



## HİDROJENLE ZENGİNLEŞTİRİLMİŞ METAN YAKITININ ALEV HIZLARI VE EMİSYON DEĞERLERİNİN KİMYASAL KİNETİK ANALİZİ

Önur TUNÇER

İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Uçak Mühendisliği Bölümü  
Maslak, İstanbul 34469, tuncero@itu.edu.tr

(Geliş Tarihi: 19. 02. 2009, Kabul Tarihi: 20. 04. 2009)

**Özet:** IGCC teknolojisinin yaygınlaşması ile beraber, sentez gazı gibi yakıtların gaz türbinlerinde ön karışımli olarak yakılabilmesi için gerekli teknolojilerin geliştirilmesi önem kazanmıştır. Sentez gazı yakıtları kömür yahut biyokütlenin gazifiye edilmesi ile elde edilirler ve bileşimlerinde temel olarak değişken oranlarda H<sub>2</sub>/CO/H<sub>2</sub>O molekülleri mevcuttur. Mevcut güç üretim amaçlı gaz türbinlerinin yanma odaları doğal gaza göre tasarlanmıştır. Ne var ki sentez gazını, ki bu gazın önemli bileşeni hidrojen, sorunsuz biçimde ön karışımli olarak yakacak bir teknolojiye ihtiyaç vardır. Özellikle karışımındaki hidrojenin alev hızının çok yüksek oluşu alev tutmada sorunlara yol açmakta, geri tepme gibi olumsuzluklara neden olabilmektedir. Bu bağlamda hidrojen zengin metan yakıtının laminer alev hızları GRI 3.0 mekanizmasına dayanan kimyasal kinetik simülasyonlar ile incelenmiştir. Hidrojen zenginleştirmenin beklenildiği gibi alev hızlarını arttırdığı saptanmıştır. Alev hızlarının kolay hesaplanabilmesi için ampirik bir korelasyon geliştirilmiştir. Alev hızlarına ve emisyonlara hidrojen oranının ve basıncın etkisi incelenmiştir. Artan basıncın alev hızlarını düşürdüğü, buna karşılık ise emisyonları arttırdığı bulunmuştur. Emisyonlar ve alev hızları ise artan hidrojen oranı ile beraber artmaktadır. Tek ve sıfır boyutlu simülasyonlar üzerinde durulmuştur. Sıfır boyutlu simülasyonlarda üzerinde durulan husus termo-akustik instabilite neticesinde ortaya çıkan eşdeğerlilik katsayısı çalkantılarının fakir alev sönmesi ile emisyonlara olan etkisidir. Hidrojence zengin karışımların eşdeğerlilik oranı çalkantılarına daha dayanıklı oldukları görülmüştür. Bir diğer gözlem bu çalkantıların azot oksit emisyonlarını artırıcı yönde etki ettiğidir. Hidrojen zenginleştirilmiş metan alevlerinde azot oksit oluşumunda temel rolü genişletilmiş Zeldovich mekanizmasının oynadığı saptanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Hidrojen Zenginleştirme, Alev hızı, Emisyonlar, Sentez gazı, Metan.

### FLAME SPEED OF HYDROGEN ENRICHED METHANE FUEL AND CHEMICAL KINETIC ANALYSIS OF EMISSIONS

**Abstract:** With the proliferation of IGCC technology development of necessary technologies for the premixed combustion of syngas have gained importance. Syngas fuels are obtained via the gasification of coal or bio-mass and have varying proportions of H<sub>2</sub>/CO/H<sub>2</sub>O molecules. Present power generation systems have their combustors designed to burn natural gas. Nevertheless, there exists a need to burn hydrogen, main constituent of syngas, in a problem free fashion. Especially high flame speeds of hydrogen within the mixture lead to problems in flame holding and might yield flashback. Within this context, laminar flame speeds of hydrogen enriched methane mixtures were investigated utilizing detailed chemical kinetics simulations based on GRI 3.0 mechanism. As expected it has been found that hydrogen enrichment increases flame speeds. An empirical correlation was developed to aid in practical computation of flame speeds. Effect of hydrogen enrichment on flame speeds and emissions were investigated. It was found that, increasing pressure reduces flame speeds, while it increases emissions to the contrary. Emissions and flame speeds both increase with increasing hydrogen content. One and zero dimensional simulations were emphasized. In zero dimensional simulations focus was on the effect of equivalence ratio fluctuations due to thermo-acoustic oscillations on lean blowout and emissions. Mixtures with rich hydrogen content were observed to be more immune to equivalence ratio fluctuations. Another observation is that these very fluctuations have an increasing effect on nitric oxide emissions. It has been found out that the extended Zeldovich mechanism plays the key role in the production of nitric oxide emissions in hydrogen enriched methane flames.

**Keywords:** Hydrogen Enrichment, Flame Speed, Emissions, Syngas, Methane.

#### SEMBOLLER

		C <sub>CH4</sub>	Metan konstantrasyonu
		C <sub>H2</sub>	Hidrojen konsantrasyonu
(C <sub>CH4</sub> /C <sub>HAVA</sub> ) <sub>st</sub>	Stokiyometrik karışımındaki metan/hava oranı	C <sub>HAVA</sub>	Hava konstantrasyonu
		c <sub>p</sub>	Sabit basınçtaki ısı kapasitesi [J/(kg.K)]
(C <sub>H2</sub> /C <sub>HAVA</sub> ) <sub>st</sub>	Stokiyometrik karışımındaki hidrojen/hava oranı	D	Diffüzyon hızı [m <sup>2</sup> /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]
Q	Reaktörden dışarıya ısı geçişi [W]
S	Burgu katsayısı
$S_L$	Laminer alev hızı [m/s]
$S_{L,st}$	Stokiometrik alev hızı [m/s]
$S_{L,st,CH4}$	Saf metanın stokiometrik alev hızı [m/s]
$S_{L,st,H2}$	Saf hidrojenin stokiometrik alev hızı [m/s]
t	Zaman [s]
T	Sıcaklık [K]
$T_{ad}$	Adyabatik alev sıcaklığı [K]
$T_{ad,CH4}$	Stokiometrik hidrojen alevinin adyabatik sıcaklığı [K]
$T_{ad,H2}$	Stokiometrik hidrojen alevinin adyabatik sıcaklığı [K]
U	Akışkan hızı [m/s]
$u_{giriş}$	Akışkanın giriş hızı [m/s]
V	Reaktör hacmi [m <sup>3</sup> ]
w	Türlerin kimyasal oluşum kaynak terimi [kg/(m <sup>3</sup> s)]
$\dot{w}$	Türlerin kimyasal oluşum kaynak terimi [mol/(m <sup>3</sup> s)]
x	Uzay koordinatı [m]
$x_i$	Çözüm noktası koordinatı [m]
Y	Kütle oranı
Y*	Reaktör girişindeki kütle oranı

### Yunan Harfleri

$\mu$	Moleküler ağırlık [kg/mol]
$\alpha$	Yakıttaki hidrojenin hacimsel oranı
$\lambda$	Isı iletim katsayısı [W/m.K]
$\rho$	Yoğunluk [kg/m <sup>3</sup> ]
$\tau$	Kalma süresi [s]
$\Phi$	Eşdeğerlilik katsayısı [Gerçek yakıt/hava oranının stokiometrik yakıt/hava oranına oranı]

### 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 önemli bir ivme kazanmıştır. Kömür gazifikasyon teknolojisi ile kombine çevrim santraller birleştirildiğinde ortaya çıkan IGCC ( Integrated Gasified Combined Cycle) teknolojisi doğası gereği içerisinde gaz temizlemesi ve atık minimizasyonu gibi özellikleri bünyesinde barındırmaktaydı ki bu özellikler onu çevreye duyarlılığından dolayı tercih edilir konuma soktu. Sistemin ticari boyuttaki uygulamaları açığa çıkan sera gazı ve partikül emisyonlarının ABD federal yasalarının gerektirdiğinin çok altında olduğunu gözler önüne

sermiştir. IGCC teknolojisi güç santralinin aşama aşama kurulmasına da olanak tanıdığı ve yeni yakıtlarla (doğal gaz, fuel oil gibi) da beslenmesine elverdiği için gereken ekonomik yeterliliğe fazlasıyla sahiptir. IGCC teknolojisi gelişerek verimi arttırmaya emisyonları daha da azaltmaya devam ederek 21. Yüzyılın önemli bir teknolojisi olmaya devam edecektir (Yoshi ve Lee, 1996).

Sentez gazı temiz bir enerji kaynağı olup temelde muhteviyatındaki hidrojen ve karbon monoksidin ve daha düşük oranlarda diğer cins gazların değişken oranlarda karışmasından oluşur. Sentez gazı kömürün yahut biyo-kütlenin gazifiye edilmesiyle elde edilir. Gazifikasyon prosesine (basınç ve sıcaklık) ve hangi katının (kömür yahut biyo-kütle) gazifiye edildiğine bağlı olarak sentez gazı bileşiminde önemli değişimler olur (Smooth ve Smith, 1985). Moliere'in 2002 yılında yaptığı bir çalışma göstermiştir ki sentez gazı içerisindeki hacimsel H<sub>2</sub>/CO oranı %0,33 ten % 40'a kadar, seyreltici gazların (N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, Ar, v.b.) oranı %4 ila %51 arasında, su oranı ise %0 ila %40 arasında değişkenlik gösterir.

Sentez gazı karışımının değişkenliği alev davranışını büyük ölçüde etkiler. Dolayısıyla alev davranışının değişik karışım oranlarında karakterizasyonu önemli ve öncelikli bir işittir. Örneğin, yakıttaki hidrojen miktarının artırılması fakir yanmada alev stabilitesini arttıracak gibi aynı anda yanma odasını alev-geri tepmesi ve termo-akustik instabiliteye maruz bırakabilecektir. Ek olarak artan sıcaklıklara bağlı olarak azot oksit emisyonlarının da artması beklenmelidir. Bir diğer açıdan bakıldığında ise karışımdaki karbon monoksit oranının artırılması alev stabilitesini olumsuz yönde etkileyecektir. Sentez gazında normalde az miktarda bulunan hidrojen sülfürün ise miktarındaki ufak bir oynama bile kirlenici emisyon miktarını önemli miktarda etkileyebilmektedir. Sonuç olarak, fazla bir tasarım değişikliğine gerek duymadan değişken karışımli sentez gazlarını yakabilecek bir yakıcıya ihtiyaç duyulmaktadır (Calvetti vd., 2001). Mevcut nesil ön karışımli yakıcılar sentez gazını güvenilir bir şekilde yakamazlar. Bu sebepledir ki sentez gazı mevcut türbinlerde ön karışımli olarak özel yakıcı tasarımları vasıtasıyla kullanılırlar ki bu yakıcıların tasarımları doğal gaz yakıcılarından oldukça farklıdır (Huth vd., 1998). Eğer düşük NO<sub>x</sub> emisyonlu yakıcılara gerek duyuluyorsa bu durumda en yüksek alev sıcaklığı büyük miktarlarda su ve/veya nitrojen kullanılıp yakıtı seyrelterek düşürülür. Sentez gazını büyük endüstriyel türbinlerde ön karışımli olarak yakmak ve 25 ppm'den az NO<sub>x</sub> (@ %15 O<sub>2</sub>) elde etmek için yakıtı 7500 MJ/kg yahut daha düşük alt ısıl değere kadar seyreltmek gerekir (Döbbeling vd., 1996). Ön karışım yakıt seyreltmeye kıyasla bir çok avantaja sahip olmasına rağmen doğal gaz yakıcılarında yakıt esnekliğini sağlama çabaları ancak belirli ölçüde 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; Tomczak vd., 2002). Alev kendi hızı akışkan hızından yüksek olduğu zaman geri teper. Alev geri tepmesi özel tasarımı alev tutucular kullanılarak yahut sentez gazını ayrı bir düzenekle yanma odasına doğrudan enjekte edilerek (difüzyon alevi) önlenir. Doğal gazdan tercih edilen yakıt olan sentez gazına dönüşümü sorunsuz olarak sağlamak için mevcut tasarımlarda en az değişikliğe gitmek gereklidir.

Alev geri tepmesi üzerinde daha önce de birçok kereler durulmuş bir konu olmasına rağmen buradaki özel öneminden dolayı (güvenlik sebepleri ile) muhakkak incelenmesi gereken bir husustur. Bu bağlamda alev geri tepmesine yol açan dört değişik mekanizmadan bahsedilebilir; çekirdek akış içerisinde türbülanslı alevin nüfuz etmesi, yanma instabilitelerinden kaynaklanan alev geri tepmesi, sınır tabaka içerisinde geri tepme ve son olarak ta girdap kopmasına bağlı alev geri tepmesi (Thibaut ve Candel, 1998; Kiesewetter vd., 2003; Tuncer vd., 2007). Bunlardan ilk üçü hem burju ile stabilize edilmiş hem de burju ile stabilize edilmemiş ön karışımı yakıcılarda ortaya çıkabilir fakat en sonuncusu ön karışım bölgesinde burgulu bir akışa ihtiyaç duyar. Bütün bunlara ek olarak yakıt kompozisyonu bütün bu mekanizmaları çok değişik yollardan etki eder.

İyi tasarlanmış bir yanma odasında yüksek aksel akış hızları sayesinde alevin geriye doğru ilerlemesi engellenir. Eğer ki akış hızı türbülanslı alev hızından daha düşük olursa alev o zaman geriye doğru yol alabilir. Eğer ki bir akış çizgisi boyunca türbülanslı alev hızı akış hızını geçiyorsa o akış çizgisi boyunca alev geriye (yani ön karışım bölgesine doğru) gider (Plee ve Mellor, 1978). Bu da tasarım esnasında akış alanında hız eksikliğine yol açmayacak seçimler yapılmasını ve bu sayede aksel hızların alev hızından çok daha yukarıda tutulmasını gerektirir. Tipik gaz türbin yakıcılarında basınç düşüşü yaklaşık %2-3 civarında ve mutlak hızlar ise genellikle 90-120 m/s aralığındadırlar. Eğer akışta kuvvetli burju varsa aynı basınç düşüşü değeri için aksel hız 65 ila 85 m/s civarındadır (Lieuwen vd., 2008). Doğal gaz yakan sistemlerde kullanılan kuvvetli burguya sahip yakıcılarda türbülans yoğunluğu ana akışın yaklaşık %10-15'ine tekabül eder. Bu da 9 ila 18 m/s'lik hız çalkantısına karşılık gelir. Yinelemek gerekirse lüle tasarım kriteri aksel hızın mümkün olduğu kadar çok olduğu ve yerel hız düşüşlerinin olmadığı bir tasarımdır. Bu kriter sadece ön karıştırıcı çıkışında değil ön karıştırıcı içerisindeki her yerde önemlidir. Burju vanasının hemen sonrasında hafif konik akışı ivmelendiren tasarımlar bu sebeple tercih görür (Lieuwen vd, 2008). Fakat dikkat edilmesi gereken akışta aşırı ivmelenme olması durumunda olası bir kompresör dalgalanması sırasında alev stabilizasyonu yakıt enjeksiyonu noktasına doğru kayabilir.

Yüksek hidrojen yüzdeli sentez gazı alevlerinin laminar ilerleme hızları doğal gazinkinden oldukça fazladır.

Lipatnikov ve Chomiak 2005 yılında yaptıkları bir araştırmada, türbülanslı alev hızının yakıt kompozisyonuna bağlı olduğunu göstermişlerdir. Dolayısıyla sentez gazı ile benzer laminar alev hızına sahip karışımlar arasında bir karşılaştırma yapılması söz konusu olamaz. Şöyle ki Kido ve arkadaşları (2002) değişik  $H_2$ ,  $CH_4$  ve  $C_3H_8$  alevlerinin türbülanslı akış hızlarını ölçmüşlerdir, ve bulmuşlardır ki aynı laminar alev hızına sahip olan iki farklı karışım arasında türbülanslı alev hızı 10 kata kadar fark gösterebilmektedir. Bu önemli bir sonuçtur ve altında yatan gerçekler henüz tam olarak açıklığa kavuşturulamamıştır.

İkinci mekanizma yanma instabilitelerine dayalı olarak ortaya çıkar. Yüksek çalkantı düzeylerinde yakıcı içerisindeki hız alanı da modüle edilmiş olur. Bu çalkantı akış hızının periyodik olarak ortalama değerinin altına düşmesine ve büyük ölçekli girdapların oluşmasına yol açar. Eğer frekans gerektiği kadar düşükse alev geriye doğru sirayet edecektir (Lieuwen vd, 2008). Bu mekanizma her ne kadar yakıt bileşimine kayıtsızmış gibi görünse de çalkantının etkili olmaya başladığı nokta ilk mekanizmada etkili olana benzerlik gösterir ve dolayısıyla yakıt kompozisyonuna bağlıdır. Yanma çalkantıları bir çok durumda aksel akışın instabilite çevrimi süresince anlık olarak ters dönmeye yol açabilecek kadar kuvvetli olabilirler. Tuncer (2006) doğrusal yanma sistemi akustığının, doğrusal olmayan ısı açığa çıkışı ile (yakıtın tükenmesi nedeniyle) arasındaki geri besleme mekanizmasını birleştirip ortaya çıkan limit çevrimi salınımlarının alev ile etkileşimini G-denklemleri vasıtasıyla modellemiş ve yanma çalkantılarına dayalı geri tepmenin sayısal benzetimini gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada akustik dalga gerçeğe uygun olarak tek boyutlu olarak kabul edilmiş alevin ise kama şeklinde olduğu varsayımı yapılmıştır. Ortaya konan sonuçlar deneysel trendler ile benzerlik arz etmekte ve bu tip bir geri tepmenin yüksek alev hızlarında önemli olduğunu göstermiştir. Bir diğer husus ise deneysel çalışmalarda gözlenen hidrojen zengin alevlerin daha yüksek genlikli yanma çalkantılarına sebep olduğudur. Deneyler sırasında artan hidrojen yüzdesi ile yanma çalkantılarının ortalama karekök genliği arasında pozitif ilişki gözlemlenmiştir (Tuncer, 2006).

Sınır tabaka içerisinde alev geri tepmesi üzerinde çokça çalışılmış bir konudur (Lewis ve von Elbe, 1987; Putnam ve Jensen, 1989) laminar sentez gazı yakan Bunsen alevlerinde sınır tabaka içerisinde geri tepme Davu ve arkadaşları (2005) tarafından ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Duvara yakın bölgelerde düşük hızlar, sınır tabaka türbülansı gibi etkiler alevin akış yönünün tersine doğru taşınmasını kolaylaştırırlar. Bu etkiler duvardaki ısı kaybı dolayısıyla alevin soğutulması ve gerilmesi gibi ters yönlü etkilerle rekabet halindedirler. Laminar alevlerde alev geri tepmesi sınırı duvardaki hız gradyenti ile ilintili olduğundan geçişte "kritik hız gradyenti" gibi bir kavram ortaya atılmıştır. Laminar alev hızındaki bir değişimin kritik hız gradyenti üzerinde önemli etkisi vardır. Dolayısıyla sınır tabaka

içerisinde alev geri tepmesi ile ilgili kaygılar sentez gazı için doğal gaza kıyasla çok daha önemlidir. Kritik hız gradyentinin türbülanslı sınır tabakalarda laminer sınır tabakalara kıyasla daha büyük olup olmadığı söndürme mesafesinin laminer alt tabaka kalınlığına oranı ile ilgilidir (Lewis ve von Elbe, 1987, Schafer vd., 2005). Eğer söndürme mesafesi daha kısaysa durum laminer duruma benzerlik gösterir. Bunun karşıtı olan durum ise henüz literatürde yeterince incelenmemiştir. Uygun aero-dinamiğe sahip yakıcı tasarımlarının alev geri tepmesini engellemek için gerekenden çok daha büyük hız gradyentlerine sahip olduğu düşünöldüğünde durumun önem arz etmediğı zannedilebilir fakat yine de yüksek hidrojen yüzdeli yakıtlar için kesin bir çıkarımda bulunmak mümkün değildir. Bazı türbin motorlarında doğal gazın sınır tabaka içerisinde geri tepmesini engellemek için ön karıştırıcı duvarından içeriye doğru efüzyon tekniğı ile çok az miktarda hava üflenir. Bu tekniğın doğal gaz için etkili olduğu kanıtlanmıştır fakat hidrojen içeren bir yakıt için, karışımı fakir alev alma limitinin altına seyreltip seyreltemeyeceğinin araştırılması gereklidir. Sınır tabakanın olabildiğince ince tutulması sentez gazı yakıtları için olmazsa olmaz bir tasarım kriteridir. Bunun yanı sıra karışım bölgesinde yerel akış ayrışmalarının engellenmesi de gerekmektedir.

Bu dördüncü geri tepme mekanizmasında ısı açığa çıkışının burgulu akışla etkileşimi sonucunda girdap kopması için gereken şartlarda bir takım değışimler olur (Kröner vd., 2007). Gaz türbin yakıcılarında burğu ile stabilizasyon kullanıldığı için bu mekanizma sentez gazı yakan sistemler ile önemli bir şekilde ilintilidir. Buna benzer bir mekanizma Umemura ve Tomita tarafından (2001) dönen tüplerde alev ivmelenmesi araştırılarak incelenmiştir. Yanmaya dayalı girdap kopması olarak adlandırılan fenomen silindirik geometri (merkezinde alev tutucu cisim olmayan) ön karışım bir yakıcıda incelenmiş ve yüksek aksenal hızların bulunduğu burgulu akışlarda alev geri tepmesine yol açtığı saptanmıştır (Umemura ve Tomita, 2001). Benzer etkiler merkezinde alev tutucu cisim olan yakıcılarda da gözlemlenmiştir. Bu tip yakıcılarda yeniden sirkülasyon bölgesi merkez cismin ucuna doğru aniden ilerleyerek çembersel bir kabarcık oluşturur. Eğer ki geometrinin sabit olduğu düşünölrse o zaman girdap kopması için gerekli şartlar burğu katsayısına bağılıdır. Düşük burğu katsayıları için ( $S < 0.5$ ) girdap kopması meydana gelmez. Buna karışt olarak yüksek burğu katsayılarında ( $S > 1.0$ ) girdap kopması meydana gelir. Burada ilginç olan altı çizilmesi gereken husus şudur ki bu iki burğu katsayısı arasında kalan alanda (ki tam da bu alan pratik gaz türbin yakıcılarında kullanılan burğu katsayısı aralığına karşılık gelir) histerezis meydana gelir. Bu ara alanda sistem için iki durum da mümkündür. Yani girdap kopması meydana gelebilir de yahut meydana gelmeyebilir de (Wang ve Rusak, 1997; Brown ve Lopez, 1990). Yanma sistemin bir durumdan ötekisine geçmesi için gerekli olan etkiyi yapabilir. Alev girdap kopmasına katkıda bulunduğu zaman hemen ilerisinde düşük yahut negatif hızlı bir bölge meydana getirir ve kopma bölgesinin akışın tersi yönde ön karışım

bölgesine doğru ilerlemesini sağlar. Bu süreç alev geriye doğru teptikçe devam eder. Bu şekilde bir geri tepme olayı türbülanslı alev hızının akışkan hızından çok daha düşük olduğu durumlarda bile meydana gelebilir ki esas tehlikeli olan da budur. Yine bu tip bir alev geri tepmesi daha çok akışkanlar mekaniğı ile ilintili bir durum olduğundan kimyasal kinetik ile bir bağı yoktur (Noble vd., 2006). Kimyasal kinetik etkiler alev geriye doğru teperken sönmeye sırasında önem kazanırlar. Kröner ve arkadaşları (2003) doğal gaz/hidrojen karışımının geri tepme limitlerini incelemişler ve bu limitlerin hidrojen yüzdesi ile kuvvetli bir bağı olduğunu saptamışlardır. Vardıkları sonuç şudur ki gerilmeye dayanıklı alevlerde (ki yüksek hidrojen yüzdeli sentez gazı bu kategoriye girer) girdap kopmasına bağı alev geri tepmesi diğer alevlere göre çok daha önemli bir sorundur. Brumberger vd. (2006) girdap kopmasına bağı alev geri tepmesini en aza indirmek için gerekli tasarım kurallarını incelemişlerdir. Sentez gazı yakan yakıcıların bu kurallara uygun olarak tasarlanması gerekse de bu kurallar girdap kopmasına bağı alev geri tepmesini tamamen engelleyememektedirler.

Emisyonlar söz konusu olduğunda ise ölçümlerin detaylı kimyasal kinetik analizlerle desteklenmesi gerekmektedir. Örnek olarak belirtmek gerekirse azot oksit emisyonlara neden olan üç temel reaksiyon mekanizması mevcuttur (Tuncer, 2006). Bunlar; (1) ani  $NO_x$  (Fenimore mekanizması), (2) yakıtı bağı  $NO_x$  (yakıt moleküllerindeki azot atomlarından kaynaklanan), (3) ısıl  $NO_x$  (Zeldovich mekanizması) olarak sayılabilir. Doğal gaz ve sentez gazında azot atomu olmadığından ikinci mekanizmayı göz önüne almaya gerek yoktur. Bu durumda ani yahut ısıl  $NO_x$ 'ten hangisinin daha baskın olduğunun açığa çıkarılması gereklidir ki bu da kimyasal kinetik bir takım ayrıntılı çözümlenmeleri gerektirir.

Laminer alev hızları üzerinde durulmasının öncelikli sebebi türbülanslı alev hızlarının da çoklukla laminer hızların, karmaşık akış şiddetinin ve alev cephesi eğriliğinin bir fonksiyonu olarak ifade edilebilmesindedir, ki bu etkiler alev hızını arttırıcı yönde etki ederler.

## MATEMATİKSEL MODELLEME

Sayısal çalışmanın ayrıntılarına değinmeden önce kullanılan ikili yakıt karışımına ( $CH_4/H_2$ ) uygun bir eşdeğerlilik katsayısı tanımlanması gereklidir. Elde edilen verilerin doğru bir şekilde yorumlanabilmesi için bu son derece önemlidir. Eşdeğerlilik katsayısı Eşitlik (1)'deki şekliyle hesaplanmaktadır. Bu tanımlamanın arkasındaki varsayım yanmanın basamaklı olduğu şeklindedir, şöyle ki; havadaki oksijen önce yakıt karışımındaki hidrojen tarafından tüketilir (yani hidrojen stokiometrik olarak yakılır) ve kalan oksijen metanın yakılmasında kullanılır. Bu yaklaşım Yu vd. (1986) tarafından ortaya atılmıştır. Deneysel verilerin anlaşılmasında da bu yaklaşımın oldukça uygun olduğu görölmüştür (Tuncer vd., 2009). Arkasındaki fiziksel

varsayım hidrojen yanmasının metan yanmasına göre oldukça daha hızlı oluşudur. Dolayısıyla daha hızlı yanan tür oksijeni öncelikli tüketir. Bütün bunlara ek olarak bu yaklaşımın geçerliliği konusuna tek boyutlu alev benzetimleri sırasında tekrar ele alınacaktır. Sentez gazının bileşiminde içerdiği CO benzer şekilde alev hızını arttıran bir etki yapar, fakat etkisi H<sub>2</sub> kadar kuvvetli değildir. Bu makalede yalnız CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> yakıt karışımları ele alınmıştır. Hidrojenin gazifikasyon dışında kaynaklardan büyük endüstriyel ölçeklerde üretilmesi de üzerinde ayrıca bir çok çalışma mevcuttur.

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

Sayısal çalışmada detaylı kimyanın hesaplanması için GRI 3.0 mekanizması kullanılmıştır. Bu mekanizma 53 tür içerir ve toplam 325 tepkime basamağından oluşur. Tepkime mekanizması azot oksit gibi emisyon oluşum mekanizmaları ile yeniden yanma kimyasını da içerecek kapsamdadır.

### Sıfır Boyutlu Alev Benzetimleri

Sıfır boyutlu olarak tanımlanan reaktör içerisinde uzayda hiçbir sıcaklık değişiminin bulunmadığı bir reaktördür. Bu tür bir senaryo basit olmasına karşın birçok yanma olayına açıklık getirebilmesi sebebiyle önemlidir. Bu tipteki reaktörlerde “kalma süresi”  $\tau$  denilen bir parametre önemlidir. Bu sayı reaktöre girenlerin reaktörde ortalama ne kadar zaman geçirdiklerini belirler. Kalma süresi yeterli değilse yanma tam olarak gerçekleşmez, eğer kalma süresi hepten yetersizse reaktör içerisindeki alev söner. Eğer yine bu süre yeterince olursa rekasyonlar kimyasal denge durumuna kadar ilerleme fırsatı bulurlar. Reaktöre giren akışın kütle debisi  $\dot{m}$ , reaktör hacmi  $V$  ile gösterilirse kalma süresi  $\tau = \rho V / \dot{m}$  şeklinde hesaplanabilir. Burada  $\rho$  reaktördeki gazların ortalama yoğunluğudur. Sıfır boyutlu reaktör literatürde “iyi karıştırılmış” olarak ta isimlendirilir. Bu ismin arkasında yatan da uzayda hiçbir sıcaklık ve tür gradyanının olmamasıdır.

Sıfır boyutlu reaktörü çözmek için reaktör içerisindeki türlerin korunumlarını ve bununla birlikte enerjinin korunumunu hesaplamak gereklidir. Kütle korunum denklemi Eşitlik (2)'deki gibi ifade edilebilir.

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

Enerjinin korunumu denklemi Eşitlik (3) ise sıcaklık cinsinden ifade edilecek olursa kolaylık sağlanmış olur. Hesaplamalar boyunca reaktörün adyabatik olduğu varsayıldığından  $Q=0$  olarak kabul edilmiştir.

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

Eşitlik (3)'de geçen  $c_p$  ısı kapasitesi kütle ağırlıklı ortalaması kullanılarak hesaplanır Eş. (4).

$$c_p = \sum_{i=1}^N Y_i c_{pi} \quad (4)$$

Kütle ve enerji korunum denklemleri beraber çözüldüklerinde toplam 53 tür ve 1 de enerji için olmak üzere toplam 54 adet adi difransiyel denklemin zamana göre integrasyonu gerekmektedir. Kimyasal kaynak terimlerin ve termo-fiziksel özelliklerin hesaplanmasında CANTERA kütüphanelerinden (Goodwin, 2001) faydalanılır. Ortaya çıkan 54 boyutlu adi difransiyel denklem sistemi oldukça kötü koşullandırılmıştır (tepkimelerden bazılarının diğerlerinden çok daha hızlı ilerlemesi nedeniyle). Dolayısıyla sayısal hesaplamalarda özen göstermek gereklidir. Bu sistemin zamanda tümlevini almak için Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) tarafından geliştirilen SUNDIALS kütüphaneleri kullanılır (Hindmarsh vd., 2005). SUNDIALS kütüphaneleri de C++ diliyle yazıldığından CANTERA ile bütünleştirilmesi oldukça sorunsuzdur.

### Tek Boyutlu Alev Benzetimleri

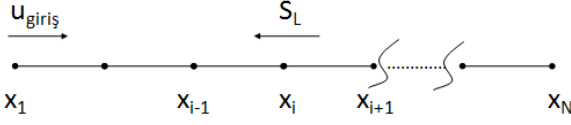
Tek boyutlu bir reaktörde reaktör boyunca tür ve sıcaklık değişimi mevcuttur. Tek boyutlu alevi çözebilmek için gerekli olan tür korunum denklemi Eşitlik (5)'te gösterilmiştir. Bu denklemde sağ tarafındaki son kaynak terimi kimyasal tepkimeler sonucu türlerin net oluşma hızlarını ifade eder. Bu terimi hesaplamak için daha önce de bahsedildiği gibi 325 basamaklı GRI 3.0 mekanizması kullanılmıştır. Bu denklem tepkimeye katılan 53 türün her biri için ayrı ayrı çözülür. Sayısal çözüm Newton-Raphson yöntemi ile iterasyon yapılarak bulunur. Hesaplamada gereken Jacobian matrisi de yine sayısal olarak hesaplanır.

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U Y_i)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho D \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right) + w_i \quad (5)$$

Tür korunum denkleminin yanı sıra bununla aynı anda enerjinin korunumu denklemi de çözülmelidir. Sıcaklıklar Eşitlik (6) sayesinde hesaplanır.

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = - \sum_{k=1}^N h_k \dot{w}_k + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \rho \frac{\partial T}{\partial x} (c_{p,k} Y_k U_k) \quad (6)$$

Basıncı hesaplamak için ise momentumun korunumu yasasından faydalanılabilir. Korunum denklemi Eşitlik (7)'de verilmiştir. Hız ve basınçlardan birisi (giriş yahut çıkış) bilindiğinde, reaktör boyunca basınç, sayısal integral olarak hesaplanabilir.



Şekil 1. Tek Boyutlu Çözüm Ağının Gösterimi

Benzetimler sırasında giriş hızı  $u_{giriş}$ , laminar alev ilerleme hızını  $S_L$  dengeleyecek şekilde ayarlanır ve buna karşılık alev çözüm ağının içerisinde tutulur. Bu ayarlama yapılırken alev cephesinin anlık konumu sıcaklık profilinden yola çıkarak kolaylıkla tahmin edilebilir. Dolayısıyla alev cephesini sabit tutan giriş hızı aynı zamanda alevin de ilerleme hızıdır.

$$u \frac{du}{dx} = -\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} \quad (7)$$

Şekil 1'de tek boyutlu alev için çözüm ağı gösterilmiştir. Çözüm noktalarının birbirine uzaklığı gerçekte şekilde gösterildiği gibi yeknesak değildir. Konstrasyonun yahut sıcaklığın ani değiştiği bölgelerde (alev cephesi gibi) çözüm noktaları benzetim sırasında nokta eklemek yoluyla sıklaştırılır.

## SAYISAL SONUÇLAR

Tek boyutlu alev simülasyonları için sayısal sonuçların elde edilmesinde kullanılan parametreler 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 modüle edildiği durumlarda modülasyon genliği ortalama değerinin %50'sine kadar çıkmaktadır.

Tablo 1. Benzetim Yapılan Parametreler

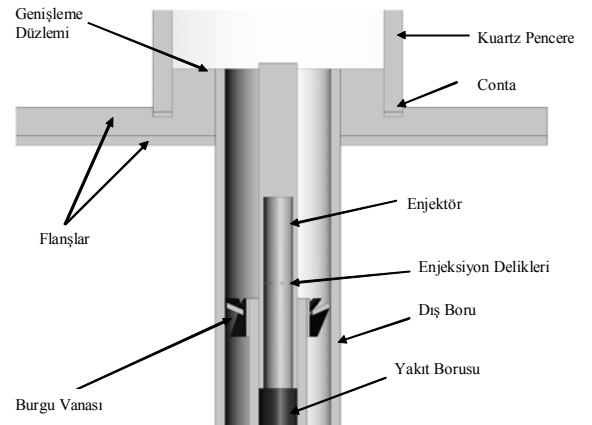
Parametre	Alt Değer	Arttırım Aralığı	Üst Değer
H <sub>2</sub> Hacimsel Oranı ( $\alpha$ )	0.00	0.05	1.00
Eşdeğerlilik Katsayısı ( $\phi$ )	0.50	0.05	1.50
Basınç (P)	1.0 atm	0.5 atm	3.0 atm

## Sıfır Boyutlu Alev Benzetimleri

Şekil 2'de geleneksel bir ön-karışimli yanma odası lülesinin şematik gösterimi verilmiştir. Bu tip bir tasarımda kompresörden gelen yanma havası iç ve dış borular arasında kalan boşluktan yanma odasına doğru ilerlerken akışa dönme bileşeni kazandıracak bir burgu vanasından geçer. Burgu vanasının hemen ardında ise hava içerisinde iç borudan akan yakıt enjektör deliklerinden geçerek enjekte edilir. Yakıt ve hava yanma odasına gelmeden evvel ön karışma sağlanır. Yanma odasına dönerek giren karışım burada ani bir genişleme düzlemine rastlar. Hem ani genişlemeden ötürü hem de genişleyen akışın açısal momentumunu korurken yavaşlaması sonucu aksel hızda artan basınç bir yeniden sirkülasyon bölgesi oluşturur. Bu

yeniden sirkülasyon bölgesi sıcak yanmış gazları hapseder, işte sürekli yanma odasına giren soğuk yakıt/hava karışımının ateşlenmesine sebep olan yer burasıdır. Böyle yahut buna benzer bir alev tutma mekanizması olmadan alev yanma odası içerisinde tutulamaz.

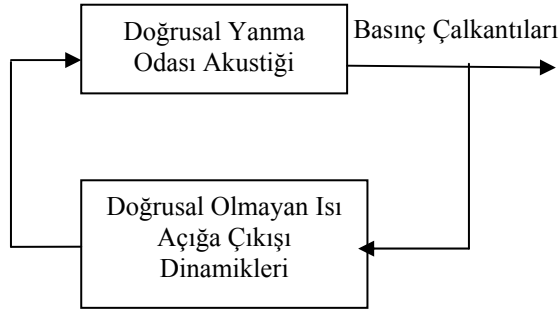
Yanma sisteminin akustiğine bağlı olan ve termo-akustik instabilite ismi verilen bir çeşit alev kararsızlığı vardır ki bunun yanma üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Yakıt karışımı hava içerisine küçük deliklerden geçerek enjekte edildiği için yakıt besleme sisteminin akustik empedansı hava borulama/yanma odası sistemininkinden çok daha yüksektir. Dolayısıyla zaman içerisinde yakıt debisi termo-akustik instabiliteden bağımsız olarak sabit kabul edilebilir. Buna karşılık enjektör hizasından geçen hava debisi sürekli olarak termo-akustik instabilite tarafından modüle edilmektedir. Neticede hava debisi anlık olarak düştüğü zaman anlık eşdeğerlilik oranı  $\phi'$  zaman ortalamasının  $\bar{\phi}$  üzerine çıkmakta, anlık olarak arttığı zaman ise bunun tam tersi gerçekleşmektedir. Eşdeğerlilik oranındaki bu çalkantılar akış ile beraber alev cephesine kadar taşınır ve burada alevi modüle edip ısı açığa çıkışının dalgalanmasına yol açarlar. Isı açığa çıkışındaki bu dalgalanma akustik çalkantılara yol açar ki bu ikisi arasında bir geri besleme mekanizması mevcuttur. Şekil 3'te bu geri bildirim mekanizması gösterilmiştir. İki arasındaki faz açısı reaktörün stabilitesini belirler (Rayleigh, 1945). Bu çalışmada amaç geri bildirim mekanizmasının ayrıntılarını yahut reaktörün stabilitesini incelemek değildir. Burada incelenmesi yeğ tutulan olgu bu çalkantıların bilhassa azot oksit emisyonlarını nasıl etkilediğidir. Bir takım deneysel çalışmalarda artan termo-akustik instabilite genliği ile birlikte buna paralel artan NO emisyon değerleri bulunmuştur (Tuncer, 2006, Tuncer vd., 2007, Tuncer vd., 2009). Amaç bu gözlemlerin teorik olarak daha basitleştirilmiş senaryolarla (eşdeğerlilik oranı modüle edilen sıfır boyutlu reaktör) uyum içerisinde olup olmadığının incelenmesidir.



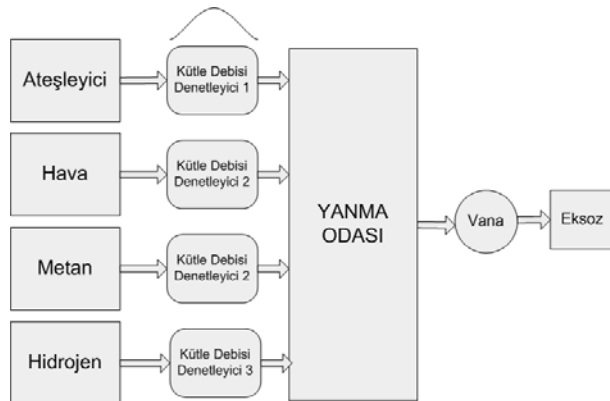
Şekil 2. Geleneksel Bir Ön Karışma Lülesinin Detaylı Şematik Görünümü

Şekil 4'te sıfır boyutlu benzetimler için kullanılan reaktörün şematik gösterimi verilmiştir. CANTERA

C++ dilinde yazılmış nesne yönelimli bir yazılım kütüphanesi niteliğinde olduğundan (Goodwin, 2001) şekilde gösterilen her bir kutu programda bir nesneye karşılık gelmektedir. Şöyle ki; hava metan ve ateşleyici için birer rezervuar nesnesi tanımlanmış, yine bu rezervuarlardan gelen debileri ayarlayan kütle debisi denetleyicileri tanımlanmış, bunların ardına yanmanın gerçekleştiği yanma odası nesnesi ilave edilmiş ve son olarak yanma odası basıncını düzenlemek için çıkışa bir vana ilaştırılmış ve bu vana eksoz rezervuarına bağlanmıştır. Burada bahsi geçen ateşleyici atomik hidrojen (H) kaynağıdır. Reaksiyonun başlatılması için bu ateşleyici simülasyon başlangıcında kısa bir süre için açılır ve sonrasında ateşleme tamamlanınca kapatılır. Yine gerçek manada nesne yönelimliliğin sağladığı bir üstünlük olarak değişik topolojilerde reaktör ağları (mesela bir reaktörden sonra bir diğer reaktör v.b.) tanımlamak mümkün olmaktadır.



Şekil 3. Termo-Akustik İnstabilite Geri Besleme Mekanizması

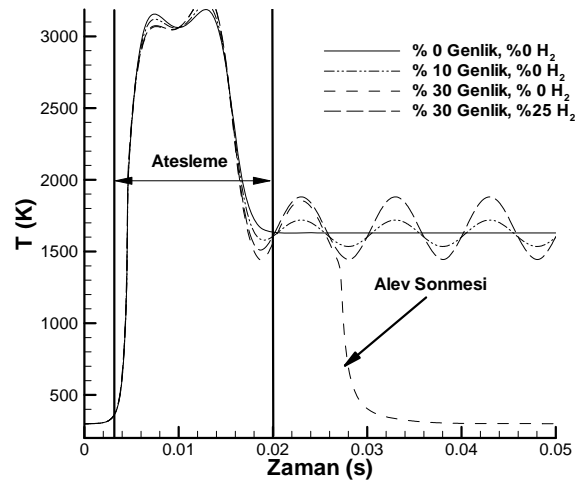


Şekil 4. Sıfır Boyutlu Reaktörün Şematik Gösterimi

Şekil 5'te sıfır boyutlu reaktörde ateşlemenin gerçekleşmesi ve bunun hemen ardından eşdeğerlilik oranındaki çalkantıya bağlı olarak zamana göre sıcaklık değişimleri gösterilmektedir. Genliğin sıfır olduğu durumda sıcaklık zaman içerisinde sabit kalmakta buna karşılık genlik arttıkça sıcaklık salınımlarının büyüklüğü de artmaktadır. Sıcaklık ani eşdeğerlilik katsayısı çalkantılarını arada fazla bir faz açısı olmadan hemen takip etmektedir. Bütün bunlara karşılık saf metan alevi çalkantı genliği %30'u bulduğu zaman aniden sönmektedir. Bu ve buna 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 CH<sub>4</sub>-%25 H<sub>2</sub>

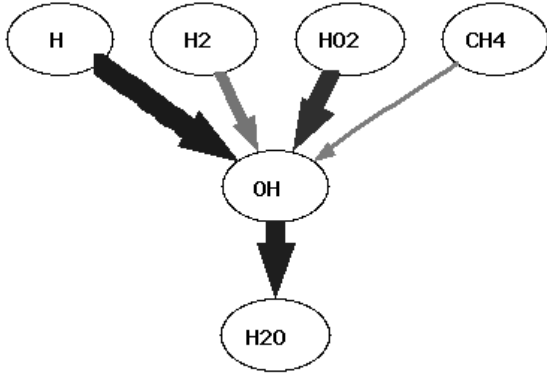
alevi sorunsuz biçimde dayanmaktadır. Bu olayın ardında yatan ise hidrojen zenginleşirmenin fakir alev alma sınırını genişlettiğidir. Deneysel çalışmalar da göstermiştir ki metana az miktar hidrojen ilavesi bile alev alma sınırlarını oldukça genişletmekte ve alev sönmeye karşı daha dayanıklı hale getirmektedir. Hidrojen ilavesi alev içerisinde serbest radikal havuzunu zenginleştirmektedir. Hidrojen ilavesi bilhassa hidroksil (OH) radikallerinin sayısını arttırmaktadır ki bu radikal metan yanmasına önemli ölçüde yardımcı olmaktadır. Bu olgu Şekil 6'da gösterilmiştir.

Şekil 7'de yine eşdeğerlilik katsayısındaki çalkantılar üzerinde durulmuştur. Bu sefer sıcaklığın yanı sıra NO emisyonları da gösterilmiştir. Verilen sıcaklık ve emisyon değerleri karşılaştırmayı kolaylaştırmak maksadı ile çalkantsız değerleri ile bölünerek boyutsuzlaştırılmışlardır. Örneğin grafikten 0% genlikte sıcaklık ve NO emisyon değerleri 1.0 olarak okunmaktadır. Burada üzerinde durulacak son derece önemli olan husus şudur; grafikte de görülmektedir ki %10 ve %20 genliklerde sıcaklık eğrisi hep orta nokta olan 1.0 etrafında salınmakta yani bir başka deyişle sıcaklığın zaman ortalama değeri çalkantı ile değişiklik göstermemekte (ki bu çalkantı olsun yahut olmasın sonuçta yine aynı miktarda yakıt yandığı için beklenen bir sonuçtur), fakat buna karşılık emisyon değerlerinin zaman ortalaması değerleri çalkantsız duruma göre daha yukarıda değerler arasında salınmaktadır. Görülecektir ki eşdeğerlilik katsayısındaki çalkantılar azot oksit emisyonlarının miktarını arttırmaktadır. Buna getirelebilecek en temel açıklama sıcaklıkla NO oluşum hızı arasındaki doğrusal olmayan bir ilişki olduğudur. Hatta bu ilişki Arrhenius terimlerinden dolayı üstel bir ilişkidir. Çevrim boyunca sıcaklık düştüğü zaman NO üretimi azalmaktadır fakat sıcaklık arttığında NO üretimi Arrhenius teriminden dolayı  $\exp(-E_a/(RT))$  üstel olarak artmakta ve ortalama NO değeri bu sebepten ötürü çalkantsız durumundakinden daha yukarıda olmaktadır. Ortalama NO değeri çalkantı genliği ile beraber artmaktadır.

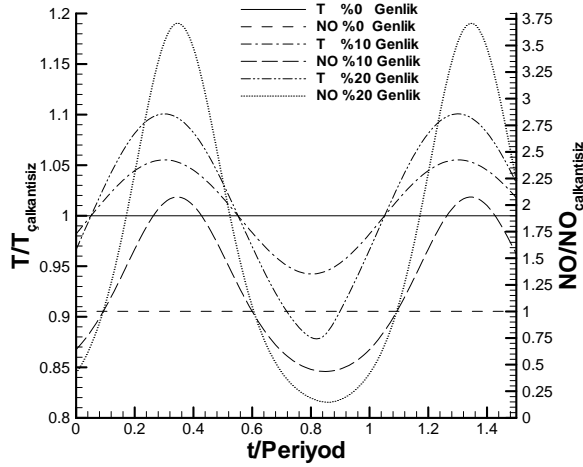


Şekil 5. Hidrojen Zenginleşirmenin Yüksek Genlikli Eşdeğerlilik Katsayısı Çalkantılarında Alev Kararlılığına Etkisi ( $\bar{\phi}=0.7$ ,  $\tau=0.5$  msec,  $f=100$  Hz).

Termo-akustik çalkantılar esnasında sıcaklık ile emisyonlar arasındaki ilişki incelenirken zaman bağımsız değişken olarak aradan çıkartılabilir. Böylelikle incelemeye bir miktar daha açıklık kazandırmak mümkündür. Şekil 8’de T-NO düzleminde değişik genliklerde sıcaklık-azot oksit ilişkisini gösteren faz diyagramları verilmiştir. Görülmektedir ki sıcaklık arttıkça azot oksit miktarı da üstel olarak artmaktadır. Genlik arttıkça salınımların faz düzleminde yaptıkları gezinti

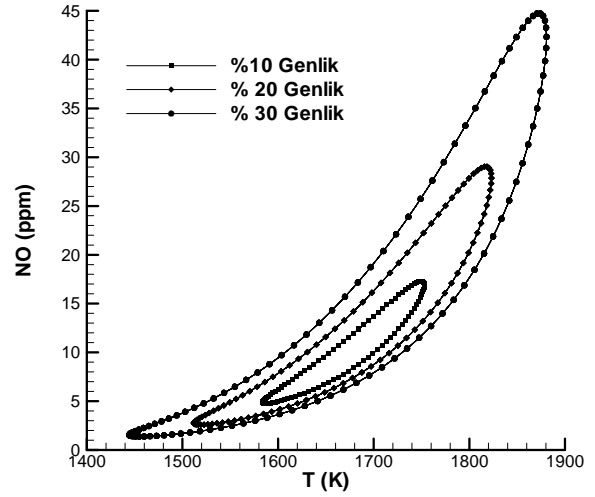


Şekil 6. Hidrojen Zenginleştiriminin Hidroksil Radikali Oluşumuna Katkısı.



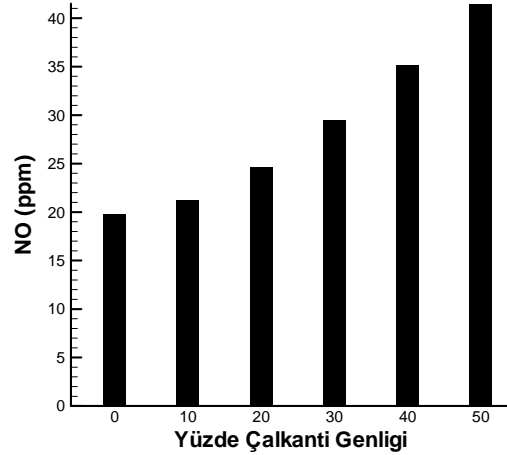
Şekil 7. Eşdeğerlilik Oranındaki Çalkantının Sıcaklık ve Emisyonlara Etkisi ( $\bar{\phi}=0.7$ , %75 CH<sub>4</sub> - %25 H<sub>2</sub>,  $\tau=0.5$  msec).

miktarı da artar. Yine bu grafiklere bakarak emisyonların ortalama değerleri hakkında bir kaniya varmak mümkündür. Zaman ortalaması değeri eğrinin içerisinde kalan alanın ağırlık merkezinin düşey koordinatı olarak ifade edilebilir. Dolayısıyla buradan da anlaşılacağı üzere artan termo-akustik instabilite genliği NO emisyonlarında artışa yol açmaktadır. Burada sayısal çalışma neticesinde yapılan bu gözlem deneysel bir takım verilerle de (Tuncer vd., 2009) uyumludur.



Şekil 8. Sıcaklık-NO Faz Diyagramı ( $\bar{\phi}=0.7$ , %100 CH<sub>4</sub>,  $\tau=0.5$  msec).

Bu etki net bir şekilde Şekil 9’da gösterilmiştir. Eşdeğerlilik oranındaki çalkantı hiç yok iken 20 ppm civarında olan emisyon değeri çalkantı genliği ortalama değerine %50’ine ulaştığı vakit emisyon değeri 40 ppm’i aşmaktadır. Yani %100’lük bir artışla emisyon değeri ikiye katlanmaktadır ki bu hiç de yadsınamayacak miktarda bir artıştır. Artış sıcaklık ve NO arasındaki doğrusal olmayan ilişkinin bir sonucudur.



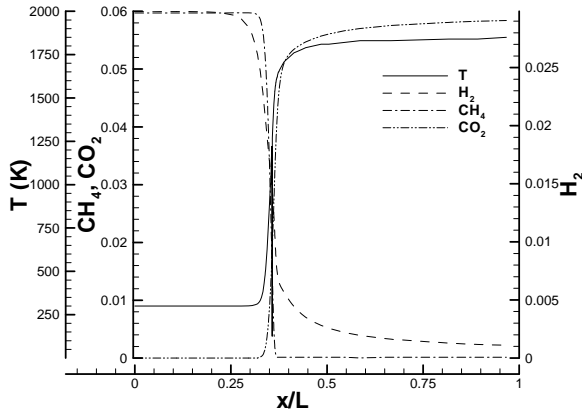
Şekil 9. Çalkantı Genliğinin NO Emisyonlarına Etkisi ( $\bar{\phi}=0.7$ , %50 CH<sub>4</sub>-%50 H<sub>2</sub>,  $\tau=1.0$  msec).

### Tek Boyutlu Alev Benzetimleri

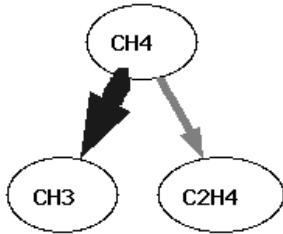
Şekil 10’da tek boyutlu reaktörde, reaktör boyunca, sıcaklık ve bazı ana türlerin konsantrasyonlarının değişimi gösterilmiştir. Alev  $x/L=0.35$  civarında reaktantlar ve ürünleri ayıran ince bir cephe şeklinde konumlanmıştır ki bunu sıcaklığın bu noktada ani yükselişine bakarak söylemek mümkündür. Evvelce eşdeğerlilik hesabı yapılırken üzerinde durulan varsayım yakıt karışımı içerisindeki hidrojenin öncelikli olarak yandığı idi. Grafiğe dikkatle bakılacak olursa H<sub>2</sub> konsantrasyonundaki ani düşüş CH<sub>4</sub> konsantrasyonundaki azalmadan daha sonra olmaktadır.



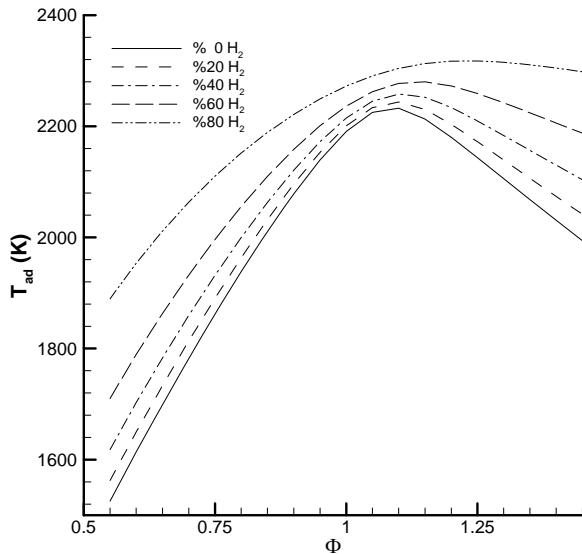
Buna ek olarak  $\text{CH}_4$  konsantrasyonu iyice azaldıktan sonra bile  $\text{CO}_2$  konsantrasyonunun alev cephesi boyunca kademeli olarak artması, metanın hidrojeninden hemen sonra ayrıştığı fakat metanın oksidasyonunun alev cephesi boyunca devam ettiğine delil olarak sunulabilir. Metan ayrışmasının temel kimyasal yolları Şekil 11’de gösterilmektedir. Buna göre ana ayrışma yolu metanın bir hidrojen atomunu kaybederek  $\text{CH}_3$ ’e dönüşmesidir. Kısmen ise serbest bir karbonun tutunmasıyla  $\text{C}_2\text{H}_4$  oluşur. Hem metan hem de karbondioksitte bulunan karbon C atomunun alev cephesi boyunca yolu izlendiğinde eşdeğerlilik katsayısı konusunda yapılan varsayımın haklılığı görülecektir.



Şekil 10. Tek Boyutlu Alevde Reaktör Boyunca Sıcaklık ve Tür Konsantrasyonlarının Değişimi ( $\phi=1$ , %70  $\text{CH}_4$ -%30  $\text{H}_2$ ).



Şekil 11. Alev İçerisinde Metanın Ayrışma Yolları.



Şekil 12. Değişik Hidrojen Zenginleştirme Yüzdelerinde Eşdeğerlilik Katsayısına Bağlı Olarak Adyabatik Alev Sıcaklıkları

Şekil 12’de değişik karışım oranlarında adyabatik alev sıcaklıkları gösterilmiştir. Bunun yanısıra karışımdaki hidrojen yüzdesi parametre olarak incelendiğinde ise hidrojen oranı arttıkça alev sıcaklığının da arttığı görülecektir ki bu da hidrojen daha yüksek alt ısıl değere sahip olduğundan beklenen bir sonuçtur. Bu grafiğin verilmiş olmasındaki temel sebep ileride buradaki sıcaklık değerlerinin hem alev hızları ile hem de emisyon değerleri ile ilişkilendirilecek olmasıdır.

Şekil 13’de değişik  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  karışımlarının alev hızları gösterilmiştir. Şekil 13.a atmosferik basıncındaki alev hızlarının gösterirken Şekil 13.b üç atmosfer basıncındaki alev hızlarını gösterip karşılaştırmaya imkan sağlamaktadır. Belirtmek gerekir ki GRI 3.0 mekanizmasından elde edilen sonuçlar birçok deneysel veri ile de uyumludur (ör: İlbaş v.d., 2006). Şekil 13’de sembollerle gösterilen alev hızları GRI 3.0 mekanizmasından elde edilen sonuçlardır. Çizgilerle gösterilenlerse bu çalışma neticesinde bulunan ampirik korelasyondan elde edilen sonuçları göstermektedir. Görülmektedir ki bu korelasyondan elde edilen sonuçlar detaylı kimyanın çözülmesi ile elde edilen sonuçlara oldukça yakındır ve bu yakınlık pratikte kullanım imkanı doğurmaktadır.

Korelasyonu bir formül olarak takdim etmeden evvel nasıl çıkarıldığından kısaca bahsetmek faydalı olacaktır. Öncelikle bir karışımın herhangi bir eşdeğerlilik katsayısındaki alev hızıyla  $S_L$  yine aynı karışımının stokiometrik ( $\Phi = 1$ ) alev hızıyla  $S_{L,st}$  ilişkilendirilmelidir. Bu ilişkiyi kurmak için en uygun değişken sıcaklıktır. Verilen bir karışım ve eşdeğerlilik oranı için yaklaşık bir adyabatik alev sıcaklığı  $T_{ad}$  hesaplamak son derece kolaydır ve sadece alt ısıl değerlerin ve ısı kapasitelerinin bilinmesi hesap için yeterlidir.  $S_L$  ile  $S_{L,st}$  oranı sıcaklıklarla ilişkilendirildiğinde Eşitlik (8)’deki gibi bir korelasyon elde edilebilir. Bu korelasyonun her basınçta ve her karışım yüzdesinde doğruluğu test edilmiş ve son derece yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

$$\frac{S_L}{S_{L,st}} = \exp \left[ \left( \frac{T_{ad} - T_{ad,st}}{T_{ad}} \right)^4 \right] \quad (8)$$

Yukarıdaki denklemde  $T_{ad}$  istenilen karışımın adyabatik alev sıcaklığını,  $T_{ad,st}$  ise stokiometrik karışımın alev sıcaklığını ifade etmektedir.

Eşitlik (8)’deki  $S_L$ ’in hesap edilebilmesi için karışımın stokiometrik alev hızının  $S_{L,st}$  bilinmesi gerekmektedir. Dolayısıyla bu korelasyonun tek başına pratik bir manası yoktur, fakat eğer  $S_{L,st}$  için de ayrı bir korelasyon bulunacak olursa bu iki korelasyon beraberce istenilen alev hızının  $S_L$  hesabında kullanılabilir. İkinci korelasyonun geliştirilmesinde adyabatik alev sıcaklıklarının yanı sıra saf metanın  $S_{L,st,CH_4}$  ve saf hidrojenin  $S_{L,st,H_2}$  stokiometrik alev hızlarından da yararlanılmıştır. Karışımın stokiometrik alev hızının  $S_{L,st}$  saf metan ve hidrojenin yine

stokiyometrik alev hızları kullanılarak boyutsuzlaştırılmıştır. Bu boyutsuz alev hızı saf metan için 0, saf hidrojen için ise 1 değerini verir. Saf metan ve hidrojen için alev hızları teorik olarak kolaylıkla hesap edilebilir yahut bu değerler yine hızlıca bir tablodan da bulunabilirler. Bu boyutsuz alev hızı ile yine benzer şekilde tanımlanan bir boyutsuz sıcaklık arasındaki ilişki bulunmuştur. Bu ilişki Eşitlik (9)'da sunulmuştur.

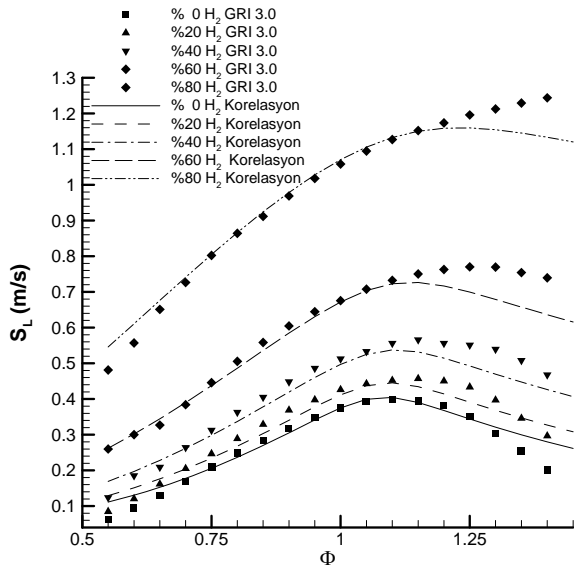
$$\frac{S_{L,st} - S_{L,st,CH4}}{S_{L,st,H2} - S_{L,st,CH4}} = \left( \frac{T_{ad} - T_{ad,CH4}}{T_{ad,H2} - T_{ad,CH4}} \right)^{1.4+n\alpha} \quad (9)$$

Eşitlik (9)'da  $T_{ad,CH4}$  stokiyometrik metan alevinin sıcaklığını,  $T_{ad,H2}$  ise benzer şekilde saf hidrojeninkini gösterir.  $\alpha$  yakıt karışımındaki hidrojenin hacimsel

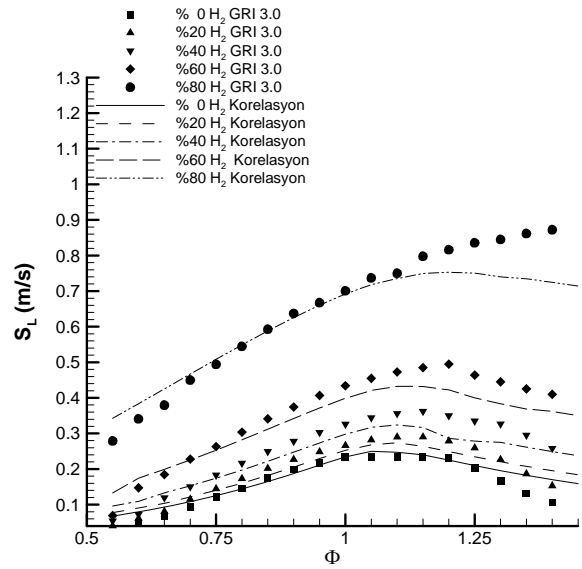
yüzdesini ifade eder. Bunu çarpan  $n$  ise basınca bağlı bir sabittir. Sözgelimi  $P=1$  atm için  $n=0.15$ ,  $P=2$  atm için  $n=0.5$  ve  $P=3$  atm için ise  $n=0.8$  olarak bulunur. Bu sabit alev hızının basınçla beraber azalmasını açıklar aynı zamanda.

Eğer Eş. (8) ve Eş. (9) birleştirilecek olursa istenilen alev hızı  $S_L$  şu şekilde bulunabilir Eş. (10).

$$S_L = \left[ \left( \frac{S_{L,st,H2} - S_{L,st,CH4}}{T_{ad} - T_{ad,CH4}} \right)^{1.4+n\alpha} + S_{L,st,CH4} \right] \exp \left[ \left( \frac{T_{ad} - T_{ad,st}}{T_{ad}} \right)^4 \right] \quad (10)$$

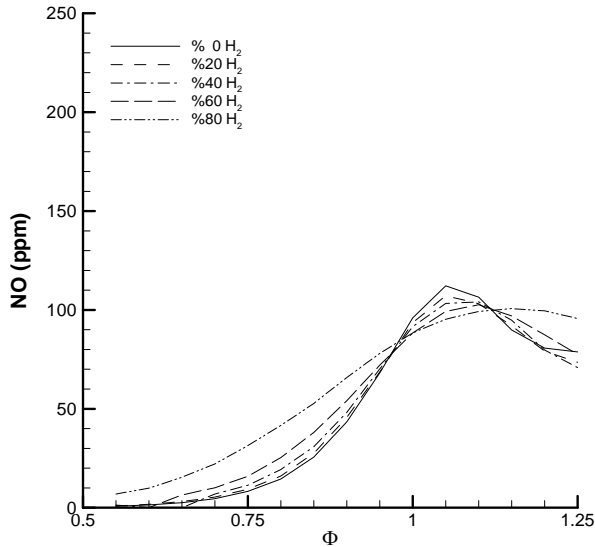


a. P=1 atm.

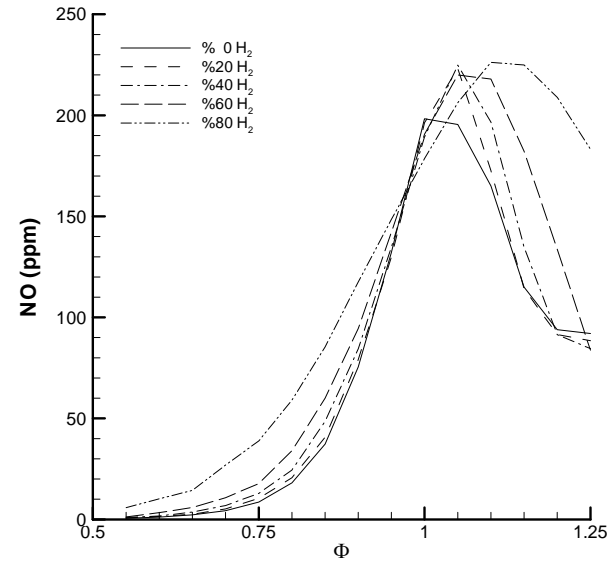


b. P=3 atm.

Şekil 13. Hidrojen Zenginleştirmenin Bir ve Üç Atmosfer Basınçlarında Laminer Alev Hızına Etkisi (Semboller GRI 3.0 Mekanizmasının Sonuçları, Çizgiler Geliştirilen Basitleştirilmiş Korelasyonun Verdiği Sonuçlar).



a. P=1 atm.



b. P=3 atm.

Şekil 14. İki Farklı Basıncda Azot Oksit Emisyonlarına Hidrojen Zenginleştirmenin Etkisi.

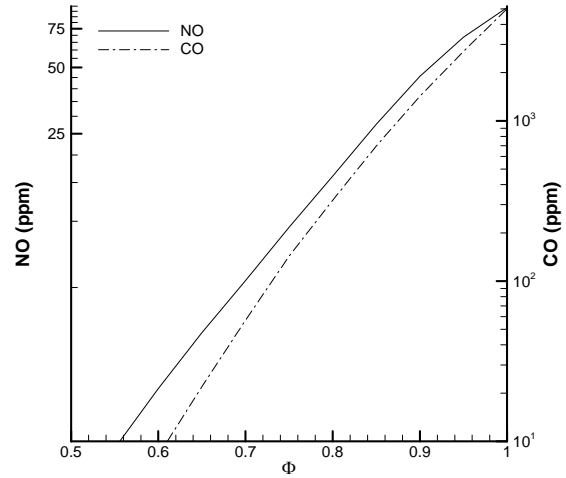
Şekil 13'de çizgilerle Eşitlik (10)'da ifade edilen korelasyonun sonuçlarıdır. Yine şekilden görüleceği üzere bu korelasyon çok geniş bir parametre uzayında (yakıt bileşimi, eşdeğerlilik katsayısı, basınç) geçerliliğini korumaktadır. Bilhassa fakir alevler için son derece uyumlu sonuçlar vermesi tasarım yapan mühendisler için önemlidir, çünkü gaz türbinlerinde azot oksit emisyonlarını azaltmak maksadıyla fakir yakma bütün güç endüstrisi tarafından halihazırda benimsenmiş bir yaklaşımdır.

Şekil 14'te hidrojen zenginleştirmenin NO emisyonlarına etkisi gösterilmektedir. Hem Şekil 14.a hem de Şekil 14.b'de görülmektedir ki metana hidrojen ilavesi NO emisyonlarını arttırmaktadır. Bu artış bilhassa fakir karışımlar için geçerlidir ki endüstride standart olarak fakir yakma uygulanmaktadır. Bu grafikler Şekil y ışığında incelenecek olurlarsa görülecektir ki özellikle fakir alevlerde NO emisyonları ile sıcaklık arasında birebir ilişki mevcuttur. Daha önce azot oksit oluşum mekanizmalarından bahsedilirken yakıtta azot bağlı olmadığı için hidrojen zenginleştirmenin başlıca iki (Fenimore ve Zeldovich) mekanizma üzerinde etkili olabileceği anlaşılmıştı. Bu veriler ışığında baskın olan oluşum mekanizmasının Zeldovich (yani ısıya bağlı olan) mekanizması olduğu apaçık ortadadır. Fenimore mekanizmasının katkısı önemli olmamakla beraber alev sıcaklığı düştükçe görece önemi bir nebze artmaktadır. Isıl yoldan oluşan NO miktarını kontrol etmenin standart yolu alevi fakir yakmaktır. Aynı zamanda yakıt/hava karışımının mümkün olduğunca homojen olması gerekmektedir ki yanma odasındaki sıcaklık dağılımı da benzer şekilde homojen olsun (bir diğer deyişle sıcak noktalar elimine edilsin). Bu yaygın bilgilere bu çalışma ışığında ekleyebileceğimiz bir diğer gözlem ise NO emisyonlarının düşürülmesi için termo-akustik instabilitenin de gelişiminin azaltılması gerektiğidir.

Üzerinde durulması gereken önemli diğer husus ise basıncın NO emisyonlarına etkisidir. Üç atmosfer basıncında emisyonlar bir atmosfer basınca göre önemli miktarda (%50-60 civarında) artış göstermektedir.

Şekil 15'de fakir alevde NO ve CO emisyonlarının eşdeğerlilik oranına bağlı değişimi gösterilmiştir. Hem CO hem de NO emisyonları gösteren düşey eksenler logaritmik biçimde ölçeklendirilmişlerdir. Bu biçimde bir ölçeklendirme ile emisyon değerlerinin neredeyse doğrusal bir trend göstermesi fakir alevlerde emisyonların eşdeğerlilik katsayısı ile üstel bir ilişki içerisinde olduklarını gösterir. Burada üstel ilişkinin sebebi esasen eşdeğerlilik oranı değil, sıcaklıktır. Sıcaklıkla bu türlerin oluşumu arasındaki ilişki bu türlerin oluşumuna sebep olan tepkimelerin ileri hızlarını ifade eden Arrhenius terimleridir. Arrhenius terimleri sıcaklığa üstel olarak bağımlıdır ve sıcaklık ne kadar fazla ise reaksiyon hızı da o derece üstel olarak artacaktır. Güç üretim endüstrisi yasal emisyon şartlarını sağlamak için standart bir uygulama olarak fakir yakmaya başvurur. Fakir yakma adyabatik alev

sıcaklığını düşürdüğü için bilhassa NO emisyonlarını da düşürür.



Şekil 15. Fakir Tek Boyutlu Alevde Azot Oksit (NO) ve Karbon Monoksit (CO) Emisyonları (%80 CH<sub>4</sub> - %20 H<sub>2</sub>, P=1 atm.).

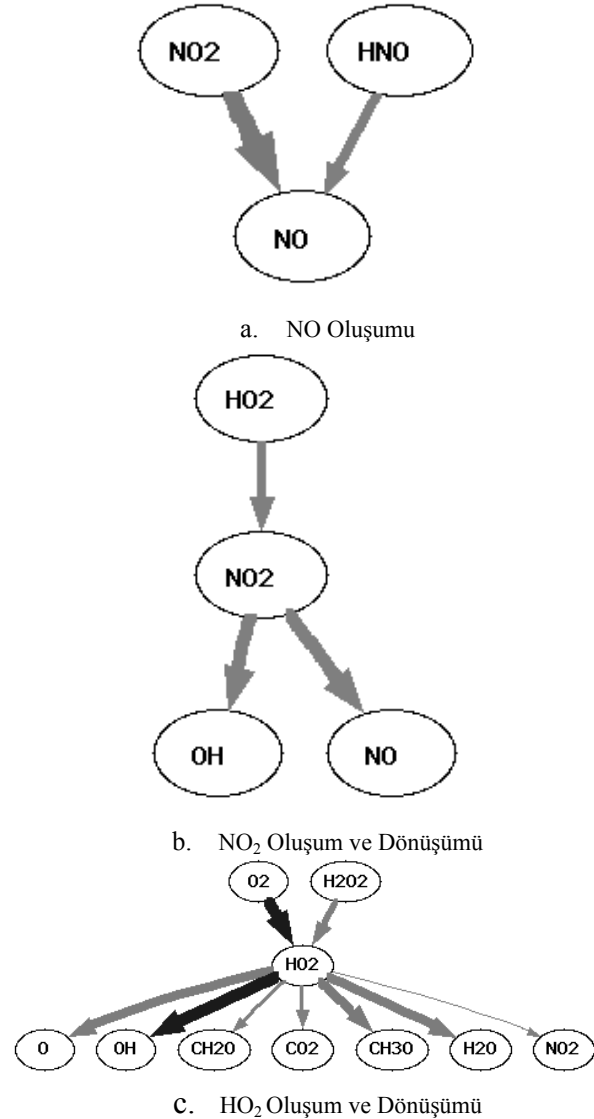
Görüldüğü üzere hidrojen zenginleştirmenin bilhassa NO emisyonları açısından bakılacak olursa iki ters yönlü etkisi vardır. Düz bir yaklaşımla hidrojen zenginleştirmenin adyabatik alev sıcaklığını arttırdığı için Zeldovich mekanizması yolu ile NO emisyonlarını arttıracacağı söylenebilir. Fakat öte yandan görülecektir ki yine hidrojen zenginleştirme fakir alev alma sınırını aşağıya çektiği için çok daha fakir karışımların yanmasına olanak sağlamaktadır ki bu da adyabatik alev sıcaklığını iyice düşüreceğinden neticede NO emisyonları azaltılabilecektir. Denilebilir ki hidrojen zenginleştirmenin NO emisyonları üzerinde olumsuz bir etkisinin olmaması hatta bu emisyonların daha de düşürülmesi isteniyorsa alevi hidrojen zenginleştirmenin beraberinde getirdiği avantajdan sonuna kadar faydalanarak iyice fakir yakmak gerekmektedir. Tabii ki fakir yanmanın beraberinde getirdiği yüksek genlikli termo-akustik instabilite problemi dikkate alınarak bunların bir şekilde aktif kontrol ile (sözgelimi ikincil yakıt enjeksiyonu modüle edip ısı açığa çıkışı ile basınç çalkantıları arasındaki faz açısına istenilen yönde müdahale ederek) bastırılabilmesi mümkündür.

Her ne kadar Şekil 15'de CO emisyonları üzerinde de durulmuş olsa da güç endüstrisi için nihai hedef saf hidrojenin sorunsuz olarak ön karışımı yakılabilesidir. Bunu için de önceden de belirtildiği gibi alev hızına bağlı olan geri tepme ve benzeri problemlerin aşılması gereklidir. Bu hedefe ulaşıldığında temiz karbonsuz bir yanma olacağı için karbon monoksit emisyonlarından da bahsetmek mümkün olmayacaktır. Doğal gazın hidrojenle zenginleştirilmesi ise bu hedefe giden yolda önemli bir aşamadır.

#### Emisyonların Kimyasal Oluşum Yolları

Şekil 16'da NO oluşumuna etki eden ana tepkime yolları gösterilmiştir. Şekil 16.a'da görüleceği üzere NO

oluşumuna katkıda bulunana iki ana tür  $\text{NO}_2$  ve  $\text{HNO}$ 'dur. Okların kalınlıklarından büyük katkının  $\text{NO}_2$ 'den geldiği anlaşılmaktadır. Dolayısıyla bir adım geri gidip  $\text{NO}_2$ 'nin kaynağını araştırmak daha temel sonuçlara götürecektir. Şekil 16.b'de görüleceği üzere  $\text{NO}_2$ ,  $\text{HO}_2$ 'nin havadaki  $\text{N}_2$  ile tepkimesinden oluşmakta ve ayrışırken de hemen hemen eşit miktarlarda  $\text{OH}$  ve  $\text{NO}$  ürünleri vermektedir. Yine bir adım geri gidilecek olursa, Şekil 16.c'de görüleceği gibi  $\text{HO}_2$  havadaki oksijen ( $\text{O}_2$ ) ile tepkime sırasında ortaya çıkan bir ara tür olan hidrojen peroksit ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) arasındaki tepkime vasıtası ile oluşmakta ve bu ara tür kararsızlığından ötürü yanma esnasında yine bir çok diğer ara türe dönüşmektedir.  $\text{HO}_2$  temel olarak hidroksil köküne ( $\text{OH}$ ) ve suya ( $\text{H}_2\text{O}$ ) dönüşmekle birlikte bunun yanı sıra daha az miktarlarda atomik oksijen ( $\text{O}$ ),  $\text{CH}_2\text{O}$ , karbon dioksit ( $\text{CO}_2$ ),  $\text{CH}_3\text{O}$  da verir. Bütün bunların yanı sıra eser miktarda  $\text{NO}_2$  emisyonu oluşumuna da yol açar ki bu tür daha sonra alev içerisinde ve alev sonrası bölgede çoğunlukla azot okside ( $\text{NO}$ ) dönüşür.



Şekil 16. NO Oluşumuna Etki Eden Tepkime Yolları.

Eğer ani  $\text{NO}_x$  mekanizmasının ayrıntıları incelenecek olursa temel oluşum yolunun atmosferik azotun ( $\text{N}_2$ )

daha ziyade yakıttan gelen C, CH ve  $\text{CH}_2$  gibi türlere tepkimesinden kaynaklandığı görülebilir. Burada yapılan incelemeden de anlaşılacağı gibi ani  $\text{NO}_x$  oluşumunun bu makalede incelenen duruma hemen hemen hiçbir katkısı yoktur.

Burada incelenen  $\text{NO}_x$  oluşum mekanizması genişletilmiş Zeldovich mekanizması ile uyumludur. Hem kimyasal tepkimelerdeki uyum hem de  $\text{NO}$  emisyonlarının sıcaklıkla ilişkisi baskın oluşum yolunun ısı yol (genişletilmiş Zeldovich mekanizması) olduğunu ispatlar niteliktedir. Isıl yol baskın olduğundan hidrojen zengin metan alevleri de saf metan alevleri gibi fakir yakılarak  $\text{NO}$  emisyonları limitler içerisinde tutulabilir. Hidrojen eklenmesi fakir alev alma limitini aşağıya çektiğinden daha da fakir karışımların yakılması mümkün olacaktır.

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada farklı basınçlar altında hidrojen zenginleştirmenin metanın laminar alev hızına, azot oksit ve karbon monoksit emisyonlarına olan etkisi sayısal olarak detaylı kimyasal kinetik mekanizmalar kullanılarak incelenmiştir. Bunların yanı sıra termokustik instabiliteye bağlı olarak eşdeğerlilik katsayısında oluşan çalkantıların bilhassa azot oksit emisyonlarına etkisi üzerinde durulmuştur. Elde edilen sonuçların birçoğu açık literatürdeki bilhassa deneysel bulguları doğrudan destekler niteliktedir.

Hidrojen zenginleştirme beklendiği gibi metanın alev hızını bir hayli arttırmaktadır. Artış hidrojen oranına bağlı olup monotonik bir eğilim göstermektedir. Bu artışın miktarı az evvel belirtildiği üzere karışımdaki hidrojen oranına bağlı olup buna karşılık hidrojen yüzdesi ile doğrusal olmayan bir şekilde ilişkilidir. Dolayısıyla hidrojenle zenginleştirilmiş metanın alev hızını hesaplarırken bu iki alev hızının yakıt karışımındaki yüzdeleri nispetinde doğrusal kombinasyonlarını alıp toplamak bire bir doğru sonuçlar vermeyecektir. Bu husus özellikle hidrojen yüzdesinin arttığı durumlarda böyledir. Alev hızını hesaplamak için detaylı kimyasal kinetik çözümlere gereksinim duyulduğu göz önüne alındığında bunun masa başında çabuklukla hesap yapması gereken bir mühendis için pek de pratik olmadığı açıkça ortadadır. Dolayısıyla bu hesabı kolaylaştıracak özgün bir bağıntıya gereksinim duyulabileceği düşünülerek basitleştirilmiş bir korelasyon geliştirilmiş ve bu bağıntıdan elde edilen neticelerin detaylı kimyasal kinetik hesaplardan elde edilen neticelerle  $\pm\%10$  uyum içerisinde olduğu görülmüştür ( $\%95$  güven aralığına dayalı olarak). Bu bağıntıyı kullanabilmek için gereken değerler şöyledir; saf metanın stokiometrik alev hızı, saf hidrojenin stokiometrik alev hızı (ki bu ikisi bir tablodan hızlıca elde edilebileceği gibi, laminar alev teorisinden yola çıkılarak da kolayca hesaplanabilir) ve son olarak ta istenilen alevin adiyabatik alev sıcaklığıdır (ki yine bu değer de ısı değerler bilindiğinde kolaylıkla hesap edilebilir).

Alev hızları üzerine değinilebilecek bir diğer önemli husus ta basıncın alev hızına olan etkisinin de yakıttaki hidrojen oranına bağlı olduğudur.

Hidrojen zenginleştirme fakir alev alma sınırını genişlettiğinden dolayı alevler yüksek genlikli termoakustik instabiliteden kaynaklanan eşdeğerlilik katsayısı çalkantılarına daha dayanıklıdır. Saf metan alevinin anlık olarak karışımdaki fakirleşme nedeni ile söndüğü durumlarda hidrojenle zenginleştirilmiş alevlerde alev sönmesi olmamaktadır.

Bütün bunlarla beraber karbon monoksitin etkileri de bu çalışma genişletilmek suretiyle yine GRI 3.0 mekanizması ile incelenebilir. Hidrojen zenginleştirme ileride saf hidrojen ekonomisine geçişte bir basamak olarak görüldüğünden bu çalışma metan/hidrojen yakıt karışımıyla sınırlandırılmıştır.

## KAYNAKLAR

Burmberger, S., Hirsch, C., Sattelmayer, T., Design Rules for the Velocity Field of Vortex Breakdown Swirl Burners, *ASME*, Paper No: GT2006-90495, 2006.

Calveti, S., Carrai, L., Cecchini, D., Esecuzione di Prove di Co-Combustione di Gas Naturale e Syngas da Biomassa su un Combustore DLN per Turbogas, Technical report, *Enel Produzione*, Pisa, Italy, ENELP/RIC/RT/-2001/258/0-IT+RT.RIC.PI, 2001.

Davu, D., Franco, R., Choudhuri, A., Lewis, A., Investigation on Flashback Propensity of Syngas Premixed Flames, *AIAA Paper No: 2005-3585*, 2005.

Döbbling, K., Eroğlu, A., Winkler, D., Sattelmayer, T., and Keppel, W., Low NOx Premixed Combustion of MBTU Fuels in a Research Burner, *ASME*, Paper No: 96-GT-126, 1996.

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.

İlbaş, M., Crayford, A. P., Yılmaz, İ., Bowen, P. J.,

Syred, N., Laminar Burning Velocities of Hydrogen-Air and Hydrogen-Methane-Air Mixtures: An Experimental Study, *International Journal of Hydrogen Energy*, 31, 1768-1779, 2006.

Kido, H., Nakahara, M., Hashimoto, J., and Barat, D., Turbulent Burning Velocity of Two Component Fuel Mixtures of Methane, Propane and Hydrogen, *Japan Soc. Mech. Eng. Int. J.*, 45, 355-362, 2002.

Kiesewetter, F., Kirsch, C., Fritz, J., Kröner, M., Sattelmayer, T., Two-Dimensional Flashback Simulation in Strongly Swirling Flows, *ASME*, Paper No: GT-2003-38395, 2003.

Kröner, M., Fritz, J., Sattelmayer, T., Flashback Limits for Combustion Induced Vortex Breakdown in a Swirl Burner, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 125, 693-700, 2003.

Kröner, M., Sattelmayer, T., Fritz, J., Kiesewetter, F., Hirsch, C., Flame Propagation in Swirling Flows-Effect of Local Extinction on the Combustion Induced Vortex Breakdown, *Combustion Science and Technology*, 179(7), 1385-1416, 2007.

Lewis, B., von Elbe, G., Combustion. Flames and Explosions of Gases, 3<sup>rd</sup> Edition, Academic Press: Pittsburgh, PA, ABD, 1987.

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.

Lipatnikov, A., Chomiak, J., Molecular Transport Effects on Turbulent Flame Propagation and Structure, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 31, 1-73, 2005.

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

Noble, D., Zhang, Q., Shareef, A., Tootle, J., Meyers, A., Lieuwen, T., Syngas Mixture Composition Effects Upon Flashback and Blowout, *ASME*, Paper No: GT2006-90470, 2006.

Plee, S. L., Mellor, A. M., Review of Flashback Reported in Pre-vaporizing/Premixing Combustors, *Combustion and Flame*, 32, 193-203, 1978.

Putnam, A., Jensen, R., Application of Dimensionless Numbers to Flashback and Other Combustion Phenomena, 3<sup>rd</sup> Symposium on Combustion, Flame, and Explosion Phenomena, Baltimore, MD, 89-98, 1948.

Rayleigh, J. S. W., The Theory of Sound, 2, Dover, New York, ABD, 1945.

Schafer, O., Koch, R., Wittig, S., Flashback in Lean Prevaporized Premixed Combustion: Non-Swirling Turbulent Pipe Flow Study, *ASME Paper No: 2001-GT-0053*, 2005.

Thibaut, D., Candel, S., Numerical Study of Unsteady Turbulent Premixed Combustion: Application to flashback simulation, *Combustion and Flame*, 113, 53–65, 1998.

Tomczak, H., Benelli, G., Carrai, L., Cecchini, D., Investigation of a Gas turbine Combustion system Fired with Mixtures of Natural Gas and Hydrogen, *IFRF Combustion Journal*, Article Number: 200207, 2002.

Tuncer, O., Active Control of Spray Combustion, Doktora Tezi, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana, ABD, 2006

Tuncer, O., Acharya, S., Uhm, J. H., Dynamics, NO<sub>x</sub> and Flashback Characteristics of Confined Pre-Mixed Hydrogen Enriched Methane Flames, *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2007*, 2, 857-868, Montreal, Kanada, 2007.

Tuncer, O., Acharya, S., Uhm, J. H., Dynamics NO<sub>x</sub> Flashback Characteristics of Confined Premixed Hydrogen Enriched Flames, *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 496-506, 2009.

Umamura, A., Tomita, K., Rapid Flame Propagation in a Vortex tube in Perspective of Vortex Breakdown Phenomenon, *Combustion and Flame*, 125, 820–838, 2001.

Wohl, K., Quenching, Flash-Back, Blow-Off Theory and Experiment, 4<sup>th</sup> 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.



**ONUR TUNÇER**, 1979 yılında İzmir’de doğdu. 1997 yılında İzmir Fen Lisesi’ni bitirdi. 2001 yılında ise Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden lisans, 2006 yılında Louisiana State University’den yine aynı alanda doktora derecesi aldı. Halen İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak Müh. Bölümünde Misafir Öğretim Üyesi olarak çalışmalarına devam etmektedir.