

# Metan-Hava Yanmasının HAD Analizleri ile İncelenmesi

Barış YILMAZ

## ÖZET

Endüstriyel uygulamaların çoğunda, içten yanmalı motorlar ve gaz türbinleri gibi, yanma olayı yüksek basınç şartları altında gerçekleşir. Bu uygulamalarda yanma süreci genellikle türbülanslıdır. Türbülanslı ortam, yakıtın hava ile daha iyi karışımını sağlayarak yanma verimini artırır. Diğer yandan, yanma sırasında ortaya çıkan ısı yanma odasındaki akış alanında birtakım düzensizliklere sebep olur. Türbülans ve yanma arasındaki bu karşılıklı etkileşimler ortamdaki alevin yapısında ve ortamın türbülans alanında birtakım değişimlere neden olabilir. Türbülanslı yanma çok sayıda zaman ve uzunluk ölçeğine bağlı olarak karakterize edilir. Bu ölçeklerin büyüklüğü türbülansın alev üzerindeki etkisini belirlemektedir. Ayrıca, ortamdaki basıncın hem yanma hem de türbülans üzerindeki etkilerinin incelenmesi ve akış alanındaki ölçeklerin belirlenmesi alev kararlılığının belirlenmesi açısından oldukça önemlidir.

Bu çalışmada, sayısal modelleme yöntemiyle fakir önkarişimli metan-hava alevlerinin özellikleri farklı karışım oranlarında ve farklı basınç koşullarında incelenmiştir. Sayısal modelleme çalışmalarında ICARE-CNRS (Fransa) laboratuvarlarında bulunan yüksek basınçlı yanma odası deney düzeneği modellenerek incelenmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Hem reaktif akış alanı hem de alev sınırı özellikleri sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal modellemelerde Fluent programı kullanılmıştır. Modelleme çalışmalarına öncelikle yanma odası akış alanı analizi ile başlanmış ve türbülans modeli olarak k-ε modeli Pope düzeltmesi uygulanarak kullanılmıştır. Fakir önkarişimli alevin farklı karışım ve basınç şartlarında özellikleri, alev boyu değişimi gibi, incelenmiştir. Sayısal model sonuçları deneysel verilerle karşılaştırıldığında uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yanma, Önkarişimli Yanma, Metan-Hava Alevi, Türbülanslı Yanma, Basınç Etkisi.

## 1. GİRİŞ

Endüstriyel uygulamaların çoğunda, yanma süreci genellikle türbülanslıdır ve yüksek basınç şartları altında gerçekleşir. Türbülanslı ortam, yakıtın hava ile daha iyi karışımını sağlayarak yanma verimini artırır. Diğer yandan, yanma sırasında ortaya çıkan ısı gaz geniş-

## Abstract:

Combustion takes place under pressurized conditions in most of industrial applications, for instance; internal combustion engines and gas turbines. On the other hand, combustion process usually takes place within turbulent environments. Turbulence increases the mixing and thereby enhances combustion. In addition, combustion releases heat and generates flow instability due to gas expansion. These interactions may lead to modifications of the flame front and the turbulent flow field. On the other hand, turbulent combustion is characterized by a wide range of time and length scales. Therefore, it is important to characterize effect of pressure on both turbulence and combustion, and resolve turbulent scales within the flow field.

In this study, the influence of equivalence ratio and the pressure on the lean premixed methane-air flame properties are investigated for different conditions in the high pressure chamber setup of ICARE-CNRS(France). Both the reactive flow field and the flame front statistics inside the chamber have been examined numerically. The flow field statistics has been initially computed using the k-ε turbulence model with Pope-correction. Then, the statistics of lean turbulent premixed flame, such as flame tip length, is studied for several equivalence ratio and pressure conditions. All the computations are performed with Fluent software. The modeling results are compared to experiments and satisfactory results have been obtained.

## Key Words:

Combustion, Premixed Combustion, Methane-air Flames, Turbulent Combustion, Pressure Effect

**Makale**

mesine ve böylece yanma odasındaki akış alanında birtakım düzensizliklere yol açar. Türbülans ve yanma arasındaki bu karşılıklı etkileşimler ortamdaki alevin yapısında ve ortamın türbülanslı akış alanında birtakım değişimlere neden olabilir.

Türbülanslı yanma çok sayıda zaman ve uzunluk ölçeğine bağlı olarak karakterize edilir [1-3]. Türbülanslı ve önkarişimli yanmada türbülans, ilerleyen alev cephesinin buruşmasına ve gerilmesine neden olur. Böylece alev yüzey alanı ve toplam alev hızı artar. Büyük ölçekli türbülans yapıları alev cephesini dalgalandırmaya ve buruşturmaya çalışır. Öte yandan boyutları alev sınır tabakasından daha küçük olan türbülans yapıları ise alev tabakası içerisine girebilir ve alevin yapısını değiştirebilir [1-3].

Türbülanslı akış alanı ve alev sınır tabakası arasındaki etkileşimler birtakım boyutsuz sayı ile ifade edilir. Bu sayıların en çok kullanılanları; türbülanslı Reynolds ( $Re_T$ ), Damköhler ( $Da$ ) ve Karlovitz ( $Ka$ ) sayılarıdır. Bu sayıların Schmidt ( $Sc$ ) sayısının bire eşit olduğu şartlar gözönüne alınarak türetilmiş matematiksel ifadeleri Denklem 1-3'te verilmiştir.

$$Re_T = \frac{u'l_T}{\nu} \quad (1)$$

$$Da = \frac{l_T s_L}{u' \delta_L} \quad (2)$$

$$Ka = \left( \frac{l_T}{\delta_L} \right)^{-1/2} \left( \frac{u'}{s_L} \right)^{3/2} \quad (3)$$

Denklem 1'de gösterilen türbülans Reynolds sayısı integral uzunluk ölçeğine (integral length scale) bağlı olarak tanımlanmıştır,  $l_T$ ,  $u'$  ve  $\nu$  sırasıyla integral uzunluk ölçeğini, türbülans çirpinti hızını ve kinematik viskoziteyi ifade etmektedir. Damköhler ( $Da$ ) sayısı; türbülans karışım zamanını,  $u'/l_T$ , kimyasal reaksiyon zamanıyla,  $\delta_L/S_L$  orantılandırılmaktadır. Burada  $\delta_L$  alev sınır tabaka kalınlığını ve  $S_L$  ise laminar alev hızını temsil etmektedir. Büyük  $Da$  sayısı ( $Da \gg 1$ ) alev içerisinde kimyasal reaksiyon olaylarının diğer tüm olaylardan çok daha hızlı gerçekleştiğini göstermektedir. Bu rejimdeki alevler

için hızlı kimyasal tepkime (fast chemistry) yaklaşımını temel alan türbülanslı yanma modelleri kullanılabilir. Düşük  $Da$  sayısı ( $Da < 1$ ) ise alev içerisinde, türbülanslı yapılar gibi diğer olayların kimyasal reaksiyon zamanına göre daha hızlı hareket ettiklerini ve alevin içerisine sokularak alevi kalınlaştırabileceği bir alev rejimini ifade eder, bu rejim iyice dağılmış alev rejimi (well-stirred) olarak adlandırılır. Bu rejimdeki bir alev için yanma, kimyasal reaksiyon kinetiği tarafından kontrol edilir. Karlovitz sayısı ( $Ka$ ) alev içerisindeki reaksiyon bölgesi kalınlığını, türbülansın en küçük uzunluk ölçeği olan Kolmogorov uzunluk ölçeği  $\eta$  ile orantılandırır. Yukarıda bahsedilen üç boyutsuz sayı kullanılarak önkarişimli ve türbülanslı alev rejimlerini sınıflandırmak üzere ilk olarak Borghi [4] tarafından önerilen daha sonra Peters [5] ve diğer araştırmacılar tarafından geliştirilen alev rejim diyagramı kullanılmaktadır.

Yanma olayı pekçok uygulamada basınçlı şartlarda meydana gelmektedir. Bundan dolayı basıncın alev sınır tabakasının istatistiksel özelliklerine etkilerinin detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Literatürde bu konu hakkında yapılmış pekçok çalışma bulunmaktadır. Kobayashi ve arkadaşları [6] Bunsen tipi bir yakıcıda önkarişimli metan-hava alevlerinin türbülanslı yanma hızlarını atmosferik basınçtan 1.0 MPa basınç şartlarına kadar deneysel olarak incelemişlerdir. Griebel ve arkadaşları [7] da yüksek basınç altında önkarişimli alevlerin akış alanlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Reynolds, Damköhler ve Karlovitz gibi boyutsuz sayıların ortalama alev sınırı pozisyonu ve alev yapısı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışma sonucunda basıncın artmasıyla ortalama alev pozisyonunun sınırlı bir şekilde değiştiğini ancak alev cephesinde daha fazla dalgalanmaya neden olduğunu belirtmişlerdir.

Türbülanslı yanma modellerinde laminar yanma özelliklerinin, laminar yanma hızı gibi, doğru olarak hesaplanması oldukça önemlidir. Pekçok önkarişimli türbülanslı yanma modeli, laminar yanma hızını temel alarak bu modelleri tamamlamakta/ kapatmak-

**Tablo1. Türbülanslı Önkarişimli Alev Rejimleri ve Karakteristikleri**

Alev Rejimi	$Re_T$	$Da$	$Ka$	$u'/S_L$	$\delta_L/\eta$
Dalgalı Alev (Wrinkled flame)	>1	>1	<1	<1	<1
Büzüşen Alev (Corrugated flame)	>1	>1	<1	>1	<1
Kalınlaşan Alev (Thickened flame)	>>1	$\geq 1$	>1	>>1	>1
Dağılmış Alev (Distributed flame)	>1	<1	>1	>1	>1

tadır. Yüksek basınç şartlarında laminer alev hızının ölçülmesi konusunda pekçok deneysel çalışma literatürde bulunmaktadır. ICARE-CNRS laboratuvarlarında yapılan tez çalışmalarında [8-10] önkarişimli alev istatistikleri yüksek basınç yanma odası düzeneğinde deneysel olarak incelenmiştir. Ogami ve Kobayashi [11] önkarişimli metan-hava karışımlarının laminer alev hızlarını yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında ölçmüştür. Deneysel verileri farklı kimyasal kinetik modelleri kullanarak sayısal olarak da hesaplamış ve deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Vagelopoulos ve arkadaşları [12] ve Hassan ve arkadaşları [13] da basıncın laminer alev hızı üzerine etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir.

Bu çalışmada, farklı hava ve yakıt karışım oranlarının ve basıncın önkarişimli metan-hava alevleri üzerine etkisi sayısal olarak incelenmiş ve deneysel ölçümler ile karşılaştırılmıştır. Modellemede ICARE-CNRS'te bulunan yüksek basınçlı yanma odası deney düzeneği modellenmiş ve bu düzende yapılan deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, bu sistemin çalışma şartları sayısal modelleme çalışmalarında başlangıç koşulları olarak kullanılmıştır.

Sayısal modelleme çalışmalarında öncelikle farklı yakıt-hava karışım oranlarının alevin boyu ve kalınlığı gibi özelliklerine etkisi incelenmiştir. Karışım denge oranı, alev-hava kütle oranının stokiyometrik şartlardaki alev-hava kütle oranına bölünmesi

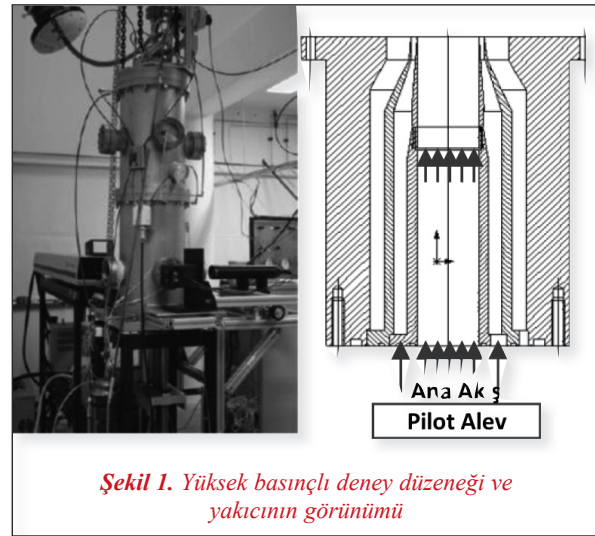
sonucunda elde edilmektedir. Bu çalışmada, 0.6, 0.7 ve 0.8 oranları için modelleme sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

Yanma odası içerisinde bulunan yakıcıdan çıkan karışımın hızı farklı basınç şartları için, 0.1 MPa dan 0.9 MPa ya kadar, sabit tutulmuştur. Böylece kütleli debi oranları basınç arttıkça artmıştır. Alevin yüksekliği ve kalınlığı gibi özellikleri, alev kalınlığı ilerleme değişkeni (progress variable) gibi alev parametreleri hesaplanarak incelenmiştir.

### Yüksek Basınçlı Yanma Odası Düzeneği

Modellemesi yapılan deney düzeneği, Şekil 1, paslanmaz çelikten yapılmış 300 mm iç çapında ve 1.0 MPa basınca kadar çalışabilen bir yanma odasından oluşmaktadır. Yanma odası, yüksekliği 600 mm olan su soğutmalı iki bölümden oluşmaktadır. Sistemde kullanılan yakıcı ise Bunsen tipi bir yakıcıdır ve yanma odasının alt tarafında yer almaktadır. Yakıcının iç çapı 25 mm ve çıkış ağzından 50 mm geride yer alan bir delikli levha ile akış türbülanslı hale getirilmektedir. Alev stabilizasyonu amacıyla stokiyometrik metan-hava karışımı kullanılmaktadır.

Alev özelliklerinin ölçümleri, yanma odası duvarlarında bulunan pencerelerden gönderilen lazer ışını sayesinde elde edilen görüntülerin kamera ile kaydedilmesi ile elde edilmektedir.



**Şekil 1. Yüksek basınçlı deney düzeneği ve yakıcının görünümü**

## Makale

### Sayısal Çalışmalar

Sayısal çalışmalara deney düzeneğinin iki boyutlu ve simetrik bir model geometrisinin geliştirilmesi ile başlandı. Yanma odası içinde türbülansın ve karışımın yoğun olduğu yakıcı çıkış ağzına yakın bölgede daha yoğun olmak üzere düzenli ağ yapıları oluşturuldu. Bu aşamadan sonra öncelikle oda içerisindeki soğuk akış alanı farklı türbülans modelleri kullanılarak hesaplandı. Son olarak reaktif akış alanı sayısal olarak incelendi.

Modellemede seçilen çalışma şartları deneysel çalışmalarda olduğu gibi oluşturuldu. Yakıcıdan hava-yakıt karışımının çıkış hızları farklı basınçlar için 2 m/s olarak sabit kabul edildi. Başlangıç şartları için ise deneysel olarak yakıcı ağzından 5mm uzaklıkta ölçülmüş radyal yöndeki hız dağılımı ve bu verilerden yararlanarak türbülans başlangıç koşulu verileri türetilerek kullanıldı. Farklı basınçlarda akış koşulları Tablo 2’de verilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi basınç arttıkça yoğunluk artmakta ve böylece türbülans Reynolds sayısı da artmaktadır.

Sayısal hesaplamaların ilk aşamasında yanma odası içerisindeki soğuk akış alanı hesaplandı. Bu aşamada k-ε türbülans modelinin çeşitli versiyonları kullanıldı ve soğuk akış alanı için Pope düzeltmesi yapılan k-ε model versiyonu hesaplamalarda deneysel verilerle en uyumlu ortalama hız ve türbülans dağılımları elde edildi. Soğuk akış modellemeleri ile ilgili çalışmalar için referans [14]’te yayınlanmıştır.

Soğuk akış çalışmalarının ardından yanma odasındaki reaktif akış alanı hesaplandı. Bu hesaplamalar iki

aşamada gerçekleştirildi. İlk aşamada, CHEMKIN [15] yazılım paketinde bulunan PREMIX programı kullanılarak farklı basınç koşulları için laminer alev özellikleri hesaplandı. Bu çalışmalarda kimyasal kinetik modeli olarak literatürde en fazla kullanılan model olan GRI Mech 3.0 kinetik modeli kullanıldı. Daha önce bahsedildiği gibi laminer alev özelliklerinin, laminer alev hızı vb, doğru hesaplanması oldukça önemlidir. Hesaplanan laminer alev hızı türbülanslı önkarışımlyanma modellerinde

kullanılacak türbülanslı alev hızı hesabı için gereklidir. Laminer alev özellikleri PREMIX ile hesaplandı ve hesaplanan sonuçlar deneysel ölçümlerle karşılaştırıldı.

Reaktif akışın modellenmesinin ikinci aşamasında ise laminer alev hesaplamaları sonucunda elde edilen sonuçlara bağlı olarak türbülans koşullarında alev özellikleri hesaplandı. Bu hesaplamalarda Zimont türbülanslı yanma modeli kullanıldı. Bu modelde yanma reaksiyonlarının çok hızlı gerçekleştiği kabul edilmekte ve akış ve enerji denklemlerine ek olarak alev sonu kalınlığını ifade eden ilerleme değişkeni (progress variable) için de bir transport denklemi çözülmektedir, Denklem 4 [16]. İlerleme değişkeni, c, kimyasal reaksiyon sonucu ortaya çıkan ürünlerin kütle oranlarının toplamının bu ürünlerin denge durumundaki kütle oranlarının toplamına oranı olarak tanımlanmaktadır. Denklem 5’te görüleceği üzere bu değişkenin değeri taze yakıt hava karışım bölgesinde 0, yanmış gaz bölgesinde ise 1 olacaktır. Aradaki değerler alev kalınlığının ilerleme dağılımını verecektir.

$$\frac{\partial \rho c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u c) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_i}{Sc_i} \frac{\partial c}{\partial x_i} \right) + \rho S_c \quad (4)$$

$$c = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{\sum_{i=1}^n Y_{i,eq}} \quad (5)$$

Denklem 4’te yeralan  $S_c$  kaynak teriminin hesaplanması için Zimont ve arkadaşları [16,17]

$$\rho S_c = \rho_u U_t |\nabla c| \quad (6)$$

**Tablo 2. Farklı basınçlar için başlangıç şartları**

P (MPa)	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
Mass flow rate $\times 10^{-3}$ (kg/s)	1.122	3.5645	5.9474	8.3276	1.0583
$U_{mean}$ (m/s)	1.9	2.01	2.01	2.01	2.01
P (kg/m <sup>3</sup> )	1.201	3.607	6.017	8.425	10.709
$\mu \times 10^{-5}$ (kg/m <sup>2</sup> s)	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85
Re	3090	9810	16400	22900	29100

şeklinde bir tamamlama/kapatma önermişleridir. Bu denklemde  $\rho_u$ , yanmamış gaz yoğunluğunu ve  $U_t$  türbülanslı yanma hızını göstermektedir.  $U_t$  türbülanslı yanma hızı, Denklem 7'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$U_t = A(u')^{3/4} S_L^{1/2} \alpha^{-1/4} l_t^{1/4} \quad (7)$$

Bu denklemde yeralan model sabiti, A, metan-hava için 0.52 değeri önerilmektedir [17].  $S_L$  laminer yanma hızını,  $\alpha$  thermal yayılma katsayısı,  $l_t$  integral türbülans uzunluk ölçeğini göstermektedir.

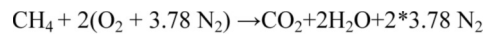
Denklem 7'den de görüleceği gibi ilerleme değişkeninin hesaplanabilmesi için laminer alev hızı en önemli parametrelerden biridir.

## SONUÇLAR

Türbülanslı önkarişimli alevin özellikleri bir önceki bölümde bahsedildiği gibi iki aşamada hesaplandı. İlk olarak laminer alev özellikleri farklı basınç koşullarında elde edildi. Daha sonra bu hesaplamalar kullanılarak türbülanslı alev özellikleri, ilerleme değişkeni dağılımı hesaplandı. Sonuçlar deneysel ölçümler ile karşılaştırıldı.

### Laminer Alev Hesaplamaları

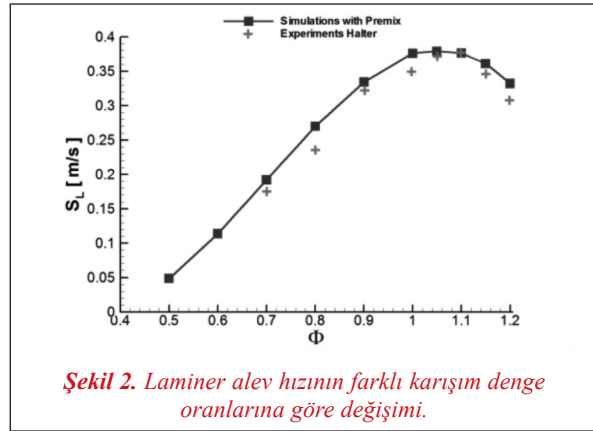
Önkarişimli Metan-hava alevinin laminer alev özellikleriyle sayısal hesaplamalara başlandı. Laminer alev özellikleri, laminer alev hızı ve Zeldovich alev kalınlığı vb., CHEMKIN yazılımı ve GRI Mech 3.0 kimyasal kinetik mekanizması kullanılarak hesaplandı. Bu hesaplamalarda kullanılan karışım dengesi oranı aşağıdaki Metan-hava tepkimesi gözönünde bulundurularak Denklem 8'deki gibi hesaplanmıştır.



$$\Phi = \frac{\frac{m_{\text{fuel}}}{m_{\text{air}}}}{\left(\frac{m_{\text{fuel}}}{m_{\text{air}}}\right)_{\text{stoich}}} = \frac{m_{\text{fuel}}}{m_{\text{air}}} \cdot \frac{2 \cdot (2M_{\text{O}} + 2 \cdot 3.78M_{\text{N}})}{M_{\text{CH}_4}} \quad (8)$$

Karışım dengesi oranının farklı değerleri için laminer alev hızı değişimi Şekil 2'de verilmiştir.

Laminer alev özellikleri, laminer alev hızı ve



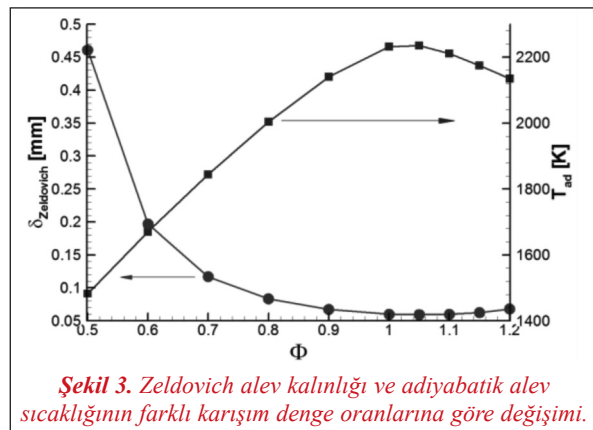
Şekil 2. Laminer alev hızının farklı karışım dengesi oranlarına göre değişimi.

Zeldovich alev kalınlığı, CHEMKIN yazılımı ve GRI Mech 3.0 kimyasal kinetik mekanizması kullanılarak hesaplandı. Laminer alev hızının farklı karışım dengesi oranlarına göre değişimi Şekil 3'te gösterilmiştir.

Şekil 4'te laminer alev hızlarının basınç artışıyla azaldığı görülmektedir. Literatürde varolan çalışmalarla karşılaştırıldığında uyumlu sonuçlar gözlenmiştir [16-18]. Termodinamik özelliklere göre hesaplanan Zeldovich alev kalınlığının değişimi, Denklem 9, farklı basınçlar için incelenmiştir.

$$\delta = \frac{\lambda}{\rho C_p S_L} \quad (9)$$

Bu denklemde  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $C_p$  and  $S_L$  sırasıyla iletim katsayısını, yanmamış gaz yoğunluğunu, özgül ısı kapasitesini ve laminer alev hızını ifade etmektedir.



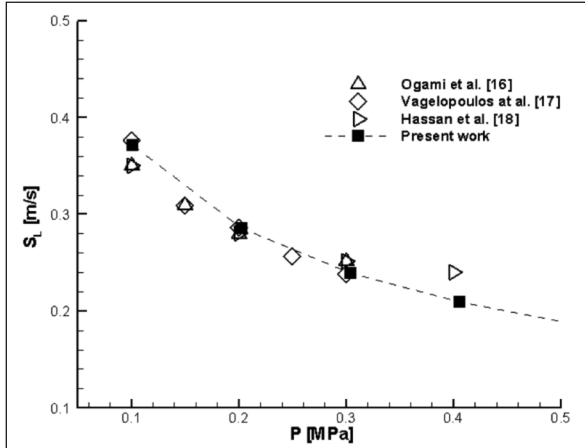
Şekil 3. Zeldovich alev kalınlığı ve adiabatik alev sıcaklığının farklı karışım dengesi oranlarına göre değişimi.

Şekil 4'te alev kalınlığının yüksek basınçlarda giderek azaldığı gözlenmektedir. Denklem 9 incelendiğinde Zeldovich alev kalınlığının laminer alev hızıyla



## Makale

la ters orantılı olduğu ancak yoğunluk ile doğru orantılı olduğu görülmektedir. Zeldovich alev kalınlığının değişmesinde yoğunluktaki değişimin daha etkili olduğu görülmektedir.



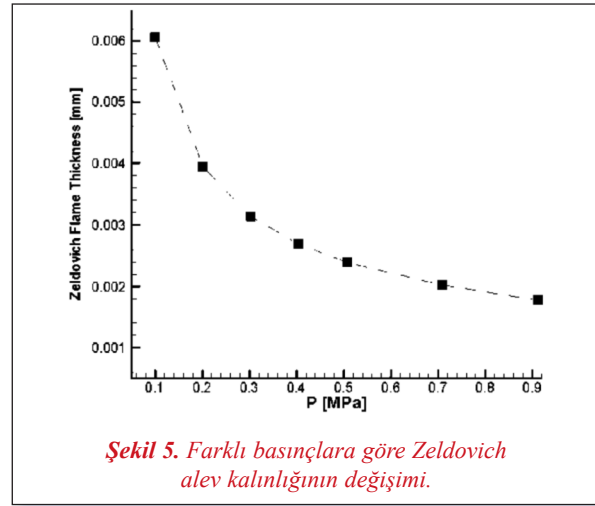
**Şekil 4.** Farklı basınçlara göre laminar alev hızlarının değişimi. İçi dolu kare semboller modelleme çalışması sonuçlarını göstermektedir.

### Türbülanslı Alev Hesaplamaları

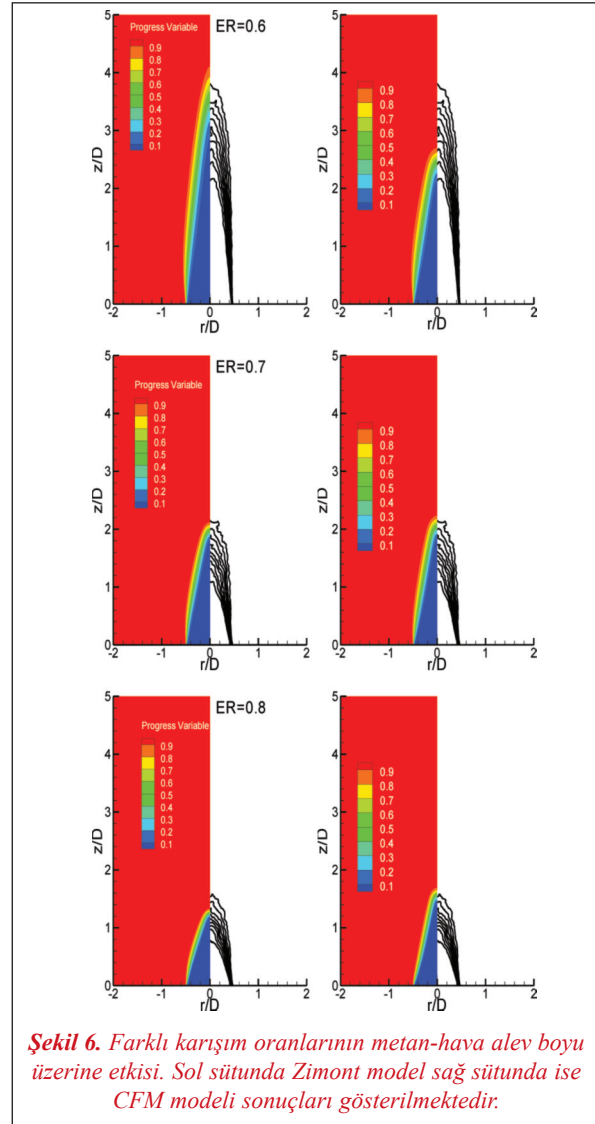
Önkarişimli laminar alev özelliklerinin hesaplanmasının ardından türbülanslı alev özelliklerinin modellenmesine başlanmıştır. laminar alev çalışmalarında hesaplanan laminar alev hızları türbülanslı yanmanın modellemesinde kullanılacaktır. Bu aşamada, önkarişimli türbülanslı yanma modelleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, metan-hava yanması Zimont ve Uyumlu Alev Modeli (Coherent Flame-CFM) modelleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. CFM modeli Fluent programına kullanıcı tanımlı fonksiyonlar (UDF) kullanılarak eklenmiştir.

Metan-havanın farklı karışım denge oranları için, 0.6, 0.7 ve 0.8, alev boyu değişimi analizinde her iki yanma modeli, Zimont ve CFM, kullanılarak hesaplama yapıldı. Artan karışım denge oranlarında alev boyunun kısaldığı Şekil 6'da gösterilmiştir. Ayrıca alev kalınlığının ise deneysel ölçümlerden daha ince hesaplandığı gözlenmektedir.

Farklı basınç koşullarında türbülanslı alev hesaplamaları Zimont model kullanılarak gerçekleştirildi. Bu çalışmalarda, metan-hava önkarişiminin fakir yakıt-hava karışım oranı, 0.6, şartları için modellenmeler yapıldı.



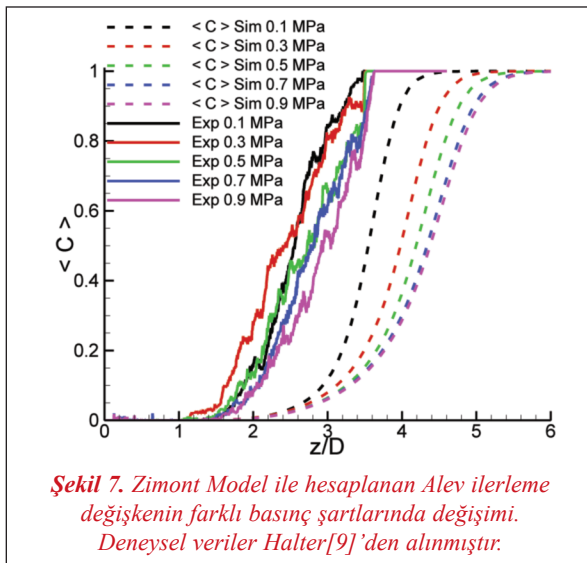
**Şekil 5.** Farklı basınçlara göre Zeldovich alev kalınlığının değişimi.



**Şekil 6.** Farklı karışım oranlarının metan-hava alev boyu üzerine etkisi. Sol sütunda Zimont model sağ sütunda ise CFM modeli sonuçları gösterilmektedir.

İlerleme değişkeninin,  $c$ , eksenel yönde dağılımı Şekil 7'de gösterilmektedir. Hesaplama sonuçları deneysel verilerle karşılaştırıldığında, ilerleme değişkeninin konumunun ölçümlere göre 1.5 çap daha ilerde yer aldığı görülmektedir. Ancak ilerleme değişkeninin eksenel yöndeki dağılımının deneysel verilerle benzer şekilde gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 7'de ayrıca basınç arttıkça ilerleme değişkeninin konumunun, dolayısıyla alev konumunun, eksenel yönde ilerlediği ancak belli bir basınç değerinden sonra değişimin oldukça sınırlı olduğu gözlenmektedir.

İlerleme değişkeninin,  $c$ , eksenel yönde dağılımı Şekil 7'de gösterilmektedir. Hesaplama sonuçları deneysel verilerle karşılaştırıldığında, ilerleme değişkeninin konumunun ölçümlere göre 1.5 çap daha ilerde yer aldığı görülmektedir. Ancak ilerleme değişkeninin eksenel yöndeki dağılımının deneysel verilerle benzer şekilde gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 7'de ayrıca basınç arttıkça ilerleme değişkeninin konumunun, dolayısıyla alev konumunun, eksenel yönde ilerlediği ancak belli bir basınç değerinden sonra değişimin oldukça sınırlı olduğu gözlenmektedir.



**Şekil 7.** Zimont Model ile hesaplanan Alev ilerleme değişkeninin farklı basınç şartlarında değişimi. Deneysel veriler Halter[9]'den alınmıştır.

### Değerlendirmeler

Farklı denge karışım oranları ve basınç koşullarının önkarişimli metan-hava alevlerinin istatistiksel özelliklerine olan etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Hesaplamalar deneysel veriler ile karşılaştırılmış ve uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Yanma odası içersindeki akış alanı iki aşamada modellenmiştir. İlk aşamada laminar alev hızı özellikleri CHEMKIN yazılımı ve GRI Mech 3.0 kimyasal kinetik mekanizması kullanılarak elde edilmiştir. Hesaplanan alev özellikleri deneysel ölçümlerle karşılaştırıldığında uyumlu sonuçlar bulunmuştur. Bu veriler kullanılarak bir sonraki aşama olan türbülanslı yanma analizleri için gerekli laminar alev hızı böylece elde edilmiştir. Farklı karışım denge oranlarında alev yapısının değiştiği ve artan karışım oranlarında alev boyunun azaldığı ve kalınlığında azalma olduğu gözlenmiştir.

Farklı basınç koşullarında hesaplanan laminar alev hızları deneysel ölçümlerle karşılaştırıldığında uyumlu sonuçlar elde edilmiş ve artan basınçla laminar alev hızının azaldığı gözlenmiştir. İkinci aşamada ise türbülanslı alev özellikleri Zimont türbülanslı yanma modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Alev ilerleme değişkeni incelendiğinde basıncın artmasıyla alevin konumunun eksenel yönde arttığı ve basınç artımının ilerleme değişkeni üzerindeki etkisinin azaldığı gözlenmiştir. Deneysel verilerle karşılaştırıldığında alevin eksenel yönde daha ilerde yer aldığı ancak alev ilerleme değişkeninin dağılım profiline benzer olduğu gözlenmiştir.

Sonuç olarak HAD analizlerinin yanma olayının modellenmesinde önemli bir araç olduğu ve deneysel verilere yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Günümüzde yanma olayının gerçekleştiği endüstriyel sistemler düşünüldüğünde, içten yanmalı motorlar, gaz türbinleri, yakıcılar ve yanma odaları vb, bu sistemlerin tasarım aşamalarında HAD analizleri yoluyla sistemin boyut ve performansı belirlenebilecektir. Ayrıca tasarımda değişikliklere gidilerek performans artırıcı ve emisyon azaltıcı yeniliklerin etkileri incelenebilecektir.

### Referanslar

- [1] T. Poinso, D. Veynante, Theoretical and Numerical Combustion, R.T. Edwards Publications (2001).
- [2] N. Peters, Turbulent Combustion, Cambridge University Press, Cambridge, UK, (2000).
- [3] D. Veynante, L. Vervisch, "Turbulent Combustion",

**Makale**

- Von Karman Institute for Fluid Dynamics Lecture Series Notes 2006-2007, Editors: Vervisch, L.; Veynante, D.; van Beeck, J.P.A.J.: (2007).
- [4] R. Borghi, "On the Structure and Morphology of Turbulent Premixed Flames", *Rec. Adv. Aerosp. Sci.* (1985) 117-138.
- [5] N. Peters, "The turbulent burning velocity for small-scale and large-scale turbulence", *J. Fluid Mech.*, 384 (1999) 107-132.
- [6] H. Kobayashi, K. Seyama, H. Hagiwara, Y. Ogami, *Proc. of the Combustion Institute* 30 (2005) 827-834.
- [7] P. Griebel, R. Schären, P. Siewert, R. Bombach, A. Inauen, W. Kreutner, *Proc. of ASME Turbo Expo 2003 Power for Land, Sea, and Air*, June 16-19, 2003, Atlanta, Georgia, USA.
- [8] T. Lachaux, "Etude des effets de la haute pression sur la structure et la dynamique des flammes turbulentes de prémélange pauvre de méthane-air", PhD Thesis, Université d'Orleans, Orleans, France, (2004).
- [9] F. Halter, "Caractérisation des effets de l'ajout d'ajout d'hydrogene et de la haute pression dans les flammes turbulentes de premelange Methane / Air", PhD Thesis, Université d'Orleans, Orleans, France, (2005).
- [10] C. Cohe, "Caractérisation de l'effet de la pression et de l'ajout de CO<sub>2</sub> sur les flammes laminaires et turbulentes de prémélange pauvre méthane-air, PhD Thesis, Université d'Orleans, Orleans", France, (2007).
- [11] Y. Ogami and Hideaki Kobayashi, "Laminar burning velocity of stoichiometric CH<sub>4</sub>/air premixed flames at high-pressure and high-temperature", *JSME International Journal*, 48B-3 (2005) 603-609.
- [12] C.M. Vagelopoulos, F.N. Egolfopoulos, C.K. Law, "Further considerations on the determination of laminar flame speeds with the counter-flow twin-flame technique", *Proc. Combust. Inst.* 25 (1994) 1341-1347.
- [13] M. I. Hassan, K. T. Aung, G. M. Faeth, "Measured and predicted properties of laminar premixed methane/air flames at various pressures", *Combustion and Flame*, 115 (1998) 539-550.
- [14] B. Yilmaz, "Computational Analysis and Experimental Verification of Premixed Combustion of Hydrogen - Methane / Air Mixtures", PhD Thesis, University of Orleans, France, 2009.
- [15] R.J. Kee, F.M. Rupley, J.A. Miller, "CHEMKIN II: A Fortran chemical kinetics package for the analysis of gas-phase chemical kinetics", Report SAND89-8009, Sandia National Laboratories, Livermore, CA, USA, (1989).
- [16] *Fluent 6.2 Users Manual*, Fluent Inc., (2005).
- [17] V. Zimont, W. Polifke, M. Bettelini, W. Weisenstein, "An efficient computational model for premixed turbulent combustion at high Reynolds numbers based on a turbulent flame speed closure", *J. of Gas Turbines Power*, 120 (1998) 526-532.