

KOMPLEKS AKIŞ ALANINA SAHİP YANMA ODAASINDAKİ TÜRBÜLANS-YANMA ETKİLEŞİMİNİN AÇIK KAYNAK KODLU HAD YAZILIMI İLE İNCELENMESİ

Mehmet Özgünoğlu* ve Ayşe G. Güngör†
İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, 34469, İstanbul

ÖZET

Bu çalışmada durma noktasına sahip ters akışlı (stagnation point reverse flow, SPRF) yanma odası geometrisinde türbülans-yanma etkileşimi ve yanma kararlılığı açık kaynak kodlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı ile incelenmiş, elde edilen sonuçlar deney verileri ve önceki sayısal çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Akış alanı içerisindeki zamana bağlı davranışlar büyük eddy benzetimi (large eddy simulation, LES) yöntemi ve kısmi karıştırılmış reaktör (partially stirred reactor, PaSR) yanma modeli ile gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde ön-karışimsız analizde yanma odasının 2/3'ünde ötelenmiş alev oluşumu gözlenirken, ön-karışımli analizde ise giriş portlarından başlayan yapışık bir alev gözlemlenmiştir. Her iki durumda alev kararlılığı geri dönmüş sıcak ürünler ile sağlanmaktadır.

GİRİŞ

Havacılık teknolojilerinin en önemli çalışmalarından biri hava araçlarının hareketi için gerekli enerji ihtiyaçlarını karşılamaktır. Bunu yaparken çevre hassasiyetini de göz önünde bulunduran araştırmacıların yenilenebilir enerji konusundaki çalışmaları artarak devam etmektedir. Günümüz hava araçlarının enerji gereksinimi göz önünde bulundurulduğunda yanma fiziğinden yararlanılarak elde edilen enerji üretimi önemini korumaktadır. Bu konuda yapılan çalışmaların odaklandığı nokta ise doğaya zarar vermeden en verimli şekilde söz konusu enerji ihtiyacını karşılamaktır. Yanma neticesinde ortaya çıkan egzoz gazları çeşitli düzenleme ve kurumlar ile denetlenmekte olup bütün üreticilerin tasarım aşamasında bu kısıtlamaları göz önünde bulundurması gerekmektedir [Sawyer, 2009]. Egzoz gazlarındaki temel ürünler incelendiğinde baskın ürünler olarak nitrojen oksit (NO_x) ve karbon-monoksit (CO) göze çarpmaktadır [Bowman, 1992]. SPRF geometrisinde giriş ve çıkış yüzeyleri aynı düzlemde bulunduğu için boyut olarak mevcut yanma odalarından daha avantajlıdır. Yine aynı geometrik özellikleri sayesinde yanmış ürünler ile reaktanları etkileşime sokarak daha düşük yanma sıcaklıkları sayesinde daha düşük NO_x ve CO emisyon değerleri görülmektedir [Neumeier vd., 2005].

*Yüksek Lisans Öğrencisi, Savunma Teknolojileri, E-posta: ozgunoglu@itu.edu.tr

†Doç. Dr., Uzay Müh. Böl., E-posta: ayse.gungor@itu.edu.tr

Modern bilgisayarların gücüne rağmen hesaplama zamanı açısından direkt sayısal benzetim (direct numerical simulation, DNS) tekniği oldukça uzun sürmektedir. LES yöntemi ise DNS'den farklı olarak sadece enerji taşıyan yapıları çözerek hesaplama zamanı açısından daha avantajlıdır. Reynolds-ortalama Navier Stokes (Reynolds-averaged Navier Stokes, RANS) tekniğinde olduğu gibi bütün türbülanslı yapıları modellemek yerine sadece küçük ölçekli yapıları modelleyen LES yönteminde modellemekten kaynaklı sayısal hatalar daha az olmaktadır [Pope, 2000]. Yanma mekaniğinde alev cephesi önünde kendini gösteren türbülans, o bölgedeki yakıt ve oksitleyicinin karışımında önemli yer tutmaktadır. Bu yüzden, türbülans-yanma etkileşimi birinci derecede yanma verimi ve yanma kararlılığını etkilemektedir [Peters, 2009]. Sonuç olarak LES yöntemi zaman ve uzunluk ölçeğinde birbirinden farklı bir çok yanma analizi için yeterli çözünürlüğü sağlayabilmektedir [Poinso, 2005].

Bu çalışmada, tasarım ve emisyon değerleri bakımından gelecek vaadeden SPRF yanma odası geometrisinde, tek denklem edi (one-equation-eddy) LES türbülans modellemesi ve PaSR yanma modellemesi [Nordin, 2001] kullanılarak türbülans-yanma etkileşimi incelenmiştir. Zamana bağlı veriler ışığında geometri içerisindeki daimi olmayan akış alanı ve ortalama istatistikler incelenerek söz konusu geometrinin karakteristik özellikleri tespit edilmiş, analiz sonuçları deney verileri [Gopalakrishnan vd., 2007] ve diğer sayısal veriler [Undapalli vd., 2009] ile karşılaştırılmıştır.

MATEMATİKSEL MODELLEME

LES denklemlerini elde etmek için Navier-Stokes denklemlerine uzaysal filtreleme uygulanmıştır. Bu yöntem, yüksek frekansa sahip küçük ölçekli çalkantı hareketlerini modelleyerek büyük ölçekli yapılardan ayırmaktadır. Düşük frekansa sahip, geometriden etkilenen büyük ölçekli yapılar ise direkt çözülmektedir. Büyük ve küçük ölçeklerin birbirinden ayrılması eleman ağı büyüklüğü Δ tarafından belirlenir.

Uzaysal Favre yaklaşımı ve "top-hat" filtresinin uygulanması sonucunda sıkıştırılabilir akışlar için LES denklemleri elde edilmiştir. Herhangi bir (f) değişkeni filtreleme sonucunda çözünürlük ($\tilde{f}$) ve (f') çözünürlük olmayan kısımları $f = \tilde{f} + f'$ olarak ifade edilebilir. Herhangi bir $\tilde{f}$ değişkeni için Favre filtreleme yöntemi $\tilde{f} = \frac{\rho f}{\bar{\rho}}$ ile temsil edilmekte olup buradaki üst çizgi uzaysal filtrelemeyi sağlamaktadır.

Filtreleme yönteminin sıkıştırılabilir Navier-Stokes denklem takımına uygulanmasının ardından LES denklemleri [Poinso, 2005] tensör notasyonu kullanılarak şu şekilde yazılabilir:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i) &= 0 \\ \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) &= - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} + \tau_{ij}^{sgs}) \\ \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{h}) &= \frac{D \bar{p}}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{h} - \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{h} + \lambda \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_i} \right) + \dot{\omega}_T \\ \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Y}_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Y}_k) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Y}_k - \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Y}_k + \rho D_k \frac{\partial \tilde{Y}_k}{\partial x_i} \right) + \bar{\omega}_k, \quad k = 1..N \end{aligned}$$

Yukarıda yer alan denklemlerde $\tilde{u}_i$ i'nci filtrelenmiş hız bileşeni, $\bar{\rho}$ filtrelenmiş yoğunluk, $\bar{p}$ filtrelenmiş basınç, $\tilde{h}$ filtrelenmiş entalpi, $\dot{\omega}_T$ ısı salınımı, $\tilde{Y}_k$ k'nci türün kütle fraksiyonu, $\bar{\omega}_k$ k'nci türün reaksiyon oranı, λ ısı iletim katsayısı, ve D_k Fick kanunu ile ifade edilen k'nci türün moleküler difüzyon katsayısıdır.

Filtrelenmiş LES denklemleri içerisinde çözünürlük olmayan alt-grid gerilme tensörü τ_{ij}^{sgs} , alt-grid entalpi akısı $\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{h} - \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{h}$ ve alt-grid konvektif kütle akısı $\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Y}_k - \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Y}_k$ terimleri bulunmaktadır. Bu terimler modellenmelidir.

Türbülans Modelleme

Edi (eddy) viskozite yaklaşımı kullanılarak alt-grid ölçeğindeki gerilme tensörü τ_{ij}^{sgs} aşağıda verilen şekilde tanımlanabilir.

$$\tau_{ij}^{sgs} \simeq -2v^{sgs}\widetilde{S}_{ij} + \frac{2}{3}k^{sgs}\delta_{ij}$$

burada v^{sgs} alt-grid viskozitesi, $\widetilde{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(d\frac{\partial \widetilde{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \widetilde{u}_j}{\partial x_i} \right)$ ise çözünük ölçekteki uzama oranı tensörüdür. K-denklemler modeli olarak da bilinen tek denklemler modeli alt-grid ölçeğindeki kinetik enerji ile akış alanı arasında şu şekilde ilişki kurmaktadır:

$$k^{sgs} = \frac{1}{2}(\widetilde{u_k u_k} - \widetilde{u_k} \widetilde{u_k})$$

Alt-grid ölçeğindeki (eddy) viskozite v^{sgs} parametresi k^{sgs} kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$v^{sgs} = C_v \Delta \sqrt{k^{sgs}}$$

Burada C_v model katsayısı olup 0.07 olarak belirlenmiştir. Alt-grid ölçeğindeki kinetik enerjinin hareket denklemi ile ifade edilmesi aşağıda yer alan denklem ile ilişkilendirilmiştir [Huang, Li, 2010].

$$\frac{\partial (\rho k^{sgs})}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \widetilde{u}_i k^{sgs})}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho (v - v^{sgs}) \frac{\partial k^{sgs}}{\partial x_j} \right] = P^{sgs} - D^{sgs} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(v^{sgs} \frac{\partial k^{sgs}}{\partial x_i} \right)$$

Burada, $P^{sgs} = -\tau_{ij}^{sgs} \frac{\partial \widetilde{u}_i}{\partial x_j}$ türbülans üretimi ve $D^{sgs} = C_e \frac{k^{sgs}}{\Delta}$ türbülans disipasyonudur. C_e model katsayısıdır ve 1 olarak alınmıştır.

Yanma ve Kimya Modellemesi

Enerji ve tür denklemlerinde yer alan terimleri modellemek için değişim difüzyonu varsayımı kullanılmıştır [Kuo, 2005].

$$\begin{aligned} \widetilde{\rho u_i Y_k} - \widetilde{\rho u_i} \widetilde{Y_k} &= \frac{\mu}{Sc} \frac{\partial \widetilde{Y_k}}{\partial x_i} \\ \widetilde{\rho u_i h} - \widetilde{\rho u_i} \widetilde{h} &= \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial \widetilde{h}}{\partial x_i} \end{aligned}$$

Burada Sc Schmidt ve Pr Prandtl sayılarıdır. Bu katsayılar 1 olarak alınmıştır.

Bu çalışmada türbülans-yanma etkileşimi için PaSR yanma modeli [Nordin, 2001] tercih edilmiştir. Bu yaklaşımda hesabı söz konusu olan hücre iki farklı bölgeye ayrılmaktadır. Bölgelerin birinde bütün reaksiyonların olduğu kabul edilirken, diğer bölgede reaksiyon oluşmamaktadır. Böylelikle denklemlerde yer alan kimyasal kaynak terimleri hesaplanırken çalkantı etkisi göz ardı edilmektedir. Reaksiyona girebilecek hacimsel oran κ aşağıda yer alan şekilde hesaplanmaktadır.

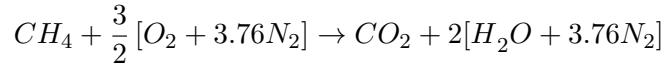
$$\kappa = \frac{\tau_r + \tau_c}{\tau_r + \tau_c + \tau_{mix}}$$

Burada, τ_r , τ_c ve τ_{mix} ilerleme süresi, kimyasal reaksiyon süresi ve karışma süresi olarak ifade edilmektedir. Hesaplama yapılan hücredeki türlerin reaksiyon oranı $\dot{\omega}_k$ ve homojen reaksiyon oranı $\dot{\omega}_k$ aşağıda verilen bağıntı ile ifade edilmektedir [Chomiak, Karlsson, 1996].

$$\frac{c^1 - c^0}{dt} = \dot{\omega}_k = \kappa \dot{\omega}_k$$

Burada reaksiyon bölgesindeki c^0 başlangıç ve c^1 bitiş zamanlarındaki ortalama konsantrasyon olarak tanımlanmıştır.

Ön-karışimsız ve ön-karışimli çalışmalarda tek adımlı reaksiyon denklem tercih edilmiştir [Westbrook ve Dryer, 1981]. Metan oksidasyon adımı aşağıda verilmiştir.



Arrhenius kanunu tarafından tanımlanan reaksiyonu oranı şu şekilde ifade edilmektedir:

$$k = AT^b \exp\left(-\frac{E_a}{\Re T}\right) C_{CH_4}^{0.7} C_{O_2}^{0.8}$$

Burada E_a aktivasyon enerjisi, $\Re$ evrensel gaz sabiti, A ve b deneysel katsayılarıdır.

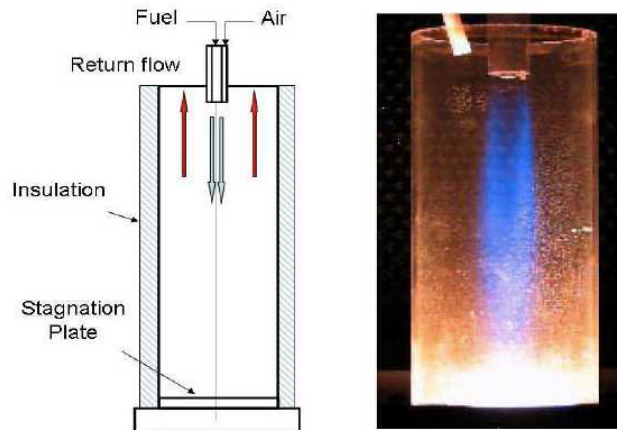
SAYISAL MODELLEME

Analizler açık kaynak kodlu HAD yazılımı OpenFOAM ile yapılmıştır [Weller, vd., 1998]. Yanma analizleri PISO (pressure implicit with splitting operator) ve SIMPLE (Semi-implicit method for pressure-linked equations) algoritmalarının kombinasyonu olan PIMPLE algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Konvektif ve viskoz terimlere ikinci dereceden merkezi farklı ayrıklaştırma yöntemi uygulanmıştır. Zaman, ikinci dereceden geri yönlü ayrıklaştırma ile sayısal olarak ifade edilmiştir. Tek denklem edi modeli alt-grid modeli olarak uygulanmıştır. Sayısal kararlılık sağlamak açısından Courant sayısı reaksiyonun aktif olduğu analizler için 0.3 olarak sabitlenerek otomatik zaman adımı tercih edilmiştir. Bu çerçevede analizler süresince ortalama fiziksel zaman adımı 2×10^{-7} olarak tespit edilmiştir.

Ortalama akış parametreleri için başlangıçtaki zamana bağlı akış alanının geçmesinin ardından 8 akış döngüsü tamamlanacak şekilde veri elde edilmiştir. Ortalama ve anlık akış parametreleri hesaplamaları için her zaman adımında veri alınmış olup ikinci dereceden istatistikler yakınsadığında analizler sonlandırılmıştır.

ANALİZ KOŞULLARI

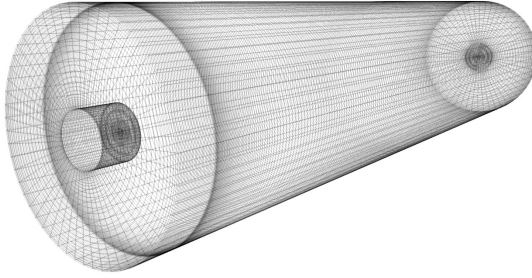
Çalışmada kullanılan geometri ve geometrinin deney esnasında [Gopalakrishnan, vd., 2007] çekilen alev fotoğrafı Şekil 1'de gösterilmiştir. SPRF 308 mm uzunluğa ve 70 mm çapa sahip, akışkan giriş ve çıkışları aynı düzlemde bulunan silindirik bir geometridir. Burada 4 mm'lik merkez jet hava jeti tarafından çevrelenmektedir.



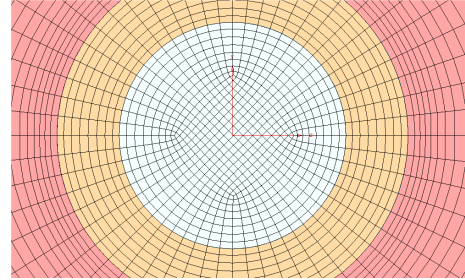
Şekil 1: SPRF geometrisi şematığı ve deney esnasında elde edilen alev fotoğrafı [Gopalakrishnan, vd., 2007]

Eleman Ağı

Tüm geometrik karakteristiklerin sağlanması planlanarak oluşturulan eleman ağı genel görünüşü Şekil 2a'da yer almaktadır. Akış yönündeki ekseninde yüksek sıklık değerine sahip elemanları engellemek açısından Şekil 2b'den görülebileceği üzere kelebek eleman ağı yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem sonucunda eksen üzerine yığılması beklenen grid elemanları eksenden belli bir oranda uzaklaşarak eksen etrafına dağılmıştır.



(a) Eleman ağı genel görünüşü



(b) Kelebek eleman ağı

Şekil 2: Eleman ağı

Mevcut geometri için en büyük zorluklardan biri uygun giriş sınır şartlarını oluşturmaktır. Jet çıkışlarındaki basınç kayıpları ve geriçevrim bölgelerinin varlığı sebebi ile giriş jetleri eleman ağı içerisine tam olarak dahil edilmemiştir.

Eleman ağı bütününde eksenel, radyal ve açısall yönde sırasıyla 241, 85 ve 57 adet yapısal eleman kullanılmıştır. Radyal ve açısall yöndeki eleman ağı iyileştirmelerinin analiz sonuçlarına olan etkisi soğuk akış analizleri ile eleman ağı bağımsızlığı testi kapsamında diğer çalışmalarda sunulmuştur [Özgünoğlu, 2008].

Çalışmalar

Soğuk akış, ön-karışimli ve ön-karışimsız analizler olmak üzere 3 temel çalışma yapılmıştır. Bu çalışma ile ilgili sıcaklık (K) ve hacimsel debi (m^3/s) sınır şartları Tablo 1'de verilmiştir. Deney sonuçları ile tutarlı bir kıyaslama sağlamak açısından deneyde sağlanan kütleli debi değerleri sınır şartı olarak dikkate alınmıştır. Giriş yüzeylerinden çalkantılı hızlar direkt olarak akış alanına sınır şartı olarak verilmiştir. Soğuk akış ve ön-karışimli analizlerde analizlerde yakıtın verildiği yüzey kapatılmış ve duvar sınır şartı uygulanmıştır. Tablo 1'de yer alan sıcaklık değerleri ön-ısınma etkisini sağlamak açısından akışkanın giriş bölgelerinde uygulanmıştır. Çıkış bölgesinde atmosfer basıncı uygulanırken eleman ağı dışından gelen basınç dalgasının eleman ağı içerisine girişi kısmı olarak sağlanmıştır. Katı duvar bölgeleri adyabatik olarak modellenmiştir.

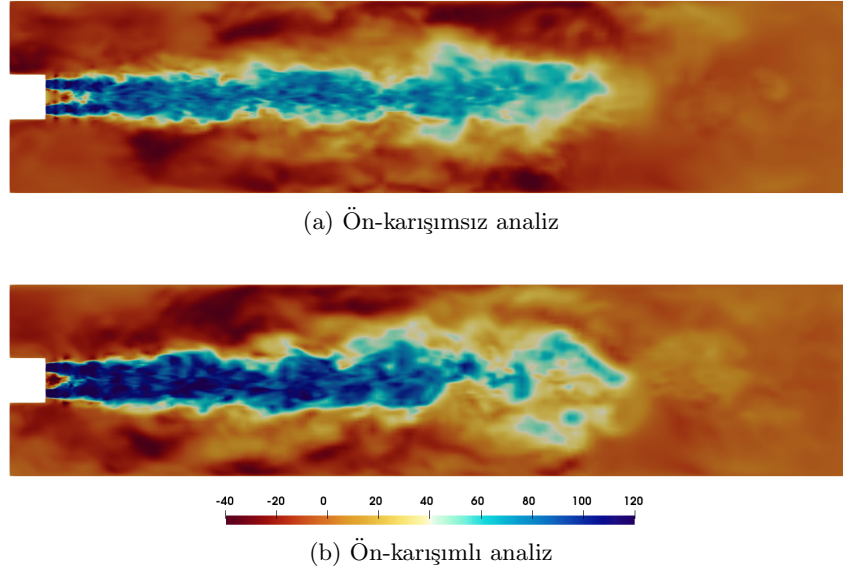
Tablo 1: Analiz koşulları

	Soğuk Akış	Ön-karışimsız	Ön-karışimli
Hava akışı hacimsel debisi	0.00638	0.00676	0.00638
Yakıt akışı hacimsel debisi	-	-	0.00038
Hava akışı sıcaklığı	300	500	450
Yakıt akışı sıcaklığı	-	330	300

Ön-karışimli ve ön-karışimsız analizlerde toplam kütleli debi değeri 8.1 g/s iken ekivalans oranı 0.58 olarak belirlenmiştir.

SONUÇLAR

Akış alanına ait 0.03 s'deki anlık hız alanları ön-karışimsız analiz için Şekil 3a'da, ön-karışimli analiz için Şekil 3b'de verilmiştir. Her iki analizde de durma bölgesine kadar ilerleyen jet akışları durma bölgesinde yavaşladıktan sonra ters yönde ilerleyerek çıkış yüzeylerine doğru ilerlemektedir. Ön-karışimli analizin yüksek giriş hız sınır şartı sebebi ile akış alanı içerisinde daha yüksek dönüş hızları görülmüştür.



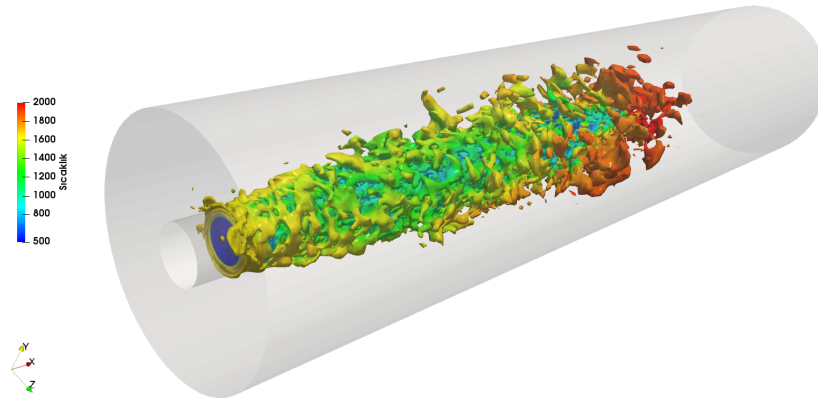
Şekil 3: Akış yönündeki anlık hız bileşeni

Girdap yapılarının ısı salınımı ile ilişkisini ortaya koymak açısından Lambda2 eşyüzey eğrileri [Jeong ve Hussain, 1998] alınarak bu değerler anlık sıcaklık verileri ile renklendirilmiştir. Ön-karışimli operasyonda (Şekil-4a) ısı salınımı jet çıkış bölgelerine yakın bölgede meydana gelmekte ve reaktanların oluşturduğu jeti sarmaktadır. Ön-karışimsız operasyonda (Şekil-4b) ise reaktanlar jet çıkış bölgesinden belirli bir mesafe sonrasında karışarak reaksiyon sonucu ortaya çıkan ısı salınımı bu bölgede gerçekleşmektedir. Ön-karışimli analizde yapışık alev ve ön-karışimsız analizde ötelenmiş alev oluşumu, resirkülasyon bölgesi ve kayma tabakası varlığı sebebi ile sürekli olarak kendini tekrar etmektedir. Bu durum, geometri içerisinde her iki operasyonda da kararlı bir alev yapısının oluşmasına neden olmaktadır.

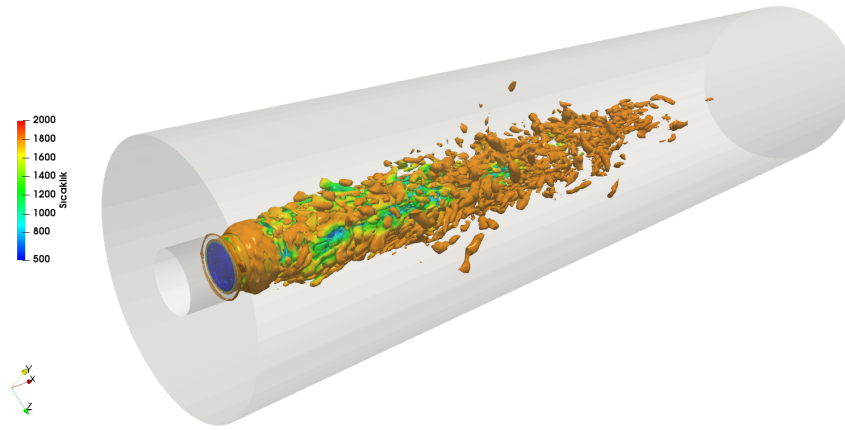
Şekil 5 ve Şekil 6'da yer alan grafiklerde mevcut analiz sonuçları ön-karışimli "LES1" ve ön-karışimsız "LES2" olmak üzere deney [Gopalakrishnan vd., 2007] ve sayısal çalışma [Undapalli vd., 2009] sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Undapalli vd. (2009) tarafından yapılan sayısal çalışmada, mevcut geometri türbülans - yanma etkileşimi açısından edi parçalanma modeli (eddy break up, EBU), kalınlaştırılmış alev modeli (thickened flame, TF), daimi alevcik modeli (steady flamelet, SF) ve lineer edi karıştırma modeli (linear eddy mixing, LEM) gibi farklı yanma modelleri LES türbülans modeli ile birlikte değerlendirilmiştir (EBULES - TFLES - SFLES - LEMLES). Yapılan çalışma deney verileri ile karşılaştırılmış, LEMLES modelleme yönteminin her iki operasyonda da diğer yöntemlerden daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Şekil 5a ve 5b'de akış yönündeki eksen boyunca eksenel yöndeki ortalama hız değerleri karşılaştırılmıştır. Özellikle ön-karışimli durum için akışın giriş bölgelerinin önünde resirkülasyon kabarcığının varlığı akışa ters yönde ciddi bir hız artışı olarak sonuçlanmıştır. Resirkülasyon kabarcığı deney verilerinde yer almadığı görülmektedir. Ayrıca deneylerde söz konusu giriş kanalları oldukça uzundur. Daha önce de belirtildiği üzere akış giriş kanalları kararlılık sorunu yarattığı için hesapla-



(a) Ön-karışimsız analiz



(b) Ön-karışimli analiz

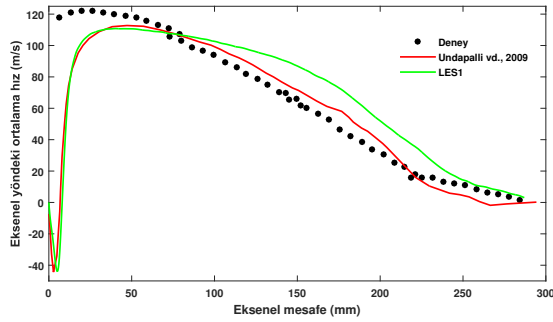
Şekil 4: Sıcaklık ile renklendirilmiş Lambda2 kriteri eşyüzey eğrileri

malara dahil edilmeyip jet çıkışlarından itibaren hızlar direkt olarak verilmiştir. Bu yaklaşım sebebi ile ön-karışimli operasyonda maksimum hız değeri tam olarak yakalanamamışken ön-karışimsız operasyonda tepe hızları deney sonuçlarına yakın bir şekilde tahmin edilebilmiştir. Bu bölgeden sonra her iki operasyonda da hız azalarak durma noktası bölgesinden önce hız profilleri birleşmektedir. Undapalli vd. (2009) tarafından yapılan ön-karışimli analizlerde resirkülasyon kabarcığı aynı zıt yönlü hız büyüklüğü ile tahmin edilmiş, tepe hız değerleri birbirine oldukça yakın değerde elde edilmiştir. Tepe noktasından sonraki hız azalma eğilimi deney sonuçlarına daha da yakındır. Undapalli vd. (2009) tarafından yapılan ön-karışimsız operasyonda yakıt giriş kanallarının analize dahil edilmesi resirkülasyon bölgesinde hız değerlerinin farklı olmasına yol açmıştır.

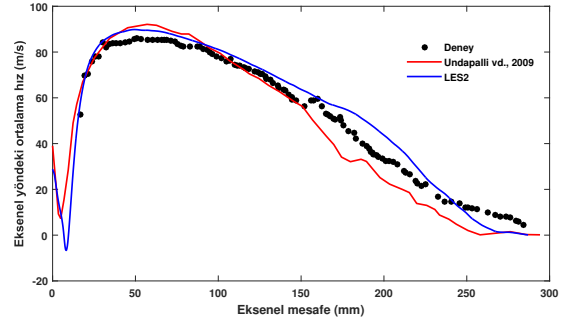
Radyal profillerde eksenel yöndeki ortalama hız değerleri incelenmiş olup Şekil 5c ve 5d'de gösterilmektedir. Seçilen eksenel konumlar $x = 57, 113$ ve 187 mm'dir. Deney sonuçları hesaplamalı sonuçlara nazaran daha asimetric görülmektedir. Yakıt ve hava kanallarının deney sırasındaki olası doğrultu sapmalarının bu duruma yol açtığı belirtilmiştir [Undapalli, vd., 2009]. Ön-karışimli operasyonda enjektöre yakın bölgedeki hesaplamalar, özellikle $x = 57$ ve 113 mm mesafede, deney sonuçlarından daha büyük değerlerde elde edilmiştir. Durma noktasından geri dönen akışlar da duvara yakın bölgelerde deney sonuçlarından daha büyük değerlerde olduğu görülmektedir. Yanmış ürünler sonucu ortaya çıkan ısı salınımının hıza olan etkisi buradaki hız büyüklüğü değişimini açıklayabilmektedir. Radyal profillerdeki mevcut hesaplama sonuçları, Undapalli vd. (2009) tarafından yapılan çalışmalara nazaran deney sonuçlarına daha yakın olduğu tespit edilmiştir. Akış yönündeki

eksenden uzaklaştıkça ve duvar bölgelerine yaklaştıkça geri dönmüş akışların varlığı radyal profillerde negatif hız büyüklüğü ile kendini göstermektedir. Her iki operasyonda da geri dönen akış büyüklükleri Undapalli vd. (2009) tarafından daha düşük değerlerde hesaplanmıştır.

Türbülans karakteristiği hakkında fikir veren eksenel yöndeki rms hız değerleri Şekil 5e ve 5f'de gösterilmektedir. Türbülans ve yanma etkileşiminin, daha önce bahsedilen asimetri problemi dışında iyi seviyede tahmin edildiği görülmektedir. Girişten uzak olan yüksek rms değerlerinin varlığının yanma sonucunda gerçekleşen ısı salınımı nedeniyle olduğu ayrıca not edilmelidir. Undapalli vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada her iki operasyondaki rms değerleri, özellikle giriş kanallarına ve duvara yakın bölgede, deney sonuçlarından daha yüksek seviyelerde elde edilmiştir.

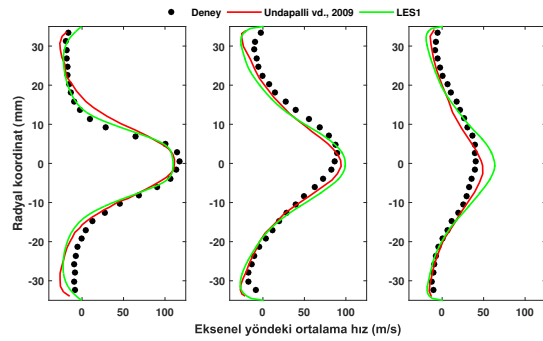


(a) Ön-karışımli analiz

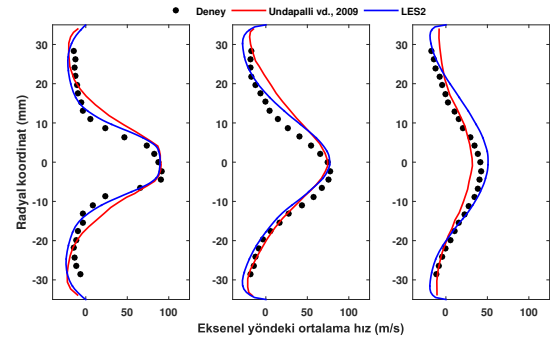


(b) Ön-karışimsız analiz

Eksenel yöndeki ortalama hız (a),(b)

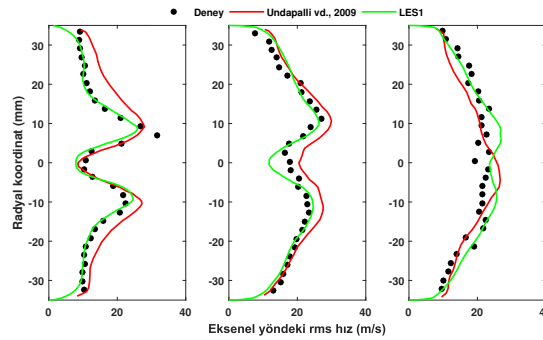


(c) Ön-karışımli analiz

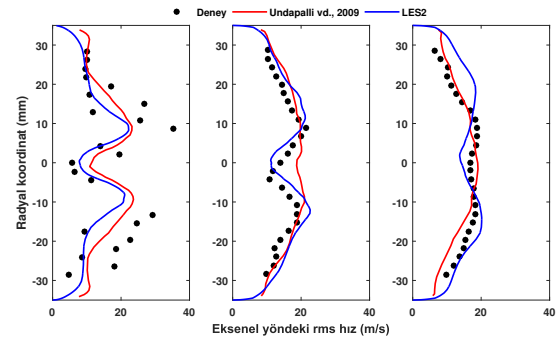


(d) Ön-karışimsız analiz

Radyal profillerde eksenel yöndeki ortalama hız değişimi, $x = 57, 113$ ve 187mm (c),(d)



(e) Ön-karışımli analiz



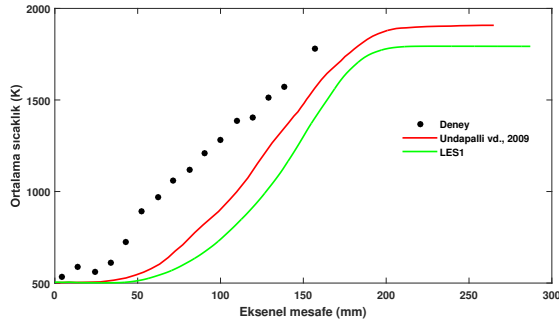
(f) Ön-karışimsız analiz

Radyal profillerdeki eksenel yöndeki rms hız değişimi, $x = 57, 113$ ve 187mm (e),(f)

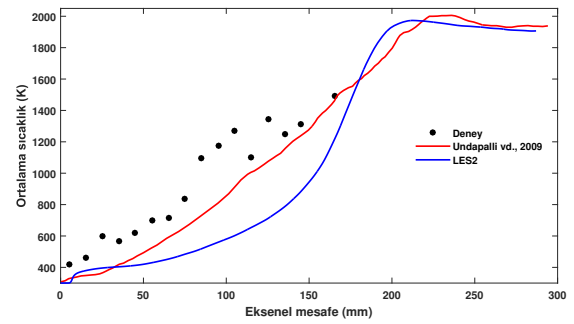
Şekil 5: Akış alanı istatistikleri

Yanma odasının akış yönündeki merkez hattı üzerindeki ortalama sıcaklık dağılımı Şekil 6a ve 6b'de sunulmuştur. Enjektöre yakın noktalarda deney sonucundan farklı değerler görülmektedir. Bununla birlikte sıcaklık profilinin genel eğilimi ön-karışimli ve ön-karışimsız operasyonlar için deney sonuçlarına yakındır. Deneylerde daha büyük ısı salınımının elde edildiği görülebilmektedir. Reaktant sıcaklıklarının tam olarak ölçülmediği ve giriş sıcaklığı değerlerini belirlerken sadece ön ısıtma etkisi dikkate alınması hesaplamalar ile deney arasındaki sıcaklık farklılıklarını açıklayabilmektedir [Gopalakrishnan, vd., 2007]. Bu durum, diğer yanma istatistiklerini ayrıca etkilemektedir [Özgünoğlu, 2018].

Reaksiyon sonucunda oluşan CO₂ ürünün akış yönündeki eksen boyunca ortalama fraksiyon değeri Şekil 6c ve 6d'de gösterilmiştir. Ön-karışimsız operasyonda CO₂ fraksiyonu durma noktası bölgesine

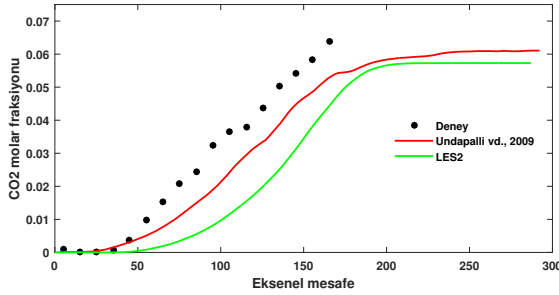


(a) Ön-karışimli analiz

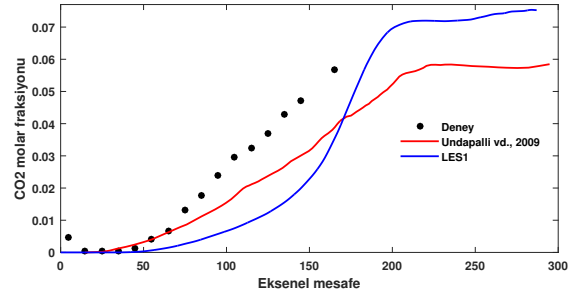


(b) Ön-karışimsız analiz

Akış yönünde eksen üzerindeki ortalama sıcaklık değeri (a),(b)

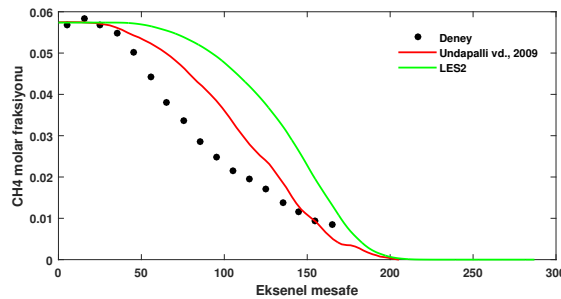


(c) Ön-karışimli analiz



(d) Ön-karışimsız analiz

Akış yönünde eksen üzerindeki ortalama CO₂ fraksiyonu değeri (c),(d)



(e) Ön-karışimli analiz

Akış yönünde eksen üzerindeki ortalama CH₄ fraksiyonu değeri (f)

Şekil 6: Yanma istatistikleri

kadar artma eğilimi gösterirken ön-karışimli operasyonda ise CO₂ fraksiyonu $x = 180$ mm'den sonra değişmemektedir. Sıcaklık grafiklerinden de benzer çıkarım yapılabileceği üzere, reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan sıcaklık değeri deneyden daha düşük değerlerde elde edildiği için her iki operasyonda da daha düşük fraksiyon değerleri elde edilmiştir. Reaksiyon ile sıcaklık arasında kurulan bu ilişki ön-karışimli operasyondaki akış yönündeki eksen boyunca reaktant tüketimini incelendiğinde de benzer sonuca varılmaktadır. Şekil 6e'de yer alan CH₄ molar fraksiyon grafiği incelendiğinde hesaplamalı verilerde CH₄ reaktantının eksen boyunca düşük sıcaklıklar nedeni ile daha geç tüketildiği görülmektedir.

Özellikle ön-karışimsız operasyon mevcut çalışmadaki PaSR yanma modeli ile Undapalli vd. (2009) tarafından yapılan çalışmadaki LEM yanma modelini kıyaslamak için idealdir. Çünkü, her iki çalışmada da reaksiyon mekanizması olarak tek adımlı basit bir reaksiyon mekanizması tercih edilmiştir. Yanma istatistikleri bu kapsamda incelendiğinde LEM yanma modeli ile yanma istatistikleri deney verilerine daha yakın bir şekilde tahmin elde edilmiştir. Yanma mekanizmasında skaler karışım önemli yer tutmakta ve bu durum LEM yönteminde direkt olarak çözülmektedir, fakat bu modelin PaSR gibi yanma modellerinden hesaplamalı zaman açısından 3.7 kat daha pahalı olduğu ayrıca not edilmelidir.

DEĞERLENDİRME & GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada SPRF yanma odası geometrisi LES türbülans modeli ve PaSR yanma modeli ile birlikte açık kaynak kodlu yazılım ile incelenmiş, elde edilen sonuçlar deney verileri ve önceki çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

Ön-karışimsız operasyonda yakıt jeti taze hava jeti tarafından sarılmaktadır. Bu durumda, yakıt ve hava jeti yanmış sıcak ürünler ile etkileşime girmeden önce karışmak için yeterli zamana sahip olmaktadır. Sonuç olarak yanma odasının 2/3'ünde ötelenmiş alev oluşumu gözlenmiştir. Ön-karışimli operasyonda ise giriş kanallarının hemen önünde yapışık alev görülmüştür. Mevcut çalışma koşulları sonucunda giriş kanallarından yanma odası içerisine aktarılan reaktant'ın sıcaklığı geri dönmüş sıcak akışkanlar ile kayma tabakası sayesinde artma eğilimindedir. Her iki operasyon için de alev kararlılığı geri dönmüş sıcak ürünler ile sağlanmaktadır.

Nümerik farklılıkların hesaplamalı analiz sonuçlarına etkisini göz ardı etmeden Undapalli vd. (2009) tarafından yapılan hesaplamalı araştırma ile mevcut çalışma karşılaştırılmıştır. Mevcut çalışmadaki PaSR yanma modeli ile k-denklemleri LES modeli birlikteliği ile akış alanı istatistikleri açısından, özellikle radyal profillerde, deney verilerine daha yakın değerler elde edilmiştir. Skaler karışımı direkt olarak çözmesi sebebi ile daha pahalı olan LEMLES modeli ile yanma istatistikleri açısından daha başarılıdır.

Mevcut çalışmada türbülans - yanma etkileşimi anlamında görece basit bir modelleme yaklaşımı tercih edilmesine rağmen özellikle akış alanı istatistikleri deney verilerine oldukça yakın değerlerde elde edilmiştir.

Düşük Mach sayılı rejimde yer alan mevcut çalışmanın termodinamik basıncı göz ardı eden düşük mach sayılı çözücü ile değerlendirilmesi hesaplama zamanı açısından avantajlı olacağı için mevcut çalışma bu kapsamda ayrıca değerlendirilecektir. Karşılaştırmalı sonuçlar elde etmek açısından da farklı LES alt-grid yöntemleri, yanma modelleri ve detaylı reaksiyon mekanizmaları ayrıca test edilecektir.

Kaynaklar

- Bowman C.T., 1992. *Control of combustion-generated nitrogen oxide emissions: Technology driven by regulation*, Symposium (International) on Combustion, Cilt.24, s.859-878
- Chomiak J. ve Karlsson A., 1996. *Flame liftoff in diesel sprays*, Proceedings of the Combustion Institute, Cilt.26, s.2557-2564
- Gopalakrishnan P., Bobba M.K. ve Seitzman M.K., 2007. *Controlling Mechanisms for Low NO_x Emissions in a Non-Premixed Stagnation Point Reverse Flow Combustor*, Proceedings of the Combustion Institute, Cilt.31, s.3401-08
- Huang S. ve Li Q. S., 2010. *A new dynamic one-equation subgrid-scale model for large eddy simulations*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Cilt.81, s.835-865
- Jeong J. ve Hussain F., 1995. *On the identification of a vortex*, Journal of Fluid Mechanics, Cilt.285, s.69-94
- Kuo K. K., 2005. *Principles of Combustion*, New Jersey: John Wiley.
- Menon S., Yeung P. K. ve Kim W. W., 1996. *Effect of subgrid models on the computed inter-scale energy transfer in isotropic turbulence*, Computers and Fluids, Cilt.25, s.165-180
- Neumeier Y., Zinn B., Weksler Y., Seitzman J.M., Jagoda J. ve Kenny J., 2005. *Ultra-low emissions combustor with non-premixed reactants injection*, 41st AIAA Joint Propulsion Conference, Arizona, 10-13 Temmuz
- Nordin P., 2001. *Complex chemistry modelling of diesel spray combustion*, Chalmers University of Technology, Doktora Tezi
- Özgünoğlu M., 2018. *Numerical Investigation of Turbulent Combustion in a Reverse Flow Combustor*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi
- Peters N., 2009. *Multiscale combustion and turbulence*, Proceedings of the Combustion Institute, Cilt.32, s.1-25
- Poinsot T. ve Veynante D., 2005. *Theoretical and Numerical Combustion*, R. T. Edwards
- Pope S. B., 2000. *Turbulent Flows*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Sawyer R. F., 2009. *Science based policy for addressing energy and environmental problems*, Proceedings of the Combustion Institute, Cilt.32, s.45-56
- Undapalli S., Srinivasan S. ve Menon S., 2009. *LES of premixed and nonpremixed combustion in a stagnation point reverse flow combustor*, Proceedings of the Combustion Institute, Cilt.32, s.1537-44
- Weller H. G., Tabor G., Jasak H. ve Fureby C., 1998. *A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques*, Computers in Physics, Cilt.12, s.620-631
- Westbrook C.K. ve Dryer F. L., 1981. *Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuel in Flames*, Combustion Science and Technology, Cilt.27, s.31-43