

HİDROJENLE ZENGİNLEŞTİRİLMİŞ METAN YAKITININ ALEV HIZLARI ve EMİSYON DEĞERLERİNİN KİMYASAL KİNETİK ANALİZİ

Onur TUNÇER¹

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Uçak Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul 34469, tuncero@itu.edu.tr
Telefon: (212) 2853341, Fax: (212) 2853139, e-mail: tuncero@itu.edu.tr

ÖZET

Hidrojenle zenginleştirilmiş karışımlarda alev tutmada sorunlar ve geri tepme gibi olumsuzluklar yaşanmaktadır. Bu bağlamda hidrojen zengin metan yakıtının laminer alev hızları GRI 3.0 mekanizmasına dayanan kimyasal kinetik simülasyonlar ile incelenmiştir. Hidrojen zenginleştirme beklenildiği gibi alev hızlarını arttırmaktadır. Alev hızlarının kolay hesaplanabilmesi için ampirik bir korelasyon geliştirilmiştir. Basıncın alev hızlarını düşürdüğü buna karşılık ise emisyonları arttırdığı bulunmuştur. Emisyonlar ise artan H₂ oranıyla artmaktadır. Sıfır boyutlu simülasyonlarda üzerinde husus termo-akustik instabilite neticesinde ortaya çıkan fazla hava katsayısı çalkantılarının fakir alev sönmesi ile emisyonlara etkisidir. Hidrojen zengin karışımların fazla hava katsayısı çalkantılarına daha dayanıklı oldukları görülmüştür. Bu çalkantıların NO emisyonlarını arttırıcı yönde etki ettikleri de bulunmuştur. Hidrojen zenginleştirilmiş metan alevlerinde NO oluşumunda temel rolü Zeldovich mekanizmasının oynadığı saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hidrojen zenginleştirme, Alev hızı, Emisyonlar, Sentez gazı, Metan

ABSTRACT

In hydrogen enriched mixtures there are problems with flame holding and flashback. Within this context, laminar flame speeds of hydrogen enriched methane mixtures were investigated utilizing chemical kinetics simulations based on GRI 3.0 mechanism. It has been found that hydrogen enrichment increases flame speeds. An empirical correlation was developed to aid in practical computation of flame speeds. It was observed that pressure reduces flame speeds while

increasing nitric oxide emissions. Emissions on the other hand increase with increasing hydrogen content. In zero dimensional simulations focus was on the effect of equivalence ratio fluctuations, due to thermoacoustic oscillations, on lean blowout and emissions. Flames with richer hydrogen content were observed to be more immune to blowout during these oscillations. Another important observation is that these very fluctuations have an increasing effect on nitric oxide emissions. Zeldovich mechanism plays the key role in the production of NO emissions in hydrogen enriched methane flames.

Keywords: Hydrogen enrichment, Flame speed, Emissions, Syngas, Methane

SEMBOLLER

$(C_{CH_4}/C_{HAVA})_{st}$	Stokiyometrik metan/hava oranı
$(C_{H_2}/C_{HAVA})_{st}$	Stokiyometrik hidrojen/hava oranı
C_{CH_4}	Metan konstantasyonu
C_{H_2}	Hidrojen konsantrasyonu
C_{HAVA}	Hava konstantasyonu
c_p	Isı kapasitesi (J/(kg.K))
D	Diffüzyon hızı (m ² /s)
f	Frekans (Hz)
h	Entalpi (J/kg)
i	Tür indisi
\dot{m}	Kütle debisi (kg/s)
N	Toplam tür sayısı
n	Basınca bağlı sabit sayı
P	Basınç (Pa)
S_L	Laminer alev hızı (m/s)
$S_{L,st}$	Stokiyometrik alev hızı (m/s)
S_{L,st,CH_4}	Metan stokiyometrik alev hızı (m/s)
S_{L,st,H_2}	Hidrojen stokiyometrik alev hızı (m/s)
t	Zaman (s)
T	Sıcaklık (K)
T_{ad}	Adyabatik alev sıcaklığı (K)
T_{ad,CH_4}	Stokiyometrik hidrojen alevinin adyabatik sıcaklığı (K)
T_{ad,H_2}	Stokiyometrik hidrojen alevinin adyabatik sıcaklığı (K)
U	Akışkan hızı (m/s)

V	Reaktör hacmi (m ³)
w	Türlerin kimyasal oluşum yahut yıkımını ifade eden kaynak terimi (kg/(m ³ s))
\dot{w}	Türlerin kimyasal oluşum yahut yıkımını ifade eden kaynak terimi (mol/(m ³ s))
x	Uzay koordinatı (m)
Y	Kütle oranı
Y*	Reaktör girişindeki kütle oranı

Yunan Harfleri

μ	Moleküler ağırlık (kg/mol)
α	Yakıttaki hidrojenin hacimsel oranı
λ	Isı iletim katsayısı (W/m.K)
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
τ	Kalma süresi (s)
Φ	Eşdeğerlilik katsayısı

1.GİRİŞ

Geride bıraktığımız otuz sene zarfında daha temiz ve verimli teknolojilerin geliştirilmesi için önemli çabalar sarfedilmiştir. Kömür gazifikasyon teknolojisi de kombine çevrimli santrallerin ortaya çıkmasıyla ivmelenmiştir. Gazifikasyon teknolojisi ile kombine çevrim santraller birleştirildiğinde ortaya çıkan IGCC teknolojisi içerisinde gaz temizlemesi ve atık minimizasyonu gibi özellikler vardı ki bu özellikler onu çevreye duyarlılığından dolayı tercih edilirdi. IGCC gelişerek verimi arttırmaya emisyonları daha da azaltmaya devam ederek 21. yüzyılın önemli bir teknolojisi olmaya devam edecektir (Yoshi ve Lee, 1996).

Moliere'in 2002 yılında yaptığı bir çalışma göstermiştir ki sentez gazı içerisindeki hacimsel H₂/CO oranı %0.33 ten % 40'a kadar, seyreltici gazların (N₂, CO₂, Ar, v.b.) oranı %4 ila %51 arasında, su oranı ise %0 ila %40 arasında değişkenlik gösterir.

Sentez gazı karışımının değişkenliği alev davranışını etkiler. Yakıttaki hidrojen miktarının artırılması fakir yanmada alev stabilitesini arttıracak gibi aynı anda yanma odasını alev-geri tepmesi ve termo-akustik instabiliteye maruz bırakabilecektir. Sonuç olarak, fazla bir tasarım değişikliğine gerek duymadan değişken karışımli sentez gazlarını yakabilecek bir yakıcıya ihtiyaç vardır. Mevcut ön karışımli yakıcılar sentez gazını güvenilir bir şekilde yakamazlar. Sentez gazı mevcut türbinlerde ön karışimsız olarak özel tasarımlar vasıtasıyla kullanılırlar ki bu yakıcıların tasarımları doğal gaz yakıcılarınınkinden oldukça farklıdır (Huth vd., 1998). Eğer düşük NO_x emisyonlu yakıcılara gerek duyuluyorsa bu durumda alev sıcaklığı büyük miktarlarda su

ve/veya nitrojen kullanılıp yakıtı seyrelterek düşürülür. Ön karışım yakıtı seyreltmeye kıyasla bir çok avantaja sahip olmasına rağmen doğal gaz yakıcılarında yakıt esnekliğini sağlama çabaları kısmen başarı sağlayabilmiştir (Lieuwen vd., 2008).

Ön karışımli sentez gazı enjeksiyonu için en önemli sorunlardan birisi de alev geri tepmesidir. Bu sorun hidrojenin alev hızının oldukça yüksek olmasından kaynaklanır (Ducruix vd., 2005). Alev kendi hızı akışkanından yüksek olduğu zaman geri teper. Geri tepme özel tasarımı alev tutucular kullanılarak yahut sentez gazını ayrı bir düzenekle yanma odasına doğrudan enjekte edilerek önlenir. Doğal gazdan sentez gazına dönüşümü sağlarken mevcut tasarımlarda en az değişiklik yapılmalıdır.

Emisyonlar söz konusu olduğunda ise ölçümlerin detaylı kimyasal kinetik analizlerle desteklenmesi gerekmektedir. Azot oksit emisyonlarına neden olan üç temel mekanizma mevcuttur. Bunlar; ani NO_x, yakıtı bağlı NO_x, ve ısıl NO_x olarak sayılabilir.

Laminer alev hızları üzerinde durulmasının nedeni türbülanslı alev hızlarının da çoklukla laminer alev hızlarının, karmaşık akış şiddetinin ve alev cephesi eğriliğinin bir fonksiyonu olarak ifade edilebilmesindedir.

2. SAYISAL ÇALIŞMA

Kullanılan yakıt karışımına (CH₄/H₂) uygun bir eşdeğerlilik katsayısı tanımlanmalıdır. Eşdeğerlilik katsayısı (1) numaralı denklemden şekliyle hesaplanmaktadır. Bu tanımlamanın arkasındaki varsayım yanmanın basamaklı olduğu şeklindedir, şöyle ki; havadaki oksijen önce yakıt karışımındaki hidrojen tarafından tüketilir ve kalan oksijen metanın yakılmasında kullanılır (Yu vd., 1986). Deneysel verilerin anlaşılmasında da bu yaklaşımın oldukça uygun olduğu görülmüştür. Arkasındaki fiziksel varsayım hidrojen yanmasının metan yanmasına göre çok daha hızlı oluşudur.

$$\phi = \frac{C_{CH_4} / [C_{H_2} - C_{H_2} / (C_{H_2} / C_{H_2})_{st}]}{(C_{CH_4} / C_{H_2})_{st}} \quad (1)$$

Sayısal çalışmada detaylı kimyanın hesaplanması için GRI 3.0 mekanizması kullanılmıştır. Bu mekanizma 53 tür içerir ve toplam 325 tepkime basamağından oluşur. Mekanizma emisyon oluşumuyla yeniden yanmayı da içerir.

2.1. Sıfır Boyutlu Alev Benzetimleri

Sıfır boyutlu olarak tanımlanan reaktör, içerisinde uzayda sıcaklık değişiminin bulunmadığı bir reaktördür. Bu tür bir senaryo basit olmasına karşın birçok yanma olayına açıklık getirebilir. Bu reaktörlerde "kalma süresi" τ denilen bir parametre

vardır. Bu süre yeterli değilse yanma tam gerçekleşmez, eğer bu süre yetersizse reaktör içerisindeki alev söner. Eğer yine bu süre uzun olursa reaksiyonlar kimyasal dengeye kadar ilerleme fırsatı bulurlar. Akışın kütle debisi \dot{m} , hacim V ile gösterilirse $\tau = \rho V / \dot{m}$ şeklinde bulunur.

Reaktörü çözmek için içerisindeki türlerin korunumlarını (2) ve bununla birlikte enerjinin korunumunu hesaplamak (3) gereklidir.

$$\frac{dY_i}{dt} = -\frac{1}{\tau}(Y_i - Y_i^*) + \dot{w}_i \frac{\mu_i}{\rho} \quad (2)$$

$$c_p \frac{dT}{dt} = -\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^N (Y_i h_i - Y_i^* h_i) - \sum_{i=1}^N \frac{h_i \dot{w}_i \mu_i}{\rho} \quad (3)$$

Kimyasal kaynak terimlerin ve termo-fiziksel özelliklerin hesaplanmasında CANTERA kütüphanelerinden (Goodwin, 2001) faydalanılır. Zamanda tümlev almak için ise SUNDIALS kütüphaneleri kullanılır (Hindmarsh vd., 2005).

2.2. Tek Boyutlu Alev Benzetimleri

Tek boyutlu bir reaktörde reaktör boyunca tür ve sıcaklık değişimi mevcuttur. Alevi çözebilmek için gerekli tür korunum denklemi aşağıdaki gibi yazılır (4). Kaynak terimi tepkimeler sonucu türlerin oluşma hızlarını ifade eder. Bu terimi hesaplamak için GRI 3.0 mekanizması kullanılmıştır. Bunun yanında enerjinin korunumu da çözülür. (5).

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U Y_i)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho D \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right) + w_i \quad (4)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} \right) = - \sum_{k=1}^N h_k \dot{w}_k + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \rho \frac{\partial T}{\partial x} (c_{p,k} Y_k U_k) \quad (5)$$

3. SAYISAL SONUÇLAR

Tek boyutlu simülasyonlar için sonuçların elde edilmesinde kullanılan parametre uzayı Tablo 1'de verilmiştir. Sıfır boyutlu alevler için ise benzetimler sadece P=1 atm basınçta 0.5 ms ila 4 ms arasında değişen kalma sürelerinde ve sadece fakir alevler için yapılmıştır. Eşdeğerlilik katsayısının modülasyon genliği ise ortalama değer %50'sine kadar çıkmaktadır.

3.1. Sıfır Boyutlu Alev Benzetimleri

Termo-akustik instabilite denilen alev kararsızlığının yanma üzerinde önemli etkileri vardır. Enjektör hizasından geçen hava debisi termo-akustik instabilite tarafından modüle

edilmektedir ki bu eşdeğerlilik oranında çalkantılara yol açar. Eşdeğerlilik oranındaki çalkantılar akış ile alev kadar taşınır ve burada onu modüle edip ısı açığa çıkışının dalgalanmasına yol açarlar. Bu dalgalanma akustik çalkantılara yol açar. İkisi arasındaki faz açısı reaktörün stabilitesini belirler. Burada amaç geri bildirim mekanizmasını incelemek değildir. İncelenen olgu bu çalkantıların NO emisyonlarını nasıl etkilediğidir. Bazı deneysel çalışmalarda artan instabilite genliği ile artan NO emisyon değerleri bulunmuştur (Tuncer vd., 2009). Amaç bu gözlemlerin teorik senaryolarla uyum içerisinde olup olmadığının incelenmesidir.

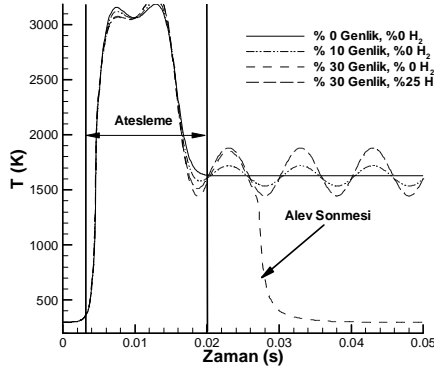
Tablo 1. Benzetim Yapılan Parametre Uzayı

Parametre	Alt Değer	Arttırım Aralığı	Üst Değer
H ₂ Hacimsel Oranı (α)	0.00	0.05	1.00
Eşdeğerlilik Katsayısı (ϕ)	0.50	0.05	1.50
Basınç (P)	1.0 atm	0.5 atm	3.0 atm

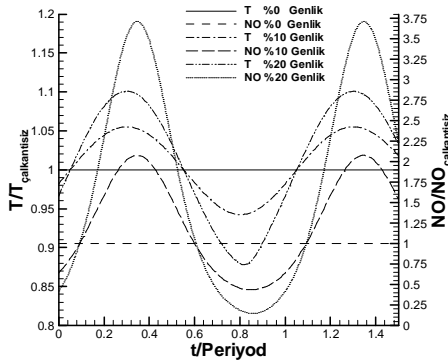
Şekil 1'de ateşleme ve bunun ardından eşdeğerlilik oranındaki çalkantıya bağlı olarak sıcaklık değişimleri gösterilmektedir. Genlik arttıkça sıcaklık salınımlarının büyüklüğü de artmaktadır. Sıcaklık çalkantıları hemen takip etmektedir. Metan alevi çalkantı genliği %30'u bulduğu zaman aniden söner. Bu ve benzer durumlar gerçek gaz türbin yakıcılarında da görülmektedir. Alevin sönmeye yol açan sebep eşdeğerlilik oranının anlık olarak ateşleme limitlerinin altına düşmesidir. Buna karşılık ise aynı genlikte çalkantıya %75 CH₄-%25 H₂ alevi sorunsuz biçimde dayanmaktadır. Bunun ardında yatansa H₂ zenginleştirmenin fakir alev alma sınırını genişlettiğidir.

Şekil 2'de yine fazla hava katsayısındaki çalkantılar üzerinde durulmuştur. Bu sefer sıcaklığın yanında NO emisyonları da gösterilmiştir. Sıcaklık ve emisyon değerleri çalkantısız değerleri ile bölünmüştür. Burada üzerinde durulacak son derece önemli olan husus şudur; grafikte de görülmektedir ki %10 ve %20 genliklerde sıcaklık eğrisi hep 1.0 etrafında salınmakta yani bir başka deyişle sıcaklığın zaman ortalama değeri çalkantı ile değişiklik göstermemekte, fakat buna karşılık emisyon değerlerinin zaman ortalaması değerleri çalkantısız duruma göre daha yukarıda değerler arasında salınmaktadır. Eşdeğerlilik katsayısındaki çalkantılar azot oksit emisyonlarının miktarını arttırmaktadır. Buna getirebilecek açıklama sıcaklıkla NO oluşum hızı arasında doğrusal olmayan bir ilişki olduğudur. Sıcaklık düştüğü zaman NO üretimi azalmaktadır fakat sıcaklık arttığında NO üretimi iyiden iyiye artmakta ve ortalama NO değeri bu sebepten ötürü çalkantısız durumundakinden daha yüksek olmaktadır.

Şekil 3'te sıcaklık-NO ilişkisini gösteren faz diyagramları verilmiştir. Görülmektedir ki sıcaklık arttıkça NO miktarı üstel artmaktadır. Genlik arttıkça salınımların faz düzleminde yaptıkları gezinti de artar. Grafikten emisyonların ortalama değerleri hakkında bir kanıya varılabilir. Artan instabilite genliği NO emisyonlarında artışa yol açmaktadır. Bu gözlem Tuncer vd. (2009) ile de uyumludur.



Şekil 1. Hidrojen Zenginleştirilmenin Alev Kararlılığına Etkisi ($\bar{\phi}=0.7$, $\tau=0.5$ msec, $f=100$ Hz.)



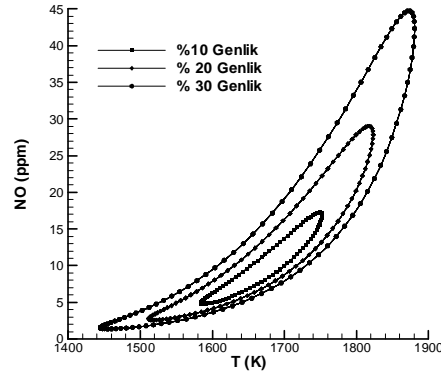
Şekil 2. Çalkantının Sıcaklık ve Emisyonlara Etkisi ($\bar{\phi}=0.7$, %75 CH₄ - %25 H₂, $\tau=0.5$ msec)

3.2 Tek Boyutlu Alev Benzetimleri

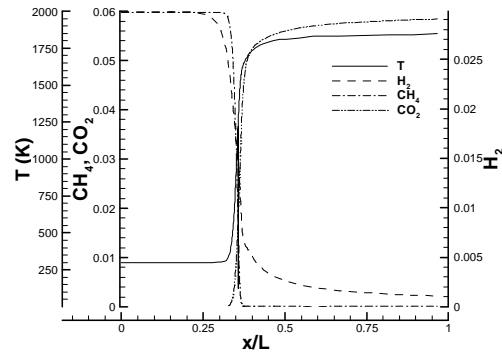
Şekil 4'te tek boyutlu reaktörde sıcaklık ve bazı türlerin konsantrasyon değişimleri gösterilmiştir. Metan ile hidrojenin alev boyunca yolu izlendiğinde eşdeğerlilik katsayısı konusunda yapılan varsayımın haklılığı görülecektir.

Şekil 5'te adiabatik alev sıcaklıkları gösterilmiştir. H₂ oranı arttıkça alev sıcaklığı da artar ki bu hidrojenin daha yüksek ısıl değere sahip olmasındandır. Bu sıcaklık değerleri alev hızları ile ve emisyon değerleri ile ilişkilendirilecektir.

Şekil 6'da CH₄/H₂ karışımlarının alev hızları gösterilmiştir. Şekil 6a atmosferik basıçtaki alev



Şekil 3. Sıcaklık-NO Faz Diyagramı ($\bar{\phi}=0.7$, %100 CH₄, $\tau=0.5$ msec)



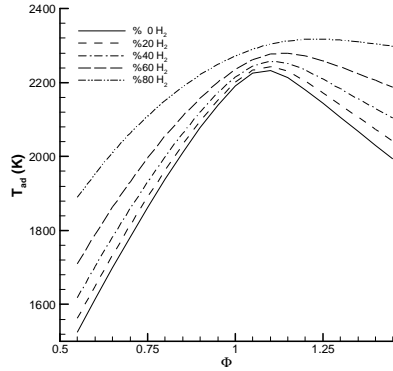
Şekil 4. Reaktör Boyunca Sıcaklık ve Konsantrasyon Değişimi ($\phi=1$, %70 CH₄-%30 H₂)

hızlarının gösterirken Şekil 6b üç atmosfer basıncındaki alev hızlarını gösterir. Şekil 6'da sembollerle gösterilen alev hızları GRI 3.0 mekanizmasından elde edilmiştir. Çizgilerle gösterilenler ise bulunan empirik korelasyondan (6) elde edilmiştir. Burada n basınca bağlı bir sabit olup 1 atm için 0.15 3 atm için ise 0.80 olarak bulunur. Bu detaylı kimyanın çözümlenmesi ile elde edilenlere oldukça yakındır. Fakir alevler için uyumlu sonuçlar vermesi önemlidir, çünkü NO emisyonlarını azaltmak için fakir yakma uygulanır.

$$S_L = \left[\left(\frac{S_{L,st,H2} - S_{L,st,CH4}}{T_{ad} - T_{ad,CH4}} \right)^{1.4+n\alpha} + S_{L,st,CH4} \right] \exp \left[\left(\frac{T_{ad} - T_{ad,st}}{T_{ad}} \right)^4 \right] \quad (6)$$

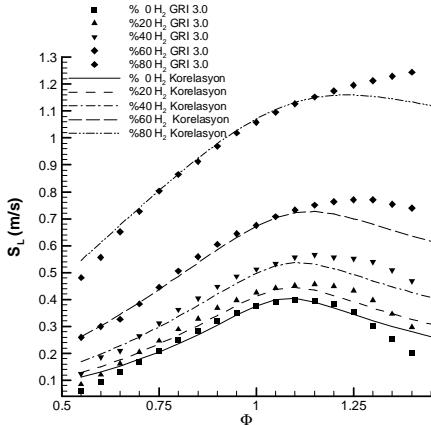
Şekil 7'de hidrojen zenginleştirilmenin NO emisyonlarına etkisi gösterilmektedir. Şekil 7.a ile Şekil 7.b'de görülmektedir ki H₂ ilavesi NO emisyonlarını arttırmaktadır. Fakir alevlerde NO emisyonları ile sıcaklık arasında birbir ilişki mevcuttur. NO oluşum mekanizmalarından bahsedilirken H₂ zenginleştirilmenin iki mekanizma üzerinde etkili olabileceği anlaşılmıştır. Baskın NO

oluşum mekanizmasının Zeldovich mekanizması olduğu anlaşılmaktadır. Fenimore mekanizmasının katkısı önemli olmamakla beraber alev sıcaklığı düşüğe görece önemli kısmen artmaktadır. Isıl NO miktarını kontrol etmenin yolu alevi fakir yakmaktır.

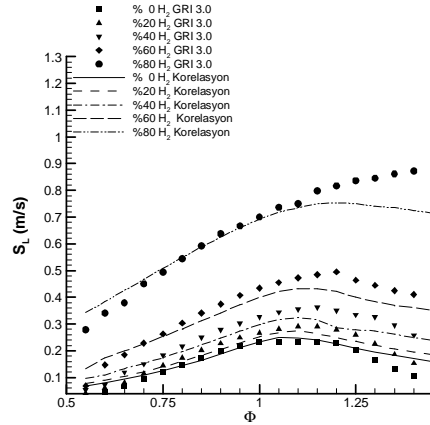


Şekil 5. Adiyabatik Alev Sıcaklıkları

Üç atmosfer basınçta emisyonlar atmosferik basınca göre önemli artış göstermektedirler. Hidrojen zenginleştirmenin NO emisyonları açısından iki ters yönlü etkisi vardır. Zenginleştirme alev sıcaklığını arttırdığı için NO emisyonlarını arttıracakı söylenebilir. Fakat

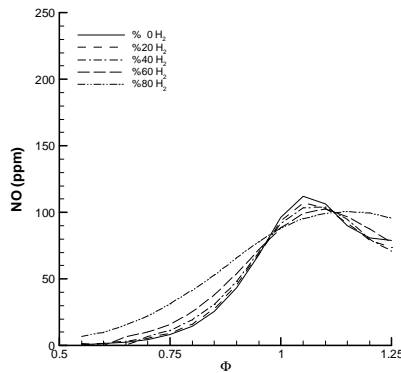


a. P=1 atm.

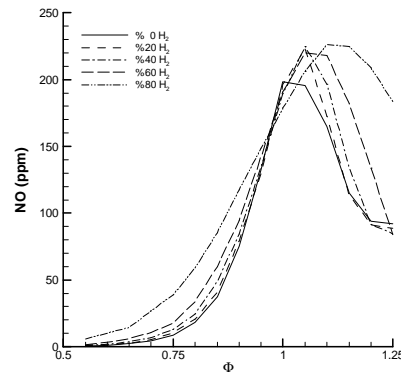


b. P=3 atm.

Şekil 6. Hidrojen Zenginleştirmenin Laminar Alev Hızına Etkisi (Semboller GRI 3.0, Çizgiler Korelasyon)



a. P=1 atm.



b. P=3 atm.

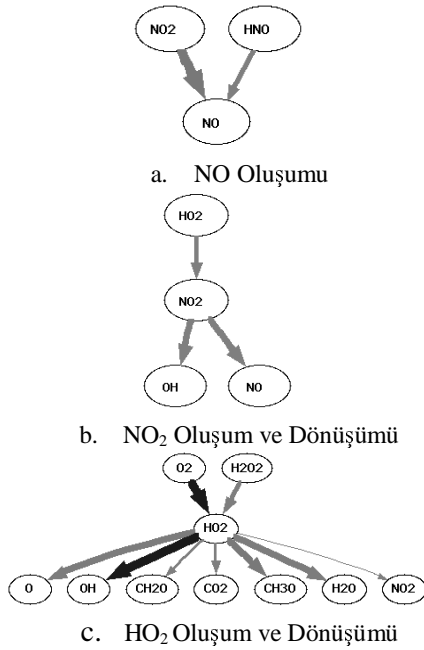
Şekil 7. Azot Oksit Emisyonlarına Hidrojen Zenginleştirmenin Etkisi

zenginleştirme fakir alev alma sınırını düşürdüğü için çok daha fakir karışımların yanmasına olanak sağlamaktadır ki bu da alev sıcaklığını düşüreceğinden emisyonları azaltılabilecektir.

3.2 Emisyonların Kimyasal Oluşum Yolları

Şekil 8.a'da görüldüğü gibi NO oluşumuna katkıda bulunana iki ana tür NO₂ ve HNO'dur. Büyük katkının NO₂'den gelir. Bir adım geri gidip NO₂'nin kaynağını araştırmak gerekir. Şekil 8.b'de görüleceği üzere NO₂, HO₂'nin havadaki N₂ ile tepkimesinden oluşmakta ve ayrışırken de hemen hemen eşit miktarlarda OH ve NO ürünleri vermektedir. Şekil 8.c'de görüleceği gibi HO₂ temel olarak OH ve suya dönüşmekle birlikte eser miktarda NO₂ oluşumuna da yol açar ki bu tür daha sonra çoğunlukla azot okside dönüşür.

İncelenen NO_x oluşum mekanizması genişletilmiş Zeldovich mekanizması ile uyum göstermektedir. Kimyasal tepkimelerdeki uyum ve NO emisyonlarının sıcaklıkla ilişkisi baskın oluşum yolunun ısıl yol olduğunu ispatlar niteliktedir.



Şekil 8. NO Oluşumu Tepkime Yolları

4.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada hidrojen zenginleştirmenin metanın laminer alev hızına ve emisyonlara etkisi incelenmiştir. İstabiliteye bağlı eşdeğerlilik katsayısında oluşan çalkantıların bilhassa azot oksit emisyonlarına etkisi üzerinde durulmuştur. Bu çalkantıların NO emisyonlarının zaman ortalaması değerini arttırdığı bulunmuştur. Bu artış sıcaklık ve NO arasındaki doğrusal olmayan ilişki neticesinde açıklanabilir.

Hidrojen zenginleştirmeden kaynaklı alev hızındaki artışın miktarı hidrojen yüzdesi ile doğrusal olmayan bir şekilde ilişkilidir. Hesabı kolaylaştıracak bir bağıntı geliştirilmiş ve bundan elde edilen neticelerin detaylı kimyasal kinetik hesaplardan elde edilenlerle uyumlu olduğu görülmüştür. Basıncın alev hızına etkisi de hidrojen oranına bağlıdır. Basınç alev hızını düşürmektedir fakat saf metan alevi ile hidrojen zengin alev arasındaki düşüş oranı farklılık göstermektedir. Basınç NO emisyonlarını arttırır.

Hidrojenle zenginleştirilmiş alevler yüksek genlikli instabiliteden kaynaklanan eşdeğerlilik katsayısı çalkantılarına daha dayanıklıdır.

5.KAYNAKLAR

Davu, D., Franco, R., Choudhuri, A., Lewis, A.,

“Investigation on Flashback Propensity of Syngas Premixed Flames”, AIAA Paper No: 2005-3585, 2005.

Ducruix, S., Schuller, T., Durox, D., Candel, S., “Combustion Instability Mechanisms in Premixed Combustors”, Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines, AIAA Press: Reston, VA, 2005.

Goodwin, D.G., Cantera, <http://www.cantera.org>, 2001-2005.

Hindmarsh, A.C., Brown, P.N., Grant, K. E., Lee, S. L., Serban, R., Shumaker, D. E., Woodward, C.S., “SUNDIALS: Suite of Nonlinear and Differential/Algebraic Equation Solvers”, *ACM Transactions on Mathematical Software*, 31, 363-396, 2005.

Huth, M., Vortmeyer, N., Schetter, B., Karg, J., “Siemens Gas Turbine Operating Experience with Coal Gas in the IGCC”, *Power-Gen Europe*, 1998.

Lieuwen, T., McDonell, V., Santavicca, D., Sattelmayer, T., “Burner Development and Operability Issues Related with Steady Flowing Syngas Combustors”, *Combustion Science and Technology*, 180, 1167-1190, 2008.

Moliere, M., “Benefiting from the Wide Fuel Capability of Gas Turbines: A Review of Application Opportunities”, ASME Paper No. GT-2002-30017, 2002.

Tuncer, O., Acharya, S., Uhm, J. H., “Dynamics NO_x Flashback Characteristics of Confined Premixed Hydrogen Enriched Flames”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 496-506, 2009.

Wohl, K., “Quenching, Flash-Back, Blow-Off Theory and Experiment”, 4th Symposium (International) on Combustion, 69-89, 1952.

Yoshi, M. M., Lee, S., “Integrated Gasification Combined Cycle – A Review of IGCC Technology”, *Energy Sources Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 18, 537-568, 1996.

Yu, G., Law, C.K., Wu C.K., “Laminar Flame Speeds of Hydrocarbon Plus Air Mixtures with Hydrogen Addition”, *Combustion and Flame*, 63, 339-347, 1986.