarlatılmış yönlendirici geometrisi, 27.5° ve 45° yönlendirici açılara sahiptir. PIV deneyleri sonucu elde edilen ortalama akış alanları incelendiğinde yönlendirici geometrisinin eklenmesiyle radyal hız bileşenlerinde artış, aksenal hız bileşenlerinde ise azalma olduğu gözlemlenmiştir. Yönlendirici geometrisine sahip döndürücüler etkisindeki akış doğrudan duvara yapışmakta ve duvar boyunca akmaya devam etmektedir. Yönlendirici geometrisine sahip olmayan döndürücü ise, köşe resirkülasyon bölgeleri oluşturmakta ve döndürücü jeti daha ileri bir noktada duvara yapışmaktadır. Farklı yönlendirici akışlarına sahip döndürücülerin akış alanları birbiri ile karşılaştırıldığında ise, akış alanında büyük farklılıklar olmadığı, akışın ortalama hızlar ve resirkülasyon bölgesinin yapısı bakımından benzerlik gösterdiği gözlemlenmiştir. Türbülans yoğunluğunun anlaşılması için ortalama türbülans kinetik enerji konturları çizilmiş ve yönlendirici geometrisine sahip olmayan geometride döndürücü jetini takip ederek yayılan bir yoğunluk görülürken, yönlendirici açısına sahip sonuçlarda türbülans yoğunluğu döndürücü çıkışında yoğun olup, etkisini hemen yitirmektedir.

SEMBOLLER

D_h	Hidrolik çap
TKE	Türbülans kinetik enerji
V_0	Test odası ortalama eksenele giriş hızı

GİRİŞ

Döndürücü etkisinde akış, gaz türbin endüstrisi yanma odalarında sıkça kullanılan bir yapıdır. Döndürücü etkisi altındaki yanma odası akışları avantajları arasında kısalan reaktif alan uzunlukları, alev kararlılığının sağlanması ve bileşen ömründeki artış sayılabilir [Syred ve Beér, 1974]. Döndürücü etkisindeki akışlar geniş, düşük hız alanları barındıran iç ve dış resirkülasyon bölgeleri oluşturur. Bu resirkülasyon bölgeleri etkisinde serbest akış türbülans etkileri artar ve bunun sonucunda reaksiyon ve karıştırma oranları artış gösterir [Andreini, v.d, 2017]. Radyal kanallı çift akışlı döndürücüler endüstride sıkça kullanılmaktadır. Literatürde bu tip döndürücülerin performansını inceleyen pek çok çalışma mevcuttur. Döndürücülere ait geometrik parametrelerin değiştirilmesi akış alanını değiştirmektedir. Literatürde sıkça çalışılan bu parametrelerden bazıları hapsetme oranı, dönüş yönü, kanal geometrisi, dönüş sayısı ve yönlendirici açısıdır.

Fu ve çalışma arkadaşları yaptıkları çalışmalarda LDV yöntemini kullanarak hapsetme oranının ters dönüşlü radyal-radyal döndürücülerin akış alanına etkisini incelemiş, hapsetme oranı artıktça

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, E-posta: e203667@metu.edu.tr

² Mühendis, TUSAŞ Motor Sanayi, Eskişehir

³ Yüksek Lisans Öğrencisi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

⁴ Uzman Mühendis, TUSAŞ Motor Sanayi, Eskişehir

⁵ Yardımcı Doçent Dr., Orta Doğu Teknik Üniversitesi, E-posta: mpercin@metu.edu.tr

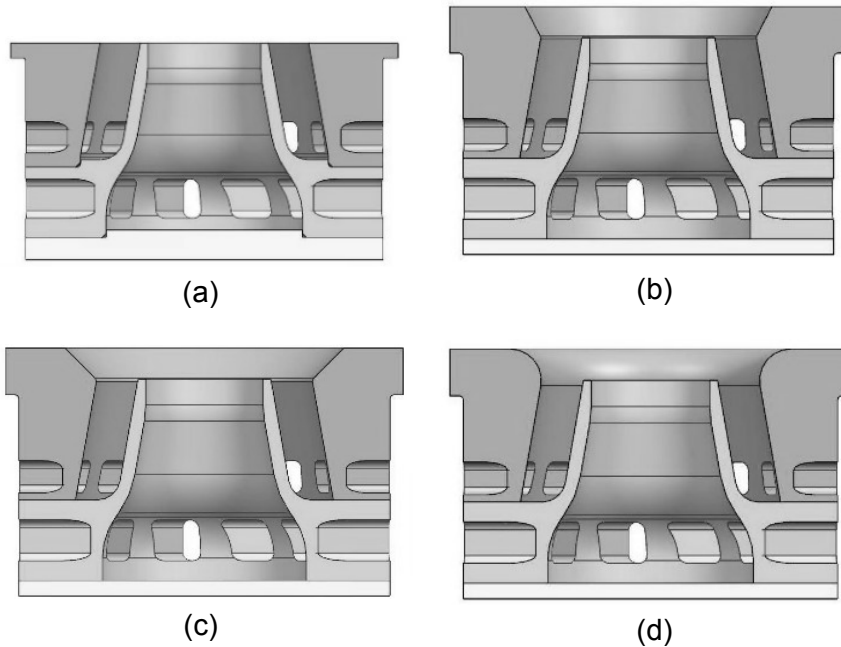
⁶ METUWIND Uygulamalı Aerodinamik Laboratuvarı Koordinatörü

türbülans yoğunluğu olan bölgelerini akış boyunca daha aşağı lokasyonlara ilerlediğini gözlemlemişlerdir. [Fu, v.d, 2005], [Fu, v.d, 2007]. Benzer bir şekilde Kıyıcı ve Perçin de hapsetme oranının ters dönüşlü radyal-radyal döndürücü etkisi altındaki akışa olan etkisini incelemiş ve köşe resirkülasyon bölgelerinin hapsetme oranı arttıkça küçüldüğünü, türbülans yoğunluğunun en büyük değerlerinin en küçük hapsetme oranı için gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir [Kıyıcı ve Perçin, 2021]. Estefanos çalışmalarında PIV yöntemi ile reaktif olmayan yanma test odasında yönlendirici geometrisinin merkez resirkülasyon bölgesi genişliği üzerindeki etkisini düşük dönüş sayılarına sahip döndürücüler için incelemiştir [Estefanos, Tambe, ve Jeng, 2015]. FFT analizi gerçekleştirerek akış dinamiği ile ilgili bulgular elde etmişlerdir. Merkezi ve köşe resirkülasyon bölgeleri etrafındaki kayma gerilmesinin yoğun olduğu katmanlar arasında öne çıkan akış kararsızlıkları gözlemlemişlerdir. Wang de çalışmalarında yönlendirici geometrisinin etkisini düşük dönüş sayıları için çalışmış ancak deneylerinde çok-fazlı akışları da incelemiştir [Wang, McDonell, ve Samuelsen, 1995]. Çalışmadan elde edilen bulgulara göre yönlendirici açısı arttıkça merkezi resirkülasyon bölgesinin genişliği artmaktadır. İzotermal koşulların yanı sıra, yanma reaksiyonlarının akış fenomenlerine etkisinin anlaşılması için de birtakım çalışmalar gerçekleştirilmiştir [Cai, v.d, 2010], [Marinov, v.d, 2010] ve [Merkle, v.d, 2003].

Bu çalışmalar incelendiğinde, yüksek dönüş sayısına sahip döndürücülerin yönlendirme açısının akış alanına etkisini inceleyen sınırlı sayıda çalışma olduğu görülmektedir. Burada yapılan çalışmanın amacı farklı yönlendirici geometrilerine sahip döndürücülerin oluşturduğu akış alanlarını birbirleri ile karşılaştırarak yönlendirici etkisinin incelenmesini sağlamaktır.

YÖNTEM

Yapılan çalışma kapsamında incelenen döndürücü geometrilerinin görselleri Şekil 1, özellikleri ise Tablo 1 ile verilmiştir. İncelenen tüm döndürücülerin 8 birincil, 12 ikincil kanalı vardır ve kanalların dönüş yönü zıt biçimdedir. Benzer tasarımların karşılaştırılması amacıyla, yalnızca yönlendirici geometrisinin etkisinin incelenmesi için diğer döndürücü tasarım parametreleri olan hidrolik çap, dönüş sayısı, hapsetme oranı gibi değerler özdeş olacak şekilde değerleri sırasıyla 30 mm, 1.2 ve 23.4 olarak tasarlanmıştır. Tablo 1 ile verilen yönlendirici açısı değerleri Şekil 2 de gösterildiği üzere düşey eksene göre ölçülmüştür.

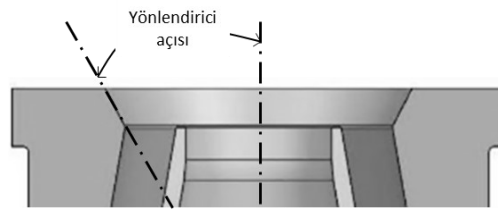


Şekil 1 Döndürücü geometrileri (a) yönlendirici geometrisine sahip olmayan referans döndürücü, (b) 27.5° yönlendirme açısına sahip döndürücü (c) 45° yönlendirme açısına sahip döndürücü (d) yuvarlatılmış yönlendirme geometrisine sahip döndürücü

Tablo 1 İncelenen döndürücü geometrilerinin özellikleri

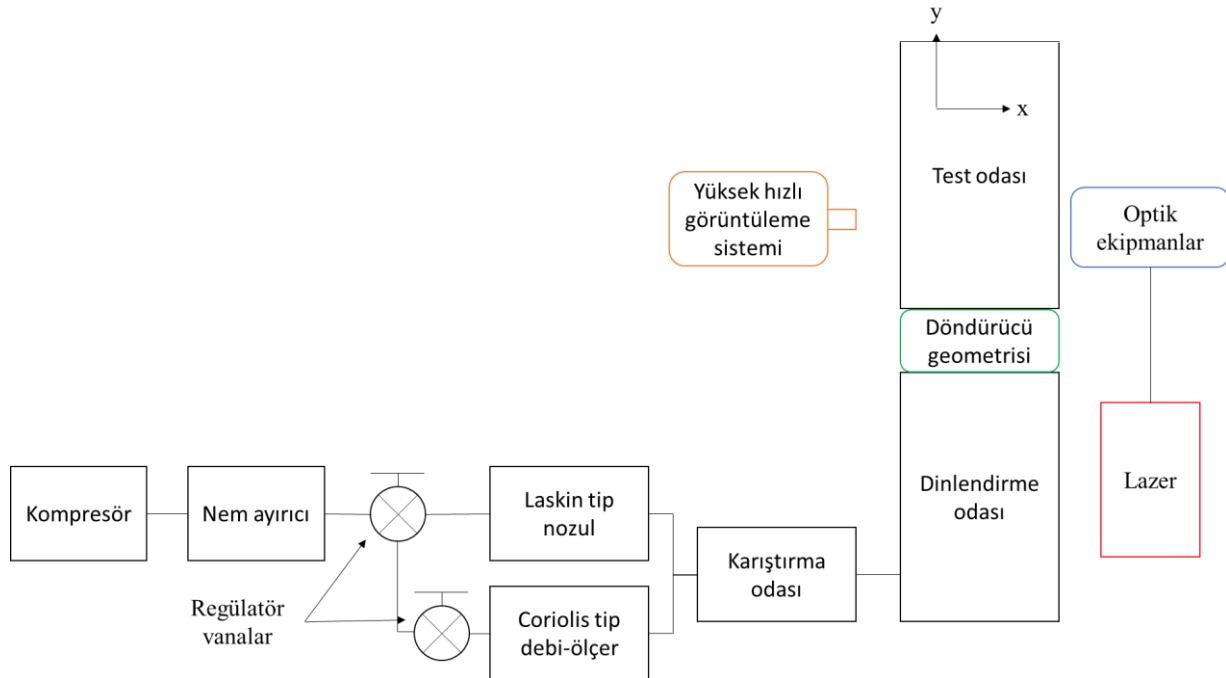
İsim	Dönüş yönü	Dönüş sayısı*	Yönlendirici geometrisi
Referans döndürücü	Zıt	1.2	-
27.5° yönlendirici açılı döndürücü	Zıt	1.2	27.5° pah açısı
45° yönlendirici açılı döndürücü	Zıt	1.2	45° pah açısı
Yuvarlatılmış yönlendiricili döndürücü	Zıt	1.2	Yuvarlatılmış

*Dönüş sayısı ventüri bölgesinde hesaplanmıştır.

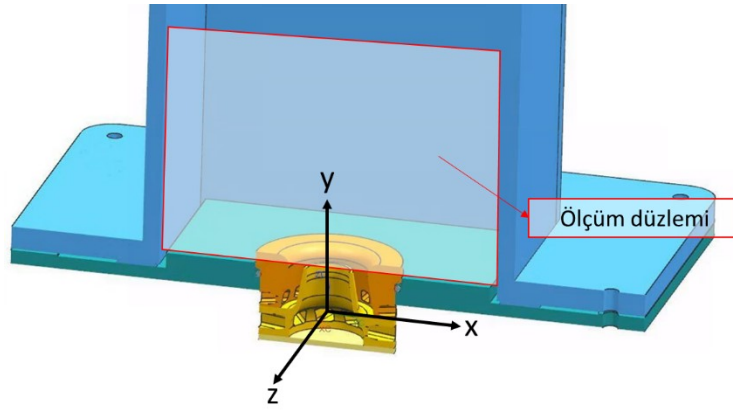


Şekil 2 Yönlendirici açısı gösterimi

Sonuçları sunulan bu çalışmaya ait deneyler Orta Doğu Teknik Üniversitesi bünyesinde çalışmalarını sürdüren RÜZGEM tesislerinde yer alan reaktif olmayan düzlemsel bir yanma odası test odasında gerçekleştirilmiştir. Test odası basınçlı kuru (nemi alınmış) hava sağlayıcı bir sistem ile beslenmektedir. Test odasına giren hava debisi regülatör vanalar yardımı ile istenen değere getirilmektedir. Bu değer 12.9 g/s olarak belirlenmiş ve bu şartlara tekabül eden Reynolds sayısı 35000 olarak hesaplanmıştır (Reynolds sayısı hidrolik çap ve döndürücü çıkışındaki akış hızı gözetilerek hesaplanmıştır). PIV deneyleri için kullanılan zeytinyağı damlacıkları Laskin tip lüle yardımı ile test odası havasının içerisine yayılmıştır. Bir karıştırma ve dinlendirme odasının ardından hava test odasına iletilmektedir. Anlatılan bu deney düzeneği ile Şekil 3 gösterilmiştir. Ölçüm düzlemi ile döndürücü geometrisinin test odasına yerleşimi ise Şekil 4 ile gösterilmiştir.



Şekil 3 PIV deney düzeneği

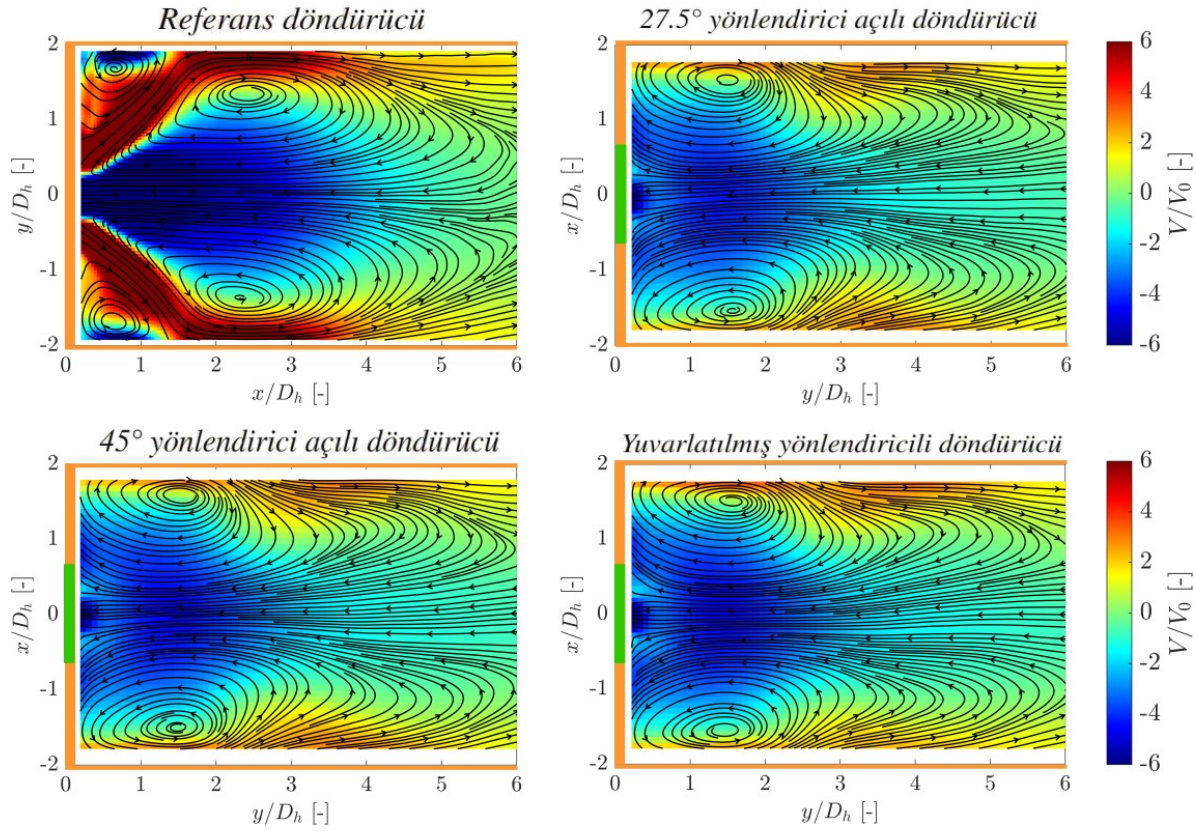


Şekil 4 Ölçüm düzlemi gösterimi

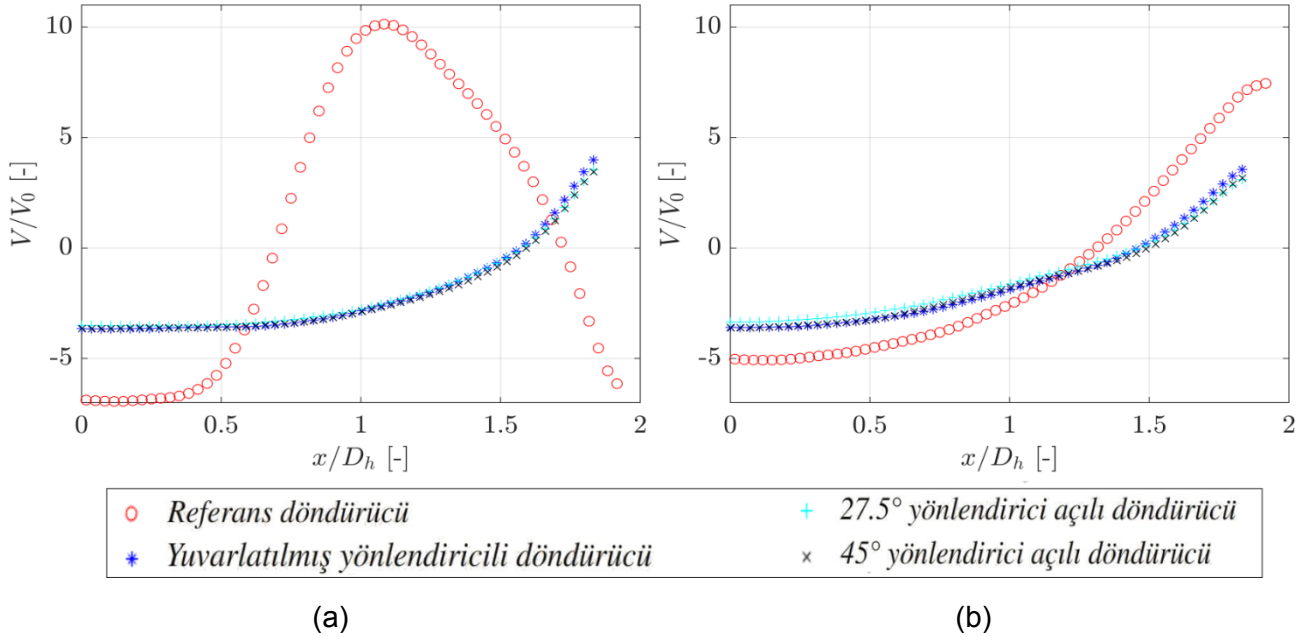
Lazer ile aydınlatılan döndürücü çıkışı orta düzleminin görüntülenmesi için ikili imaj çiftleri kullanılmış ve yakınsamış ortalama akış alanının elde edilmesi için toplamda 2000 imaj çifti 20 Hz veri toplama frekansı ile kaydedilmiştir. Bu imajların kaydedilmesi için Phantom V641 yüksek hızlı kamera (maksimum çözünürlük 2560×1600 piksel², 1500 fps) kullanılmıştır. Kullanılan lazer ise dalga boyu 532 nm olan çift atış Nd:YAG lazer (New Wave Research Solo 120XT) ekipmanıdır. Ölçüm düzlemindeki lazer kalınlığı 1 mm olacak şekilde optik ekipmanlar yerleştirilmiştir. Bir çift lazer atışı arasındaki zaman 60 μ s olarak belirlenmiştir. Bu değer belirlenirken PIV imajlarında inceleme pencerelerinde partikül hareketlerinin tespit edilebilir düzeyde olmasına ve düzlem-dışı partikül hareketlerinin imaj çiftlerine yansımamasına dikkat edilmiştir. Kaydedilen imaj çiftleri DynamicStudio v2015a yazılımı kullanılarak işlenmiştir. İşleme esnasında ilgi bölgesinin belirlenmesi (ROI), düşük geçirimli filtre kullanımı ile arka plan çıkarımı, uyarlanabilir kros-korelasyon algoritması ile üniversal aykırı değer ayıklamasından oluşan bir analiz sekansı takip edilmiştir. İnceleme pencerelerinin boyutu 32×32 pixel² olarak belirlenmiştir.

UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Şekil 5'te incelenen tüm döndürücülerin zaman ortalamalı akış alanlarının y-yönündeki hız konturları görülmektedir. İlk olarak referans döndürücü akış alanı sonucu ile yönlendirici geometrisi eklenmiş döndürücünün akış alanı karşılaştırılırsa, yönlendirici geometrisi eklenmesi radyal hız bileşeninde artış, eksenel hız bileşeninde ise bir düşüşe yol açmaktadır. Bunun sonucunda döndürücüden çıkan jet ani bir açılım sonucunda duvara yapışır ve duvar jeti olarak akmaya devam eder. Referans geometrinin akış sonuçlarında köşelerde resirkülasyon bölgelerinin oluşumu gözlemlenirken yönlendirici geometrisi eklenmesi ile bu oluşum ortadan kalkmaktadır. Öte yandan, yönlendirici geometrisine sahip döndürücülerin akış alanları kendi içlerinde karşılaştırıldığında ise yönlendirici geometrisinin değişmesine rağmen, benzer akış profillerinin elde edildiği gözlemlenmiştir. Deneylerin gerçekleştirildiği hapsedme oranları ve döndürücülerin mevcut dönüş sayıları için, yönlendirici geometrisi değişse de resirkülasyon bölgelerinin şekli ve boyutları ve incelenen eksenel hızların boyutları bakımından akışlar benzerlik göstermektedir.



Şekil 5 İncelenen döndürücülerin zaman ortalamalı akış alanlarının y-yönündeki hız bileşenlerinin karşılaştırması

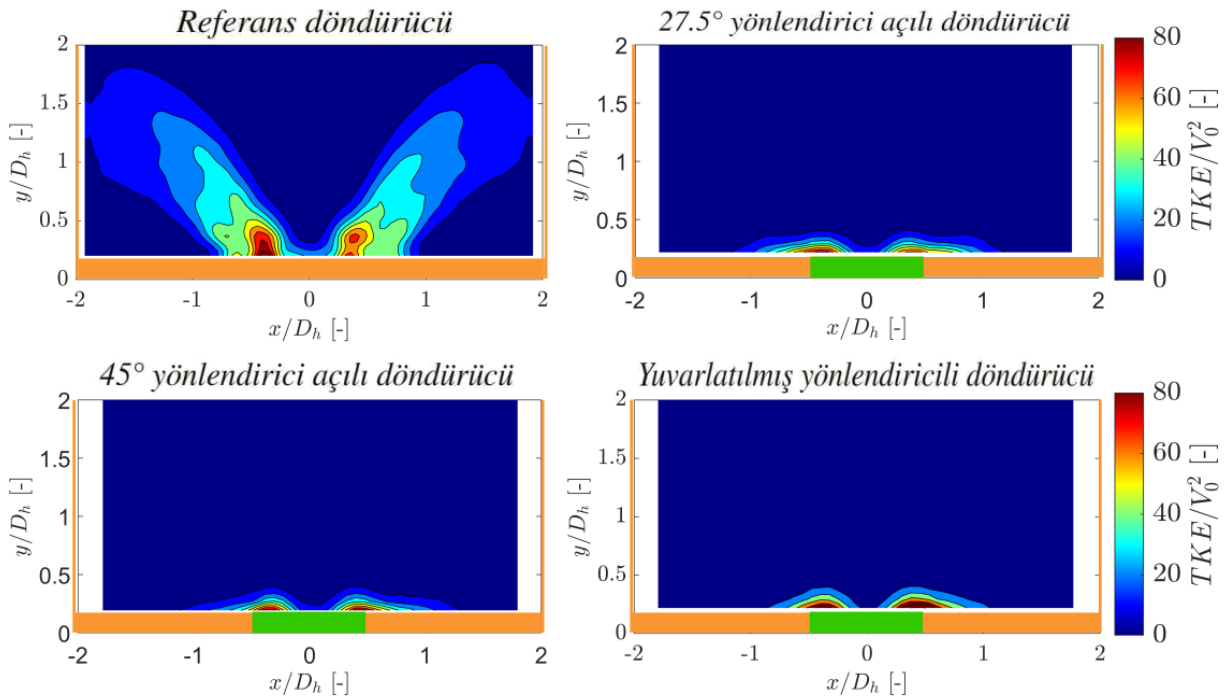


Şekil 6 Farklı döndürücü geometrileri için zaman ortalamalı akışın y-yönündeki hız bileşeni (a) $y/D_h = 1$, (b) $y/D_h = 2$

Farklı döndürücü geometrileri için zaman ortalamalı akışın y-yönündeki hız bileşeni birbirinden farklı eksenel lokasyonlarda Şekil 6 ile gösterilmiştir. (a) ile (b) şekilleri karşılaştırıldığında referans döndürücüde akış yönünde ilerledikçe merkez resirkülasyon bölgesinde genişleme ve negatif hız bileşeninin tepe değerinde düşüş gözlemlenmiştir, yönlendirici geometrisine sahip döndürücülerde ise resirkülasyon bölgesinin etkinliğinin azalışı özellikle $x/D_h = 0.5-1.5$ arasında gözlemlenen negatif hız bileşenlerinin büyüklüklerindeki azalmadan anlaşılmaktadır. Yönlendirici geometrisine sahip olmayan döndürücü sonuçları incelendiğinde $y/D_h = 1$ lokasyonunda akışın duvara yapışmamasından dolayı pozitif eksenel hızların en yüksek değerleri merkez ve köşe resirkülasyon

bölgeleri arasında gözlemlenmiştir. Yönlendirici geometrisine sahip döndürücü sonuçları incelendiğinde ise, akışın duvar jeti olarak akması sebebiyle pozitif aksenal hızı tepe değerleri duvara yakın bölgelerde elde edilmiştir. Alınan ölçümlerde duvar bölgesinde imajlardaki yansımadan dolayı akış alanının tamamı incelenememiş, bu sebeple alınan veriler $x/D_h = 2$ değerine kadar uzanmamaktadır. Yönlendirici geometrisi eklenmesi ile birlikte resirkülasyon bölgesi içerisindeki negatif aksenal hız bileşenlerinin büyüklüklerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durumun sebebi yönlendirici geometrisine sahip olmayan döndürücü etkisindeki akış içerisindeki akış yönündeki yüksek aksenal basınç gradyanları ile açıklanabilir. Yönlendirici geometrisine sahip sonuçlar kendi aralarında karşılaştırıldığında ise verilen hapsedme oranı ve dönüş sayısında hız profilinde belirgin bir farklılığa rastlanmamıştır. Şekil 5 ile elde edilen uyumlu akış alanının hız büyüklüklerinin de benzer olduğu burada açıkça gözlemlenmektedir.

Şekil 7'de farklı yönlendirici geometrilerine sahip döndürücüler ile referans döndürücünün akış alanlarına ait normalize edilmiş kinetik enerji oranı konturları verilmiştir. Bu konturlardan anlaşılacağı üzere yönlendirici geometrisine sahip olmayan referans konfigürasyonda türbülans, döndürücü jeti birlikte yayılmaktadır. Yönlendirici yapısının eklenmesi sonucu ise, oluşan ani radyal açılım sebebi ile döndürücü çıkışında yüksek TKE değerleri görülmekte, ancak bu değer aniden etkisini yitirmektedir. Bu durum yönlendirici geometrisi eklenmesi sonucu dönüş sayısının artabileceğini öne süren literatür çalışmaları ile uyumlu bir bilgiye işaret etmektedir. Ayrıca yuvarlatılmış yönlendirici geometrisine sahip döndürücü ile pah açılı yönlendirici geometrilerine sahip döndürücülerin TKE profilleri karşılaştırıldığında yuvarlatılmış geometrinin daha yüksek TKE değerlerine yol açtığı gözlemlenmiştir.



Şekil 7 İncelenen döndürücülerin normalize edilmiş türbülans kinetik enerji oranlarının karşılaştırması

SONUÇ

Bu çalışmada ters dönüşlü radyal-radyal kanallı döndürücü tarafından oluşturulan akışa yönlendirici geometrisinin etkisi sabit bir hapsedme oranı ve dönüş sayısında deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan PIV ölçümleri yönlendirici geometrisi eklenmesinin akış alanı üzerinde oldukça etkili olduğunu göstermektedir. Yönlendirici geometrisine sahip olmayan döndürücü etkisinde, köşe ve merkez resirkülasyon bölgeleri yüksek hız değerlerine sahip döndürücü jeti ile birbirlerinden ayrılmaktadır. Yönlendirici geometrisine sahip olan koşullarda ise köşe resirkülasyon bölgesi görülmemekte, geniş uzun bir merkez resirkülasyon bölgesi oluşumu görülmektedir. Akış doğrudan duvarlara yapışmakta ve türbülans yoğunluğu döndürücü çıkışında en yüksek değerlerine ulaşmaktadır. Akış yapısı, merkez resirkülasyon bölgesinin genişliği ve türbülans

yoğunluğu mertebeleri bakımından farklı yönlendirici geometrileri arasında incelenen dönüş sayısı ve hapsedme oranları için bariz bir fark görülmemektedir.

Kaynaklar

- Andreini, A., Becchi, R., Facchini, B., Picchi, A., & Peschiulli, A. (2017). The effect of effusion holes inclination angle on the adiabatic film cooling effectiveness in a three-sector gas turbine combustor rig with a realistic swirling flow. *International Journal of Thermal Sciences* 121, 75-88.
- Cai, J., Ichihashi, F., Mohammad, B., Tambe, S., Kao, Y.-H., & Jeng, S.-M. (2010). Gas Turbine Single Annular Combustor Sector: Combustion Dynamics. *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. Orlando, Florida: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Estefanos, W., Tambe, S., & Jeng, S. (2015). Effect of the Flare Expansion Angle on the Mean and Dynamic Behavior of Swirling Flow Generated by a Counter Rotating Radial-Radial Swirler Using a Water Test Rig. *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition. Volume 4B: Combustion, Fuels and Emissions*. Montreal, Quebec, Canada: ASME.
- Fu, Y., Cai, J., Jeng, S.-M., & Mongia, H. (2005). Confinement Effects on the Swirling Flow of a Counter-Rotating Swirl Cup. *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air. Volume 2: Turbo Expo 2005*. (s. 469-478). Reno, Nevada, USA: ASME.
- Fu, Y., Cai, J., Jeng, S.-M., & Mongia, H. (2007). Characteristics of the Swirling Flow Generated by a Counter-Rotating Swirler. *43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibition*. Cincinnati, OH: AIAA.
- Kıyıcı, F., & Perçin, M. (2021). Experimental Investigation of the Confinement Effects in Radial-Radial Swirlers. *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2021: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Volume 3A: Combustion, Fuels, and Emissions*. Virtual, Online: ASME.
- Marinov, S., Kern, M., Merkle, K., Zarzalis, N., Peschiulli, A., Turrini, F., & Sara, O. N. (2010). On Swirl Stabilized Flame Characteristics Near the Weak Extinction Limit. *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air. Volume 2: Combustion, Fuels and Emissions, Parts A and B* (s. 259-268). Glasgow, UK: ASME.
- Merkle, K., Büchner, H., Zarzalis, N., & Sara, O. N. (2003). Influence of Co and Counter Swirl on Lean Stability Limits of an Airblast Nozzle. *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2003, collocated with the 2003 International Joint Power Generation Conference. Volume 2: Turbo Expo 2003*. (s. 1-9). Atlanta, Georgia, USA.: ASME.
- Syred, N., & Beér, J. (1974, October). Combustion in swirling flows: A review. *Combustion and Flame*, 23(2), 143-201.
- Wang, H. Y., McDonnell, V. G., & Samuelsen, S. (1995, April). Influence of Hardware Design on the Flow Field Structures and the Patterns of Droplet Dispersion: Part I - Mean Quantities. *J. Eng. Gas Turbines Power*, 117(2), 282-289.