

FARKLI KOMPOZİSYONLARDAKİ SENTETİK GAZLARIN YANMA PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

Yılmaz H¹
Erzincan Üni.
Sivil Hv. Y.O.
Erzincan

Yılmaz İ²
Erciyes Üni.
Hav.Uzy. Bil. Fak.
Kayseri

Çam Ö³
Erciyes Üni.
Hav.Uzy. Bil. Fak.
Kayseri

Taştan M⁴
Erciyes Üni.
Hav. Uzy. Bil. Fak.
Kayseri

ÖZET

Bu çalışmada farklı bileşimlerdeki (H₂, CO, CH₄, N₂, CO₂ karışımları) sentetik gazların ön karışimsız, silindirik bir yakıcıdaki yanma performansları ve emisyon davranışları sayısal olarak incelenmiştir. Bu incelemeler ANSYS Fluent paket programında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan yanma modeli Mixture Fraction/PDF, türbülans modeli standart k-ε ve radyasyon modeli P-1'dir. Sayısal simülasyonlar standart atmosfer şartlarında gerçekleştirilmiştir. Yakıcıya olan termal giriş, yakıt kompozisyonundan bağımsız olarak 600 kW olarak belirlenmiş ve yanma işlemleri stokiyometrik olarak modellenmiştir. Sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmeden önce çözüm süresini gereksiz yere artırmamak, matematiksel olarak aşırı belirtime neden olmamak için gereken en az element sayısı ve en kaliteli ağ yapısı belirlenmeye çalışılmıştır. Ağ yapısı belirlendikten sonra metan gazı yanması modellenmiş ve elde sonuçlar diğer sentetik gaz yakıtların yanma performansları ve emisyon davranışlarından elde edilen veriler ile kıyaslanmıştır. %50 H₂ – %50 CO karışımı en yüksek alev sıcaklığını oluşturmuş ve karışımdaki hidrojen miktarı azaldıkça maksimum alev sıcaklığı düşmüştür. Yapılan çalışma sonucunda alev sıcaklığının NO_x emisyonları üzerindeki önemli etkisi açığa çıkmış ve test edilen karışımlar içerisinde %100 CH₄/hava karışımı en düşük NO_x emisyonunu oluşturmuş, maksimum alev sıcaklığını oluşturan karışım ise en yüksek NO_x oluşumuna neden olmuştur. Bu durum, NO_x oluşumunda termal Zeldovich mekanizmasının etkin olduğu şeklinde yorumlanmıştır.

GİRİŞ

Tüm fosil hidrokarbon yakıt kaynakları (kömür, petrol, doğal gaz) yenilenebilir değildir ve doğanın bizlere değerli bir armağanıdır. Sürdürebilir bir gelişim için bu enerji kaynaklarının etkili ve verimli bir şekilde kullanımı adına bir yol bulunması gerekmektedir. Temiz yanma teknolojilerinin gelişimi CO₂ gibi sera gazı emisyonları olmadan fosil yakıt kaynaklarının sürekli kullanımını mümkün kılacaktır [MillerB, 2011]. Böyle bir temiz yanma teknolojisi esasen hidrojen (H₂) ve karbon monoksit (CO) karışımı olan sentetik gazların kullanımı üzerine kuruludur [LieuwenT, 2010].

Sentetik gazlar lignoselülozik biokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından veya kömür gibi fosil yakıt kaynaklarından üretilebilir. Sentetik gaz üretimi için kullanılan kaynakların ve gazlaştırma proseslerinin çeşitliliğinden dolayı, sentetik gaz yakıtların bileşimi farklılık gösterebilir. Sentetik

¹ Araştırma görevlisi, Uçak Gövde Motor Böl., E-posta: hyilmaz@erzincan.edu.tr

² Prof. Dr., Uçak Gövde Motor Böl., E-posta: iyilmaz@erciyes.edu.tr

³ Araştırma görevlisi, Uçak Gövde Motor Böl., E-posta: omercam@erciyes.edu.tr

⁴ Araştırma görevlisi, Uçak Gövde Motor Böl., E-posta: mrt@erciyes.edu.tr

gazlar H_2 , CO , CH_4 , CO_2 , N_2 , H_2O ve düşük miktarlarda yüksek hidrokarbonlar içerebilirler [LieuwenT, 2008]. Sentetik gazlar aşağıdaki tabloda gösterildiği gibi gaz kompozisyonlarına bağlı olarak sınıflandırılırlar [JICA, 1989].

Çizelge 1: Enerji içeriği bakımından sentetik gazların sınıflandırılması [JICA, 1989].

Düşük Btu Gaz	Orta Btu Gaz	Yüksek Btu Gaz	
CO , H_2 ve ısıtma değerleri 300 Btu\scf den daha düşük olan gazlar	CO , H_2 , az miktarda CH_4 - CO_2 ve ısıtma değerleri 300 -700 Btu\scf arasında olan gazlar	SNG, CH_4 (%95) ve ısıtma değerleri 300 Btu\scf den daha yüksek olan gazlar	Gaz Kompozisyonu
Hava	Saf Oksijen	Yok (metanlaşma reaksiyonu sonucu)	Oksitleyici

Daha önce de belirtildiği gibi geleneksel yakıtlardan farklı olarak sentetik yakıt kompozisyonu farklılık gösterir. Geleneksel yakıtlar için optimize edilmiş yanma sistemlerinde bu yakıtları kullanmadan önce özelliklerinin ayrıntılı bir şekilde analiz edilmesi gerekir. Bu maksatla sentetik gazların yanma davranışları üzerine bu zamana kadar birçok çalışma yapılmıştır. Bunlardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Lee ve arkadaşları yüksek oranda H_2 ve CO içeren sentetik gazların yanma performanslarını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarından elde ettikleri sonuçları, yanma performansı bakımından metan gazı yanmasından elde edilen sonuçlar ile kıyaslamışlardır. Kullanılan gazların yanma performanslarını türbin giriş sıcaklığı, yanma dinamikleri, emisyon karakteristikleri ve alev yapıları bakımından değerlendirmişlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda sentetik gazların yanma karakteristiklerini belirlemiş ve gaz türbin yakıcılarında metan gazı yerine sentetik gaz kullanıldığında ne tür problemler ortaya çıkacağını tespit etmişlerdir. Sonuçlar; sentetik gazların yanma karakteristiklerinin H_2/CO oranına bağlı olarak değişebileceğini, yüksek H_2 içeriğinin NO emisyonlarını artırdığını ancak düşük yüklerde bile CO emisyonunun olmadığını, sentetik gazların metanda olduğu gibi yanma titreşimine neden olmadığını ve çalışmada kullanılan gaz türbin yakıcısında metan gazı yerine sentetik gazın yakıcıda çok az bir modifiye ile kullanılabileceğini göstermiştir [LeeMC, 2010].

İlbaş ve Karyeyen hidrojen ilavesi içeren düşük kalorik değerli kömür gazlarının yanma davranışlarını sayısal olarak incelemiş ve hidrojen ilavesi ile bu gazların yanma performanslarını geliştirmeye çalışmışlardır. Çalışmalarında PDF (Probability Density Fuction)/karışım kesri modelini yanma modeli, deneysel sonuçlar ile daha iyi uyum gösterdiğinden k-ε realizable modelini türbülans modeli olarak kullanmışlardır. Çalışmalarında, kömür gazlarını yakmadan önce doğal gazın esas bileşeni olan metanı tahminleri doğrulamak için referans yakıt olarak yakmışlardır.. Metan alevinin tahmin edilen sıcaklık profilleri deneysel sonuçlar ile kıyaslanmış ve ayrıca bu tahminler literatürdeki ölçümler ile iyi bir uyum göstermiştir. Daha sonra aynı yakıt girişinden düşük kalorik değerli kömür gazları hidrojenle zenginleştirilmiş ve bu karışımın yanması modellenmiştir. Elde edilen sonuçlar hidrojenle zenginleştirilmiş kömür gazlarının yanma karakteristiklerinin hidrojen ilavesi ile geliştiğini ancak hidrojen ilavesinin NO_x seviyelerini bir miktar artırdığını göstermiştir [İlbaşM, 2015].

Ghenai, gazlaştırma işlemi ile katı plastik atık ve biokütle karışımından elde edilen sentetik gaz yakıtların yanma davranışlarını HAD (Hesaplama Akışkanlar Dinamiği) yazılımları ile incelemiştir. Bu maksatla yakıtı verimli bir şekilde yakmak ve emisyonları azaltmak için can tipi burgulu bir gaz türbin yakıcısı tasarlamıştır. Çalışmasındaki esas amaç sentetik gaz kompozisyonu ve düşük ısıtma değerinin yanma performansı ve emisyonlar üzerindeki etkilerini incelemektir. Bu çalışmada kullanılan sentetik yakıt, hurma çekirdeği kabuğu ve polietilen atık karışımının gazlaştırılması sonucu elde edilmiştir. %30 oranında polietilen atık hurma çekirdeği kabuğu ile karıştırıldığında yüksek hidrojen içerikli sentetik gaz elde edilmiştir. Elde edilen sentetik gaz; %76.2 H_2 , %8.53 CO , %4.39

CO₂ ve %10.90 CH₄'den oluşmaktadır. Bu çalışmada üç farklı yakıt test edilmiştir. Bunlar; saf CH₄, sentetik gaz ve saf H₂'dir. Sentetik gaz kompozisyonu ve düşük ısıtma değerinin alev şekline, gaz sıcaklığına ve her bir birim enerji oluşumu için NO_x ve CO₂ kütlelerine etkileri incelenmiştir. Sonuçlar doğal gaza kıyasla maksimum alev sıcaklığı ve NO kütle kesirlerinin sentetik gaz ve saf H₂ yanmasında daha yüksek olduğunu, aynı şekilde doğal gaza kıyasla yakıcı çıkışında sentetik gaz yanmasının daha az CO₂ emisyonları oluşturduğunu göstermiştir [GhenaiC, 2015].

Joo ve arkadaşları H₂/CO/CH₄ karışımı sentetik gazların model bir gaz türbin yakıcısında kısmi ön karışimli yanma karakteristiklerini araştırmışlardır. 0.7-1.3 eşdeğerlik oranı aralığındaki sentetik gazların alev yapılarını ve karakteristiklerini incelemek için kimyasal ışıldama ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Abel ters çevirme metodunu üç boyutlu kimyasal ışıldama görüntülerinden iki boyutlu kimyasal ışıldama alev görüntülerini elde etmek için kullanmışlar ve EINO_x'i (Emission Index of Nitrous Oxide), alev yapısı ve egzoz gazı arasındaki ilişkiyi araştırmak için ölçmüşlerdir. Ek olarak EINO_x tahmini için bir yapay sinir ağı modeli oluşturmuşlardır. Bu modelde alev sıcaklığını, alev uzunluğunu ve giriş hava akış oranını yapay sinir ağı giriş değerleri olarak kullanmışlardır. Sonuçlar kısmi ön karışım alevi EINO_x karakteristiklerinin difüzyon alevinden farklı olduğunu göstermiştir. Dahası, EINO_x karakteristikleri alev sıcaklığına bağlıdır ve aynı ısı girdisi için 0.7-1.3 eşdeğerlik oranı aralığında alev uzunluğu ile ilişkilendirilmiştir. Üst üste getirilen OH, CH ve C₂ kimyasal ışıldama görüntüleri çeşitli H₂/CO/CH₄ sentetik gaz kompozisyonlarının EINO_x'lerini tahmin etmede çok daha doğru sonuçlar vermiştir. Bu durumu yapay sinir ağı modeli ile doğrulamışlardır [JooS, 2015].

Dinesh ve arkadaşları burgulu, ön karışimsız H₂/CO sentetik gaz karışımlarının alev karakteristiklerini LES (Large Eddy Simulation) ve detaylı kimya modeli kullanarak incelemişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları yakıcı konfigürasyonu doğal gaz yanmasının geniş çaplı deneysel analizleri için kullanılan TECFLAM yakıcısıdır. Elde edilen sonuçlar hidrojen ve karbon monoksitçe zengin alevler arasında hem hız hem de diğer skalar özellikler bakımından büyük farklılıklar göstermiştir. Bu durum yakıt çeşitliliğinin alev karakteristiklerine olan etkisine bağlanmıştır. Son olarak H₂'nin yüksek yayılma kabiliyetinden dolayı, hidrojen zengin alevin karbon monoksitçe zengin aleve göre daha kalın alevler oluşturduğu tespit edilmiştir [DineshK, 2013].

Yakıt kompozisyonunun alev özelliklerine etkilerinden ayrı olarak, bu kompozisyonun alev kararlılığına olası etkileri konusuna da özel ilgi gösterilmiştir. Ön karışım ve difüzyon alevlerinin çalışma aralıkları (Alev tepmesi ve sönme limitleri ile tanımlanır.) birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bu araştırmacılar özellikle H₂ gibi sentetik gaz bileşenlerinin alevin kararlılık aralığını nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Sentetik gazlar yüksek miktarda CO de içerirler. CO kararlılık aralığını yavaş şartlara doğru taşır. CH₄, CO ve H₂ alev davranışını etkileyen çok farklı taşınım özelliklerine ve alev hızlarına sahiptirler. Örneğin H₂ ve CO düşük eşdeğerlik oranlarında çalışmaya müsaade ederek (Bu durum emisyonları azaltır.) yüksek sıcaklıklı ve yüksek hızlı alevler oluştururlar. Ancak bu tür yakıtlar alev geri tepmesine neden olurlar ve bu durum sıcaklık dayanımı düşük olan ve konum olarak yanma odalarının yukarı akımına yerleştirilmiş yakıt enjektörleri için bir güvenlik tehdidi oluşturur. Bu nedenle birçok araştırmacı alev geri tepmesi mekanizmasını araştırmıştır.

Tuncer ve arkadaşları sentetik gazların önemli bir bileşeni olan hidrojenin (yüksek yanma oranından dolayı) saf metan yakıtına ilavesinin alev davranışına (yavaş sönme limiti, alev geri tepmesi ve basınç genliği) etkisini incelemişlerdir. Bu maksatla laboratuvar ölçekli, ön karışimli bir yakıcı tasarlamış ve üretmişlerdir. Bu yakıcıda saf metandan başlayarak artan oranlarda hidrojen içeren yakıt karışımlarını yakmışlardır. Çalışmalarında ısı salınımı, emisyon ve alev geri tepmesi ölçümlerini gerçek zamanlı olarak yapmışlar ve ayrıca termoakustik temelli basınç dalgalanmaları ve alev geri tepmesi arasındaki ilişkiyi de araştırmışlardır. Yapılan çalışma hidrojenin mol kesrindeki artışın alev geri tepme eğilimini artırdığını ve bu hidrojen ilavesinin dominant akustik modda ani bir değişikliğe neden olabileceğini göstermiştir. Elde edilen sonuçlar hidrojen ilavesinin NO oluşumunu artırmasına rağmen, çok yavaş şartlarda yanmaya imkân sağladığını göstermiştir. Bu düşük yavaş sönme limitinden faydalanarak, yakıcı çok yavaş şartlarda çalıştırılabilirse, alev sıcaklığının düşeceği ve termal NO oluşumunun azalacağı belirtilmiştir. Son olarak basınç çevrimi,

periyodik alev geri tepmesi davranışı ve NO emisyonları arasında yakın bir bağlantı olduğu tespit edilmiştir [TuncerO, 2009].

Armingol ve Ballester sentetik gaz yanmasındaki temel kaygılar (kararlılık aralığı, yanma kararsızlıkları ve kirlenici emisyonlar) üzerine çalışmışlar ve basınç dalgalanmaları ile alev geri tepmesi arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Sonuçlar yakıt kompozisyonunun kararlılık aralığı (özellikle alev geri tepmesi oluşumu) üzerindeki önemli etkisini ve yakıcı konfigürasyonunun da kararlılık aralığını etkilediğini açığa çıkarmıştır. Bu çalışmada kritik Damköhler numarasının tanımlanması gibi bazı yaklaşımların bulunmasına rağmen, belirli yakıt karışımlarının ve yakıcı geometrilerinin kararlılık aralığı oldukça doğru bir şekilde tahmin edilmiştir. Son olarak yüksek hidrojen içerikli bazı yakıt karışımlarında, belirli şartlar altında, alev geri tepmesi ve termoakustik kararsızlıklar arasında tetikleyici bir mekanizmanın varlığının kanıtı bulunmuştur [ArmingolT, 2015].

Lee ve Kil kömürden elde edilen, düşük kalorik değerli sentetik gazların alev kararlılıklarını, termal ve yakıt kaynaklı NO_x oluşum karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları sentetik yakıtı yakıcıya olan termal girişin doğal gaz ile aynı olması isteği ile CO, H₂ ve amonyak karışımından üretmişlerdir. Bu sentetik gaz karışımı için eş değerlik oranını değiştirerek kararlı yanma aralığını belirlemek, alev sönmesi ve alev geri tepmesi gibi alev kararsızlıklarını tanımlamak için alev davranışını gözlemlemişlerdir. Egzoz gazlarındaki NO_x içeriğini, sentetik gaz yanması sonucu oluşan termal ve yakıt kaynaklı NO_x emisyonlarını doğal gaz yanması sonucu oluşan NO_x emisyonu sonuçları ile kıyaslamak için ölçmüşlerdir. Son olarak N₂ ile seyreltme işlemini NO_x azaltma tekniği olarak uygulamış, bu tekniğin NO_x emisyonu ve alev kararlılığına etkilerini araştırmışlardır [LeeC, 2009].

Emadi ve arkadaşları düşük burğu numaralı, yavan ön karışimli bir yakıcının termoakustik davranışını birkaç parametrenin değişik varyasyonları açısından deneysel olarak incelemişlerdir. Bu parametreler; eş değerlik oranı, yanma odası basıncı, akış hızı ve yakıt karışımına hidrojen ilavesi miktarıdır. Bu çalışmada farklı kompozisyonlarda iki farklı yakıt kullanılmıştır. Bunlar; saf metan ve %80 metan-%20 hidrojen karışımıdır. Yapılan çalışmalar eşdeğerlik oranındaki artışın dominant akustik modların frekans ve genişliğini artırdığını, yakıt akış oranındaki artışın akustik modlara etkisinin düşük olduğunu (Saf metanda akış hızındaki artış frekansı azaltmış, hidrojen ilaveli yakıtta ise frekansta artışlar görülmüştür.) göstermiştir. Basıncın akustik davranışa etkisi düzensiz olduğundan anlamlı bir sonuç elde edilememiştir. Son olarak yakıcı ve yanma odası tasarımının da akustik davranışı etkilediği tespit edilmiştir [EmadiM, 2013].

Deneysel çalışmalar ile kıyaslandığında hesaplamalı akışkanlar dinamiği alev davranışının ucuz ve güvenli bir şekilde anlaşılmasını mümkün kılar. Bu yaklaşımın doğruluğu fiziksel modelin düzgün bir şekilde oluşturulmasına ve uygun türbülans, radyasyon ve kimya modellerinin kullanımına bağlıdır. Kimya modeli alev sıcaklığı, alev hızı gibi çeşitli alev özelliklerinin ve emisyonların belirlenmesi için önemli bir elementtir. Sentetik gaz yanması için çeşitli kimya mekanizmaları geliştirilmiş ve deneysel veriler ile (çeşitli sentetik gaz karışımları için) doğrulanmıştır.

Bu çalışmada farklı bileşimlerdeki sentetik gazların yanma ve emisyon davranışları HAD yazılımları kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Bu maksatla literatürde bulunan silindirik bir yanma odası modellenmiştir. Yanma modeli olarak Mixture Fraction/PDF, türbülans modeli olarak standart k-ε ve radyasyon modeli olarak P-1 kullanılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar gaz türbin sistemlerinde yaygın olarak kullanılan metan gazı yanmasından elde edilen veriler ile kıyaslanmıştır.

MATEMATİKSEL MODEL

Bu çalışmada silindirik bir yanma odasında kararlı hal yanma işlemi, yanma odası içindeki sıcaklık, tür ve hız dağılımları ve bu dağılımlara radyasyonun etkisi hesaba katılarak modellenmiştir.

Kütlenin Korunumu

İki boyutlu aksi-simetrik geometriler için kütlenin korunumu aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial \rho}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = S_m \quad (1)$$

Burada x ve r eksenel ve radyal koordinatları v_x ve v_r eksenel ve radyal hızları, ρ akışkanın yoğunluğunu, S_m kaynak terimi ifade etmektedir [Fluent, 2003].

Momentumun Korunumu

İki boyutlu aksi-simetrik geometriler için radyal momentum korunum denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_r) &= \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \right] \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] &- 2 \mu \frac{v_r}{r^2} + \frac{2}{3} \frac{\mu}{r} (\nabla \cdot \vec{v}) + \rho \frac{v_z^2}{r} + F_r \end{aligned} \quad (2)$$

Bu denklemlerde ∇ terimi vektör operatörü olup aşağıda verilmiştir [Fluent, 2003].

$$\nabla \cdot \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} \quad (3)$$

k-ε Türbülans Modeli

Standart k-ε model, Reynolds gerilmelerini şu şekilde ifade eder;

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ik} \quad (4)$$

Burada k türbülans kinetik enerjisini, μ_t türbülans viskozitesini ifade eder.

$$\mu_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

C_μ sabit, ε ise kinetik enerji yitim hızıdır. Türbülans kinetik enerjisi ve enerji yitim hızı için eşitlikler;

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} G_k \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

G_k ortalama hız gradyanından dolayı türbülanslı kinetik enerji oluşumudur. Sabitler;

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_\mu, \sigma_k, ve \sigma_\varepsilon$ sırasıyla 1.44, 1.92, 0.09, 1.0, ve 1.3'dir [Fluent, 2003].

Mixture Fraction/PDF Model

Ön karışimsız modelleme yaklaşımında korunan bir veya iki skaler özelliğin taşınım eşitlikleri çözülür. Her bir tür için ayrı bir eşitlik çözülmez. Bunun yerine, tür konsantrasyonları tahmin edilen karışım kesri alanlarından elde edilir. Türbülans ve yanma kimyası etkileşimi ise PDF (Probability Density Function – İmkan dahilindeki yoğunluk fonksiyonu) ile hesaba katılır. Ön karışimsız modelleme yaklaşımı bazı kabuller üzerine kuruludur. Akışkanın anlık termo-kimyasal durumu korunan skaler bir özellik olan karışım kesrine (f) bağlıdır. Karışım kesri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$f = \frac{m_f}{m_f + m_o} \quad (8)$$

Bu denklemde m_f ve m_o yakıt ve oksitleyicinin kütle kesirlerini göstermektedir. Karışım oranı, türbülanslı akış alanının her bir noktasında korunan bir özelliktir.

Bütün türler için eşit yayılabilirlik kabulü altında, bütün tür taşınım eşitlikleri tek bir eşitliğe indirgenebilir. Tür denklemlerindeki reaksiyon kaynak terimi iptal olur ve böylece karışım kesri korunur. Bu kabul türbülans dalgalanmalarının moleküler difüzyon etkilerine üstün geldiği türbülanslı akışlar için uygundur. Yoğunluk ortalamalı karışım kesri eşitliği;

$$\frac{\partial(\rho \bar{f})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \bar{f})}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \bar{f}}{\partial x} \right) + S_m \quad (9)$$

Burada S_m kaynak terimidir.

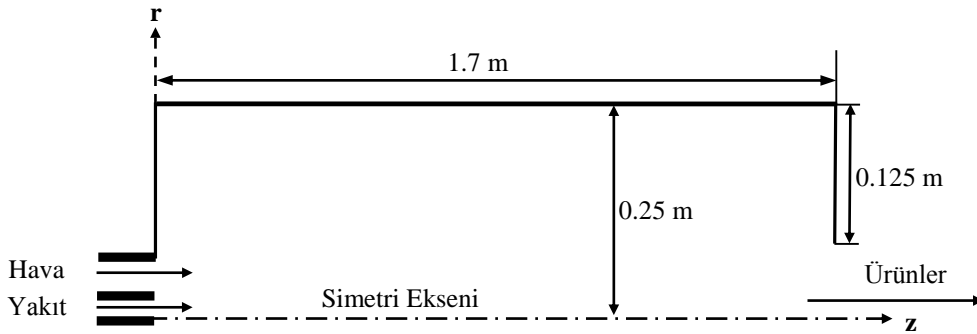
Bu eşitliğe ek olarak Fluent, karışım kesri varyansı için bir korunum denklemi çözer.

$$\frac{\partial(\rho \overline{f'^2})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \overline{f'^2})}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \overline{f'^2}}{\partial x} \right) + C_g \mu_t \left(\frac{\partial \bar{f}}{\partial x} \right)^2 - C_d \rho \frac{\varepsilon}{k} \overline{f'^2} \quad (10)$$

Burada $\overline{f'^2}$ karışım kesri varyansı, C_g ve C_d model sabitleridir [Fluent, 2003].

YANMA ODASI GEOMETRİSİ

Bu çalışmada kullanılan yanma odası geometrisi ve bu yanma odasının ölçüleri aşağıda verilmiştir. Yakıt girişi 3 cm, hava girişi 2 cm'dir.



Şekil 1: Yanma odasının geometrisi [Garre'tonD, 1994].

ÇALIŞMADA KULLANILAN YAKITLAR ve KOMPOZİSYONLARI

Bu çalışmada kullanılan yakıt karbon içeren biokütle, kömür, plastik veya kentsel atıklardan çeşitli gazlaştırma yöntemleri ile üretilmiş sentetik gazdır. Sentetik gazların bileşimi ve termal özellikleri gazlaştırma işlemi sırasındaki basınç ve sıcaklığa, reaktör tipine ve sentetik gaz üretiminde kullanılan ham maddenin bileşimine bağlıdır. Bu çalışmada kullanılan sentetik gaz kompozisyonları aşağıdaki şekilde verilmiştir.

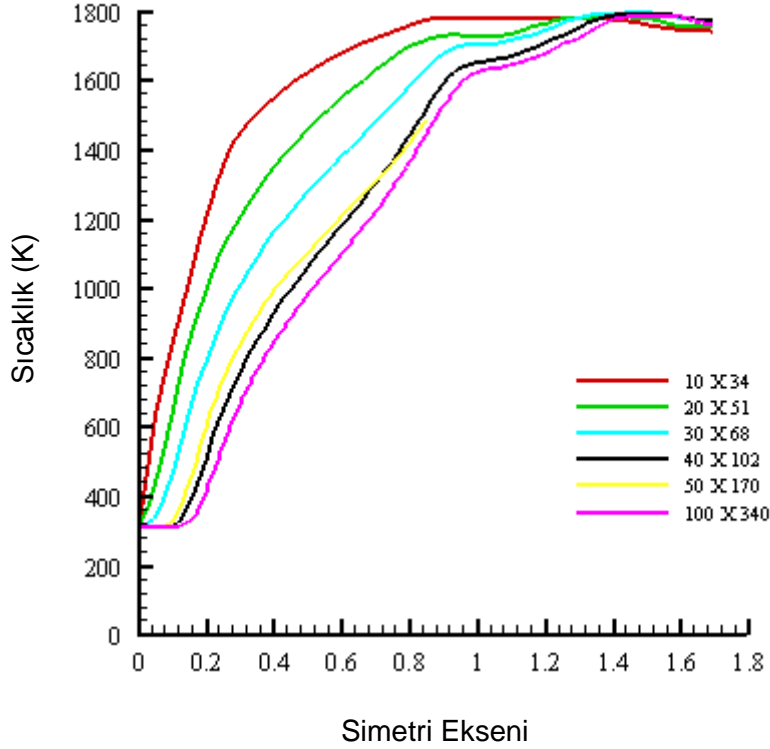
Çizelge 2: Test edilen yakıt kompozisyonları [AlavandiSK, 2008]

	%H ₂	%CO	%CH ₄
I	0	0	100
II	20	20	60
III	35	35	30
IV	40	40	20
V	45	45	10
VI	50	50	0

VII	50	40	10
VIII	35	45	20

SAYISAL AĞ ve ANALİZ ŞARTLARI

Bu çalışmada sayısal ağın oluşturulması mapped mesh yöntemi ile gerçekleştirilmiş ve altı farklı ağ yapısı oluşturulmuştur. Grid bağımsızlığı analizleri yapılmış ve 40x102 ağ yapısının en uygun ağ yapısı olduğu belirlenmiştir. Şekil 2'de bu analiz sonuçları görülmektedir.



Şekil 2: Grid bağımsızlığı sonuçları

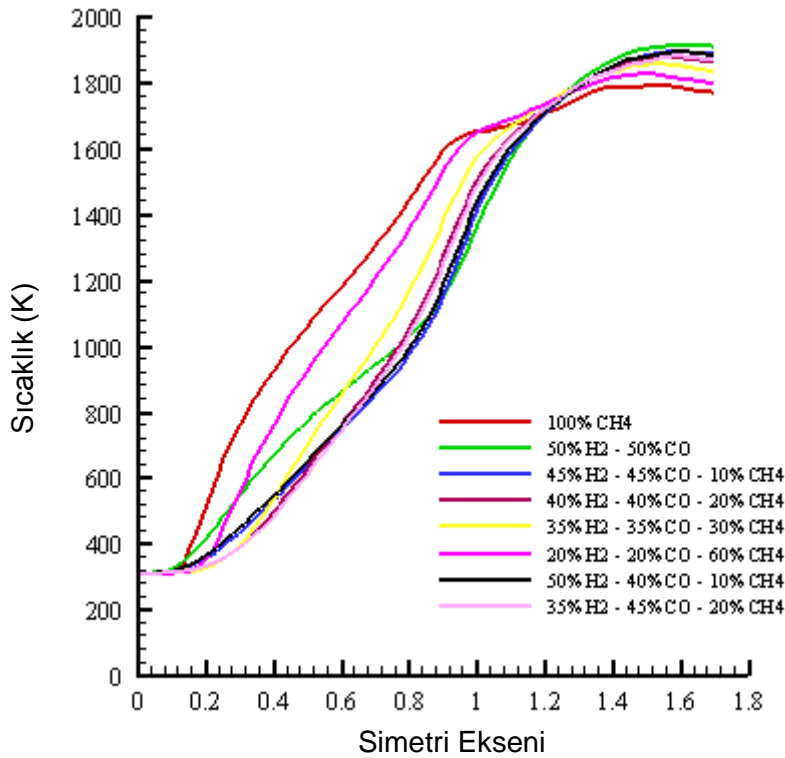
Yapılan hesaplamalar daha sık ağ yapısı oluşturularak değerlendirilmiş, sonuçlarda kayda değer bir değişiklik gözlenmemiştir. Yapılan hesaplamalar en yüksek 4500 iterasyon sonucunda yaklaşık olarak 40 dakikada tamamlanmıştır. Bütün değişkenlerde, hesaplanan sonuçlar arası fark en yüksek 1×10^{-6} olarak elde edilmiştir.

Yanma işlemi ön karışimsız olarak Fluent programında sonlu hacimler metodu ile simüle edilmiştir. Yanma duvarı yüzeylerinde adyabatik varsayımı ve kaymama koşulu kabulü yapılmıştır. Yer çekiminin etkileri ihmal edilmiştir. Akış modeli olarak standart $k - \epsilon$ türbülans modeli seçilmiştir. Yanma modeli olarak Mixture Fraction/PDF modeli, ışınımın etkilerini hesaba katmak içinde P-1 modeli kullanılmıştır. P-1 modeli zamandan tasarruf sağlamak nedeni ile seçilmiştir. Yanma odasına yakıt ve hava akış hızları, yakıcıya olan termal girişin 600 kW olduğu varsayımı yapılarak, her bir yakıt karışımı için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

SAYISAL SONUÇLAR

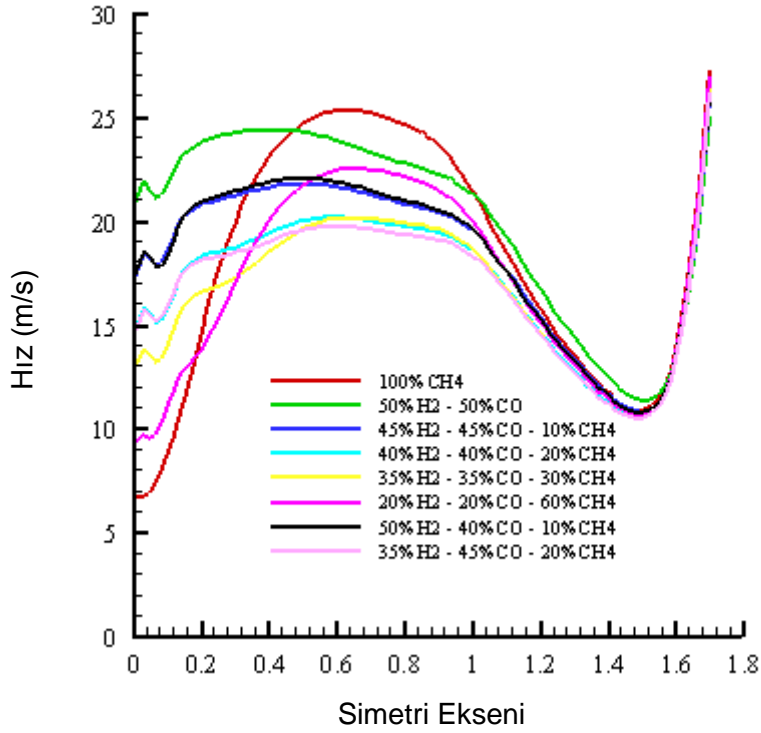
Yanma odası içerisindeki sıcaklık dağılımları tüm yakıt karışımları için benzer bir davranış göstermiştir. En yüksek sıcaklık %50 H₂ - % 50 CO karışımında görülmüştür. Bu durum, yakıttaki hidrojen içeriğinin artışı ile açıklanabilir çünkü hidrojenin hem termal hem de moleküler yayılabilirliği çok yüksektir. Sıcaklık grafiği incelendiğinde aksel doğrultudaki sıcaklık artışının, bütün yakıt karışımları içinde metan yanmasında daha hızlı gerçekleştiği görülmektedir. Bu durumun, metan yanmasında görece yavaş CO + O₂ → CO₂ tepkimesinin [TurnsSR, 2000] diğer yakıt karışımlarına kıyasla daha düşük oranlarda gerçekleşmesinden kaynaklandığı

düşünülmektedir. Eksenel doğrultudaki en yavaş sıcaklık artışı %50 H₂ - %50 CO yakıt karışımında beklenirken, %45 H₂- %45 CO - %10 CH₄ yakıt karışımında görülmüştür. Bunun sebebi, %50 H₂ - %50 CO yakıt karışımında metanın yokluğudur. Hidrokarbon yanması basitçe iki adımda incelenecek olursa: ilk adımda yakıt molekülleri karbon monoksit parçalanır, ikinci adımda ise CO oksitlenerek CO₂ oluşur [TurnsSR, 2000]. %45 H₂- %45 CO - %10 CH₄ yakıt karışımında %10 oranında bulunan metan, karbon monoksit oranına katkı sağlamıştır. %50 H₂ – %40 CO – %10 CH₄ karışımında, %45 H₂- %45 CO - %10 CH₄ karışımına kıyasla metan oranı sabit tutulup H₂ oranı %5 artırıldığında ve CO oranı %5 azaltıldığında eksenel doğrultudaki sıcaklık artışının görece daha hızlı gerçekleştiği, %35 H₂ – % 45 CO – %20 CH₄ karışımında ise %40 H₂ – %40 CO – %20 CH₄ karışımına kıyasla metan oranı sabit tutulup H₂ oranı %5 oranında azaltıldığında ve CO oranı %5 artırıldığında eksenel doğrultudaki sıcaklık artışının görece daha yavaş gerçekleştiği görülmektedir.



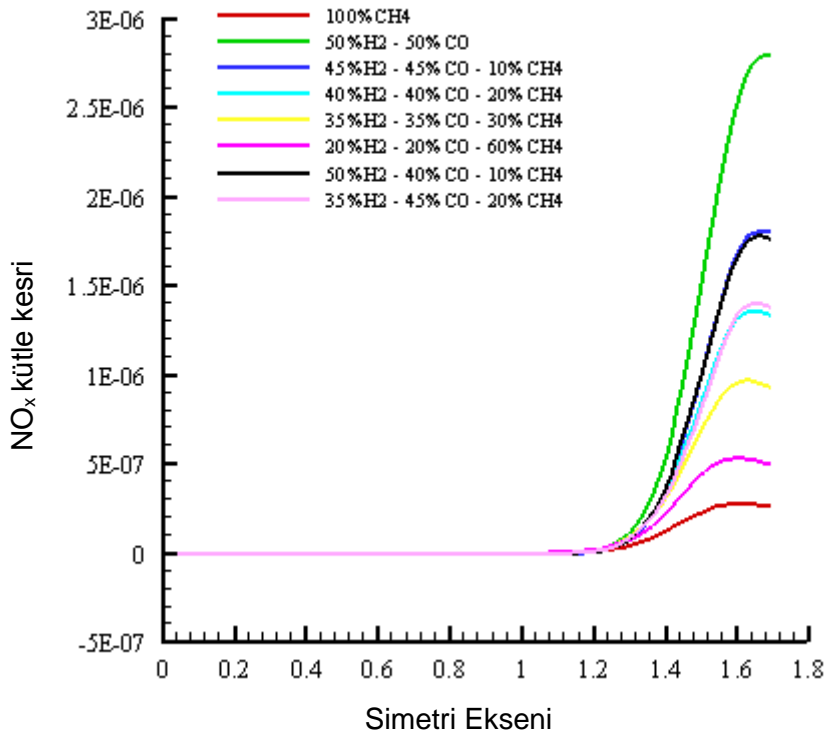
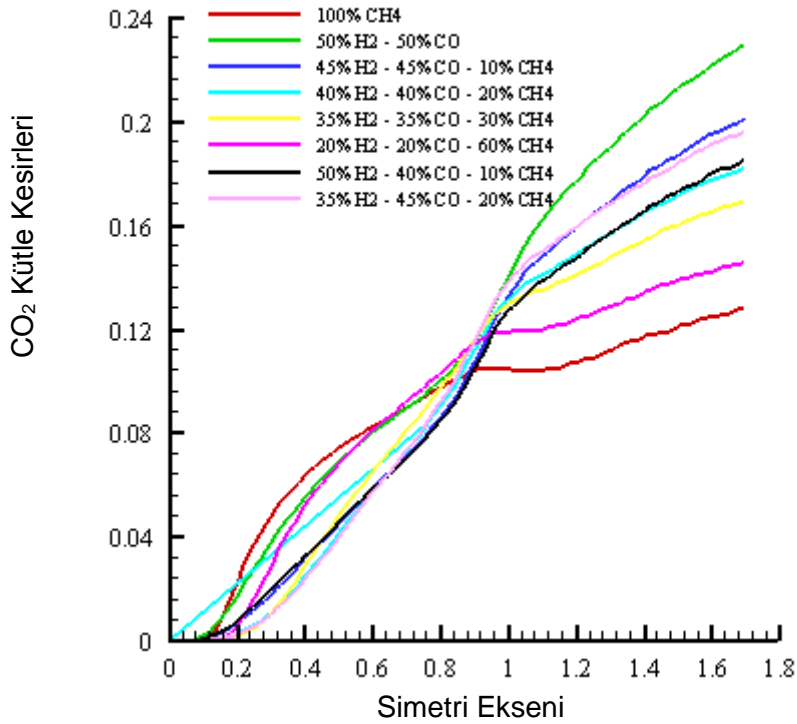
Şekil 3: Sıcaklığın değişimi

Yanma odası içindeki hız dağılımları incelendiğinde en fazla hız artışının saf metan yanmasında olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, daha önce de belirtildiği gibi metan yanmasında görece yavaş $\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ tepkimesinin diğer yakıt karışımlarına kıyasla daha düşük oranlarda gerçekleşmesidir. %20 H₂ - %20 CO - %60 CH₄ yakıt karışımında ise metan oranı azaldıkça hız artışı azalmıştır. %50 H₂ - %50 CO, %45 H₂- %45 CO - %10 CH₄, %40 H₂- %40 CO - %20 CH₄, %35 H₂ - %35 CO - %30 CH₄ yakıt karışımlarında hız artışı, diğer yakıt karışımlarına kıyasla daha düşük oranlarda gerçekleşmiştir. Bu durumun karışımdaki CO oranının artmasından ve hidrojen artışının bu etkiye baskın gelememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. %50 H₂ – %40 CO – %10 CH₄ ve %35 H₂ – %45 CO – %20 CH₄ yakıt karışımlarında %45 H₂- %45 CO - %10 CH₄ ve %40 H₂ – %40 CO – %20 CH₄ yakıt karışımlarına kıyasla metan oranı sabit tutulup H₂ ve CO oranları değiştirildiğinde hız artış grafiklerinin hemen hemen benzer ancak bu durumda hız artışında hidrojen etkisinin baskın olduğu görülmektedir.

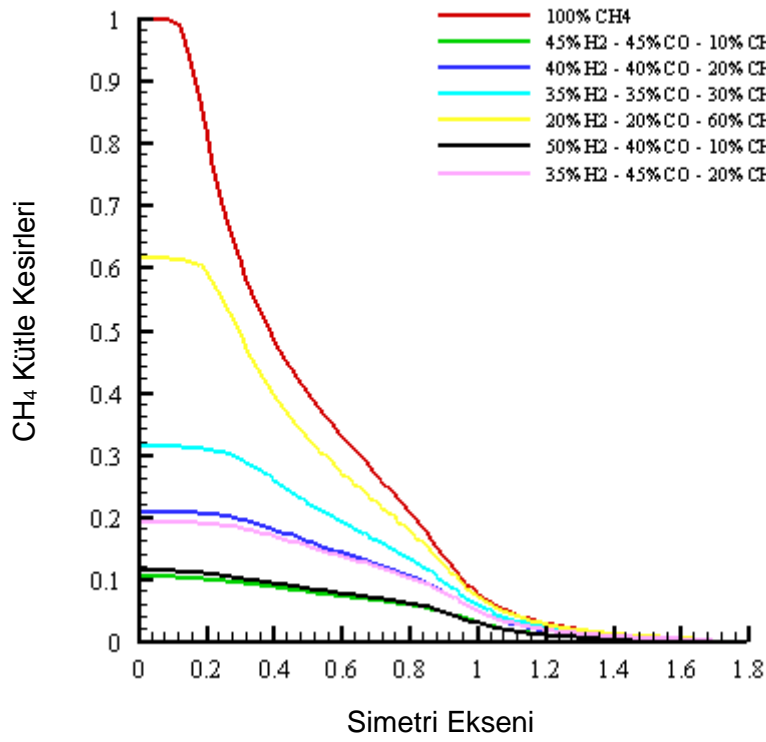
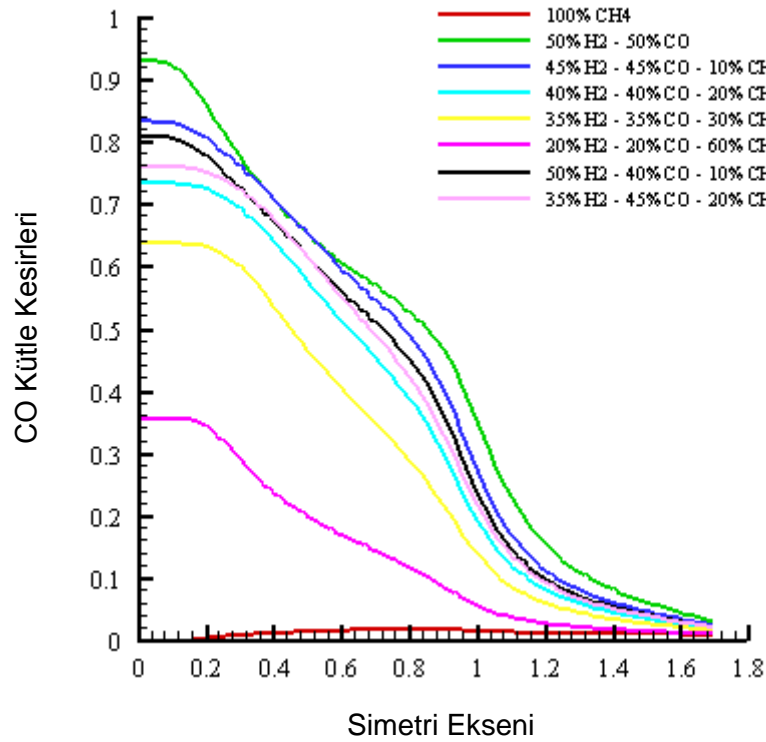


Şekil 4: Hızın değişimi

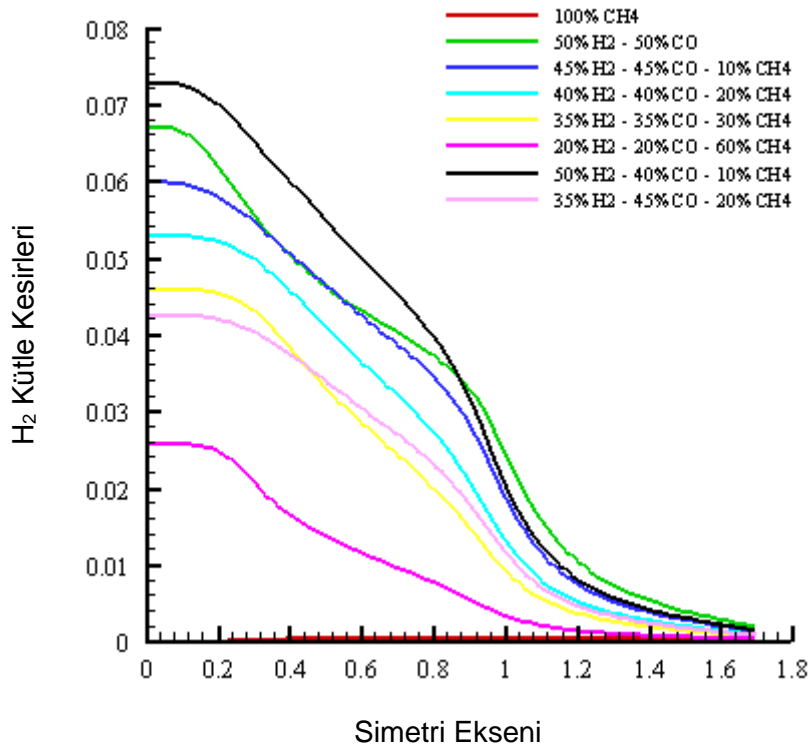
Tüm yakıt karışımları içinde en yüksek alev sıcaklığına neden olan karışım, en fazla NO_x oluşturmuştur. Bu durum NO_x oluşumunda termal Zeldovich mekanizmasının etkin olduğunu gösterir. Saf metan yanmasından başlayarak, karışımındaki hidrojen içeriği arttıkça yanma odası içinde görülen maksimum alev sıcaklıkları, yaklaşık olarak 20-30 K artmıştır. En yüksek ve en düşük maksimum alev sıcaklıkları arasında 120 K fark vardır. Buna karşın, maksimum alev sıcaklığına neden olan yakıt karışımının NO_x emisyonu miktarı minimum alev sıcaklığına neden olan yakıt karışımının NO_x emisyonu miktarının yaklaşık olarak 10 katıdır. Bu durum NO_x oluşumunun sıcaklık bağımlılığının ne kadar yüksek olduğunu gösterir.

Şekil 5: NO_x emisyonunun değişimiŞekil 6: CO₂ dağılımı

Bütün analizler stokiyometrik olarak tam yanma varsayımı ile gerçekleştirildiğinden ve yüksek sıcaklıklardaki çözünme ihmal edildiğinden, yakıt karışımlarındaki karbon miktarı arttıkça CO₂ miktarı da artmıştır (Şekil 6). Şekil 7-9'da CH₄, CO ve H₂ gazlarının simetri eksenini boyunca kütle kesirleri verilmiştir.

Şekil 7: CH₄ dağılımı

Şekil 8: CO dağılımı

Şekil 9: H₂ dağılımı**Teşekkür**

Bu çalışma, Tübitak tarafından 215M821 kodlu bilimsel araştırma projesi kapsamında desteklenmiştir.

Kaynaklar

- AlavandiSK., AgrawalAK., 2008. Experimental study of combustion of hydrogen–syngas/methane fuel mixtures in a porous burner International Journal of Hydrogen Energy 33: 1407 – 1415
- DineshKR., LuoKH., KirkpatrickMP., MalalasekeraW., 2013. Burning syngas in a high swirl burner: Effects of fuel composition. International Journal of Hydrogen Energy, 38(21): 9028-9042.
- EmadiM., KarkowD., MelendezA., RatnerA., 2013. Parameter variations and the effects of hydrogen: An experimental investigation in a lean premixed low swirl combustor. International Journal of Hydrogen Energy, 38: 5401-5408.
- Fluent Incorporated. FLUENT User's guide version 6.1, 2003.
- García-ArmingolT., BallesterJ., 2015. Operational issues in premixed combustion of hydrogen-enriched and syngas fuels. International Journal of Hydrogen Energy, 40(2): 1229-1243.
- Garre'tonD., SimoninO., 1994. Aerodynamics of steady state combustion chambers and furnaces. In ASCF Ercoftac Cfd Workshop, Org: EDF Chatou, France.
- GhenaiC., 2015. Combustion and Emissions Performance of Syngas Fuels Derived from Palm Kernel Shell and Polyethylene (PE) Waste via Catalytic Steam Gasification. Combustion, 1: 31944.
- İlbaşM., KaryeyenS., 2015. A numerical study on combustion behaviors of hydrogen-enriched low calorific value coal gases. International Journal of Hydrogen Energy, 40(44): 15218-15226.
- Japan International Cooperation Agency (JICA), The Final Report for the Feasibility Study on Effective Utilization of Banko Coal in Republic of Indonesia, Volume I (1989)
- JooS., YoonJ., KimJ., LeeM., YoonY., 2015. NO_x emissions characteristics of the partially premixed combustion of H₂/CO/CH₄ syngas using artificial neural networks. Applied Thermal Engineering, 80: 436-444.
- LeeC., KilH. G., 2009. Effects of nitrogen dilution for coal synthetic gas fuel on the flame stability and NO_x formation. Korean Journal of Chemical Engineering, 26(3): 862-866.
- LeeMC., SeoSB, ChungJH, KimSM, JooYJ, AhnDH., 2010. Gas turbine combustion performance test of hydrogen and carbon monoxide synthetic gas. Fuel : 89(7):1485–91.
- LieuwenT., McDonellV., PetersenE., SantaviccaD., 2008. Fuel flexibility influences on premixed combustor blowout, flashback, auto ignition, and stability. J. Eng. Gas Turbines Power 130:011506 – 011506.
- LieuwenT., YangV, YetterR., 2010. Synthesis gas combustion: fundamentals and applications. FL, USA: CRC Press Taylor and Francis Group.
- MillerB., 2011. Clean coal engineering technology. Burlington, MA,USA: Butterworth-Heinemann.
- TuncerO., AcharyaS., UhmJH., 2009. Dynamics, NO_x and flashback characteristics of confined premixed hydrogen-enriched methane flames. International Journal of Hydrogen Energy, 34: 496-506.
- TurnsSR., 2000. An Introduction to Combustion, Second Edition. McGraw-Hill, Singapore, 700pp.