

HİDROJENLE ZENGİNLEŞTİRİLMİŞ ÖN-KARIŞIMSIZ METAN-HAVA ALEVLERİNİN İNCELENMESİ

Yunus Emre Karasu*, Tuğba Zaman† ve Ayşe G. Güngör‡
İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, 34469, İstanbul

ÖZET

Bu çalışmada ön karışimsız ve kısmi karışimli yanma odalarında metan ve hidrojenle zenginleştirilmiş metan alevlerinin dinamikleri açık kaynak kodlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı ile incelenmiştir. Bu kapsamda ilk olarak ön-karışimsız metan ve hidrojenle zenginleştirilmiş metan alevleri için Reynolds-ortalama Navier Stokes (RANS) yaklaşımı ile sayısal analizler yapılmıştır. Metan alevi için RANS analizlerinden elde edilen sonuçların deneysel verilerle uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Hidrojenle zenginleştirilen metan yakıtının ortalama adyabatik alev sıcaklığı ve NO_x gazlarının salınımını arttırdığı aynı zamanda karbon kaynaklı zararlı gazların salınımını azalttığı görülmüştür. Ardından ön karışimsız yanma odasına radyal enjeksiyon sistemi eklenerek kısmi karışimli yanma odası geometrisi oluşturulmuştur. Elde edilen kısmi karışimli yanma odasında metan ve hidrojenle zenginleştirilmiş metan alevleri için yanma analizleri gerçekleştirilmiştir. Alevin zamana bağlı davranışlarını ve dinamiklerini simüle etmek için büyük edi benzetimi (LES) yaklaşımı kullanılmıştır. Kısmi karışimli yanma odası sisteminin daha kararlı alev yapısı oluşturduğu gözlemlenmiştir. Radyal enjeksiyon mekanizması kullanılarak metan-hava karışımına hidrojen ilavesinin maksimum sıcaklıklarda artışa sebep olmasına karşın, NO_x salınım oranlarında ciddi bir artışa neden olmadığı görülmüştür.

GİRİŞ

Son yıllarda fosil yakıtların daha verimli ve temiz kullanımına yönelik çalışmalar artan bir ilgi görmüştür [Bodirsky, 2020]. Bu kapsamda araştırmacılar birçok endüstriyel uygulamada kullanılan doğalgaza odaklanmışlardır. Doğalgaz yüksek miktarda (yaklaşık % 90) metan gazından oluşur. Metan gazı kütlece yüksek ısı kapasitesine sahiptir. Metan-hava yanmasındaki NO_x emisyonlarının atmosferdeki troposferik ozon seviyesini arttırdığı bilinmektedir [Wang, 2018]. Bu özelliği nedeniyle küresel ısınmanın artmasına sebep olan ikinci önemli gaz haline gelmiştir.

Araştırmalar metan yakıtının hidrojenle zenginleştirilmesinin emisyon salınım oranlarını azalttığı ve alev kararlılığının artırılmasında etkili olduğunu göstermiştir [Arghode, 2009]. Hidrojenle zenginleştirilen metan alevinin yüksek sıcaklıklara ulaşması nedeniyle termal NO_x emisyon oranlarını arttırdığı bilinmektedir.

*Yüksek Lisans Öğrencisi, Uçak ve Uzay Müh. Böl., E-posta: karasuy19@itu.edu.tr

†Yüksek Lisans Öğrencisi, Uçak ve Uzay Müh. Böl., E-posta: zaman20@itu.edu.tr

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

Araştırmacılar farklı yakıt enjeksiyon geometrileri kullanarak CO₂ ve NO_x emisyonlarını azaltmayı hedeflemişlerdir. Bu kapsamda [Zhu, 2010], 45° açığa sahip girdaplayıcı (swirler) valfleri kullanarak radyal olarak enjekte edilen hidrojenle zenginleştirilmiş metan alevi üzerinde deneysel bir çalışma yürütmüştür. Bu çalışma, hidrojenle zenginleştirilmiş metan alevinin girdap etkilerinden dolayı merkezi devridaim bölgesini ve akışın karakteristik uzunluğunu azalttığını göstermektedir. Kim ve diğerleri [Kim, 2009] farklı radyal enjeksiyon açıları için deneysel çalışmalar yapmış ve aşırı fakir karışım koşulları altında hidrojenle zenginleştirilmiş önkarişimli metan alevini incelemiştir. Bu çalışma aynı çalışma koşulları altında NO_x ve CO emisyonlarının hidrojenle zenginleştirilmiş ön-karişimsız metan alevinden daha düşük olduğunu göstermektedir. Boushaki ve diğerleri [Boushaki, 2019], girdap etkileri altında ön-karişimsız metan alevininin oksijen ile zenginleştirilmesinin etkilerini inceleyen deneysel bir çalışma yürütmüştür.

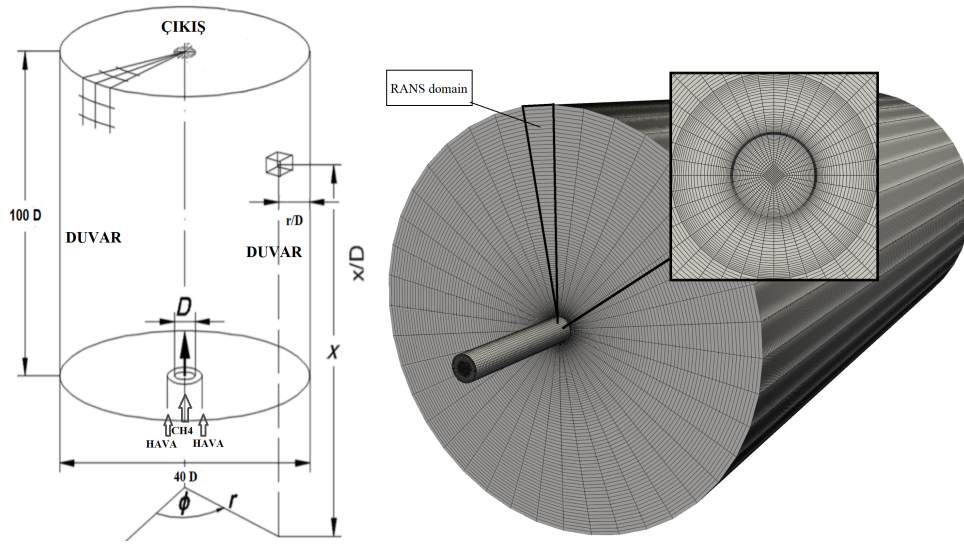
Bu çalışmanın amacı, hidrokarbon yakıtların hidrojen ile zenginleştirilmesinin alev dinamikleri ve emisyonlar açısından etkileri nümerik olarak araştırmaktır. Bu bağlamda, öncelikle iyi dökümente edilmiş deneysel Sandia D alevi [Barlow, 1998] referans alınarak metan alevinin nümerik doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ardından RANS yaklaşımı ile metan yakıtı farklı yüzdelerde hidrojen ile zenginleştirilerek elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Daha sonra, radyal enjeksiyon sisteminin karışımları ve yanma verimliliğini artırdığını belirten çalışma [Boushaki, 2019] referans alınarak Sandia D alevi yanma odasına radyal enjeksiyon sistemi eklenmiştir. Elde edilen kısmi karişimli yanma odasında metan ve hidrojenle zenginleştirilmiş metan alevleri için LES yaklaşımıyla yanma analizleri yapılarak elde edilen sonuçlar alev dinamikleri ve emisyonlar açısından incelenmiştir.

SAYISAL MODELLEME

Analizler açık kaynak kodlu bir yazılım olan OpenFOAM-v9 kullanılarak gerçekleştirilmiştir. OpenFOAM, akışı yöneten denklemleri ve tür denklemini çözmek için sonlu hacimler yöntemini kullanır. Türbülans modellemesi için Reynolds ortalama Navier-Stokes (RANS) ve büyük edi benzetimi (LES) yaklaşımları kullanılmıştır. RANS, Navier-Stokes denklemlerini Reynolds ayrıştırmasını kullanarak çözen zaman ortalama matematiksel yöntemdir. RANS'ta zamana bağlı türbülans yapıları tüm ölçekler için doğrudan çözülmek yerine modellenir. Bu çalışmanın ilk kısmında yanma davranışlarını incelemek için hesaplama performansı nedeniyle literatürde sıklıkla kullanılan standart k-ε modeli uygulanmıştır [Hirsch, 2009]. Ardından anlık alev davranışlarını analiz etmek için LES yaklaşımı kullanılmıştır. LES yönteminde, enerji taşıyan ölçekler (büyük yapılar) filtrelenmiş denklemler kullanılarak açıkça çözülür. Küçük yapılar, alt ızgara ölçekli modelleme için duvar uyarlamalı yerel girdap viskozitesi (WALE) ile modellenmiştir. Sınır tabaka modellemesi için Spalding duvar fonksiyonu [Lauder, 1972] ve termal duvar fonksiyonları kullanılmıştır.

Yanma analizleri kimyasal tepkimeli akışları çözebilen reactingFoam çözücüsü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. PIMPLE algoritması kullanılarak basınç-hız çözümlenmesi (pressure-velocity decoupling) sağlanmıştır. Konvektif ve skaler terimler için ikinci dereceden merkezi farklar şeması uygulanmıştır. Şemaların kararlılığı Sweby sınırlandırıcı ile sağlanmıştır [Sweby, 1984]. Zaman ikinci dereceden geri yönlü ayrıklaştırma ile sayısal olarak ifade edilmiştir. Maksimum CFL sayısı 0.3 olarak sabitlenmiştir. RANS analizleri yaklaşık 1×10^{-5} fiziksel zaman adımı ile gerçekleştirilmiştir. LES analizleri için ortalama zaman adımı 3×10^{-7} saniyedir. Ortalama akış parametreleri için istatistiksel sonuçlar, başlangıçtaki zamana bağlı akış alanının tamamlanmasından sonra ortalama 10 akış döngüsü için toplanmıştır.

Türbülans kimya etkileşimleri kısmi karişimli reaktör (partially stirred reactor, PaSR) [Nordin, 2001] yanma modeli kullanılarak modellenmiştir. Termal radyasyon, P-1 [Sazhin, 1996] radyasyon modeli kullanılarak modellenmiştir. Yanma işlemleri esnasında kurum oluşumu ihmal edilmiştir. Kimyasal reaksiyon denklemlerinin hesaplama maliyetlerini düşürebilmek için TDAC algoritması kullanılmıştır. Tepkime mekanizmaları için literatürde sıklıkla kullanılan GRI-Mech 3.0 [Frenklach, 1995] mekanizması kullanılmıştır. Bu mekanizma 53 kimyasal tür ve 325 reaksiyon denklemi içermektedir.



Şekil 1: Akış alanı ve çözüm ağ yapısı genel görünümü LES (tüm geometri) ve RANS (5°kama).

SANDIA D ALEVİ

Sandia D alevi, türbülanslı ve önkarişimsız pilot metan-hava difüzyon alevinin deneysel bir çalışmasıdır. Sandia D alevi deney geometrisi üç bölümden oluşur: ana yakıt jeti, pilot jet ve serbest akışlı hava. Ana yakıt jeti, dairesel pilot jet ve serbest akışlı hava tarafından çevrelenmiştir.

Ana yakıt jeti hacimce %25 CH_4 ve %75 kuru havadan oluşmaktadır. Pilot alev, zayıf koşullarda ($\phi = 0.77$) C_2H_2 , H_2 , hava, CO_2 ve N_2 karışımıdır. Ana jet hızı $U_{bulk} = 49.6$ m/s'dir. Reynolds sayısı yakıt jet hızı ve boru çapına göre 22400'dür. Pilot jet hızı $U_{plt} = 11.4$ m/s'dir. Ana yakıt jet sıcaklığı 294 K'dir. Metan-hava karışımı, yanma odasının girişinde 1880 K sıcaklığa sahip olan pilot jet karışımı ile ateşlenir.

Analizler için oluşturulan ağ yapısı ve akış alanı Şekil 1'de gösterilmiştir. Çoklu blok (multi-block) tekniği kullanılarak düzgün yapıli (structured) ağlar elde edilmiştir. Ağ yapıları altı yüzlü elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Ayrıca ana jetin merkezindeki hücre yüzey-hacim oranı sebebiyle yaşanacak tekilliği önlemek için O-H (kelebek) yapıli ağ uygulanmıştır.

LES Analizleri

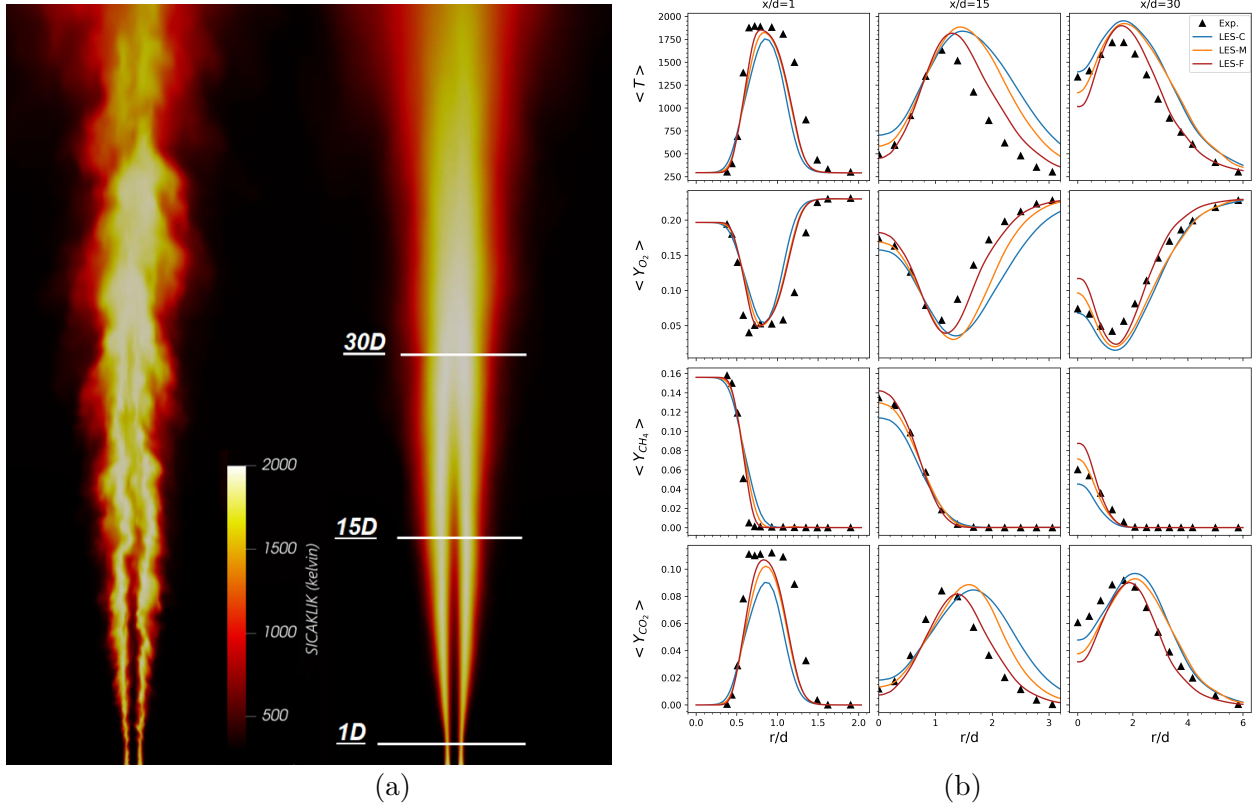
LES analizlerinde sayısal yöntem ve çözüm ağının doğrulanabilmesi için üç farklı çözüm aği ile birlikte ön-karişimsız metan alevi analizleri gerçekleştirilmiştir. Ağ yapıları hakkında detayli bilgi Tablo 1'de verilmiştir.

Alevin anlık-ortalama genel yapısı ve ölçüm konumları Şekil 2(a)'da görölmektedir. Sıcaklık dağılımı, CH_4 , CO_2 ve O_2 ortalama kütle oranları Şekil 2(b)'de üç farklı aksenal konum ve ağ yapısı için gösterilmektedir. Sonuçlar ağ yapısı açısından değerlendirildiğinde, üç farklı çözüm aği için sonuçların benzer olduğu görölmektedir. Ağ çözünürlüğü arttıkça elde edilen sonuçlar deney sonuçlarına daha fazla yaklaşmıştır. Akış yönünde ilerledikçe yüksek çözünürlüklü ağ yapısının kütle oranları ve sıcaklıkları tahmin etme açısından daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Bunun sebebi, akış yönünde ilerledikçe daha yoğun türbülans yapıları ve gerilim bölgeleri oluşmakta ve bu yapılar yüksek çözünürlük sayesinde daha iyi yakalanmaktadır. He-

Tablo 1: RANS ve LES analizleri için ağ yapısı detayları.

RANS		LES	
Ağ	Hücre Sayısı	Ağ	Hücre Sayısı
RANS-C	5100	LES-C	0.9M
RANS-M	12000	LES-M	2.1M
RANS-F	30000	LES-F	4.9M

saplama maliyetleri ve çözüm sonuçları arasındaki doğruluk incelendiğinde LES-M ağ yapısının çalışmanın amaçları doğrultusunda uygun olduğuna karar verilmiştir.

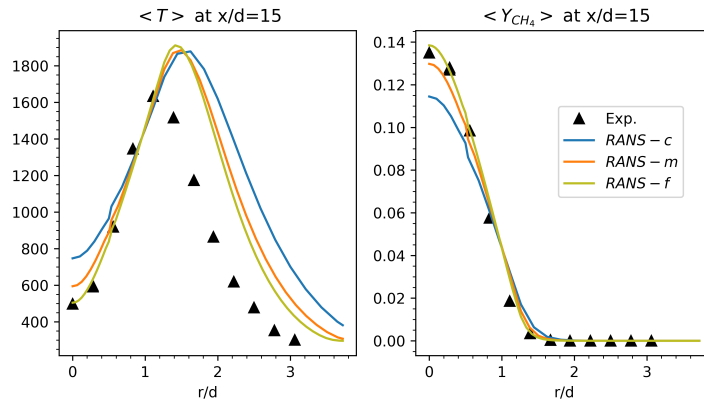


Şekil 2: (a) Ortalama ve anlık alev yapısının genel görünümü. (b) $x/d = 1, 15$ ve 30 konumları için değişkenlerin akışa dik yöndeki dağılım eğrileri

Analiz sonuçları yanma dinamikleri açısından incelendiğinde; sıcaklık profillerinin tüm bölgeler için benzer trend içerisinde olduğu görülmektedir. $x/d = 15$ yakınlarında, alev merkezi civarında difüzyon alevlerinin doğası gereği yerel sönmeler oluşur ve bu durum daha aşağı noktalarda yeniden ateşleme ve tam yanma süreçlerini takip eder. PaSR yanma modeli sönmeye/yeniden tutuşma olgusunu yakalayamadığı için alev merkezindeki tepe sıcaklığı beklediği şekilde bir miktar fazla tahmin edilmiştir, $x/d = 15$ ve $x/d = 30$ konumları incelendiğinde, radyal yön boyunca deneysel verilerden sapma azalmaktadır. CH_4 ve O_2 tüketimi yanma için kritik öneme sahiptir. CH_4 kütle oranı, $x/d = 15$ noktasındaki hafif bir sapma haricinde doğru tahmin edilmiştir. Kimyasal türler üretilmelerine veya tüketilmelerine bağlı olarak, $x/d = 15$ ile 30 arasında bir miktar eksik ya da fazla tahmin edilmiştir. $x/d = 1$ 'de tüm kimyasal türler iyi hesaplanmıştır. $x/d = 15$ noktasında, O_2 aşırı tüketimine bağlı olarak CO_2 aşırı üretimi, yerel sönmelerin nümerik olarak gözlenememesinden dolayı açıkça görülebilir, ancak bu sapmalar ihmal edilebilir düzeydedir. Genel itibarı ile sonuçların deney verileri ile yeterli uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Metan Alevinin Hidrojen ile Zenginleştirilmesi

Metan yakıtının hidrojenle zenginleştirilmesinde farklı karışım oranları etkilerinin incelenmesi için çok sayıda nümerik analiz gerçekleştirilmesi gerekmektedir. LES analizlerinin yüksek depolama alanı ve hesaplama kaynaklarına ihtiyaç duyması sebebiyle bu bölümdeki çalışmalar RANS yaklaşımı kullanılarak yapılmıştır. Problem doğası gereği aksel simetrik olduğu için RANS analizlerinde hesaplama maliyetlerini azaltabilmek amacıyla ağ geometrisinin 5^o 'lik bir dilimi ile çalışılmıştır. RANS analizleri için üç farklı çözünürlükte ağ yapısı oluşturularak ağ etkisi incelenmiştir. Analizlerdeki ağ etkisi metan yakıtı kullanılarak deneyle karşılaştırmalı olarak incelenmiş ardından hidrojen ile zenginleştirme çalışması yapılmıştır. RANS analizlerinde kullanılan ağ yapıları hakkında bilgi Tablo 1'de verilmiştir.

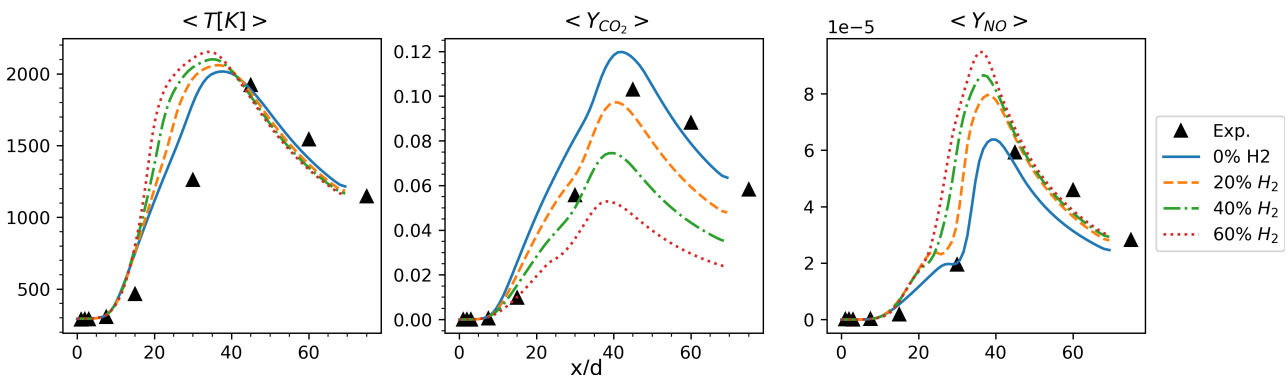


Şekil 3: Ortalama sıcaklık (K) ve CH_4 kütle oranının $x/d = 15$ noktası için akışa dik yönde dağılımı.

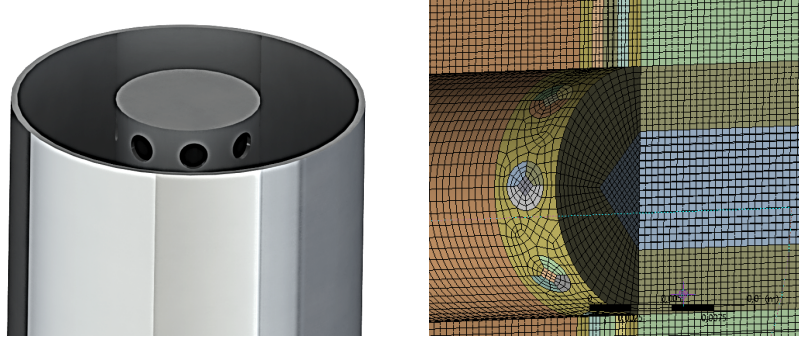
Şekil 3, RANS analizleri için ağ çözünürlüğünün ortalama sıcaklık dağılımı ve CH_4 kütle oranı üzerindeki etkilerini deneyle karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Şekil 3'de sonuçların ağ çözünürlüğü ile değiştiği görülmektedir. Tüm simülasyonlarda, ortalama sıcaklık fazla tahmin edilmiştir. RANS-c simülasyonu deney sonuçları ile daha az benzerdir. RANS-f simülasyonu, özellikle CH_4 'ün ortalama kütle oranları için deneysel verilerle daha iyi uyum göstermiştir. Ancak sayısal sonuçlar ve hesaplama maliyetleri açısından RANS-m en uygun ağ yapısı olarak görülmüştür.

Hidrokarbon yakıtlara hidrojen ilavesinin etkilerinin incelenmesi amacıyla Sandia D alevi farklı oranlarda hidrojen ile zenginleştirilmiştir. Üç farklı hidrojen ilavesi (%20 – 40 – 60) için analizler yapılarak karışımların yanma dinamikleri ve emisyon özellikleri bakımından etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Yakıt-hava karışım oranı yüzdeleri (%25 CH_4+H_2 karışımı ve %75 kuru hava) deney şartları ile benzer olacak şekilde sabit tutulmuştur.

Hidrojen ilavesinin akış yönündeki eksen boyunca ortalama adyabatik alev sıcaklığı ve zararlı gazlar üzerindeki etkisi Şekil 4'de gösterilmektedir. Hidrojen ilavesinin alevin merkez hattı boyunca maksimum sıcaklıkları artırdığı görülmektedir. Alev sıcaklıklarının artmasının NO_x gazlarının oluşumunu tetiklediği bilinmektedir. Bu durum analiz sonuçlarında da açıkça görülmektedir. Hidrojen yüzdesindeki artış yanma odasına giren karbon kaynağını azaltmaktadır. Bu nedenle hidrojen ilavesi durumunda CO_2 emisyonlarındaki dramatik azalma dikkat çekmektedir. Analiz sonuçları neticesinde % 40 hidrojen ilavesinin uygun yakıt karışım oranı olduğuna karar verilmiştir ve kısmi karışimli LES analizlerinde bu oranda yakıt karışımı kullanılması planlanmıştır.



Şekil 4: Farklı yüzdelerde hidrojen ihtiva eden Sandia D alev merkezinin akış yönünde sıcaklık, CO_2 ve NO dağılımları



Şekil 5: Radyal enjeksiyon sisteminin geometrik modeli ve ağ yapısı

Tablo 2: Ön karışimsız yanma odası için metan ve %40 hidrojenle zenginleştirilmiş metan yanması analizleri için sınır koşulları

Yakıt	Jet	Hız (m/s)	T[K]	CH ₄	O ₂	H ₂	N ₂
CH ₄	Radyal Jet	15	291	0.1561	0.1966	0	0.6473
	İkincil Jet	11	1880	0	0.054	0	0.742
CH ₄ +H ₂	Radyal Jet	15	291	0.0968	0.2026	0.0324	0.6682
	İkincil Jet	11	1880	0	0.054	0	0.742

KISMİ KARIŞIMLI YANMA ODASI TASARIMI

Hidrojenle zenginleştirilen ön-karışimsız metan alevinin yakıt-hava karışım oranının artırılması ve emisyon salınım oranlarının azaltılması için radyal yakıt enjeksiyon sistemi kullanılmıştır. Şekil 5'de gösterildiği gibi Sandia D geometrisinin ana yakıt borusu üzerinde 1,5 mm çapında 8 adet radyal delik açılarak püskürtme sistemi oluşturulmuştur. Yakıt karışımı, radyal deliklerden eşit kütle debisinde hız sınır şartı uygulanarak püskürtülmektedir. Bu şekilde akış, pilot alev ile karışarak yanma odasına ilerlemektedir. Ön-karışimsız metan ve metan-hidrojen alevleri (%60 CH₄+%40 H₂) için sayısal analizler yapılarak radyal enjeksiyon sisteminin etkileri incelenmiştir. Her iki sayısal analiz için giriş koşulları Tablo 2' de gösterilmektedir. İlk çalışmada, kısmi karışimli metan-hava alevi, ikinci çalışmada ise yakıt konsantrasyonu %40 H₂-%60 CH₄ olan kısmi karışimli alev çalışılmıştır. Türbülanslı yanma olaylarının LES yaklaşımı ile analizinin yüksek CPU sürelerine ihtiyaç duyması sebebiyle bu bölümde LES analizlerinden elde edilen anlık sonuçlar üzerinden değerlendirme yapılmıştır.

Şekil 6 kısmi karışimli metan ve kısmi karışimli metan+hidrojenin anlık alev profillerini göstermektedir. Yakıtın hava içerisinde radyal enjeksiyonu, yakıt ve havanın çok daha hızlı karışmasını sağlamıştır. Yakıt Sandia Flame D alevine göre daha hızlı tüketilmiştir. Alev boyundaki azalma da dikkat çekicidir. Sandia Flame D alevinde, kimyasal türlerin zayıf karışımı sebebiyle alev yakıcı girişi yakınında çok incedir. Radyal enjeksiyon analizlerinde alev başlangıç bölgesi daha kalındır. Bu etki alev kararlılığını artırır.

Şekil 7 bazı kimyasal türlerin kütle oranlarını ve PaSR reaksiyon yoğunluğunu göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, hidrojenin yüksek tepkime hızı nedeniyle yanma reaksiyonları yakıcı girişinde daha yoğundur. Bu durum merkezi sirkülasyon bölgesinde daha yüksek sıcaklıklara neden olur. Merkez hattı boyunca maksimum sıcaklığın, yakıtta %40 H₂ ilavesiyle 1954 K'dan 1986 K'ya yükseldiği gözlemlenmiştir. Bunun durumun sebebi, hidrojenin daha yüksek adyabatik sıcaklıklara sahip olmasıdır.

Alev uzunluğu, yanma olaylarının kolaylıkla karakterize edilebildiği en önemli değişkenlerden biridir. Anlık sıcaklık profilleri, hidrojen ilavesinin daha dar alev bir alev kalınlığına neden olduğunu göstermektedir. Ayrıca hidrojenin yüksek reaksiyon hızı, yakıtın daha hızlı tüketilmesine ve alev boyunun daha kısa olmasına neden olmaktadır. Ayrıca hidrojen ilavesinin alev yüzey yoğunluğunu arttırdığı da açıkça görülmektedir. Artan hidrojen miktarı, artan yanma hızı anlamına geldiğinden, elde edilen sonuçlar beklentilerle de uyumludur.

CO ve CO₂'nin aksel kütle oranları da şekil 7'de gösterilmektedir. Yakıtta hidrojen ilavesi CO ve CO₂ yoğunluğunu önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu durumun sebebi yakıttaki H/C oranının hidrojen ilavesiyle

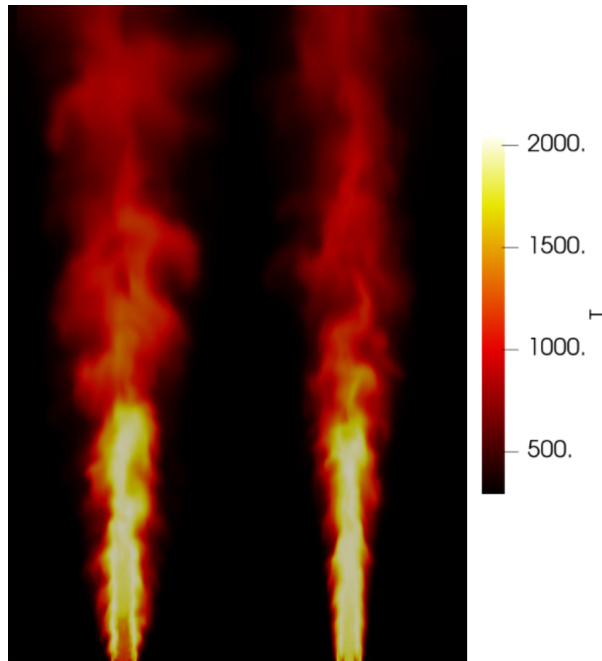
artmasıdır. Kısacası, yakıtın hidrojen ile zenginleştirilmesi, daha düşük karbon girdisi sağlamakta ve daha düşük karbon emisyonu sağlamaktadır.

OH eğrisi incelendiğinde, H/C oranındaki artış daha fazla OH oluşumuna neden olmaktadır. OH oluşumu, H₂O tepkimeleri gibi bir dizi zincir tepkime neticesinde artmaktadır. Küresel bir etki olarak, hidrojen ilavesi maksimum sıcaklıkları artırarak NO_x emisyonlarının artmasına neden olur. NO_x eğrilerinden de görüldüğü gibi sonuçlar beklentilerin aksine iki analiz de benzer NO_x oranları içermektedir. Bu duruma, radyal enjeksiyon stratejisi sayesinde maksimum sıcaklık artışının baskılanmasının yol açtığı düşünülmektedir. Bu durum ilerleyen çalışmalarda daha detaylı araştırılacaktır.

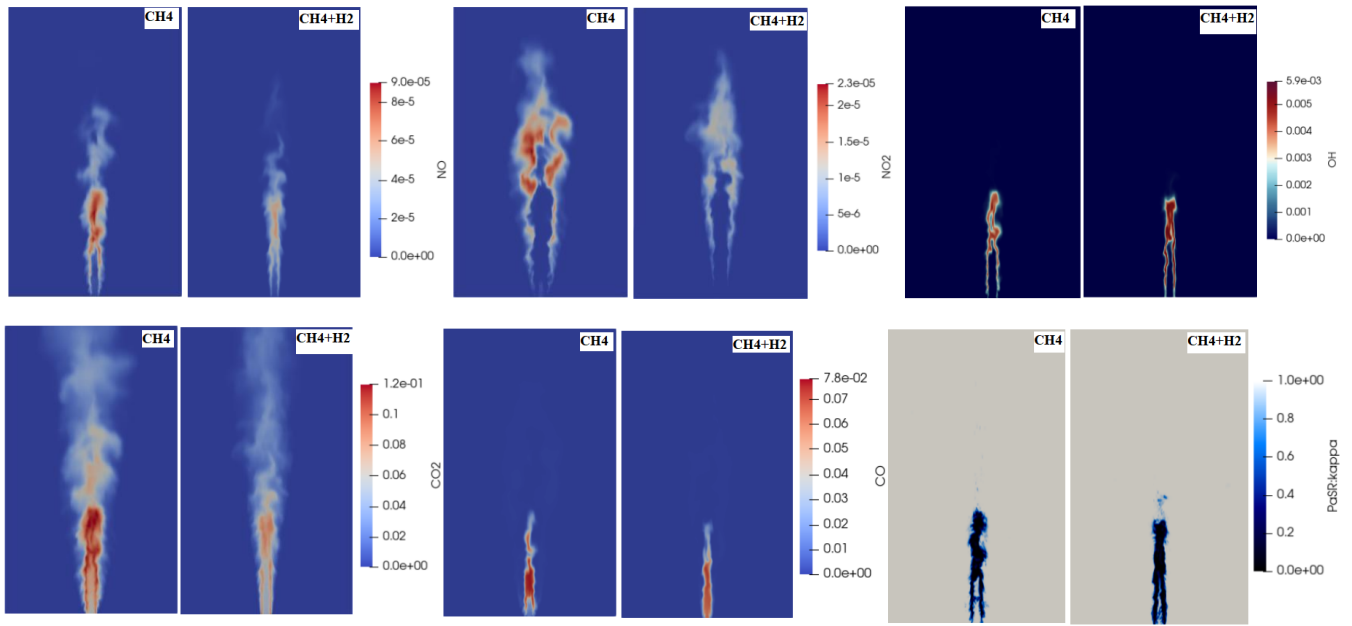
DEĞERLENDİRME & GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada açık kaynak kodlu bir yazılım olan OpenFOAM kullanılarak ön-karışimsız ve kısmi karışimli yanma odalarında metan ve hidrojenle zenginleştirilmiş metan alevleri sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla, öncelikle ön karışimsız metan alevi belirli oranlarda hidrojen ile zenginleştirilerek RANS yaklaşımı ile incelenmiştir. Ardından kısmi karışimli yanma odasında metan ve hidrojenle zenginleştirilmiş metan alevleri için LES yaklaşımı ile analizler gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda, yanma için PaSR modeli ve radyasyon için P1 modeli kullanılmıştır. Türbülans modellemesi için, RANS yaklaşımında k-ε ve LES yaklaşımında WALE modeli kullanılmıştır.

Genel olarak RANS yaklaşımının özellikle yakıcı girişi yakınında sıcaklık ve kimyasal türler hakkında iyi tahminler sağladığı ve düşük CPU maliyeti düşünüldüğünde hala uygun bir metodoloji olduğunu söylemek mümkündür. Ancak yakıcının girişinden çıkışına kadar tüm bölgelerin incelenmesi beklenen ve tür oluşumlarının kritik öneme sahip olduğu kirletici gaz oluşumlarının incelenmesi gibi uygulamalarda gereken hassasiyette sonuçlar vermemektedir. Bu bağlamda LES yaklaşımı ile akış ve alev dinamikleri hakkında çok daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Özellikle türbülans yoğunluğunun fazla olduğu alevin alt bölgelerinde LES yaklaşımı ile çok daha başarılı sonuçlar elde edilebilmektedir. Yakıtın oksitleyici içerisine doğrudan yönlendirildiği kısmi karışimli yanma odası sistemleri ile daha kararlı alev yapısı elde edildiği görülmüştür. Ayrıca, ön karışimsız sistemlere kıyasla yakıt ve hava daha iyi bir şekilde karışarak daha verimli yanma gerçekleştirilebilir.



Şekil 6: Kısmi karışimli yanma odası CH₄ alevi (sol) ve kısmi karışimli yanma odası CH₄+H₂ alevi (sağ).



Şekil 7: Kısmi karışımli alev analizlerinde bazı kimyasal türlerin kütle oranları ve PaSR model katsayısı için anlık sonuçlar.

Hidrojen, geleceğin yeşil yakıt kaynağı olmaya adaydır. Hidrokarbon yakıtların hidrojen ile zenginleştirilmesi, CO ve CO₂ gibi zararlı gazların daha az salınmasını sağlar. Analizler neticesinde elde edilen sonuçlar karbon emisyonlarının azaldığını açıkça göstermektedir. Hidrojen ilavesi, alevin tutunum noktalarında daha yoğun tepkime gerçekleşmesini ve alevin daha iyi tutunmasını sağlar. Bu durum alev kararlılığını artıran ve sönme limitlerini düşüren bir faktördür. Ayrıca, hidrojen ilavesi neticesinde alev boyunda kısalma gözlemlenmiştir.

Hidrojen yüzdesindeki artışın alevin maksimum sıcaklıklarını artırdığı görülmektedir. Bu durum NO_x gazlarının daha fazla üretilmesine sebep olan bir olgudur. Analizler neticesinde NO_x gazlarının beklenenin aksine artmadığı görülmüştür. Radyal enjeksiyon mekanizmasının bu duruma neden olduğu düşünülmektedir. İlerleyen çalışmalarda, NO_x gazlarının salınımı üzerine çalışmalar yürütülecektir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada kullanılan hesaplama kaynakları Ulusal Yüksek Başarımlı Hesaplama Merkezi'nin (UHeM), 4008552020 numaralı desteğiyle, sağlanmıştır.

Kaynaklar

- Arghode V. K., Gupta A. K., Kim H. S., Linck M. B., 2009. "Hydrogen addition effects in a confined swirl-stabilized methane-air flame.", *International Journal of Hydrogen Energy*, Cilt.34(2), s.1054-1062.
- Barlow R.S. ve Frank J.H., 1998. "Effects of turbulence on species mass fractions in methane/air jet flames", *Proc. Combust. Inst.*, s. 1087–1095, <https://tnfworkshop.org/data-archives/pilotedjet/ch4-air/>
- Bodirsky B. L., Chateau J., Durand-Lasserre, 2020. "The role of methane in future climate strategies: mitigation potentials and climate impacts.", *Climatic Change*, Cilt.163(3), s. 1409-1425.
- Boushaki T., Merlo N., De Persis S., Chauveau C., Gökalp I., 2019. "Experimental investigation of CH₄-air-O₂ turbulent swirling flames by Stereo-PIV". *Experimental Thermal and Fluid Science*, Cilt.106, s. 87-99.

- Frenklach M., 1995. "An Optimized Detailed Chemical Reaction Mechanism for Methane Combustion," Rapor No. GRI-95/0058, GRI-Mech.
- Hirsch C., Tartinville B., 2009. "Reynolds-averaged Navier-Stokes modelling for industrial applications and some challenging issues.", *Int. Journal Comput. Fluid Dyn.*, Cilt.23(4), s. 295–303.
- Jaccard M., 2006. "Sustainable fossil fuels: the unusual suspect in the quest for clean and enduring energy.", Cambridge University Press.
- Kim Han S., Vaibhav K. Arghode, Martin B. Linck, Ashwani K. Gupta., 2009. "Hydrogen addition effects in a confined swirl-stabilized methane-air flame." ,*International Journal of Hydrogen Energy*, Cilt.34.2, s.1054-1062
- Launder B. E. ve Spalding D. B., 1972, "Mathematical Models of Turbulence.", Academic Press.
- Nordin P., 2001. "Complex chemistry modelling of diesel spray combustion", Chalmers University of Technology, Doktora Tezi.
- Faltsi O., Sazhin S. S. ve Sazhina E.M., 1996. "The P-1 model for thermal radiation transfer: advantages and limitations." s. 289-294.
- Sweby PK., 1984. "High resolution schemes using flux limiters for hyperbolic conservation laws.", *SIAM J. Numer. Anal.* Cilt.21, s.995–1011.
- Wang, P., Chen, Y., Hu, J., Zhang, H., ve Ying, Q., 2018. "Attribution of tropospheric ozone to nox and voc emissions: considering ozone formation in the transition regime". *Environmental science technology*, Cilt.53(3), s. 1404–1412.
- Zhu S. ve Acharya S., 2010. "Effects of hydrogen addition on swirl-stabilized flame properties.", In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, Cilt. 43970, s. 1277-1287.