

YÖNDEŞ VE TERS AKIŞLI HAVA PARÇALAMALI YAKIT-HAVA PÜSKÜRTÜCÜLÜ BİR YANMA ODASININ KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Hasan Başar BOLAT ¹ ve Sıtkı USLU ²
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara

ÖZET

Yanma odası tasarımlarında yakıt ve havanın iyi derecede karıştırılmaları en önemli parametrelerden birisidir. Hava parçalama atomizerler, sıvı yakıtı atomize etmenin yanı sıra yakıt ve havayı da karıştırarak yanma odasının içine gönderir. Yakıtın atomizasyonu, havaya döngülü bir hareket kazandıran hava parçalama yakıt-hava püskürtücüsü sayesinde gerçekleştirilir. Bu amaçla mevcut çalışmada, küçük bir turbojet motor için geliştirilen yanma odasında çift döngülü hava parçalama yakıt-hava püskürtücüsünün yöndeş ve ters akışlı konfigürasyonlarının 3-Boyutlu HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) , yanma ve emisyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Çözüm ağı nokta sayısından bağımsız çözüm elde edildikten sonra, farklı konfigürasyonların yanma odasının temel tasarım parametreleri üstündeki etkileri incelenmiştir. PDF yanma modeli kullanılarak gerçekleştirilen analizler sonucu elde edilen sıcaklık, yakıt-denge katsayısı, emisyon değerleri tartışılmıştır. HAD analizleri için Ansys-Fluent programı kullanılmıştır.

¹ Araştırma Görevlisi, Mak. Müh. Böl., E-posta: hbolat@etu.edu.tr

² Yrd. Doç Dr. Mak. Müh. Böl., E-posta: suslu@etu.edu.tr

GİRİŞ

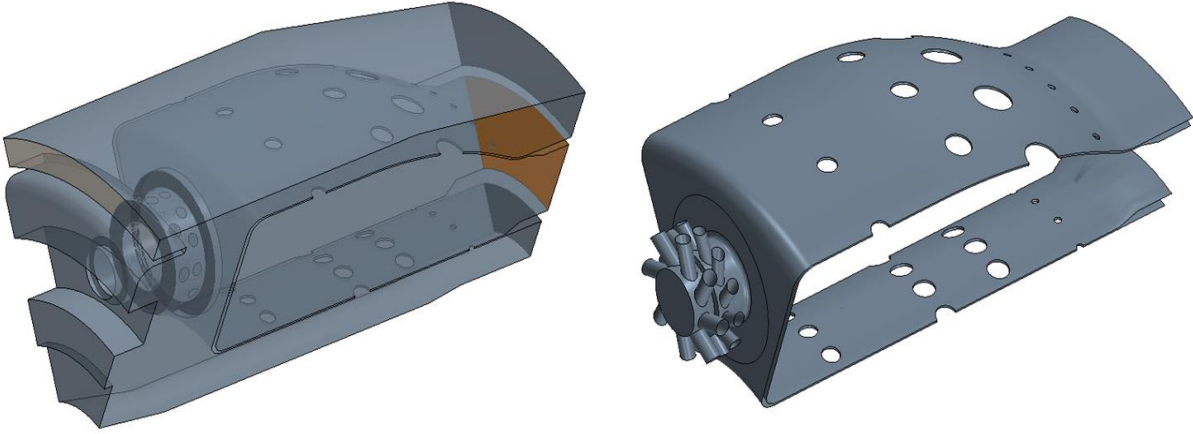
Yanma odalarında kullanılan hava parçalamalı atomizerin birincil görevi alev tüpünde hava ile yakıtın iyi bir şekilde karıştırılmasını sağlamak ve yüksek alev kararlılığı açısından gerekli olan resirkülasyon bölgesini oluşturmaktır. Kilik Erol doktora tezi sırasında yaptığı deneysel çalışmalarda yanma odalarında birincil bölgede kararlı alev elde edebilmek için gerekli olan resirkülasyon bölgesinin atomizer kullanılarak yaratılan döngü ile elde edildiğini ve resirkülasyon bölgesinin tek döngülü atomizer yerine çift döngülü atomizer kullanıldığında büyüdüğünü göstermiştir [Erol, 1976]. Hayashi ve Terasaki yaptıkları deneysel çalışmada, tek döngülü atomizer yerine çift döngülü döngülü atomizer kullanıldığında yanma veriminin arttığını, yakıt ile havanın daha iyi karıştığını, daha uniform(düzenli) yakıt-denge katsayısı bölgesi elde edildiğini böylece yanma reaksiyonları sonucu daha düşük miktarda emisyonların açığa çıktığını gözlemlemişlerdir [Hayashi ve Terasaki, 1996].

Çift döngülü hava parçalamalı yakıt-hava püskürtücüsü kanal hava akış yönlerinin seçiminde iki farklı yöntem izlenebilir. Yöndeş döngülü konfigürasyonda, atomizer çıkışında radyal yönde genişleyen ve duvarı takip eden bir akış yapısı gözlemlenir. Bu durum, yanma için hayati önem taşıyan CRV (Central Recirculation Vortex) akış yapısının oluşumunu kuvvetlendirir. Ters akışlı konfigürasyonda ise, birincil ve ikincil döngü kanallarından gelen akımlar farklı yönde döndüklerinden, birincil bölge içerisinde düzensiz bir akış yapısı gözlemlenir. Bu durum, CRV yapılarının oluşumunu kısıtlamakla birlikte, yakıt ve havanın daha etkin biçimde karıştırılmasına olanak sağlar. Beuchner, Haessler, Merkle, ve Zarzalis yaptıkları deneyde yöndeş akışlı veya ters akışlı atomizer konfigürasyonuna sahip yanma odasında, havanın akış karakteristiklerini incelemişlerdir. Deney sonucunda atomizerden çıkan havanın ters akışlı konfigürasyonda yöndeş konfigürasyona göre daha eksenel biçimde hareket ettiğini ve resirkülasyon bölgesinin eksenel yönde uzadığını gözlemlemişlerdir [Beuchner, Haessler, Merkle ve Zarzalis, 2003].

Vigor ve Ying LES modeli kullanılarak yaptıkları HAD analizleri sonucunda yanma odası girişinde oluşturulan döngünün artırılması ile beraber alevin boyunun eksenel olarak kısaldığını, fakat döngü sayısının belli bir değerin üzerine çıkmasıyla beraber alevin geriye dönüşünün arttığını ve yanma odası alev tüpü girişine doğru kaydığını gözlemlemişlerdir [Vigor ve Ying, 2005].

YÖNTEM

Yanma odası bir boyutlu tasarım metodolojisi ve kriterlerine göre ortaya çıkan yanma odası geometrisinin, HAD simülasyonları sırasında kaynakların verimli kullanılması açısından yakıt-hava püskürtücüsünü kapsayacak şekilde, periyodik sınır şartı kullanılarak Şekil 1' de gösterilen yedide birlik kısımda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1: HAD analizlerinde kullanılan yanma odası sektör geometrisi

Kullanılan Modeller

Bu kısımda, yanma odası içerisindeki reaksiyonlu akışın HAD simülasyonları sırasında kullanılan temel denklemler, türbülans modeli, yanma modeli açıklanmıştır.

Temel denklemlerden birincisi, kütle korunumunu ifade eden süreklilik denklemdir;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = S_M \quad (1)$$

Burada, ρ özkütleyi, t zamanı, S_M ise sıvı fazın buharlaşması sonucu gaz fazındaki kütle artışını ifade eden kaynak (source) terimidir.

Diğer temel denklem olan momentum korunum denklemi, şu şekilde gösterilir;

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla(\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

Denklemdede, p basıncı, \vec{F} ise gaz fazının sıvı damlacıklarıyla olan etkileşimi sonucu meydana gelen kuvvetleri içeren kaynak terimini temsil etmektedir. Denklemdede $\bar{\tau}$ terimi ise viskoz gerilme tensörünü ifade etmektedir.

Enerji korunum denklemi, reaksiyonlu akış nedeniyle, taşınma değişkeni entalpi olacak şekilde ifade edilmiştir;

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v} H) = \nabla \left(\frac{k_g}{C_p} \nabla H \right) + S_H \quad (3)$$

Burada, H toplam entalpiyi, k_g ısı iletim katsayısını, C_p özgül ısıyı, S_H kimyasal reaksiyonlar sonucu açığa çıkan ısıyı temsil eden kaynak terimini ifade etmektedir.

Gaz fazındaki akışı tanımlayan son temel denklem ise molekül taşınma denklemidir;

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (4)$$

Burada R_i kimyasal reaksiyonlar sonucunda ürünlerin oluşum hızını temsil eder, S_i yayılım fazından gelen kaynak terimidir. \vec{J}_i ise yayılım akısıdır.

Yanma odası HAD analizlerinde reaksiyonlu akışı daha iyi çözdüğü düşünölen realizable k-epsilon türbölans modeli kullanılmıştır.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v} k) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_k + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v} \epsilon) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right) + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{v \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \quad (6)$$

Burada G_k ortalama hız gradyanlarının oluşturduğu türbülans kinetik enerjisini, G_b batmazlık kuvvetinin oluşturduğu türbülans kinetik enerjisini, Y_k salınımlı dilatasyonun ortalama dağılıma etkisini simgeler. $C_2=1.9$, $C_{1_\epsilon}=1.44$, S_k ve S_ϵ kaynak terimini simgeler. σ_k ve σ_ϵ prandtl sayılarıdır.

Yanma analizlerinde PDF yanma modeli kullanılmıştır.

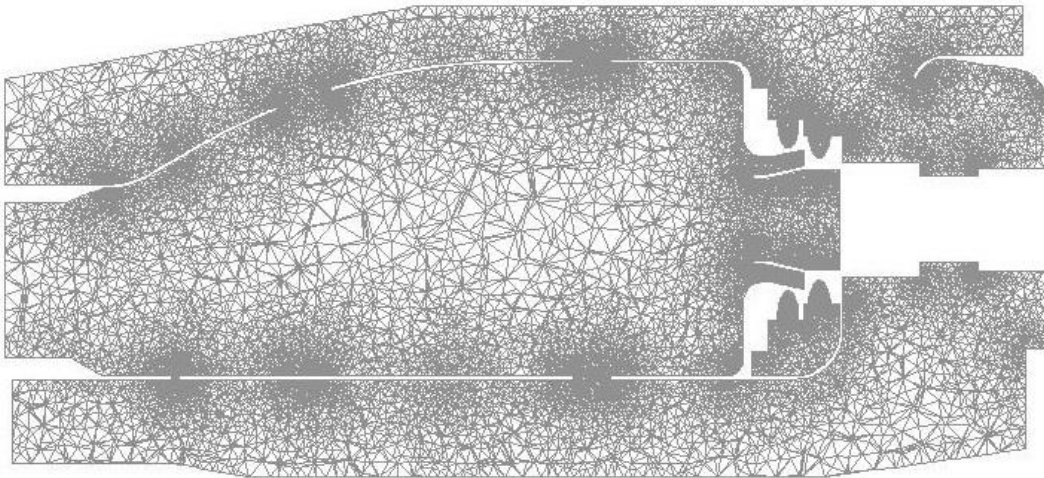
$$\frac{\partial(\rho \bar{f})}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{v} \bar{f}) = \nabla\left(\frac{\mu_t}{\sigma_f} \nabla \bar{f}\right) + S_m + S_{user} \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho \overline{f'^2})}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{v} \overline{f'^2}) = \nabla\left(\frac{\mu_t}{\sigma_f} \nabla \overline{f'^2}\right) + C_g \mu_t (\nabla \bar{f})^2 - C_d \rho \frac{\epsilon}{k} \overline{f'^2} + S_{user} \quad (8)$$

Burada $f' = f - \bar{f}$, $\sigma_f = 0.85$, $C_g = 2.86$, $C_d = 2$ olarak alınmıştır.

UYGULAMALAR

HAD simülasyonları sonucu elde edilen verilerin çözüm açısından bağımsızlığını kanıtlamak amacıyla yanma odası geometrisinin, üç farklı sıklıktaki tetrahedral çözüm ağı yapısında reaksiyon analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır.

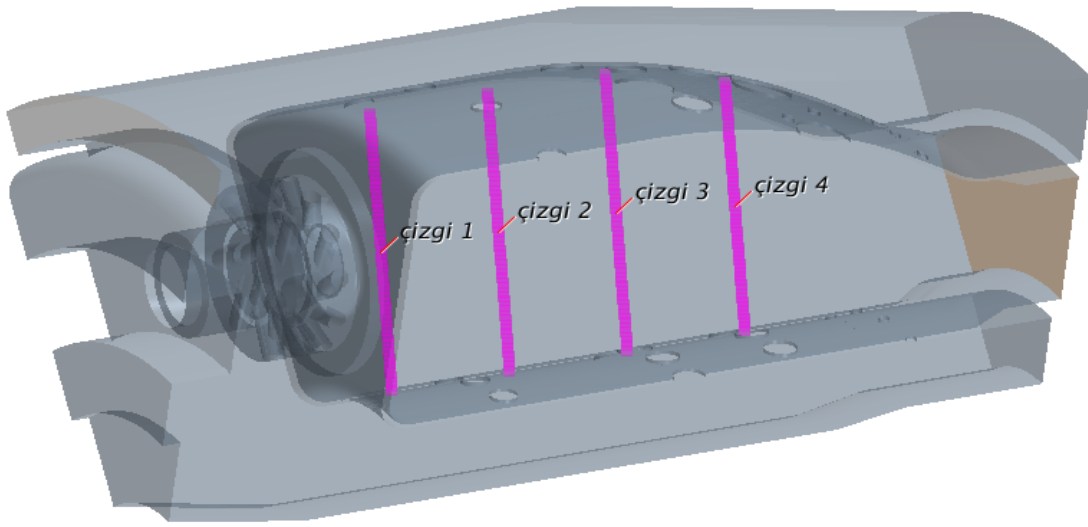


Şekil 2: Merkezi kesit üzerindeki çözüm ağı yapısı (Çözüm ağı (b))

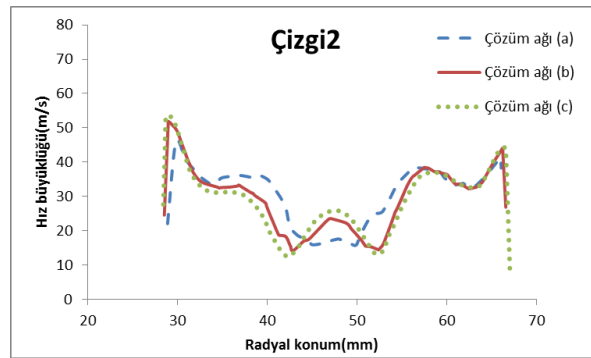
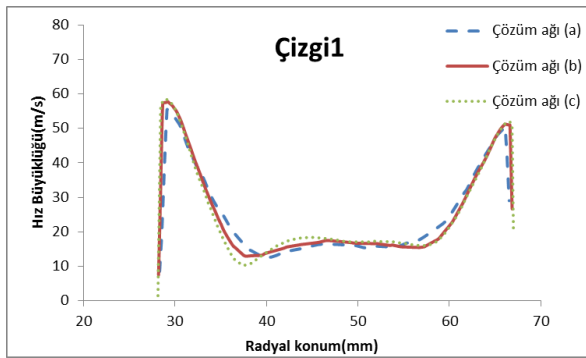
| Çözüm Ağı | Hücre sayısı |
|-----------|--------------|
| a | 1.5 milyon |
| b | 6 milyon |
| c | 17 milyon |

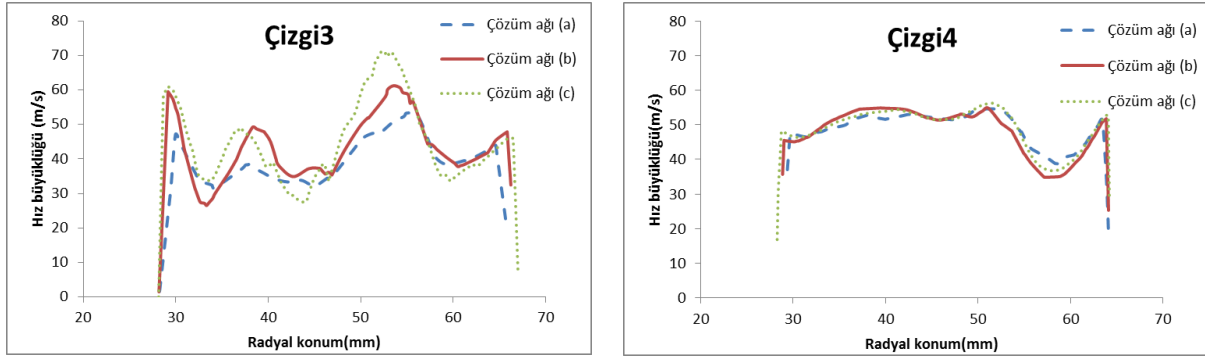
Tablo 1: Çözüm ağı çalışmasında kullanılan hücre sayıları

Çözüm ağlarında elde edilen sonuçları karşılaştırmak için Şekil 3'te verilen radyal çizgiler üzerinde alınan hız ve sıcaklık değerleri kullanılmıştır. Ölçüm değerleri üzerinde alınan hız profilleri Şekil 4'te sunulmuştur.



Şekil 3: Çözüm ağı çalışmasında kullanılan ölçüm çizgileri

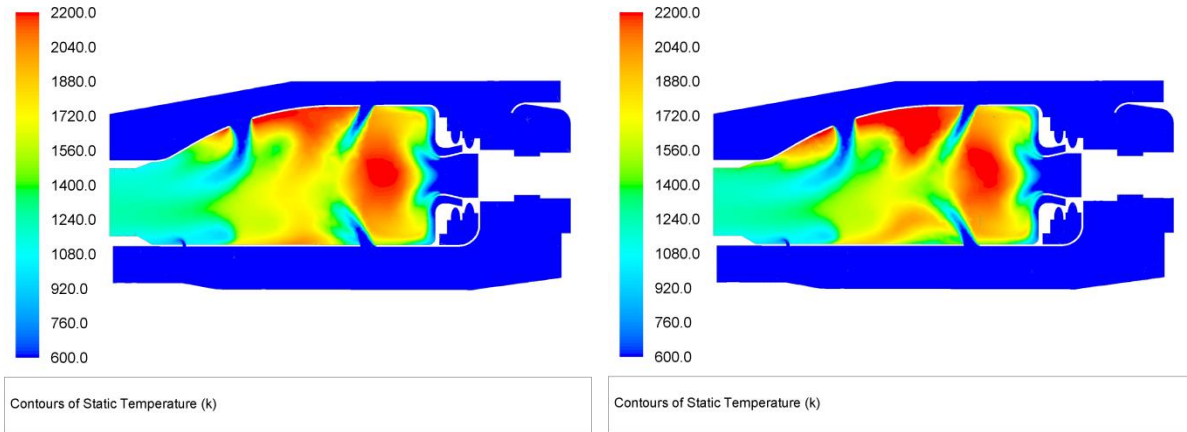




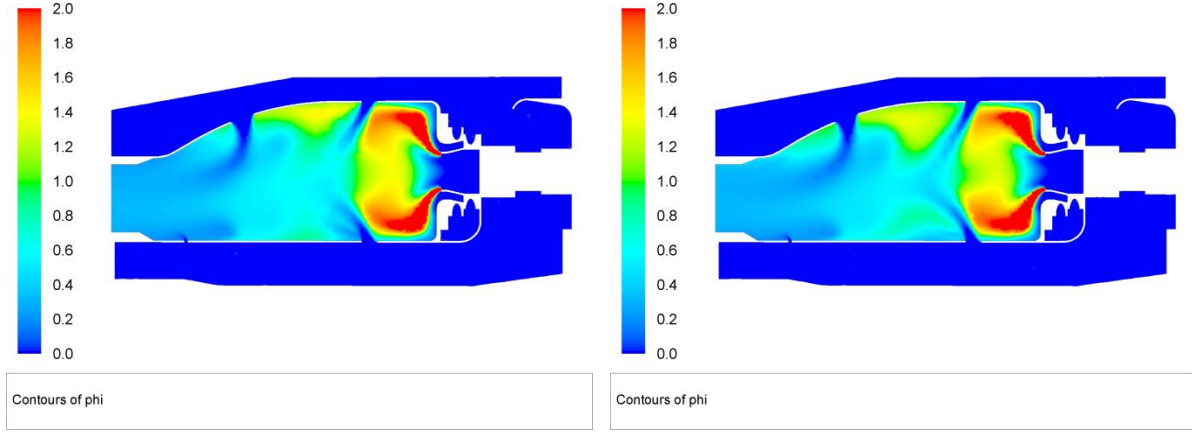
Şekil 4: Farklı sıklıktaki çözüm ağlarında elde edilen hız profilleri

Hesaplama kaynakları ve simülasyon süreleri göz önünde bulundurularak analizler çözüm ağı (b) üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Çözüm ağı (b) üzerinden gerçekleştirilen iki döngülü hava parçalamalı yakıt-hava püskürtücüsünün yöndeş ve ters akışlı konfigürasyonlarının HAD analizleri sonucunda elde edilen konturlar aşağıda gösterilmiştir.

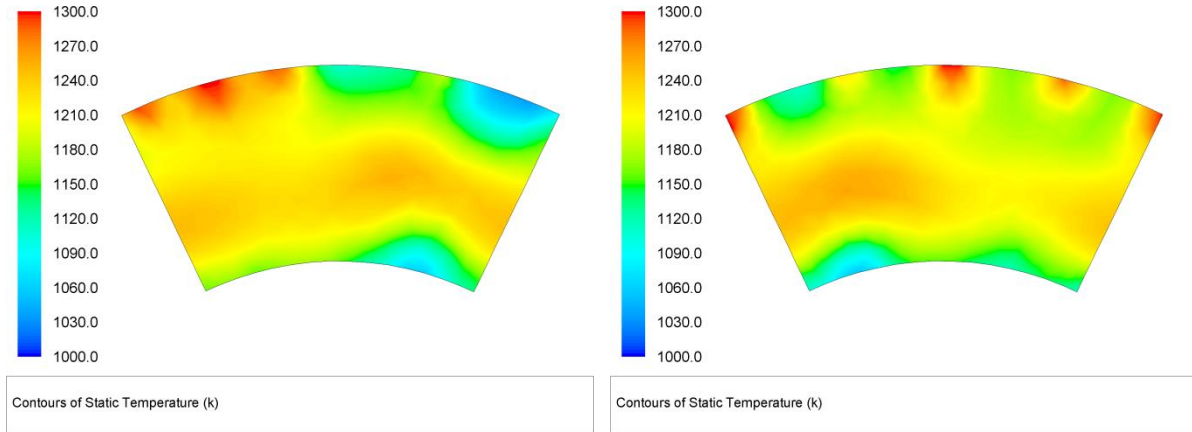


Şekil 5: Yöndeş (Solda) ve Ters akışlı (Sağda) konfigürasyonların merkezi kesit üzerinde sıcaklık konturları



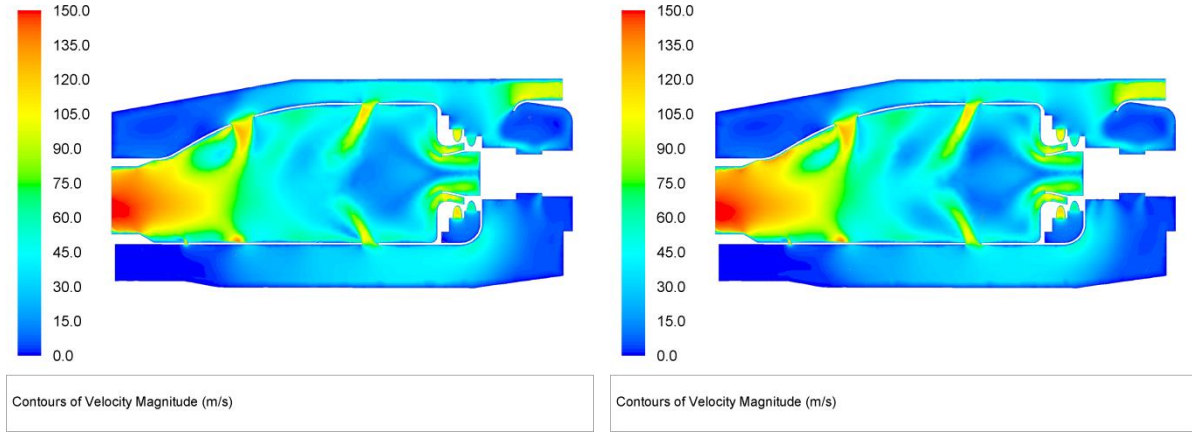
Şekil 6: Yöndeş (Solda) ve Ters akışlı (Sağda) konfigürasyonların merkezi kesit üzerinde yakıt-denge katsayısı konturları

Şekil 5 ve Şekil 6 incelendiğinde, ters akışlı konfigürasyona sahip yanma odasında duvarlara yakın bölgede yakıt-denge katsayısı bire daha fazla yaklaşmaktadır. Bu nedenle bu bölgeler yöndeş akışlı konfigürasyona göre daha sıcaktır.



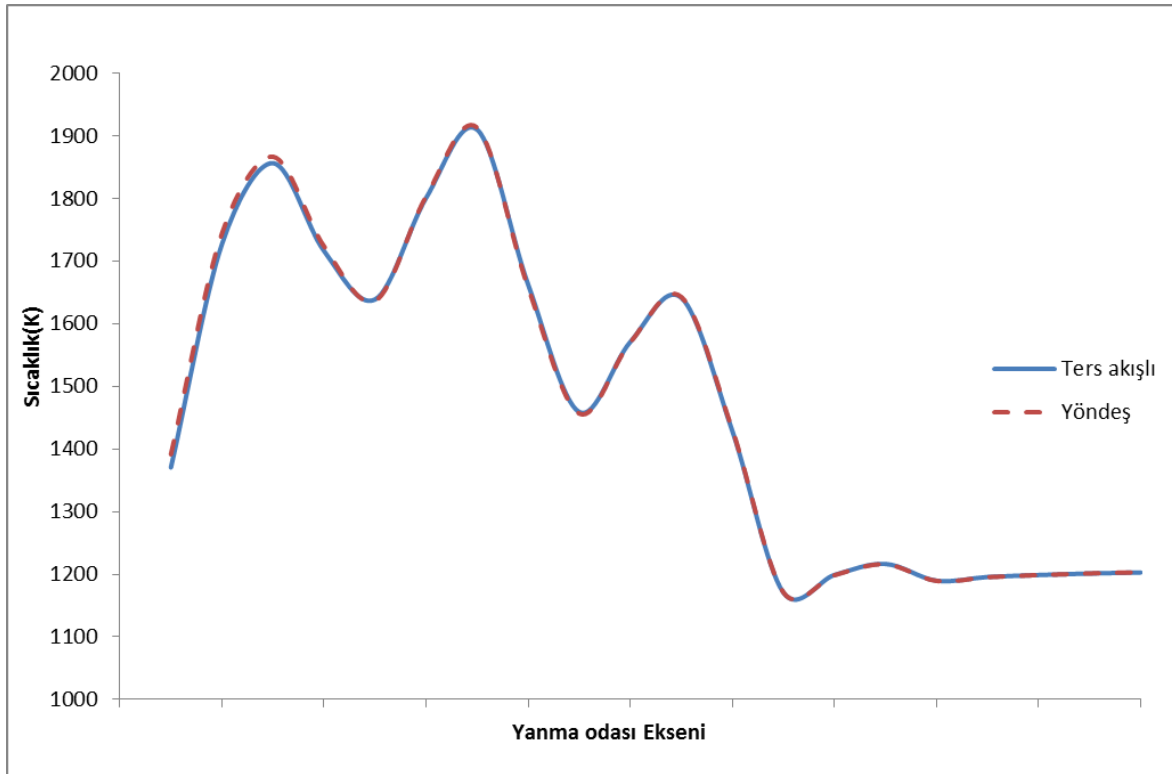
Şekil 7: Yöndeş (Solda) ve Ters akışlı (Sağda) konfigürasyonların yanma odası çıkış sıcaklığı konturları

Yanma odası çıkışında bulunan türbin kanatçıklarının mekanik dayanımı göz önüne alınarak, Şekil 7 incelendiğinde, yöndeş akışlı konfigürasyonda sıcaklığın daha uniform biçimde dağıldığı gözlemlenmektedir.



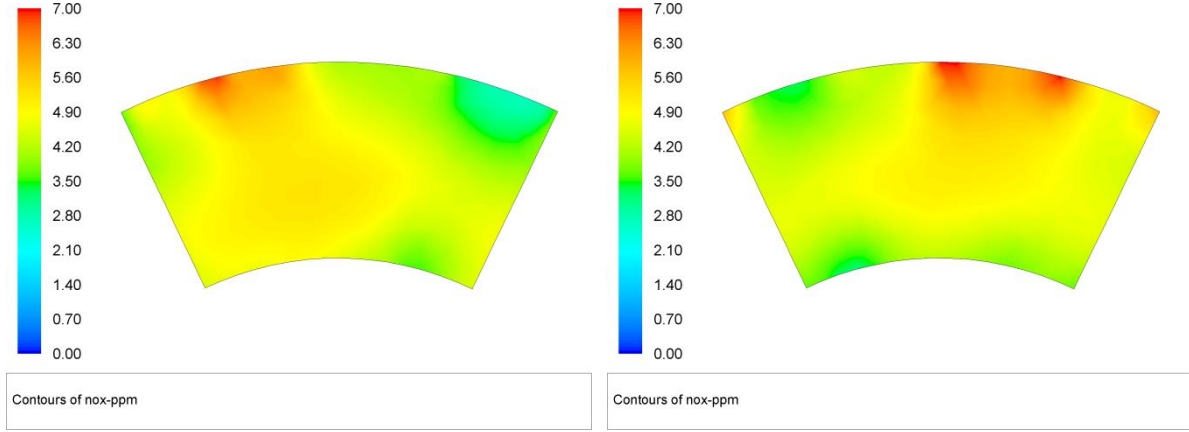
Şekil 8: Yöndeş (Solda) ve Ters akışlı (Sağda) konfigürasyonların merkezi kesit üzerinde hız konturları

İki konfigürasyonda ki hız konturları incelendiğinde, ters akışlı konfigürasyonda birincil atomizerden gelen havanın daha aksenal biçimde ilerlediği ve bu olay sonucunda birincil jet deliklerinden gelen havanın penetrasyonunun da etkilendiği gözlemlenmiştir.

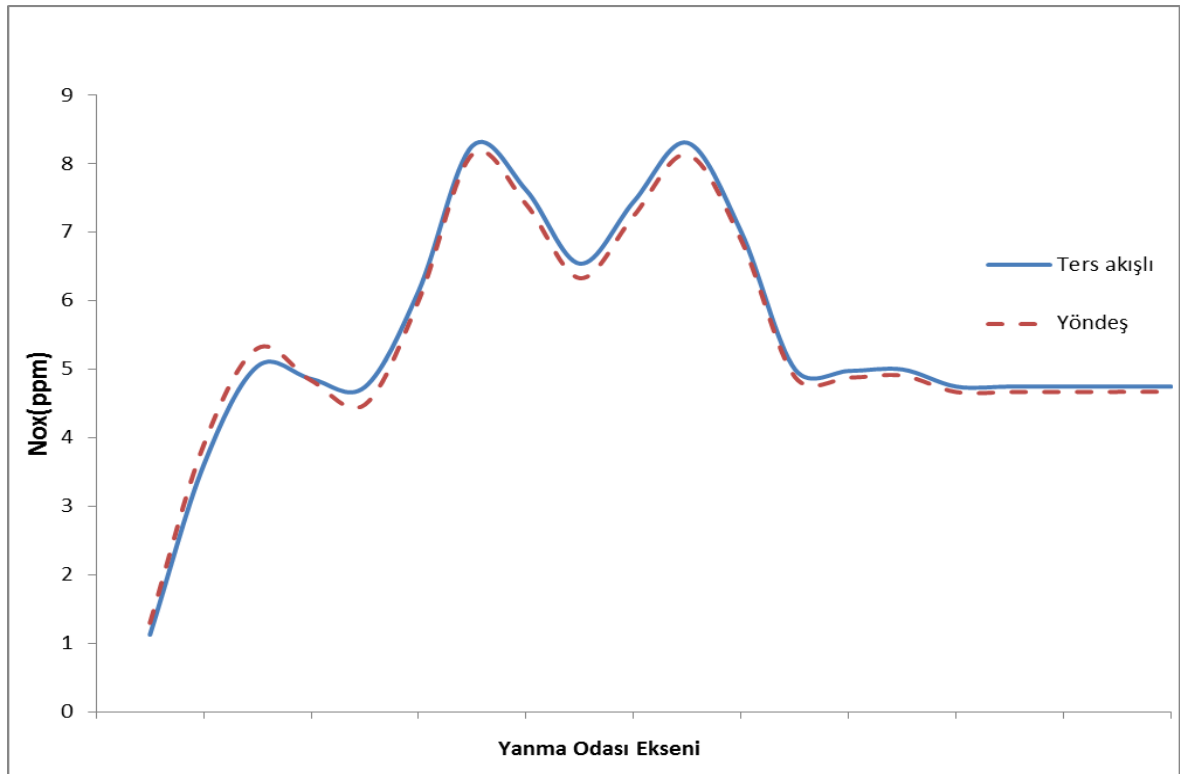


Şekil 9: Yanma odası ekseni boyunca alınan kesitlerde ortalama sıcaklık değerleri

Yanma odası ekseni boyunca alınan kesitlerde ki ortalama sıcaklık değerleri incelendiğinde iki konfigürasyon içinde ortalama sıcaklık değerinin çıkışta birbirine çok yakın (Yöndeş: 1203.3K, Ters akışlı: 1203.1 K) olduğu görülmektedir.



Şekil 10: Yöndeş (Solda) ve Ters akışlı (Sağda) konfigürasyonların yanma odası çıkış NOx emisyon konturları



Şekil 11: Yanma odası ekseni boyunca alınan kesitlerde ortalama NOx emisyon değerleri

Yanma odası çıkışında ki emisyon değerleri incelendiğinde ters yönlü konfigürasyona sahip yanma odasının yaklaşık %5 oranında daha fazla NOx emisyonu açığa çıkardığı gözlemlenmiştir.

SONUÇ

Çift döngülü hava parçalamalı yakıt-hava püskürtücüsünün yöndeş ve ters akışlı konfigürasyonlarının HAD analizleri sonucunda, ters akışlı konfigürasyona sahip yanma odasında, yanma odası duvarlarına yakın bölgede, yakıt-denge katsayısının sitokiyometrik orana yaklaştığı; bunun sonucunda ters akışlı konfigürasyona sahip yanma odası geometrisinin duvarlarının yöndeş konfigürasyona sahip yanma odası duvarlarına göre daha fazla ısınabileceği sonucu ortaya çıkmaktadır.

Yanma odası çıkışındaki sıcaklık konturları incelendiğinde yöndeş akışlı konfigürasyonda sıcaklığın daha uniform biçimde dağıldığı gözlemlenmektedir. Bu da yanma odası çıkışında bulunan türbin kanatçığının ömrü açısından yöndeş akışlı konfigürasyonun daha iyi olduğunu göstermektedir. Yanma odası ekseninde alınan kesitlerde ki ortalama sıcaklık değerleri incelendiğinde iki konfigürasyonunda çok yakın çıkış sıcaklık değerlerine sahip olduğu görülmektedir, Bu da iki konfigürasyonunda yanma verimlerinin aynı olduğu sonucunu ortaya koymaktadır. NOx emisyonları incelendiğinde ise ters akışlı konfigürasyonun daha yüksek oranda emisyon açığa çıkardığı gözlemlenmektedir. Bu sonuçlar göz önüne alındığında HAD analizleri yapılan küçük bir turbojet motor yanma odası geometrisi için yöndeş akışlı konfigürasyonun daha uygun olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

Beuchner, H., Haessler, H., Merkle, K. ve Zarzalis N., 2003. *Effect of co- and counter-swirl on the isothermal flow- and mixture-field of an airblast atomizer nozzle*, International Journal of Heat and Fluid Flow 24, s. 529–537

Erol, K., 1976. *The Influence of Swirler Design Parameters on the Aerodynamics of the Downstream Recirculation Region*, Doktora Tezi, Cranfield Teknoloji Enstitüsü, Makine Mühendisliği

Hayashi, S., Terasaki, T., 1996. *The effects of fuel-air mixing on NO_x formation in non-premixed swirl burners*, in Proceedings of the 26th Symposium International on Combustion, s. 2733– 2739

Vigor Y. ve Ying H., 2005. *Effect of swirl on combustion dynamics in a lean-premixed swirl-stabilized combustor*, Proceedings of the Combustion Institute 30, s. 1775–1782