

## Kaya Gazı Karışımlarının Yanma ve Emisyon Davranışlarının Laboratuvar Ölçekli Bir Yakıcıda Sayısal Olarak İncelenmesi

Harun YILMAZ<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup>Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Yalnızbağ Yerleşkesi, 24100 – Türkiye

Geliş / Received: 4.09.2019, Kabul / Accepted: 15.12.2019

### Öz

Bu çalışmada, kaya gazı karışımlarının yanma ve emisyon davranışlarına yakıt bileşimi ve swirl sayısının etkileri laboratuvar ölçekli bir yakıcıda sayısal olarak incelenmiştir. Bu maksatla, deneysel olarak test edilmiş ön karışimli bir yakıcının iki boyutlu bir modeli oluşturulmuştur. Bu modelde metan/hava yanması simüle edilmiş ve elde edilen sonuçlar, oluşturulan modelin doğrulanması için deneysel veriler ile kıyaslanmıştır. Sayısal çalışmalar hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı, ANSYS/Fluent kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test edilen kaya gazı karışımları; %86 CH<sub>4</sub>- %14 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, %81 CH<sub>4</sub>- %10 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>- %9 N<sub>2</sub> ve %58 CH<sub>4</sub>- %20 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>- %12 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>- %10 CO<sub>2</sub>'dir. İlgili karışımların yanma ve emisyon davranışları, yanma odası boyunca sıcaklık ve tür (CO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub>) dağılımları incelenerek belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar; %86 CH<sub>4</sub>- %14 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> karışımının yanma ve emisyon performansı bakımından avantajlı olduğunu; NO<sub>x</sub> emisyonunun gaz kompozisyonuna ve swirl sayısına son derece bağımlı olduğunu ve eksenel sıcaklık değerleri ve reaksiyon hızının swirl sayısı ile doğru orantılı olduğunu göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kaya gazı, yanma, emisyon, swirl sayısı.

### Numerical Investigation of Combustion and Emission Behavior of Shale Gas Mixtures in a Laboratory Scale Combustor

#### Abstract

In this study, effects of gas composition and swirl number on combustion and emission behavior of shale gas mixtures were numerically investigated in a laboratory scale combustor. For this purpose, a two-dimensional model of an experimentally tested premixed combustor was formed. In this model, methane/air combustion was simulated, and achieved results were compared with experimental data to validate applicability of the model. Numerical studies were performed using computational fluid dynamics software, ANSYS/Fluent. Tested shale gas mixtures are; 86% CH<sub>4</sub> - 14% C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, 81% CH<sub>4</sub> - 10% C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> - 9% N<sub>2</sub> and 58% CH<sub>4</sub> - 20% C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> - 12% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> - 10% CO<sub>2</sub>. Combustion and emission behavior of the respective mixtures were determined by examining temperature and species (CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub>) distributions throughout the combustion chamber. Results of this study showed that %86 CH<sub>4</sub>- %14 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> mixture is favorable in terms of combustion and emission performance; emissions of NO<sub>x</sub> are highly dependent on gas composition and swirl number, and axial temperature values and reaction rate are directly proportional to swirl number.

**Keywords:** Shale gas, combustion, emission, swirl number.

## 1. Giriş

Kaya gazı, organik madde içeriği yüksek kil ile kuvars ve kalsit minerallerinden oluşan tortul kayacın gözeneklerine hapsolmuş gaz olarak tanımlanabilir. Petrol ve doğalgazdan farkı; bahsi geçen gazların ana kayayı terk etmesi, kaya gazının ise ana kaya içerisinde hapsolmesidir (Şengüller, 2012; İlbaş, 2017). Kaya gazı, esasen metan gazından oluşur ve içeriğinde etan ve propan gazları gibi yüksek karbon sayılı hidrokarbonlar, CO<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub> gibi inert bileşenler bulunabilir (Etiopie et al., 2013; Speight, 2013). Kimyasal kompozisyon bakımından kaya gazı ile doğal gaz arasında pek bir fark yoktur. Esas fark, gazların içerisine hapsediği rezervuarların fiziksel ve jeolojik özelliklerindedir. Kaya gazı rezervuarları, doğal gaz ve petrol şeyli (tortu) içerisinde kendiliğinden oluştuğundan ve ticari ölçekte yakıt akışı için yeterli geçirgenliğe sahip olmadığından geleneksel olmayan yakıt kaynakları olarak sınıflandırılırlar (Skea, 2015). Ancak, hidrolik çatlatma ve yatay sondaj gibi kaya gazı üretim stratejilerindeki gelişmeler kaya gazına olan ilgiyi ve neticede kaya gazı üretimini artırmıştır (Vengosh et al., 2013; Zeng et al., 2016).

Türkiye’de bazı bölgelerde (Güneydoğu Anadolu ve Trakya Bölgeleri) kaya gazı rezervleri tespit edilmiştir. Gaz rezervinin yaklaşık olarak 13 trilyon m<sup>3</sup> olduğu tahmin edilmektedir. Bu gazın tamamının kurtarılamayacağı ve ABD’deki kurtarma oranları dikkate alındığında 1.8 trilyon m<sup>3</sup> kaya gazı üretileceği öngörülmektedir. Bu değer, ülkemizin uzun bir süre boyunca doğalgaz ihtiyacını karşılayacak seviyedir. Konvansiyonel doğal gazın stratejik önemi, dünyada yarattığı krizler ve enerjide dışa bağımlı bir ülke olmamız gerçekleri kaya gazının ülkemiz açısından önemini daha da

artırmaktadır. Ülkemizde, TPAO ve BP ortaklığında ilk sondaj çalışmaları başlamıştır. Üretimin, önümüzdeki yıllarda gerçekleşmesi planlanmaktadır (Şengüller, 2012; İlbaş, 2017). Bu bağlamda, üretilen kaya gazının etkili bir şekilde işlenmesi ve verimli bir yanma işlemi için yakıt özelliklerinin (kimyasal ve fiziksel-ısıtma değeri, Wobbe indeksi, adyabatik alev sıcaklığı, ateşleme limitleri, ateşleme gecikme süreleri, laminer yanma hızları vb.) ve alev kararlılık karakteristiklerinin bilinmesi son derece önemlidir (Vargas, et al., 2016). Bu durum, kaya gazlarının mevcut doğalgaz yakıcılarında kullanımları için herhangi bir modifikasyon gerektirip/gerektirmemesinin anlaşılması açısından ticari önem arz etmektedir.

Literatürde kaya gazı karışımlarının yanma ve emisyon karakteristikleri üzerine çok az çalışma yer almaktadır. Vargas et al., üç farklı kaya gazı karışımının yanma özelliklerini incelemişlerdir. Bu maksatla, inceledikleri kaya gazı karışımlarının laminer yanma hızlarını hem deneysel olarak ölçmüş hem de nümerik olarak hesaplamışlardır. Ayrıca, ilgili karışımların alev kalınlığı, alt ve üst ısıl değerleri, Wobbe indeksi, ateşleme limitleri, çığlenme noktası, adyabatik alev sıcaklığı gibi özelliklerini analitik olarak belirlemişlerdir. Elde edilen sonuçlar, inert içermeyen kaya gazı karışımının en iyi Wobbe indekse sahip olduğunu, kaya gazı içeriğindeki etan ve inert bileşenlerin alev kalınlığını azalttığını ve bu durumun kaya gazlarını hidro-dinamik kararsızlıklara karşı daha duyarlı hale getirdiğini, kaya gazı karışımlarının yanma özelliklerindeki farklılıkların metan beslemeli yakıcılarda bu gazların kullanımı açısından bazı problemler oluşturabileceğini göstermiştir (Vargas et al., 2016). Ozturk, ABD’de farklı bölgelerden çıkarılan kaya gazlarının yanma ve emisyon özelliklerine

## Kaya Gazı Karışımlarının Yanma ve Emisyon Davranışlarının Laboratuvar Ölçekli Bir Yakıcıda Sayısal Olarak İncelenmesi

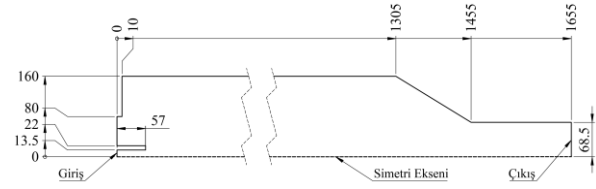
eşdeğerlik oranı; duvar, oksitleyici ve yakıt giriş sıcaklıklarının etkilerini sayısal olarak incelemiştir. Sonuçlar, maksimum NO salınımının gaz bileşimine bağlı olarak belirli bir eşdeğerlik oranı değerinde oluştuğunu, eşdeğerlik oranı arttıkça CO emisyonlarının yükseldiğini, giriş sıcaklığı arttıkça NO emisyonlarının arttığını ve CO emisyonlarının azaldığını göstermiştir. Son olarak, duvar sıcaklığı arttıkça NO ve CO emisyonlarının yükseldiği belirtilmiştir (Ozturk, 2019).

Bu çalışmada, kaya gazı karışımlarının yanma ve emisyon davranışlarına yakıt bileşimi ve swirl sayısının etkileri laboratuvar ölçekli ön karışimli bir yakıcıda, ANSYS/Fluent programı kullanılarak sayısal olarak incelenecektir. Bu maksatla ilgili yakıcının iki boyutlu modelleri oluşturulacak ve bu modellerde %86 CH<sub>4</sub>- %14 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, %81 CH<sub>4</sub>- %10 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>- %9 N<sub>2</sub> ve %58 CH<sub>4</sub>- %20 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>- %12 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>- %10 CO<sub>2</sub> karışımları, benzer fiziksel ve sınır şartlar altında yakılacaktır. Böylece yakıt bileşiminin etkileri, yanma odası boyunca sıcaklık ve tür dağılımları incelenerek belirlenmiş olacaktır. Bu inceleme sonucunda, yanma ve emisyon davranışı bakımından en yüksek performansa sahip kaya gazı karışımı belirlenecek ve ilgili karışım, swirl sayısı (SS=0.2, 0.6, 1.0 ve 1.4) etkilerini incelemek için kullanılacaktır. Sonuç olarak, ilgili yakıcıda en yüksek güç çıktısı ve en düşük kirletici emisyon oluşturan yakıt karışımı ve swirl sayısı belirlenmiş olacaktır. Mevcut çalışma, kaya gazlarının yanma ve emisyon özelliklerinin belirlenmesi ve bu husustaki bilgi birikiminin artırılması yönleri ile literatüre katkı sağlayacaktır.

## 2. Fiziksel ve Matematiksel Modeller

### 2.1. Fiziksel model

Bu çalışmada, deneysel olarak test edilmiş laboratuvar ölçekli bir yakıcının iki boyutlu sayısal modelleri ANSYS/DesignModeler programı kullanılarak oluşturulmuştur. Paslanmaz çelikten imal edilmiş olan yanma odası 1655 mm uzunluğa, 330 mm dış çapa ve 320 mm iç çapa sahiptir (cidar kalınlığı 5 mm). Şekil 1'de yanma odasının şematik görüntüsü sunulmuştur. Hesaplama zamanını kısaltmak için, yanma odası merkezi boyunca simetri (eksenel-simetri) koşulu uygulanabileceğinden, yanma odasının sadece üst yarısı modellenmiştir.



Şekil 1. Yanma odası geometrisi (tüm ölçüler milimetre cinsindedir).

### 2.2. Matematiksel Model

Matematiksel modelleme, süreklilik, momentum, enerji ve tür denklemlerinin kararlı hal (sürekli), iki boyutlu ve eksen-simetrik formları üzerine kuruludur. Eksen simetrik akış için taşınım denkleminin genel formülü, silindirik koordinatlarda, aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \text{div}(\rho v\Phi - \Gamma \text{grad}\Phi) = S_{\Phi}$$

(Denklem 2.1)

Bu denklemde  $\Phi$ , bağımlı değişkeni;  $\Gamma$ , değişken  $\Phi$  için taşınım katsayısını;  $S_{\Phi}$  ise  $\Phi$  için taşınım denkleminin kaynak terimidir (İlbas et al., 2005). Korunum denklemleri sonlu hacim yöntemi ile çözülmüş ve basınç-hız eşleşmesi için Coupled algoritması kullanılmıştır. Türbülans-yanma kimyası etkileşimi, Eddy Dissipation (türbülanslı karışma işleminin reaksiyon hızını kısıtladığı

varsayılarak) yanma modeli kullanılarak modellenmiştir (Fluent, 2009). Bu modelde, tür  $i$ 'nin reaksiyon  $R_{i,r}$  vasıtasıyla net üretim hızı aşağıdaki iki denklem ile hesaplanır.

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min_{\mathcal{R}} \left( \frac{Y_{\mathcal{R}}}{v'_{\mathcal{R},i} M_{w,\mathcal{R}}} \right) \quad \text{Denklem 2.2)}$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_P Y_P}{\sum_j^N v'_{j,r} M_{w,j}} \quad \text{(Denklem 2.3)}$$

Bu denklemlerde  $v'_{i,r}$ , reaksiyon  $r$ 'deki tür  $i$ 'nin stokiyometrik katsayısını;  $N$ , sistemdeki toplam tür sayısını;  $Y_P$ , herhangi bir ürünün kütle kesrini;  $Y_{\mathcal{R}}$ , reaksiyona giren belirli bir türün kütle kesrini ( $\mathcal{R}$ );  $M_{w,i}$ , tür  $i$ 'nin moleküler ağırlığını ifade eder. A (0.4) ve B (0.5) ise deneysel sabitlerdir (Fluent, 2009).

Test edilen tüm gaz karışımları için global tek adımlı reaksiyon mekanizmaları tercih edilmiştir. Sayısal çalışmalar sırasında viskoz ve basınç kuvvetleri tarafından herhangi bir iş yapılmadığı, kütle konsantrasyon farklarından dolayı enerji akışı olmadığı varsayılmış ve yakıcı duvarında kaymama şartı uygulanmıştır.

Girdaplı akışlarda daha doğru sonuçlar verdiği için RNG  $k$ - $\varepsilon$  türbülans modeli tercih edilmiştir (Gaikwad et al., 2017). RNG  $k$ - $\varepsilon$  türbülans modeli için taşınım denklemleri şu şekildedir:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad \text{(Denklem 2.4)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad \text{(Denklem 2.5)}$$

Bu denklemlerde  $k$ , türbülans kinetik enerjisi;  $\varepsilon$ , enerji yitim hızı;  $G_k$ , ortalama hız gradyenlerinden dolayı türbülanslı kinetik enerji oluşumu;  $G_b$ , kaldırma kuvvetinden dolayı türbülanslı kinetik enerji oluşumu;  $Y_M$ , sıkıştırılabilir akıştaki dalgalı genleşmenin toplam enerji yitimine katkısı;  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  ve  $C_{3\varepsilon}$ , sabit;  $\alpha_\varepsilon$  ve  $\alpha_k$ , türbülanslı Prandtl sayıları;  $S_\varepsilon$  ve  $S_k$ , kaynak terimlerdir (Fluent, 2009). RNG  $k$ - $\varepsilon$  türbülans modeli,  $\varepsilon$  denkleminde ek bir terim içerir;

$$R_\varepsilon = \frac{c_\mu \rho \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0}\right) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad \text{(Denklem 2.6)}$$

Denklemden;  $\eta \equiv s_k / \varepsilon$ ,  $\eta_0 = 4.38$  ve  $\beta = 0.012$ 'dir (Fluent, 2009).

Son olarak, hesaplama zamanından tasarruf etmek ve yanma işlemlerinde oldukça doğru sonuçlar verdiği için (Fluent, 2009) P-1 radyasyon modeli kullanılmıştır.

Bir yanma işleminde  $\text{NO}_x$  oluşumu, üç farklı mekanizma tarafından kontrol edilir. Bunlar; termal (Zeldovich), ani (Fenimore) ve yakıt kaynaklı  $\text{NO}_x$  oluşum mekanizmalarıdır (Glassman and Yetter, 2014; Turns, 1996). Bu çalışmada incelenen tüm gaz karışımları için termal ve ani  $\text{NO}_x$  oluşum mekanizmaları göz önünde bulundurulmuştur.  $\text{NO}_x$  oluşum mekanizmaları ve kullanılan  $\text{NO}_x$  modelleri detaylı bir şekilde ilgili kaynaklarda (Karyeyen, 2018; Fluent, 2009; Glassman and Yetter, 2014; Turns, 1996) bulunabilir.

### 3. Sınır ve İşletme Şartları

Yakıt ve havanın yanma odası girişinden önce homojen bir şekilde karıştığı varsayılmıştır. Bu nedenle yanma odası girişinde hız girişi sınır şartı, yanma odası çıkışında ise basınç çıkışı sınır şartı uygulanmıştır. Giriş ve çıkışta türbülans yoğunluğu %5 olarak belirlenmiş ve hesaplanan hidrolik çap değeri girilmiştir.

Yanma odası duvarlarında ise sabit sıcaklık sınır şartı uygulanmıştır. Her bir gazın ve yanma için gerekli havanın miktarı termal güç (2 kW) ve eşdeğerlik oranına ( $\Phi=0.6$ ) göre belirlenmiştir.

Swirl sayısı, açısal momentumun aksel akısının aksel momentumun aksel akısına oranı olarak ifade edilir (Abdel-Al et al., 2013) ve aşağıdaki formül ile hesaplanabilir (Lefebvre, 1998).

$$Swirl\ Sayısı = \frac{2}{3} \left( \frac{1 - \left(\frac{d_h}{d_o}\right)^3}{1 - \left(\frac{d_h}{d_o}\right)^2} \right) \tan\theta \quad (\text{Denklem 3.1})$$

3.1)

Denklemde;  $d_h$ , gidap üretici göbek çapı;  $d_o$ , girdap üretici dış çapı;  $\theta$  ise girdap üretici kanatçık açısıdır. Bu çalışmada çap oranı 0.5 olarak belirlenmiş ve swirl sayısına (0.2, 0.6, 1.0 ve 1.4) uygun kanatçık açısı değerinde akışa teğetsel bileşen eklenerek girdaplı akış şartları oluşturulmuştur.

Gaz karışımından bağımsız olarak termal güç ve eşdeğerlik oranı, sırasıyla, 2 kW ve 0.6 değerlerinde sabit tutulmuş ve yanma işleminin oda şartlarında gerçekleştiği varsayılmıştır. Test edilen gaz karışımları (Vargas et al., 2016) Tablo 1’de verilmiştir.

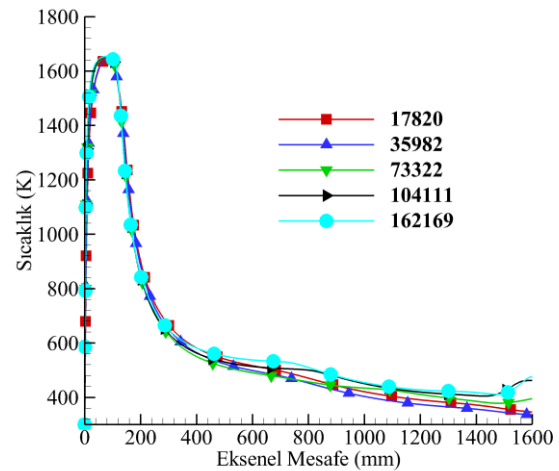
Tablo 1. Test edilen kaya gazı karışımları.

Kaya Gazı	CH <sub>4</sub> (%)	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (%)	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	N <sub>2</sub> (%)
KG1	86	14	-	-	-
KG2	81	10	-	-	9
KG3	58	20	12	10	-

#### 4. Ağ Bağımsızlığı ve Sayısal Modelin Doğrulanması

Hesaplama zamanının azaltılması ve deneysel verilere uygun sonuçlar elde edilmesi bakımından mümkün olan en az sayıda elemente sahip bir ağ yapısının oluşturulması

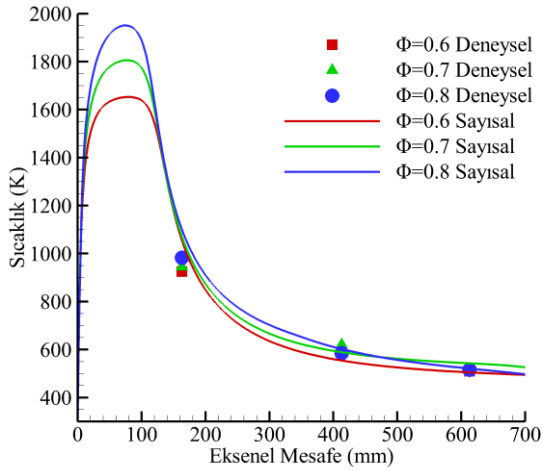
son derece önemlidir. Bu maksatla, farklı sayıda element içeren (17820, 35892, 73322, 104111 ve 162169) ağ yapısına sahip yanma odası modelleri oluşturulmuş ve bu modellerde metan/hava yanması benzer şartlar altında ( $\Phi=0.6$ ,  $SS=1.0$ ) simule edilmiştir. Şekil 2’de, bu modeller için yanma odası merkezi boyunca tahmin edilen sıcaklık değerleri karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi ağı sıklaştırmak, yanma odasının giriş bölgesindeki sıcaklık değerlerini (0-400 mm) çok fazla değiştirmemiş, yanma odası aşağı akımında ise sıcaklık değerlerinin farklılaşmasına neden olmuştur. Yakıcı uzunluğu ile kıyaslandığında çok küçük alev boyundan dolayı bu çalışmada yanma odasının sadece giriş bölgesi göz önünde bulundurulduğundan, 73322 sayıda element içeren ağ yapısı tercih edilmiştir.



Şekil 2. Ağ bağımsızlığı.

Oluşturulan modelin uygulanabilirliğini doğrulamak için, hesaplanan sıcaklık değerleri, TÜBİTAK-MAG-215M821 projesi kapsamında kurulmuş olan deney düzeneğinde 0.6, 0.7 ve 0.8 eşdeğerlik oranlarında ve 1.0 geometrik swirl sayısında saf metan/hava yanmasından elde edilen deneysel sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Deney sistemi hakkında detaylı bilgi Yılmaz ve

Yılmaz'ın (Yılmaz and Yılmaz, 2019) çalışmalarında bulunabilir. Şekil 3'te görüldüğü gibi, deneysel ve sayısal sonuçlar, test edilen tüm eş değerlik oranlarında hem değer hem de eğilim bakımından iyi bir uyum içerisindedir. Bu durum, oluşturulan sayısal modelin uygulanabilirliğini göstermektedir. En yüksek uyum, 0.8 eşdeğerlik oranında elde edilmiştir.

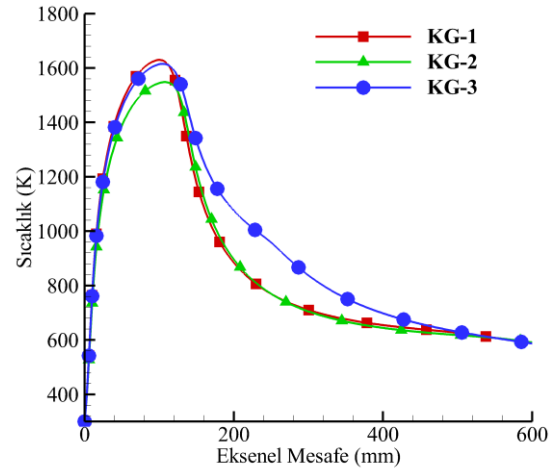


Şekil 3. Yanma odası merkezi boyunca ölçülen ve tahmin edilen sıcaklık değerleri.

## 5. Bulgular

Yanma odası boyunca sıcaklık dağılımları ve yanma neticesinde salınan kirletici emisyon miktarı, bir yanma işleminin etkinliğinin belirlenmesi açısından son derece önemlidir. Şekil 4'te test edilen gaz karışımlarının 0.6 eşdeğerlik oranında ve 0.2 swirl sayısında, yanma odası merkezi boyunca tahmin edilen sıcaklık değerleri görülmektedir. Karışım içeriğinden bağımsız olarak, yanma odası girişinden itibaren 600 mm eksenel mesafeden sonra hemen hemen aynı sıcaklık değerleri oluştuğundan, bu mesafeden sonraki sıcaklık değerleri sunulmamıştır. Beklenildiği gibi, en yüksek ısıl değere sahip KG-1 karışımı, en yüksek tepe sıcaklık değerini oluşturmuştur. Ayrıca ilgili karışım, tepe

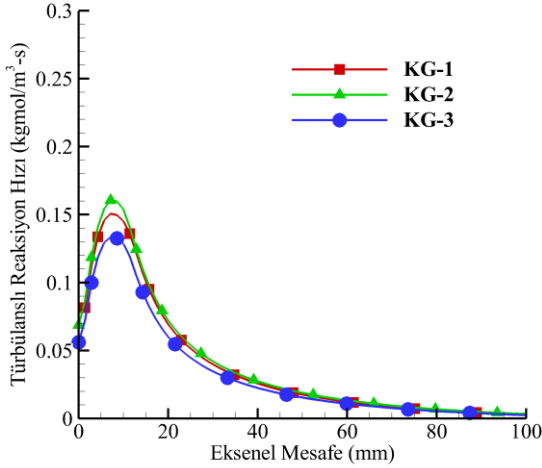
sıcaklık değerine yanma odası girişinden itibaren görece en kısa mesafede ulaşmıştır. KG-2 karışımı ise, KG-1 karışımına kıyasla daha düşük olan tepe sıcaklık değerine yanma odası aşağı akımında ulaşmış ve yanma odası girişinden itibaren yaklaşık olarak 200 mm eksenel mesafeden sonra KG-1 karışımı ile benzer sıcaklık değerleri oluşturmuştur. Vargas et al. (2016), kaya gazı karışımlarındaki inert bileşenlerin, adyabatik alev sıcaklığını çok fazla etkilemediğini, fakat karışım içeriğindeki nitrojenin yanma sıcaklığını düşürdüğünü belirtmişlerdir. KG-2 karışımının düşük yanma sıcaklığı, bu duruma dayandırılmıştır.



Şekil 4. KG-1, KG-2 ve KG-3 karışımlarının yanma odası merkezi boyunca sıcaklık dağılımları ( $\Phi=0.6$ ,  $SS=0.2$ ).

KG-3 karışımı, KG-1 ve KG-2 karışımlarına kıyasla daha farklı bir sıcaklık profili oluşturmuştur. İlgili karışım, yanma odası girişinden itibaren yaklaşık olarak 200 mm eksenel mesafeden sonra en yüksek sıcaklık değerlerini oluşturmuştur. Bu durum,  $C_3H_8$  ve  $CO_2$  ilavelerinin yakıt karışımının termofiziksel özelliklerini çok fazla değiştirdiğini göstermektedir. İlgili karışım, KG-2 karışımından daha yüksek inert ( $CO_2$ 'nin ısı kapasitesi  $N_2$ 'den daha yüksektir ve  $N_2$ 'ye

göre daha düşük hızda yayılır (Samiran et al, 2017)) içeriğine sahip olmasına rağmen, KG-2 karışımından daha yüksek tepe sıcaklık değeri oluşturmuştur. Vargas et al. (2016),  $C_2H_6$ 'nın adyabatik alev sıcaklığının test edilen gaz karışımları (KG-1-2-3) ve metan gazına kıyasla daha yüksek olduğunu belirtmiştir. KG-3'karışımının yüksek alev sıcaklığının, KG-2 karışımına kıyasla daha yüksek etan ( $C_2H_6$ ) gazı içeriğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, KG-3 karışımının adyabatik alev sıcaklığı, KG-2 karışımından daha yüksektir (Vargas et al., 2016).

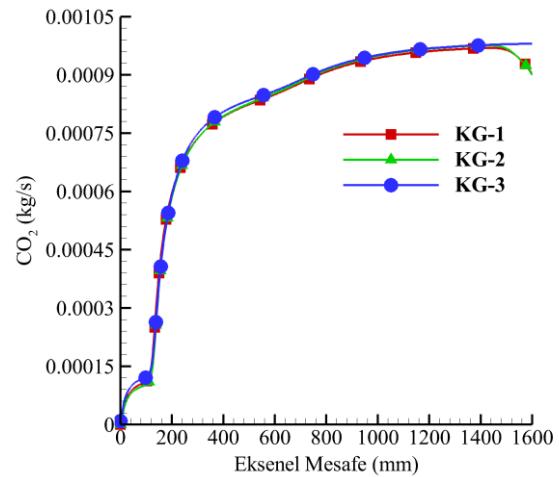


**Şekil 5.** KG-1, KG-2 ve KG-3 karışımlarının türbülanslı reaksiyon hızları ( $\Phi=0.6$ ,  $SS=0.2$ ).

Şekil 5'te KG-1, KG-2 ve KG-3 karışımlarının türbülanslı net reaksiyon hızları sunulmuştur. Tüm gaz karışımlarındaki yanıcı bileşenler yanma odası girişinden itibaren yaklaşık olarak 100 mm eksenel mesafe içerisinde tüketilmiştir. KG-2 karışımı, inert içeriğine rağmen, KG-1 karışımından daha yüksek reaksiyon hızına sahiptir. Hacimsel olarak çok yakın inert içeriklerine rağmen, KG-3 karışımının net reaksiyon hızı, KG-2 karışımından daha düşüktür. Mohammed et al. (2017),  $CO_2$  seyreltiminin  $N_2$  seyreltimine

kıyasla hem yanma hızı hem de sıcaklık dağılımı üzerinde daha fazla etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. KG-3 karışımının düşük reaksiyon hızı, bu duruma dayandırılmıştır.

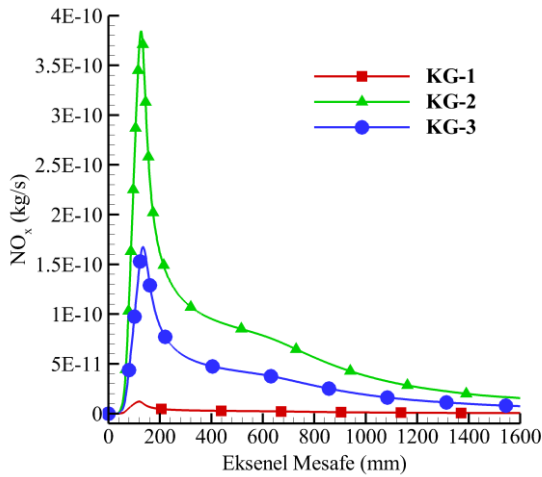
Yanma işleminin etkinliğinin daha iyi değerlendirilebilmesi için yanma odası boyunca tür dağılımlarının da incelenmesi gerekir. Düşük eşdeğerlik oranından, bir başka ifadeyle yüksek  $O_2$  miktarından dolayı yakıtta bulunan karbonun tamamı karbondioksite dönüşmüştür. KG-1 ve KG-2 karışımları, alev bölgesindeki az bir fark hariç tüm yanma odası eksenini boyunca hemen hemen aynı miktarda  $CO_2$  salınımına sebep olmuş, KG-3 karışımı ise içeriğindeki  $CO_2$ 'den dolayı en yüksek  $CO_2$  salınımına neden olmuştur (Şekil 6). Ancak,  $CO_2$  emisyonları bakımından, test edilen gaz karışımları arasında belirgin bir fark yoktur. KG-1, KG-2 ve KG-3 karışımları için yanma odası çıkışından salınan  $CO_2$  miktarları, sırasıyla, 0.00092, 0.00094 ve 0.00097  $kg/s$ 'dir.



**Şekil 6.** Eksenel  $CO_2$  akış oranları ( $\Phi=0.6$ ,  $SS=0.2$ ).

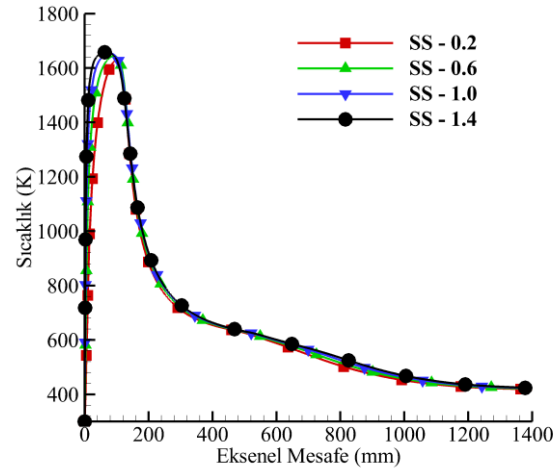
$CO_2$  emisyonlarına kıyasla, yakıt kompozisyonunun  $NO_x$  emisyonları üzerindeki etkileri çok daha belirgindir (Şekil

7). Yakıt karışımına %9'luk N<sub>2</sub> ilavesi, KG-2 karışımı yanması neticesinde salınan NO<sub>x</sub> değerinin KG-1 karışımından (yüksek yanma sıcaklığına rağmen) çok daha fazla olmasına sebebiyet vermiştir. Şekil 4 incelenirse, KG-3 karışımı yanmasında CO<sub>2</sub> ilavesiyle azalan reaksiyon kinetikleri ve uzayan alev boyundan dolayı yüksek sıcaklık bölgesinin genişlediği (ve C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> ilavesiyle sıcaklık değerlerinin arttığı) görülebilir. Hem bu durum hem de KG-3 karışımının KG-1 karışımından tam yanma için daha fazla hava gerektirmesi (daha yüksek O<sub>2</sub> kullanılabilirliği), KG-3 karışımının daha fazla NO<sub>x</sub> oluşturmaya neden olmuştur.



Şekil 7. Eksenel NO<sub>x</sub> akış oranları (Φ=0.6, SS=0.2).

Yukarıda bahsedilen bulgular ışığında, yanma ve emisyon performansı bakımından en yüksek verim sağlayan kaya gazı karışımı, daha üniform bir sıcaklık dağılımı oluşturması bakımından %58 CH<sub>4</sub>- %20 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>- %12 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>- %10 CO<sub>2</sub> karışımıdır. Ancak, yanma sonucu salınan NO<sub>x</sub> seviyeleri incelendiğinde %86 CH<sub>4</sub>- %14 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> karışımının daha avantajlı olduğu değerlendirilmektedir. Bu nedenle, swirl sayısının yanma performansı üzerindeki etkileri ilgili karışım kullanılarak incelenmiştir.



Şekil 8. KG-1 Karışımının farklı swirl sayılarında sıcaklık profilleri (Φ=0.6).

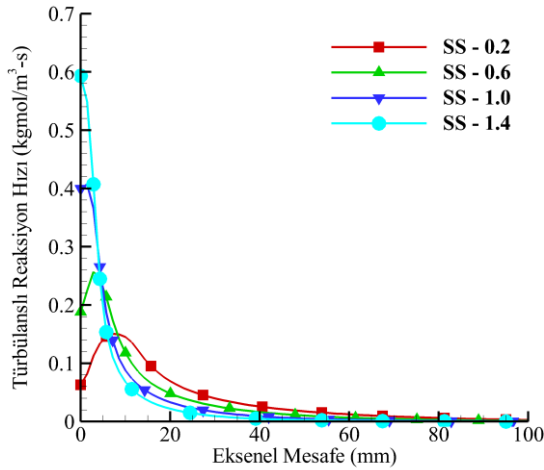
Şekil 8'de %86 CH<sub>4</sub>- %14 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> karışımının, 0.6 eşdeğerlik oranında ve farklı swirl sayılarında sıcaklık profilleri görülmektedir (aşağı akım sıcaklık değerleri belirli bir eksenel mesafeden itibaren değişmediğinden sadece değiştiği aralık verilmiştir). Tüm sıcaklık profilleri hem trend hem de değer bakımından oldukça benzerdir. 0-200 mm eksenel mesafe aralığında, swirl sayısının artması, KG-1 karışımının yanma odası yukarı akımında ateşlenmesine ve tepe sıcaklık değerinin artmasına neden olmuştur. Girdap (swirl) yoğunluğu arttıkça, hava/yakıt karışma durumu iyileşir ve sonuç olarak, karışımın difüzyon kabiliyeti ve yanma verimi artar (Wang et al., 2019). Aynı zamanda, iyileşen karışma durumunun yanma zamanını kısalttığı da rapor edilmiştir (Yoon et al., 2018; Xu et al., 2019; Dadsetan et al., 2019). Swirl sayısı artışı ile hava/yakıt karışımı ateşlenme bölgesinin brülör çıkışına yaklaşmasının (oluşan resirkülasyon bölgesi yanma sonu ürünleri ve taze karışım arasındaki etkileşimi artırır - ısı transfer karakteristikleri iyileşir) bu durumdan kaynaklandığı düşünülmektedir. 200- 400 mm eksenel mesafe aralığında, %86 CH<sub>4</sub>- %14 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> karışımı, test edilen tüm swirl



## Kaya Gazı Karışımlarının Yanma ve Emisyon Davranışlarının Laboratuvar Ölçekli Bir Yakıcıda Sayısal Olarak İncelenmesi

sayılarında hemen hemen aynı sıcaklık değerlerini oluşturmuştur. 400-600 mm aksel mesafe aralığında ise, swirl sayısı arttıkça sıcaklık değerleri yükselmiş ve yanma odası çıkışına doğru tüm sıcaklık değerleri birbirlerine yaklaşmıştır.

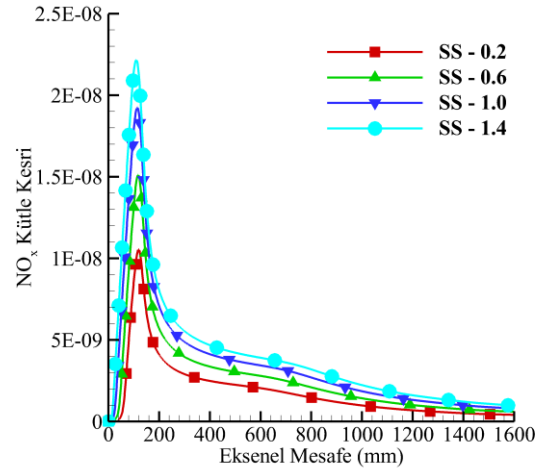
Sıcaklık profilleri ile tutarlı bir şekilde, swirl sayısı arttıkça net reaksiyon hızı da artmıştır (Şekil 9). Brülör çıkışından itibaren yaklaşık olarak 20 mm içerisinde reaksiyon hızı, tüm swirl sayılarında hemen hemen en düşük değerine ulaşmıştır. Bu noktadan sonra düşük swirl sayılarındaki yüksek reaksiyon hızı, düşük tepkinirliği (yanma işleminin aşağı akımda tamamlandığını) göstermektedir.



Şekil 9. KG-1 karışımının farklı swirl sayılarında türbülanslı reaksiyon hızları ( $\Phi=0.6$ ).

Test edilen tüm swirl sayılarında salınan  $\text{CO}_2$  miktarları, birbirlerine çok yakındır. 0.2, 0.6, 1.0 ve 1.4 swirl sayılarında yanma işlemi neticesinde yanma odası çıkışından salınan  $\text{CO}_2$  miktarları, sırasıyla, 0.0009277, 0.0009322, 0.0009352 ve 0.0009353 kg/s'dir. Swirl sayısı,  $\text{CO}_2$  emisyonunu pek fazla etkilememiştir.

$\text{NO}_x$  emisyonunun swirl sayısına bağımlılığı ise oldukça yüksektir. Swirl sayısı arttıkça,  $\text{NO}_x$  emisyonu, sıcaklık artışına bağlı olarak artmıştır (Şekil 10). Bu durum,  $\text{NO}_x$  oluşumunda termal (Zeldovich)  $\text{NO}_x$  oluşum mekanizmasının etkin olduğunu göstermektedir.



Şekil 10. KG-1 karışımının farklı swirl sayılarında  $\text{NO}_x$  profilleri ( $\Phi=0.6$ ).

## 6. Sonuç

Bu çalışmada farklı kompozisyonlara sahip kaya gazı karışımlarının yanma ve emisyon davranışlarına yakıt bileşimi ve swirl sayısının etkileri, deneysel olarak test edilmiş laboratuvar ölçekli, ön karışimli ve girdap sabitlemeli bir yakıcının iki boyutlu modelleri oluşturularak sayısal olarak incelenmiştir. Oluşturulan sayısal modelin doğrulanması için 0.6, 0.7 ve 0.8 eşdeğerlik oranlarında saf metan yanmasından elde edilen deneysel sonuçlar kullanılmış ve ilgili modelin kullanılabilirliğini gösteren uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Vargas et al. (2016)'ın çalışmaları ile uyumlu bir şekilde; %86  $\text{CH}_4$ - %14  $\text{C}_2\text{H}_6$  karışımı en yüksek, 58  $\text{CH}_4$ - %20  $\text{C}_2\text{H}_6$ - %12  $\text{C}_3\text{H}_8$ - %10  $\text{CO}_2$  karışımı ise %81  $\text{CH}_4$ - %10  $\text{C}_2\text{H}_6$ - %9  $\text{N}_2$  karışımından daha yüksek tepe sıcaklık değerleri oluşturmuştur.

%81 CH<sub>4</sub>- %10 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>- %9 N<sub>2</sub> karışımı, N<sub>2</sub> içeriğinden dolayı en yüksek NO<sub>x</sub> salınımına neden olmuş, CO<sub>2</sub> emisyonları ise yakıt bileşiminden pek fazla etkilenmemiştir. Test edilen swirl sayısı aralığında, swirl sayısı arttıkça, yakıt karışımının ateşlendiği bölge brülör çıkışına yaklaşmış, net reaksiyon hızı artmış, maksimum sıcaklık değeri ve buna bağlı olarak NO<sub>x</sub> emisyonları yükselmiştir. Yukarıda bahsedilen bulgular ışığında, ilgili yanma düzeneğinde %86 CH<sub>4</sub>- %14 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> karışımının, 0.6-1.0 swirl sayısı aralığında yüksek yanma verimi ve güç çıktısı sağlayacağı düşünülmektedir.

### **Teşekkür**

ANSYS/Fluent programı için Erciyes Üniversitesi'ne, deneysel veriler için Prof. Dr. İlker Yılmaz'a teşekkür ederim.

### **7. Kaynaklar**

Abdel-Al, M. A., Yehia, M. A., Taha, M. R., Abou-Arab, T. W., 2013. "Effect of Fuel and Air Injection Pattern on Combustion Dynamics in Confined and Free Diffusion Flame", *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 1(3), 928-938.

Dadsetan, M., Chitsaz, I., Amani, E., 2019. "A Study of Swirl Ratio Effects on the NO<sub>x</sub> Formation and Mixture Stratification in an RCCI Engine". *Energy*, 182, 1100-1114.

Etiopie, G., Drobnik, A., Schimmelmann, A., 2013. "Natural Seepage of Shale Gas and the Origin of "Eternal Flames" in the Northern Appalachian Basin, USA", *Marine and Petroleum Geology*, 43, 178-186.

Fluent, A., 2009. "12.0 Theory Guide". *Ansys Inc*, 5(5).

Gaikwad, P., Kulkarni, H., Sreedhara, S., 2017. "Simplified Numerical Modelling of Oxy-Fuel Combustion of Pulverized Coal in a Swirl Burner", *Applied Thermal Engineering*, 124, 734-745.

Glassman, I., Yetter, R. A., Glumac, N. G., 2014. "Combustion, Fourth Edition". *Elsevier, USA*, 773 pp.

İlbaş, M., 2017. "Türkiye'nin "Kaya Gazı" Potansiyeli", <https://www.tespam.org/turkiyennin-kaya-gazi-potansiyeli/>, Son erişim tarihi: 03.09.2019.

İlbas, M., Yılmaz, İ., Kaplan, Y., 2005. "Investigations of Hydrogen and Hydrogen-Hydrocarbon Composite Fuel Combustion and NO<sub>x</sub> Emission Characteristics in a Model Combustor", *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(10), 1139-1147.

Karyeyen, S. 2018. "Combustion characteristics of a non-premixed methane flame in a generated burner under distributed combustion conditions: A numerical study", *Fuel*, 230, 163-171.

Lefebvre, A. H., 1998. "Gas turbine combustion", *CRC press*.

Mohammed, A. N., Juhany, K. A., Kumar, S., Kishore, V. R., Mohammad, A., 2017. "Effects of CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> Dilution on Laminar Burning Velocity of Stoichiometric DME-Air Mixture at Elevated Temperatures", *Journal of Hazardous Materials*, 333, 215-221.

Öztürk, S., 2019. "The Effect of Temperature on the Emissions of Shale Gas Combustion", *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (16), 186-193.

Samiran, N. A., Ng, J. H., Jaafar, M. N. M., Valera-Medina, A., Chong, C. T., 2017. "Swirl Stability and Emission Characteristics of CO-Enriched Syngas/Air Flame in a Premixed Swirl Burner", *Process Safety and Environmental Protection*, 112, 315-326.

Şengüller, İ., 2012. "Şeyl Gazı (Shale Gas) ve Ekonomik Değeri", *MTA Ekonomi Bülteni*, 13-8.

Skea, J., 2015. "A Guide to Shale Gas", *Energy Institute, London*, 24 pp.

Speight, J. G., 2013. "Shale Gas Properties and Processing", *Shale Gas Production Processes*, 101-119.

- Turns, S. R., 1996. "An Introduction to Combustion (Vol. 287)". *McGraw-Hill*, New York, 676 pp.
- Vargas, A. C., Arrieta, A. A., Arrieta, C. E., 2016. "Combustion Characteristics of Several Typical Shale Gas Mixtures", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 33, 296-304.
- Vengosh, A., Warner, N., Jackson, R., Darrah, T., 2013. "The Effects of Shale Gas Exploration and Hydraulic Fracturing on the Quality of Water Resources in the United States", *Procedia Earth and Planetary Science*, 7, 863-866.
- Wang, G., Yu, W., Li, X., Su, Y., Yang, R., Wu, W., 2019. "Experimental and Numerical Study on the Influence of Intake Swirl on Fuel Spray and In-Cylinder Combustion Characteristics on Large Bore Diesel Engine", *Fuel*, 237, 209-221.
- Xu, Y., Jia, R., Medina, H., Sun, H., 2019. "Effect of Tangential Swirl Air Inlet Angle on the Combustion Efficiency of a Hybrid Powder-Solid Ramjet", *Acta Astronautica*, 159, 87-95.
- Yilmaz, H., Yilmaz, I., 2019. "Effects of synthetic gas constituents on combustion and emission behavior of premixed H<sub>2</sub>/CO/CO<sub>2</sub>/CNG mixture flames", *Journal of the Energy Institute*, 92(4), 1091-1106.
- Yoon, S., Lee, S., KWon, H., Lee, J., Park, S., 2018. "Effects of the Swirl Ratio and Injector Hole Number on the Combustion and Emission Characteristics of a Light Duty Diesel Engine", *Applied Thermal Engineering*, 142, 68-78.
- Zeng, L., Lyu, W., Li, J., Zhu, L., Weng, J., Yue, F., Zu, K., 2016. "Natural Fractures and Their Influence on Shale Gas Enrichment in Sichuan Basin, China", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 30, 1-9.