



# Yakıt Karışımlarında Adyabatik Alev Sıcaklığının Hesaplanması

Mehmet Özgün Korukçu<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup> Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-4761-4304), [ozkorukcu@uludag.edu.tr](mailto:ozkorukcu@uludag.edu.tr)

(1st International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences ICEANS 2022, May 10-13, 2022)

(DOI: 10.31590/ejosat.1097085)

**ATIF/REFERENCE:** Korukçu, M.Ö. (2022). Yakıt Karışımlarında Adyabatik Alev Sıcaklığının Hesaplanması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (36), 21-25.

## Öz

Artan yakıt maliyetleri ve geleneksel yakıtların kullanımından dolayı bazı yakıtların birbirleriyle karıştırılarak daha verimli yanma ve daha yüksek ısı enerjisi elde edilebilir. Bu çalışmada oktan, etil alkol (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) ve metan, hidrojen (CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>) yakıt karışımlarında adyabatik alev sıcaklığını sayısal olarak çok kısa sürede hesaplayabilen bir algoritma geliştirilmiştir. Yakıtların termofiziksel özellikleri CoolProp veri tabanından alınarak MATLAB programında geliştirilen hesaplamalarda kullanılmıştır. Yakıtların karışım oranı, eksik ya da fazla hava kullanılmasının adyabatik alev sıcaklığı üzerine olan etkileri incelenmiştir. Ayrıca yakıt karışımlarının adyabatik alev sıcaklığını mol oranı ve hava eşdeğerlik katsayısı cinsinden veren bağıntılar elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yanma, Kimyasal Denge, Adyabatik Alev Sıcaklığı, Yakıt Karışımı

## Calculation of Adiabatic Flame Temperature in Fuel Blends

### Abstract

Due to increasing fuel prices and usage of conventional fuels, more efficient combustion and higher heat energy by blending some fuels can be obtained. In this study rapid calculation algorithm for calculating adiabatic flame temperature of octane, ethyl alcohol (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) and methane, hydrogen (CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>) fuel blends. Thermophysical properties of fuels are taken from CoolProp database and used for calculations in MATLAB program. Effects of blending ratio and air equivalence ratio on adiabatic flame temperature are investigated. Moreover, relations of adiabatic flame temperature of fuel blends are derived with respect to blending ratio and air equivalence ratio.

**Keywords:** Combustion, Chemical Equilibrium, Adiabatic Flame Temperature, Fuel Blend.

\* Sorumlu Yazar: [ozkorukcu@uludag.edu.tr](mailto:ozkorukcu@uludag.edu.tr)

## 1. Giriş

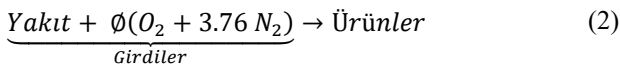
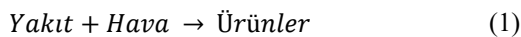
Günümüzde kullandığımız enerjinin çoğu hidrokarbon temelli yakıtların sıvı, gaz ya da katı biçimde yakılmasından elde edilmektedir. Yanma uygulamaları enerji üretim santrallerinde, endüstride üretimde, evsel ve endüstriyel ısıtma sistemlerinde, kirlenici emisyon ve yanma işlemlerinin aktif kontrolünde kullanılmaktadır (Kuo, 2005). Ön karışimli yanma tepkimelerinde genellikle ana etken eşdeğerlik oranıdır ( $\phi$ ). Fazla hava kullanılması durumunda  $\phi > 1$ , stokiyometrik hava kullanılması durumunda  $\phi = 1$  ve az hava olması durumunda ise  $\phi < 1$  olmaktadır (Poinsoot & Veynante, 2005). Yanma işleminde bir başka önemli parametre ise adyabatik alev sıcaklığıdır (AAS). Adyabatik alev sıcaklığı adyabatik yanma işleminde herhangi bir iş, kinetik ve potansiyel enerji değişiminin olmadığı durumda ürünlerin sıcaklığıdır. Stokiyometrik hava kullanıldığında en yüksek Adyabatik alev sıcaklığı değerine ulaşılır. Adyabatik alev sıcaklığı değerinin yüksek olması yanma verimini artırırken yanma sonucu elde edilen emisyonlarda artışa ya da is birikimine neden olabilir. Bu nedenle adyabatik alev sıcaklığını kontrol etmek için eşdeğerlik oranı değiştirilmektedir (Wylene, C Borgnakke\_ Richard Edwin Sonntag, n.d.).

Adyabatik alev sıcaklığı, yanma tepkimesinde açığa çıkan ısı enerjisini hesaplamak için birkaç program bulunmaktadır. Reynolds eleman potansiyel yöntemi kullanarak tepkime denkleştirme için STANJAN programını geliştirmiştir (Reynolds, 1986). Gordon ve McBride kompleks kimyasal denge kompozisyonları ve uygulamaları için (CAE) bir program kullanmışlardır (Gordon & McBride, 1994). Olikara yanma ürünlerinin sıcaklığa bağlı olarak gaz sabiti, entalpisi, iç enerjisi ve kısmi türevlerini hesaplayabilen bir program sunmuştur (Olikara & Borman, 1975). Eriksson yanma tepkimesi için girenler ve ürünlerin termofiziksel özelliklerinin bulunabileceği MATLAB tabanlı bir grafik ara yüzü programı geliştirmiştir (Eriksson, 2004). GASEQ ise adyabatik alev sıcaklığı, ürünlerin ve girenlerin katsayıları ile şok hesaplamalarının yapılabileceği başka bir yazılımdır (Morley, n.d.).

Bu çalışmada ise MATLAB programı ve CoolProp (Bell, 2013) veri tabanı kullanılarak oktan, etil alkol ( $C_8H_{18}$ ,  $C_2H_5OH$ ) ve metan, hidrojen ( $CH_4$ ,  $H_2$ ) yakıt karışımlarının adyabatik alev sıcaklığı değerlerini hesaplayabilen bir program geliştirilmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

Bir yanma işleminde yakıt oksitlenir ve sistemden çevreye ısı geçişi olur. Oksitleyici olarak hava kullanılır. Yanma tepkimesinin genel yapısı Eşitlik 1'de verilmiştir. Eşitlik 2'de gösterildiği üzere yanma tepkimesine giren maddeler girdiler, yanma sonu ürünleri ise çıkanlar olarak adlandırılır (Wylene, C Borgnakke\_ Richard Edwin Sonntag, n.d.).



Sürekli rejim koşullarında Termodinamiğin I. Kanunu Eşitlik 3'deki gibi yazılabilir.

$$Q - W = \Delta H \quad (3)$$

Sistemde herhangi bir mekanik iş ( $W=0$ ) yapılmadığı sürece yanma tepkimesinden çıkan enerji ( $Q_{çıkan}$ ), girdiler ile ürünler arasındaki toplam entalpi farkına eşit olacaktır.

Eşitlik 4'de verilen  $N$  mol sayısı,  $\bar{h}_{for}^\circ$  oluşum entalpisi,  $\bar{h}_T$  bileşenin belirli bir sıcaklıktaki entalpisi ve  $\bar{h}_{ref}^\circ$  ise bileşenin 1 atm, basınç 25 °C sıcaklıktaki referans entalpisini göstermektedir.

$$Q_{çıkan} = \frac{\sum N_G (\bar{h}_{for}^\circ + \bar{h}_T - \bar{h}_{ref}^\circ)_G}{\text{Yakıtın birim kmol başına giren enerji}} - \frac{\sum N_U (\bar{h}_{for}^\circ + \bar{h}_T - \bar{h}_{ref}^\circ)_U}{\text{Yakıttan birim kmol başına çıkan enerji}} \quad (4)$$

Adyabatik yanma işleminde (Eşitlik 5) girdilerin ve ürünlerin entalpileri eşit olur (Eşitlik 6).

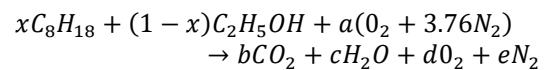
$$Q = W = 0 \quad (5)$$

$$H_G = H_U \quad (6)$$

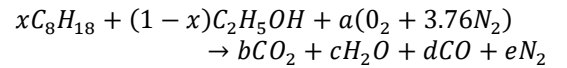
Eşitlik 7 girdiler ile ürünler arasındaki enerji dengesini göstermektedir. Eşitlik 7 kullanılarak ürünlerin entalpisi ( $\bar{h}_{T,p}$ ) ve adyabatik alev sıcaklığı ( $T_{af}$ ) bulunabilir.

$$\sum N_G (\bar{h}_{for}^\circ + \bar{h}_T - \bar{h}_{ref}^\circ)_G = \sum N_U (\bar{h}_{for}^\circ + \bar{h}_T - \bar{h}_{ref}^\circ)_U \quad (7)$$

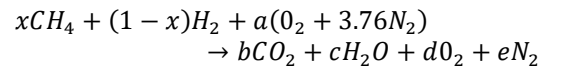
Oktan, etil alkol ( $C_8H_{18}$ ,  $C_2H_5OH$ ) karışımının fazla hava ile yakılması aşağıdaki gibi modellenmiştir.



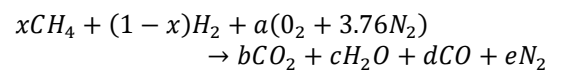
Oktan, etil alkol ( $C_8H_{18}$ ,  $C_2H_5OH$ ) karışımının az hava ile yakılması aşağıdaki gibi modellenmiştir.



Metan, hidrojen ( $CH_4$ ,  $H_2$ ) karışımının fazla hava ile yakılması aşağıdaki gibi modellenmiştir.



Metan, hidrojen ( $CH_4$ ,  $H_2$ ) karışımının az hava ile yakılması aşağıdaki gibi modellenmiştir.

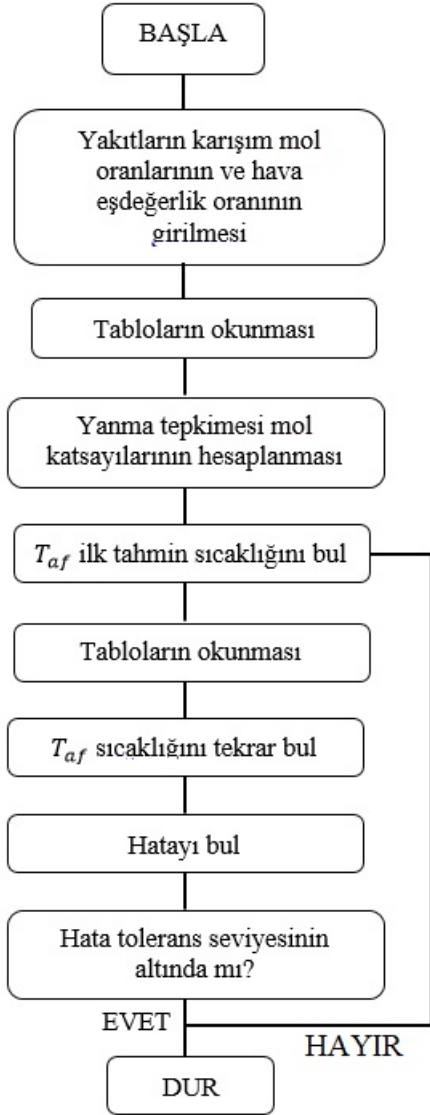


Çalışmada aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- Hava ve ürünler ideal gazdır.
- Yanma ve çevre basıncı 1 atm değerindedir.

- Yakıt yanma odasına 25°C sıcaklıkta girmektedir.
- Çevre sıcaklığı 25°C değerindedir.

Hesaplama programında kullanılan adımları içeren akış şeması Şekil 1’de görülebilmektedir. Yakıt karışımının mol oranı yüzdesel olarak seçildikten sonra, hava eşdeğerlik oranı girilmekte, ardından yanma tepkimesine giren ve ürünlerin termofiziksel özellikleri tablolardan okunması, girdiler ve ürünlerin mol katsayılarının hesaplanması, ilk tahmini adyabatik alev sıcaklığının ( $T_{af}$ ) hesaplanması, tabloların tekrar okunması ve adyabatik alev sıcaklığının tekrar bulunması, iki adyabatik alev sıcaklığı arasındaki hata ( $\Delta\varepsilon = 1 \times 10^{-15}$ ) tolerans değerinin altında ise program durmakta, bulunan hata tolerans değerinin üstünde ise ilk tahmini yapılan adyabatik alev sıcaklığı değiştirilmekte ve hata tolerans değerinin altına gelene kadar program devam etmektedir.



Şekil 1. Programın akış şeması.

### 3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

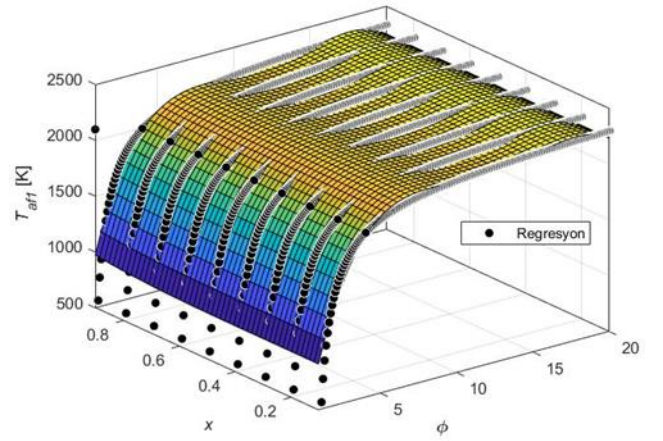
Oktan, etil alkol ( $C_8H_{18}$ ,  $C_2H_5OH$ ) karışımının fazla hava ile yakılması ( $\phi > 1$ ) durumunda elde edilen adyabatik alev

sıcaklığının ( $T_{af1}$ ), hava eşdeğerlik oranı ( $\phi$ ) ve Oktanın ( $C_8H_{18}$ ) karışım mol oranına ( $x$ ) göre değişimi Şekil 2’de verilmiştir.

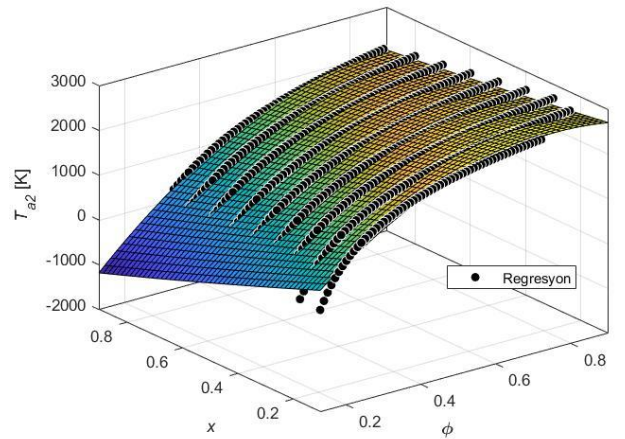
Oktan, etil alkol ( $C_8H_{18}$ ,  $C_2H_5OH$ ) karışımının az hava ile yakılması ( $\phi < 1$ ) durumunda elde edilen adyabatik alev sıcaklığının ( $T_{af2}$ ), hava eşdeğerlik oranı ( $\phi$ ) ve Oktanın ( $C_8H_{18}$ ) karışım mol oranına ( $x$ ) göre değişimi Şekil 3’de verilmiştir.

Metan, hidrojen ( $CH_4$ ,  $H_2$ ) karışımının fazla hava ile yakılması ( $\phi > 1$ ) durumunda elde edilen adyabatik alev sıcaklığının ( $T_{af3}$ ), hava eşdeğerlik oranı ( $\phi$ ) ve Oktanın ( $C_8H_{18}$ ) karışım mol oranına ( $x$ ) göre değişimi Şekil 4’de verilmiştir.

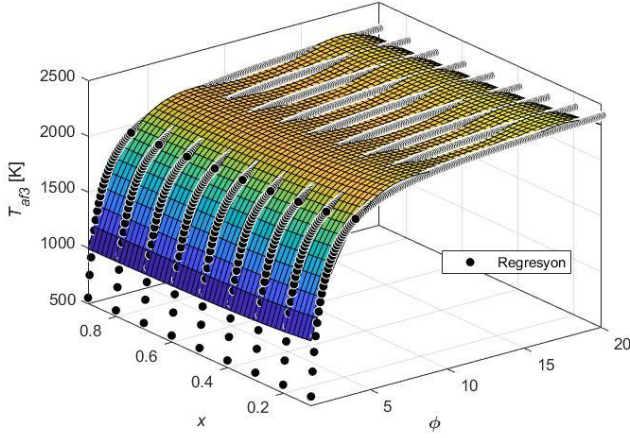
Metan, hidrojen ( $CH_4$ ,  $H_2$ ) karışımının az hava ile yakılması ( $\phi < 1$ ) durumunda elde edilen adyabatik alev sıcaklığının ( $T_{af4}$ ), hava eşdeğerlik oranı ( $\phi$ ) ve Oktanın ( $C_8H_{18}$ ) karışım mol oranına ( $x$ ) göre değişimi Şekil 5’de verilmiştir.



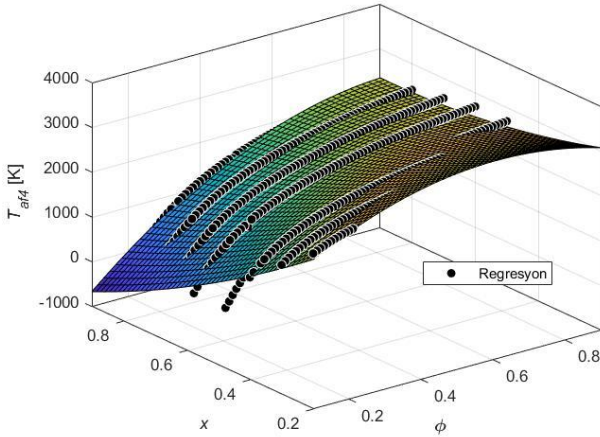
Şekil 2. Oktan, etil alkol ( $C_8H_{18}$ ,  $C_2H_5OH$ ) karışımının fazla hava ile yakılması.



Şekil 3. Oktan, etil alkol ( $C_8H_{18}$ ,  $C_2H_5OH$ ) karışımının az hava ile yakılması.



Şekil 4. Metan, hidrojen (CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>) karışımının fazla hava ile yakılması.



Şekil 5. Metan, hidrojen (CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>) karışımının az hava ile yakılması.

Oktan, etil alkol (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) karışımının fazla hava ile yakılması ( $\phi > 1$ ) durumunda adyabatik alev sıcaklığını ( $T_{af1}$ ), hava eşdeğerlik oranı ( $\phi$ ) ve Oktanın (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>) karışım mol oranına ( $x$ ) göre değişimini veren bağıntı Eşitlik 8'de sunulmuştur.

$$\begin{aligned}
 T_{af1} = & 368.8 + 683.4x + 1.311\phi \\
 & -91.53x^2 + 13.14x\phi - 15.48\phi^2 \\
 & +5.19x^3 + 0.4448x^2\phi - 17.36x\phi^2 \\
 & -52.58\phi^3 - 0.1044x^4 - 0.06719x^3\phi \\
 & + 1.818x^2\phi^2 - 19.41x\phi^3 + 186.1\phi^4
 \end{aligned} \quad (8)$$

$$(r_1^2 = 0.9448)$$

Oktan, etil alkol (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) karışımının az hava ile yakılması ( $\phi < 1$ ) durumunda adyabatik alev sıcaklığını

( $T_{af2}$ ), hava eşdeğerlik oranı ( $\phi$ ) ve Oktanın (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>) karışım mol oranına ( $x$ ) göre değişimini veren bağıntı Eşitlik 9'da sunulmuştur.

$$\begin{aligned}
 T_{af2} = & 39.13 + 7856x - 2806\phi \\
 & -5314x^2 + 1996x\phi + 172.2\phi^2
 \end{aligned} \quad (9)$$

$$(r_2^2 = 0.9868)$$

Metan, hidrojen (CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>) karışımının fazla hava ile yakılması ( $\phi > 1$ ) durumunda adyabatik alev sıcaklığını ( $T_{af3}$ ), hava eşdeğerlik oranı ( $\phi$ ) ve Oktanın (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>) karışım mol oranına ( $x$ ) göre değişimini veren bağıntı Eşitlik 10'da sunulmuştur.

$$\begin{aligned}
 T_{af3} = & 458.3 + 704.3x - 457.7\phi \\
 & -94.03x^2 - 30.68x\phi + 826.9\phi^2 \\
 & +5.337x^3 + 2.217x^2\phi + 10.34x\phi^2 \\
 & -754.4\phi^3 - 0.1079x^4 - 0.05133x^3\phi \\
 & -0.3116x^2\phi^2 - 1.526x\phi^3 + 271.5\phi^4
 \end{aligned} \quad (10)$$

$$(r_3^2 = 0.9529)$$

Metan, hidrojen (CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>) karışımının az hava ile yakılması ( $\phi < 1$ ) durumunda adyabatik alev sıcaklığını (4), hava eşdeğerlik oranı ( $\phi$ ) ve Oktanın (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>) karışım mol oranına ( $x$ ) göre değişimini veren bağıntı Eşitlik 11'de sunulmuştur.

$$\begin{aligned}
 T_{af4} = & 3108 + 4327x - 6529\phi \\
 & -4221x^2 + 4073x\phi + 1658\phi^2
 \end{aligned} \quad (11)$$

$$(r_4^2 = 0.9582)$$

Oktan, etil alkol (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) karışımının fazla hava ile yakılması ( $\phi > 1$ ) durumunda en yüksek adyabatik alev sıcaklığı ( $T_{af1max} = 2328.2 K$ , hava eşdeğerlik oranının  $\phi = 20$ , oktanın mol karışım oranının  $x = 0.9$  olduğu değerlerde elde edilmiştir. Oktanın mol karışım oranı ( $x$ ) azaldıkça elde edilebilecek en yüksek adyabatik alev sıcaklığı ( $T_{af1max}$ ) azalmaktadır. Hava eşdeğerlik oranının ( $\phi$ ) artması en yüksek adyabatik alev sıcaklığı ( $T_{af1max}$ ) arttırmaktadır.

Oktan, etil alkol (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) karışımının az hava ile yakılması ( $\phi < 1$ ) durumunda en yüksek adyabatik alev sıcaklığı  $T_{af2max} = 2755.6 K$ , hava eşdeğerlik oranının  $\phi = 0.87$ , oktanın mol karışım oranının  $x = 0.1$  olduğu değerlerde elde edilmiştir. Oktanın mol karışım oranı ( $x$ ) azaldıkça elde edilebilecek en yüksek adyabatik alev sıcaklığı ( $T_{af2max}$ ) artmaktadır. Hava eşdeğerlik oranının ( $\phi$ ) azalması en yüksek adyabatik alev sıcaklığını ( $T_{af2max}$ ) azaltmaktadır.

Metan, hidrojen (CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>) karışımının fazla hava ile yakılması ( $\phi > 1$ ) durumunda en yüksek adyabatik alev sıcaklığı  $T_{af3max} = 2393.9 K$ , hava eşdeğerlik oranının  $\phi = 20$ , metanın mol karışım oranının  $x = 0.1$  olduğu değerlerde elde edilmiştir. Metanın mol karışım oranı ( $x$ ) azaldıkça elde edilebilecek en yüksek adyabatik alev sıcaklığı ( $T_{af3max}$ ) artmaktadır. Hava eşdeğerlik oranının ( $\phi$ ) artması en yüksek adyabatik alev sıcaklığı ( $T_{af1max}$ ) arttırmaktadır.

Metan, hidrojen (CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>) karışımının az hava ile yakılması (0.1 <  $\phi$  < 1) durumunda en yüksek adyabatik alev sıcaklığı  $T_{af4max} = 2788.1 K$ , hava eşdeğerlik oranının  $\phi = 0.63$ , metanın mol karışım oranının  $x = 0.4$  olduğu değerlerde elde edilmiştir. Hava eşdeğerlik oranının ( $\phi$ ) artması en yüksek adyabatik alev sıcaklığı ( $T_{af4max}$ ) azalmaktadır. Metanın mol karışım oranı ( $x$ ) azaldıkça elde edilebilecek en yüksek adyabatik alev sıcaklığı ( $T_{af4max}$ ) artmaktadır. Hava eşdeğerlik oranının  $\phi < 0.1$  olması durumunda adyabatik alev sıcaklığı değerleri hesaplanamamıştır.

#### 4. Sonuç

Çalışmada oktan, etil alkol (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) karışımı ve metan, hidrojen (CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>) karışımlarının adyabatik alev sıcaklık değerleri ( $T_{af}$ ), değişik fazla hava ( $\phi > 1$ ), az hava ( $\phi < 1$ ), oktanın (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>) ve metanın (CH<sub>4</sub>) mol karışım oranı ( $x$ ) değerlerine göre MATLAB programı ve CoolProp veritabanı kullanılarak hesaplanmıştır. Oktan, etil alkol (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) karışımının fazla hava ile yakılması ( $\phi > 1$ ) durumunda en yüksek adyabatik alev sıcaklığı  $T_{af1max} = 2328.2 K$ , az hava ile yakılması ( $\phi < 1$ ) durumunda ise en yüksek adyabatik alev sıcaklığı  $T_{af2max} = 2755.6 K$  elde edilmiştir. Metan, hidrojen (CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>) karışımının fazla hava ile yakılması ( $\phi > 1$ ) durumunda en yüksek adyabatik alev sıcaklığı  $T_{af3max} = 2393.9 K$ , az hava ile yakılması (0.1 <  $\phi$  < 1) durumunda ise en yüksek adyabatik alev sıcaklığı  $T_{af4max} = 2788.1 K$  elde edilmiştir.

Yakıt karışımları için tam yanma ( $\phi = 1$ ) durumunda adyabatik alev sıcaklığı ( $T_{af}$ ) değerleri hesaplanamamıştır.

Adyabatik alev sıcaklığının ( $T_{af}$ ) hava eşdeğerlik katsayısı ( $\phi$ ) ve yakıt karışımı mol oranına ( $x$ ) bağlı olarak bağıntılar elde edilmiştir. Oktan, etil alkol (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) karışımının fazla hava ile yakılması ( $\phi > 1$ ) durumunda elde edilen bağıntının regresyon katsayısı  $r_1^2 = 0.9448$ , oktan, etil alkol (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) karışımının az hava ile yakılması ( $\phi < 1$ ) durumunda elde edilen bağıntının regresyon katsayısı  $r_2^2 = 0.9868$  olarak bulunmuştur. Metan, hidrojen (CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>) karışımının fazla hava ile yakılması ( $\phi > 1$ ) durumunda elde edilen bağıntının regresyon katsayısı  $r_3^2 = 0.9529$ , metan, hidrojen (CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>) karışımının az hava ile yakılması ( $\phi < 1$ ) durumunda elde edilen bağıntının regresyon katsayısı ise  $r_4^2 = 0.9582$  olarak bulunmuştur.

Elde edilen bağıntıların regresyon katsayıları oldukça yüksektir ve çalışmada belirtilen koşullar çerçevesinde geçerlidir. Elde edilen bağıntılar yardımıyla ilgili yakıt karışımının istenen koşuldaki adyabatik alev sıcaklığı ( $T_{af}$ ) kolaylıkla hesaplanabilir.

Her iki yakıt karışımı için de en yüksek adyabatik alev sıcaklığı değeri ( $T_{af1max}$ ) az hava ile ( $\phi < 1$ ) yanma durumunda elde edilmiştir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar içten yanmalı motorları, yanma odaları, gaz türbinleri ve endüstriyel yanma işlemlerinde kullanılabilir.

İlerleyen zamanda yakıt karışımı kütüphanesi geliştirilip kullanıcı ara yüzü (GUI) tasarlanarak yazılımın ticari duruma getirilmesi planlanmaktadır.

#### Kaynakça

- Bell, I. (2013). *CoolProp: An open-source thermophysical property library*. 2013 <http://coolprop.sf.net> (accessed ). 2013.
- Eriksson, L. (2004). CHEPP - A chemical equilibrium program package for Matlab. *SAE Technical Papers*, 113, 730–741. <https://doi.org/10.4271/2004-01-1460>
- Gordon, S., & McBride, B. J. (1994). *Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications I. Analysis* (p. 58). <https://doi.org/NASA-RP-1311>
- Kuo, K. K. (2005). *Principles of Combustion*. John Wiley&Sons, Inc.
- Morley, C. (n.d.). *Gaseq chemical equilibrium program*, available at <http://www.gaseq.co.uk/>.
- Olikara, C., & Borman, G. L. (1975). A computer program for calculating properties of equilibrium combustion products with some applications to I.C. engines. *SAE Technical Papers*, 7191. <https://doi.org/10.4271/750468>
- Poinsot, T., & Veynante, D. (2005). *Theoretical and Numerical Combustion 2nd Edition*. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53).
- Reynolds, W. C. (1986). *the Element Potential Metho D for Chemical Equilibrium Analysis: Implementation in the Interactive Program .STANJAN*.
- Wylen, C Borgnakke\_ Richard Edwin Sonntag, G. J. Van. (2009). *Fundamentals of Thermodynamics*. John Wiley&Sons, Inc.