



HİDROJEN-METAN KARIŞIM YANMASINDA YANMA MODEL SABİTİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

İlker YILMAZ*, Mustafa İLBAŞ**

*Erciyes Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Uçak Gövde-Motor Bölümü, 38039, Kayseri

**Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Beşevler, 06500 Ankara

(Geliş Tarihi: 17. 03. 2009, Kabul Tarihi: 17. 08. 2009)

Özet: Bu çalışmada, konik girişli bir yanma odasında türbülanslı hidrojen-metan karışım alevinin Fluent hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı yardımıyla sayısal simülasyonu yapılmıştır. Sunulan çalışmanın amacı; hidrojen-metan karışımli yakıtın sayısal simülasyonun da deneysel ölçümlerle uyumlu yanma model sabitinin belirlenmesidir. Sayısal simülasyonda hacimsel olarak %30 hidrojen ve %70 metan kompozit yakıt kullanılarak %20 hava fazlalık değerinde ve 40 kW ısı güç için sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, sayısal simülasyonda hidrojen miktarının emisyonlar üzerindeki etkisinin belirlenmesi için %70 hidrojen ve %30 metan içeren karışım yakıtı da kullanılmıştır. Karışım yakıtının sayısal simülasyonunda iki farklı yanma model sabiti değeri (4 ve 1) kullanılmıştır. En uygun yanma model sabitinin belirlenmesinde sıcaklık, NO_x, CO ve CO₂ ölçüm değerleri simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca sayısal simülasyondan elde edilen hız, sıcaklık ve gaz kompozisyonlarının dağılımları verilmiş ve çalışmada tartışılmıştır. Çalışmada kullanılan hidrojen-metan karışımli kompozit yakıt yanmasının yanma model sabiti değerinin 1 alınması durumunda deneysel değerlere daha yakın tahmin değerlerinin elde edildiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hidrojen-metan, Yanma model sabiti, Sayısal simülasyon.

EVALUATION OF COMBUSTION MODEL CONSTANT IN COMBUSTION OF HYDROGEN-METHANE MIXTURE

Abstract: In this study, the numerical simulation of turbulence hydrogen-methane blending flame was performed by using the CFD code Fluent in a conical entry combustion chamber. The main aim of the presented study is to determine the best combustion model constant to be agree with experimental measurements in numerical simulation of the hydrogen-methane blending fuels. In the numerical simulation, the fuel including 30% hydrogen and 70% methane by volumetrically, 40 kW thermal power, and 20% of excess air was used. In addition, the fuel mixture of 30% hydrogen and 70% methane by volumetrically was also used to determine the effect of hydrogen amount on the emissions including NO_x, CO ve CO₂ in the numerical simulation. Numerical simulations of the blended fuel, two different values (A=4 and A=1) of the combustion model constant A were used. In order to determine the most suitable combustion model constant, temperature, NO_x, CO, and CO₂ measurement values were compared with numerical results. The velocity, temperature and gas composition distributions obtained from numerical simulation were also given and discussed in this paper. In numerical simulations of the hydrogen-methane blended fuel combustion, it is determined that the predictions for combustion model constant of 1 are closer to experimental values compared with the predictions for combustion model constant of 4.

Keywords: Hydrogen-methane, Combustion model constant, Numerical simulation.

SEMBOLLER

A_k	arrhenius üs faktörü	E_k	aktivasyon enerjisi [J/kmol-K]
C	sabit	G_k	türbülans kinetik enerji üretimi
C_j	reaktantların molar konsantrasyonu [mol/m ³]	$h_ç$	ısı taşınım katsayısı [W/m ² -K]
C_μ	RNG k- ϵ model sabiti	k	türbülans kinetik enerji
$C_{1\epsilon}$	RNG k- ϵ model sabiti	k	ısı iletim katsayısı [W/m-K]
$C_{2\epsilon}$	RNG k- ϵ model sabiti	L	yanma odası uzunluğu [m]
C_p	özgül ısı [kJ/kg K]	m	kütle kesri
		M	molekül ağırlığı [kg/kmol]
		q_d	duvardan çevreye ısı akısı [W/m ²]
		R	reaksiyon oranı [kg/m ³ s ⁻¹]
		R	yanma odası yarıçapı [m]

R	üniversal gaz sabiti [kJ/mol-K]
r	radyal mesafe [m]
r_1	yakıt giriş yarıçapı [m]
r_2	hava giriş yarıçapı [m]
S	şekil değişim tensörünün ortalama oran modülü
S_{ij}	ortalama şekil değişim oranı
T	sıcaklık [K]
u_i	hız [m/s]
v_r	radyal hız [m/s]
v_z	eksenel hız [m/s]
v'	reaktantlar için stokiometrik katsayı
v''	ürünler için stokiometrik katsayı
$v_{i',k}$	k reaksiyonunda i türünün stokiometrik katsayısı
$v_{j',k}$	j türü konsantrasyon üssü
x	mesafe [m]
Y	kimyasal tür
z	eksenel mesafe [m]

Yunan Alfabeti

α_k	invers efektif prandtl sayıları
α_ε	
β_k	sıcaklık üssü
χ	ε denkleminde ilave terim
ε	türbülans kinetik enerji dağılım oranı
ε_0	RNG k- ε model sabiti
ε_d	yayımlı katsayısı
σ	stefan boltzmann katsayısı [W/m^2K^4]
μ	dinamik vizkozite [kg/ms]
ρ	karişımın yoğunluğu [kg/m^3]

Alt İndisler

φ	çevre
d	duvar
eff	efektif
h	hava
i, j	tensör notasyon indisleri
in	giriş
j	hücre numarası
k	reaksiyon numarası
P	yanma ürünü
r	radyal
R	reaksiyona girenler
t	türbülans
y	yakıt
z	eksenel

GİRİŞ

Yaşamımız için enerjinin kullanımı ve üretimi gereklidir. Enerji, sosyal kalkınma ve ekonomik büyüme için bir girdidir. İnsanoğlunun temel ihtiyaçları olan aydınlanma, pişirme, ısıtma, soğutma ve ulaşım enerjinin kullanımı yoluyla karşılanmaktadır. Ayrıca, enerji endüstri'nin bütün sektörlerinde kritik üretim

faktörüdür. Günümüzde fosil yakıtlar (kömür, fuel-oil vb.) temel enerji kaynağıdır. Dünya üzerinde sınırlı fosil yakıt rezervleri, bilim adamlarını fosil yakıtın yerini alacak yeni kaynaklara ve varolan mevcut kaynakların verimli kullanılması için araştırmalara yöneltmiştir (Yılmaz, 2006).

Son yıllarda hidrojen-hidrokarbon kompozit yakıtlar endüstriyel yanma uygulamalarında enerji temini için artan bir ilgiyle karşı karşıyadır. Hidrokarbon kökenli yakıtların (doğalgaz, kömür vb.) fakir karışım şartlarında yanması düşük kirletici emisyon ve üstün yanma özellikleri vermektedir. Bununla birlikte, hidrokarbon yakıtların büyüme kısmının yüksek olan fakir karışımli alevlenme limitleri, fakir karışım bölgesinde kararlı yanma şartlarına çok zor ulaşılmasına neden olmaktadır. Bunun aksine, çok fakir karışımlarda düşük alevlenme limiti ve fakir karışımli yanması ile hidrojen oldukça caziptir. Düşük hacimsel yoğunluğundan dolayı depolama zorlukları, geri parlama gibi problemler, pratik yanma uygulamalarının çoğunda hidrojen kullanımını zorlaştırmaktadır. Bu durumlardan hareketle, hidrojen-hidrokarbon kompozit yakıt, yanma sistemlerinde kullanılabilircek cazip bir çözüm olmaktadır.

Literatürde yanma çalışmaları incelendiğinde genellikle hidrokarbon yakıtların kullanıldığı görülmektedir (İlbaş, 1997; Kaname, 1994; Schaler and Obernberger, 2000; Schaler ve diğ., 2001, Spangelo, 2004). Hidrojen-metan karışımli kompozit yakıtların kullanıldığı çalışmalar nisbeten sınırlıdır (Yılmaz ve İlbaş, 2008; Yılmaz, 2006; İlbaş, 2005; İlbaş ve diğ., 2005; İlbaş ve diğ., 2005). Siklon yakıcıda doğalgaz yanması için yanma model sabiti A' 'nın 1 'e yakın değerlerde olması durumunda deneysel değerlere uygun sonuçlar elde edildiği görülmüştür (İlbaş, 1997; Kaname, 1994). Izgaralı yakıcılarda biyokütle yanmasında kullanılan yanma model sabitinin A' 'nın 0,6-1 arasında alınmasının daha uygun sonuçlar verdiği tespit edilmiştir (Schaler and Obernberger, 2000; Schaler ve diğ., 2001). Konu ile ilgili daha ayrıntılı literatür (Yılmaz, 2006)'da bulunmaktadır.

Daha önceki hidrojen-metan karışımli kompozit yakıt yanmasını içeren sayısal çalışmalar incelendiğinde sıcaklık ve gaz kompozisyonları üzerinde önemli bir etkiye neden olan yanma modelindeki sabitinin kullanılan programda varsayılan değerinde kullanıldığı ve herhangi bir düzenleme yapılmadığı görülmektedir. Bu durum ise; sayısal simülasyon sonuçlarının ölçüm değerlerinden sapmasına yol açarak, simülasyon sonuçlarının kabuledilebilir sınırlardan uzaklaşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle yanma simülasyonlarında daha doğru ve gerçeğe yakın sonuçların elde edilebilmesi için kullanılan yanma modelindeki sabitin düzenlenmesi gerekmektedir. Daha önceki çalışmalarda hidrojen-metan karışımli yakıt yanmasının simülasyonu için kullanılan yanma modelindeki sabitin sıcaklık, akış ve emisyon değerlerine etkisi incelenmemiştir ve kullanılan model sabitinin değeri (genellikle 4) uygun olup olmadığı araştırılmamıştır. Bu durum sunulan

çalışmanın motivasyonunu oluşturmakta olup, bu alandaki boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır.

Bu çalışmada, hidrojen-metan karışımli kompozit yakıt yanmasında yanma model sabitinin sıcaklık dağılımı ve emisyonlar üzerindeki etkisi deneysel ölçüm değerleri ile karşılaştırılmış ve kullanılan yakıt için yanma model sabitinin değeri belirlenmiştir. Sayısal simülasyonun doğruluğu daha önceden yazarlar tarafından yapılmış çalışmalarla belirlendiğinden (Yılmaz, 2006; İlbaş, 2005; İlbaş ve diğ., 2005; İlbaş ve diğ., 2005), ayrıca bu çalışmada sayısal simülasyon sonuçlarının doğruluğu test edilmemiştir. En uygun yanma model sabitinin belirlenmesinde yazarlar tarafından aynı işletme şartlarında alınan termokapılı sıcaklık ölçüm değerleri ve gaz analizör emisyon ölçüm değerleri kullanılmıştır (Yılmaz, 2006). Çalışmada, konu ile ilgili literatür araştırması giriş bölümünde, simülasyon detayları bölüm 2’de, sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırması ve tartışma bölüm 3’de ve sonuçlar ise; son bölümde sunulmuştur.

YANMANIN SAYISAL SİMÜLASYONU

Simülasyonda kullanılan matematiksel model; kütle, momentum, enerji ve skaler değişkenler için taşınım denklemlerinin sayısal çözümüne dayanmaktadır. Hidrojen-metan kompozit yakıt yanmasında türbülanslı reaksiyon akışının iki boyutlu, eksenel simetrik ve sıkıştırılabilir akış denklemleri FLUENT sonlu hacimler programı yardımıyla çözüldü. FLUENT programı kullanıcıya geniş modelleme kapasiteleri veren alt modelleri ve sınır şartları sunmaktadır (Fluent, 2002). Kullanılan program ve simülasyon işleminin detayları (Yılmaz, 2006)’da bulunabilir. Yanma simülasyonunda yakıt ve havanın karışımı için uygun bir türbülans modelinin kullanılması gereklidir. Sunulan çalışmada düşük girdaplı akış söz konusu olduğundan ve bu tip akışlar için uygun olan RNG k-ε türbülans modeli seçilmiştir. RNG k-ε modelde türbülans kinetik enerjisi (k) ve dağılım oranı (ε) aşağıdaki taşınım denklemlerinin Fluent programı yardımıyla iteratif olarak çözülmesi ile belirlenmiştir (Yılmaz, 2006):

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \epsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + \frac{\epsilon}{k} (C_{1\epsilon} G_k - C_{2\epsilon} \rho \epsilon) - \chi \quad (2)$$

α_k ve α_ϵ Denklem 1 ve 2’ den $\epsilon_0 = 1$ olarak elde edilir.

$$\left| \frac{\alpha - 1,3929}{\alpha_0 - 1,3929} \right|^{0,6321} \left| \frac{\alpha + 2,3929}{\alpha_0 + 2,3929} \right|^{0,3679} = \frac{\mu}{\mu_{\text{eff}}} \quad (3)$$

$$\alpha_0 = \frac{k}{\mu C_p} \quad (4)$$

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (5)$$

$$\chi = C_\mu \rho \frac{\eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right) \epsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k} \quad (6)$$

Burada S değeri şekil değişim tensörünün ortalama oran modülünü ifade etmektedir. Bu değer aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (7)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

$$\eta = S x \frac{k}{\epsilon} \quad (9)$$

Burada $\eta_0 = 4,38$ ve $\beta = 0,012$ ’dir.

RNG k-ε modelde kullanılan C_μ , $C_{1\epsilon}$ ve $C_{2\epsilon}$ değerleri model sabitlerini göstermektedir. Sayısal simülasyonda bu sabitlerin tablo 1’ de verilen değerleri kullanılmıştır.

Tablo 1. RNG k-ε Modelde Kullanılan Sabitler (Fluent, 2002).

Sabit	C_μ	$C_{1\epsilon}$	$C_{2\epsilon}$	α_0
Değer	0,0845	1,42	1,68	1

Sınır Şartları

Sayısal simülasyonda yakıt ve hava girişlerde akışkan miktarları, sıcaklık, türbülans yoğunluğu ile türbülans karakteristik uzunluğu ve kompozisyonu tanımlamak üzere kütle akış girişi, yanma odası üst, konik duvarlar ile yakıt hava arasındaki nozul için duvar sınır şartları tanımlanmıştır. Çıkış için, basınç çıkışı tanımlanmıştır. Yanma odası simetri ekseninde eksen sınır şartı tanımlanmıştır. Fiziksel alan eksenel yönde simetrik olduğundan hesaplama alanının her tarafında uygun sınır şartları ayırdır. Sayısal simülasyonda kullanılan sınır şartlar denklem 10-15’de verilmiştir.

Yanma odası girişinde (z=0):

$$0 < r < r_1, \quad v_r = 0, \quad v_z = v_y, \quad T = T_{in}, \quad Y = Y_{in} \quad (10-a)$$

$$r_1 < r < r_2, v_r = 0, v_z = v_h, T = T_{in}, Y = Y_{in} \quad (10-b)$$

Yanma odası çıkışında:

$$v_r = 0, \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \frac{\partial Y}{\partial z} = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

Yanma odası simetri ekseninde (r=0):

$$v_r = 0, \frac{\partial v_z}{\partial r} = 0, \frac{\partial Y}{\partial r} = 0, \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (12)$$

Yanma odası iç duvarında (r=R, 0 < z ≤ L):

$$v_r = 0, v_z = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (13)$$

Yanma odası dış duvarında (z=0, r₂ < r < R):

$$v_r = v_z = 0, \frac{\partial Y}{\partial z} = 0, T = T_d \quad (14)$$

$$q_d = h_\zeta [T_d - T_\zeta] + \varepsilon_d \sigma [T_d^4 - T_\zeta^4] \quad (15)$$

Denklem 15'deki q_d duvardan çevreye olan ısı akısını, h_ç ısı taşınım katsayısını, ε_d duvar yayılımını, T_d duvar sıcaklığını ve T_ç çevre sıcaklığını göstermektedir.

Konik girişli yanma odası, iki parçalı olarak flanşlı bağlantı ile birleştirilmiştir ve geometrisi Şekil 1'de verilmiştir. Konik kısmın uzunluğu L₁=0,4 m, diğer düz kısmın uzunluğu ise 1 m olarak seçilmiş olup, toplam yanma odası uzunluğu 1,4 m'dir. Yanma odası yarıçapı ise yanma odası boyuna ve literatürdeki yanma odası yarıçapları (hidrokarbon yakıtlar için 0,25-0,30 m) dikkate alınarak R=0,25 m olarak alınmıştır. Yakıt ve hava jeti giriş yarıçapı sırasıyla r₁=0,005 m ve r₂=0,15 m değerindedir. Yakıt jeti ile hava jeti 0,002 m bir nozul ile ayrılmıştır. Bu değerler belirlenirken deneysel çalışmalarda kullanılan brülörün işletme şartı ve yanma odasının farklı eksenel mesafelerinde radyal ölçüm değerlerinin belirlenmesi durumları da ayrıca gözönünde bulundurulmuştur.

Girdap Ayrışma Modeli (Magnussen Model)

Sunulan çalışmada hidrojen-metan karışımli kompozit yakıt yanması için yanma literatüründe girdap ayrışma modeli (Magnussen modeli) olarak adlandırılan yanma

modeli kullanılmıştır. Bu model, önkarişimli, kısmi önkarişimli ve difüzyon yanma problemleri için kullanılabilir. Bu model iyi tahminler yapabilmekle birlikte tahminlerin kalitesi kullanılan yanma model sabitinin değerine önemli derecede bağlıdır. Ayrıca tahminlerin doğruluğu simülasyonda kullanılan türbülans modelden de etkilenmektedir (Versteeg ve Malalasekera, 1995). Türbülanslı kimyasal yanma reaksiyonunun sayısal çözümlemesinin hem reaksiyon oranını hem de türbülanslı karışım zamanını içermesi için sayısal hesaplamalarda türbülans karışım oranı Magnussen modelin kullanılması gereklidir (Magnussen and Hjertager, 1976). Yakıt için reaksiyon oranı aşağıdaki ifade ile belirlenmiştir.

$$R_{i,k} = -v'_{i,k} M_i T^{\beta_k} A_k \prod_{j' \text{ ürünler}} C_{j'}^{v_{j'k}} \exp\left(-\frac{E_k}{RT}\right) \quad (16)$$

Arrhenius kinetik oran ifadesi normalde laminer akışlarda reaksiyon oranının kontrolü için kullanılır (Fluent, 2002). Türbülanslı akışlarda reaksiyon oranı, Arrhenius kinetik oran ifadesi (denklem 16) ve Magnussen model ile hesaplanmaktadır. Reaksiyon oranına türbülansın etkisi Magnussen model (Magnussen and Hjertager, 1976) kullanılarak dikkate alınır. Magnussen modelde, reaksiyon oranı (R_{i,k}) aşağıdaki iki ifadeden sırasıyla reaksiyona girenler ve ürünler için hesaplanır:

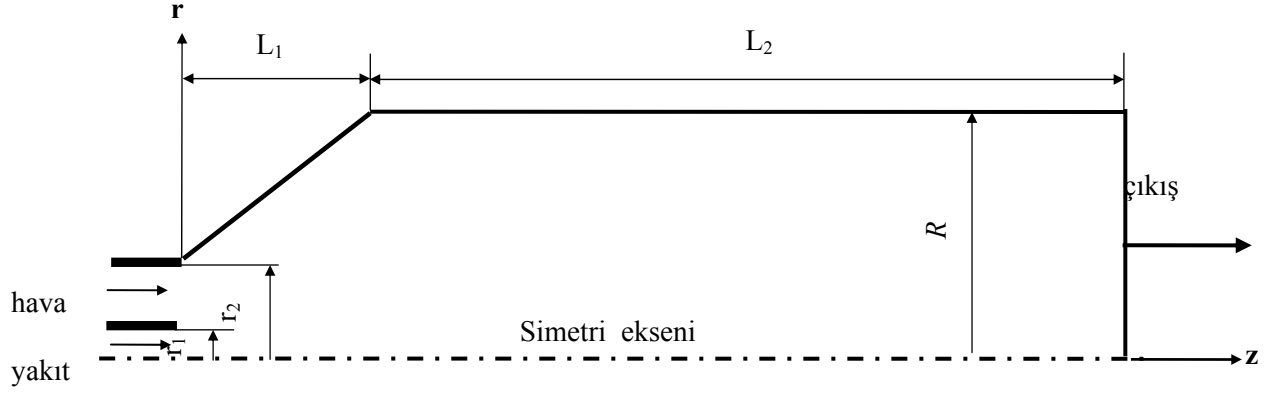
$$R_{i,k} = -v'_{i,k} M_i C_p \frac{\varepsilon}{k} \frac{m_R}{v'_{R,k} M_R} \quad (17)$$

$$R_{i,k} = v'_{i,k} M_i C_p \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_P m_P}{\sum_{j'}^N v'_{j',k} M_{j'}} \quad (18)$$

C reaksiyona girenler için A değerine (C=A) ve ürünler için AxB (C=AxB) değerine eşit olan deneysel bir sabiti, A ve B ise Magnussen sabitlerini (reaksiyon karışım oranlarını) göstermektedir. Bu çalışmada, B değeri Fluent programında varsayılan değer olan 0,5 olarak alınmıştır.

Girdap ayrışma modeli reaksiyona giren ve ürünleri içeren girdapların dağılım oranı ile ilgilidir ve reaksiyon oranı üzerinde türbülansın etkisi için kullanılmaktadır. Karışım kontrollü reaksiyon oranı, türbülans zaman skalası (k/ε) biçimde ifade edilir (Launder ve Spalding, 1974). Bu model kinematik kontrollü reaksiyon terimlerini de barındırmaktadır (Versteeg ve Malalasekera, 1995).

Türbülanslı reaksiyon akışlarında reaksiyon oranı yukarıda verilen denklemler (16-18)'den hesaplanır. En yavaş (sınırlanan) reaksiyon oranı bütün hesaplamalar



Şekil 1. Konik Girişli Yanma Odası Geometrisi.

için reaksiyon oranı olarak kullanılır. Sonuçta, türbülanslı akışta reaksiyon oranı ($R_{i'k}$) aşağıdaki genel ifadeden hesaplanmaktadır:

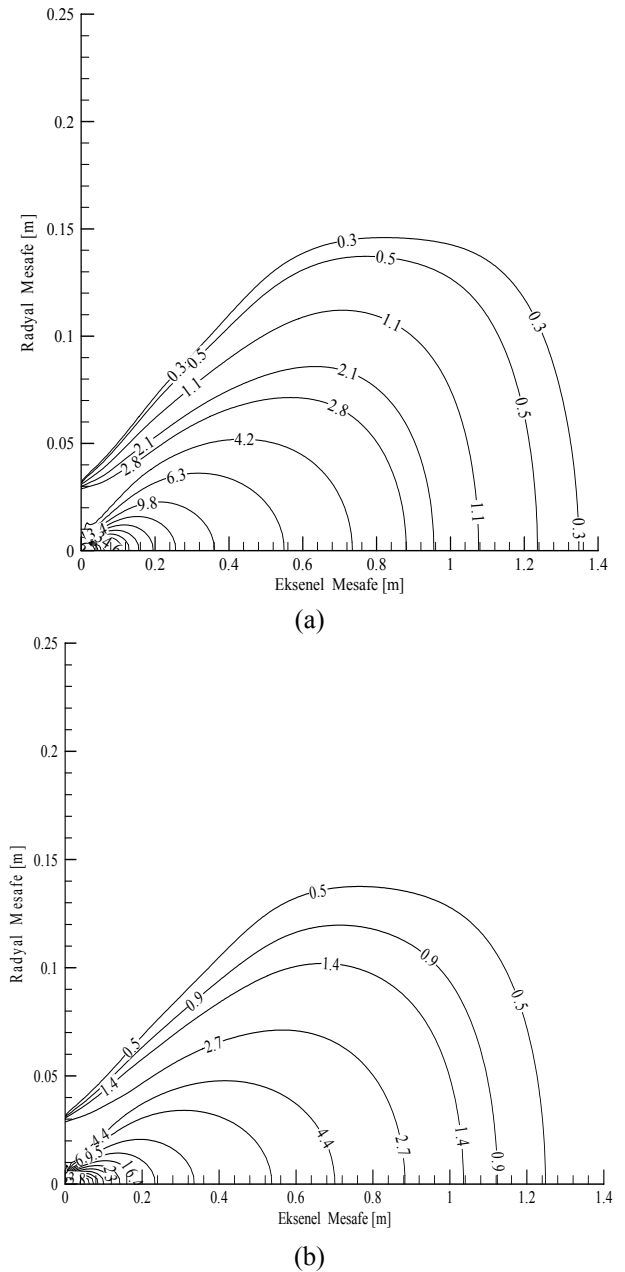
$$R_{i'k} = -\min\{(Denk.16), (Denk.17), (Denk.18)\} \quad (19)$$

Yakıt kütle kesri için taşınım denklemi çözülür. Burada yakıt reaksiyon oranı; yakıt, oksitleyici ve ürünlerin türbülans dağılım oranının en küçüğü olarak alınır. Yakıt kütle kesri denklemine ilave olarak, türünler ve oksijen kütle kesirlerinin belirlenmesi için diğer kimyasal türlerin taşınım denklemleri çözülür.

SAYISAL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

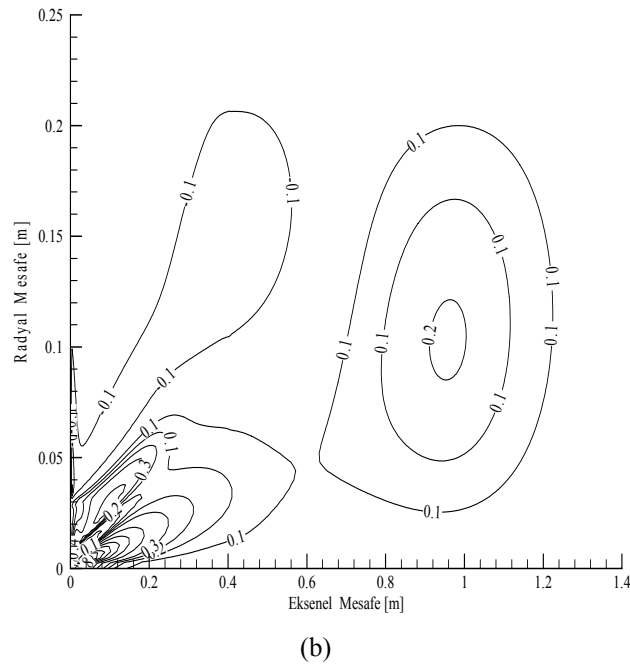
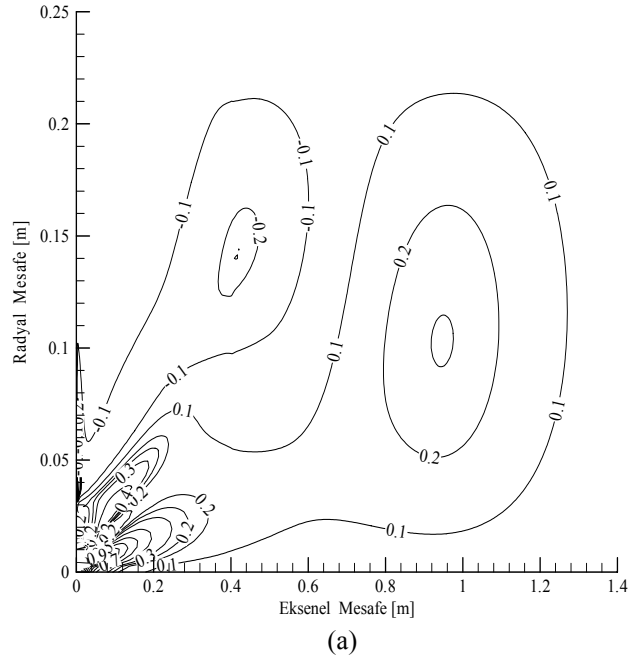
Konik girişli paslanmaz çelikten imal edilmiş bir yanma odasında hidrojen-metan karışımlı kompozit yakıtın sayısal simülasyonu Fluent programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmada hacimsel olarak %70 H₂ e % 30 CH₄ ve %30 H₂ ve % 70 CH₄ içeren yakıtlar için 40 kW ısı güç ve % 20 hava fazlalık değerinde sayısal simülasyon yapılmıştır. Bu yakıtlar ve işletme şartları, yazarlar tarafından aynı geometriye ve işletme şartlarında yanma odasından elde edilen deneysel ölçüm değerlerinin mümkün olması nedeniyle seçilmiştir. Deneysel sıcaklık ölçüm değerleri ve gaz analizörleri kullanılarak elde edilen emisyon değerleri sayısal simülasyon sonuçları ile karşılaştırılarak hidrojen-metan karışımı yakıt için en uygun yanma model sabiti belirlenmiştir.

Sayısal simülasyonda yanma model sabitinin iki farklı değerinin yanma aerodinamiğine etkileri Şekil 2-5'de verilmiştir. Model sabiti A'nın değerinde azalma ile (4'den 1'e) eksenel hızda büyük değişimler olmadığı Şekil 2a-b'den anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, reaksiyon gecikmesinden dolayı A'nın azalması ile eksenel hız çıkış bölgesinde biraz azalmaktadır.



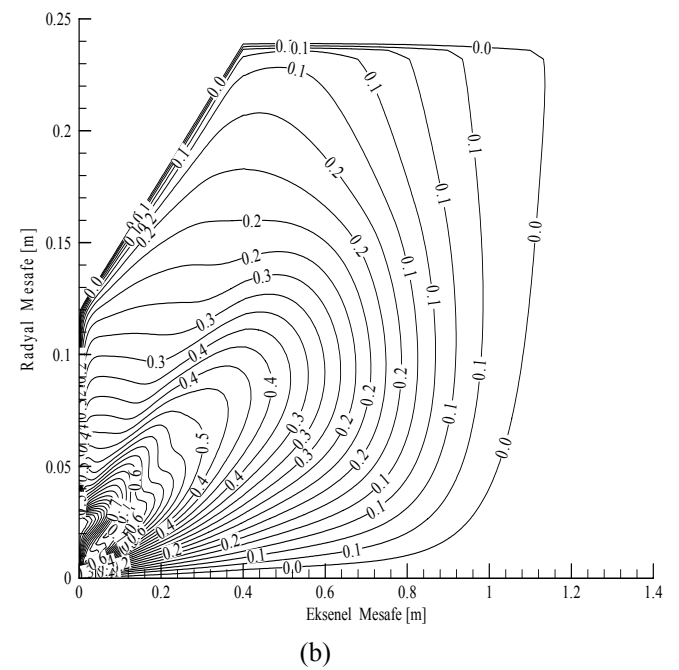
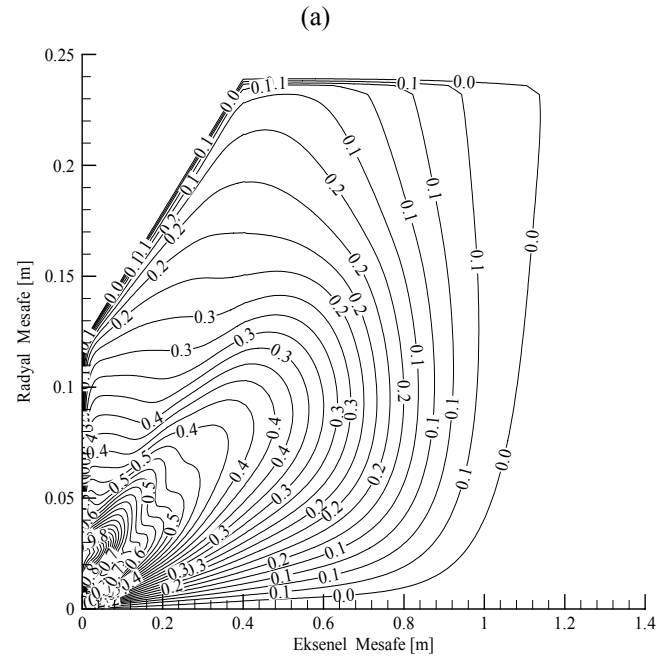
Şekil 2. Eksenel Hız Dağılımı [m/s], a)- A=4, b)- A=1.

A'nın azalması ile radyal hız seviyesi girişe yakın bölgede azalmasına karşın, yanma odası çıkışına yakın bölgede artma gösterdiği Şekil 3a-b'den görülmektedir.



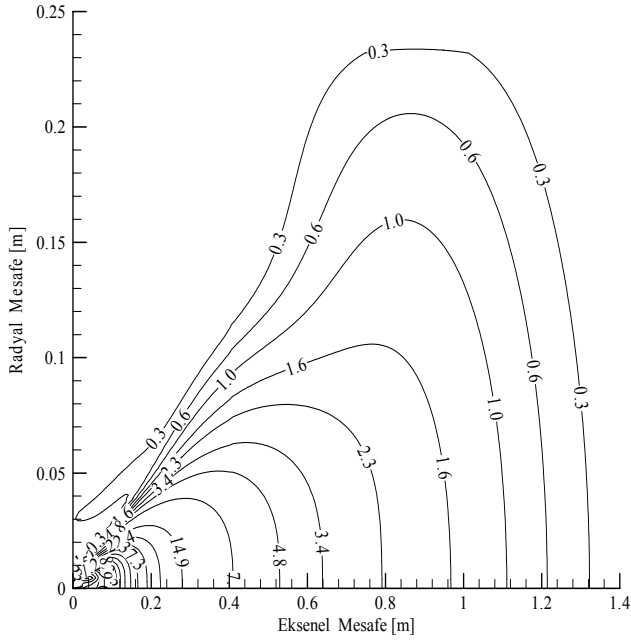
Şekil 3. Radyal Hız Dağılımı [m/s], a)-A=4, b)-A=1.

Yanma odası akış alanındaki bu değişimler reaksiyon gecikmesinden kaynaklanmaktadır.

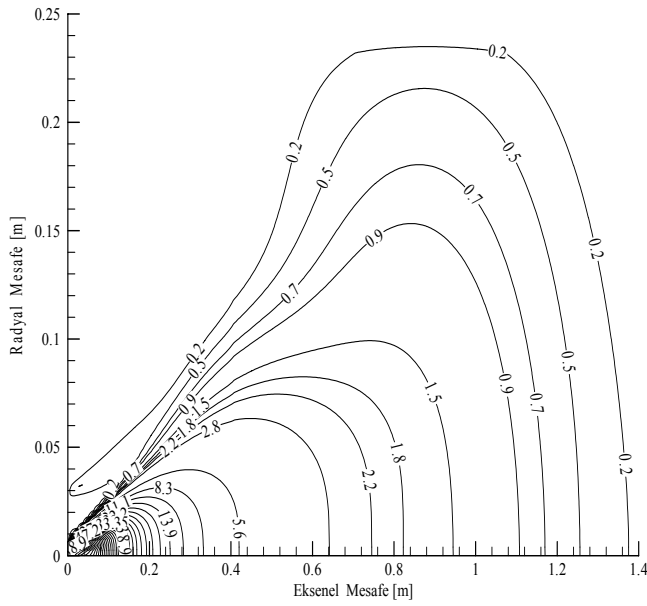


Şekil 4. Teğetsel Hız Dağılımı [m/s], a)-A=4, b)-A=1.

Maksimum teğetsel hız (w) seviyesinin A'nın azalması ile azaldığı Şekil 4a-b'den görülmektedir. Şekil 5a-b'den de görüleceği gibi maksimum türbülans seviyesinin model sabiti A'nın değerinde azalma ile azaldığı görülmektedir.



(a)



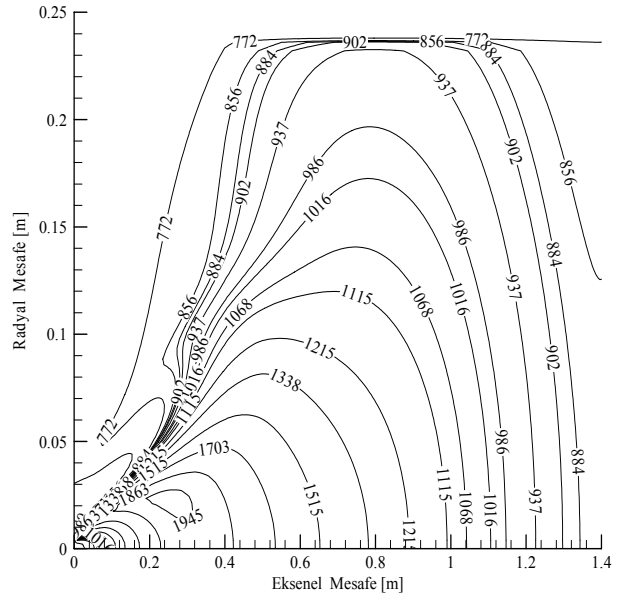
(b)

Şekil 5. Türbülans Kinetik Enerji Dağılımı [m^2/s^2], a)- $A=4$, b)- $A=1$.

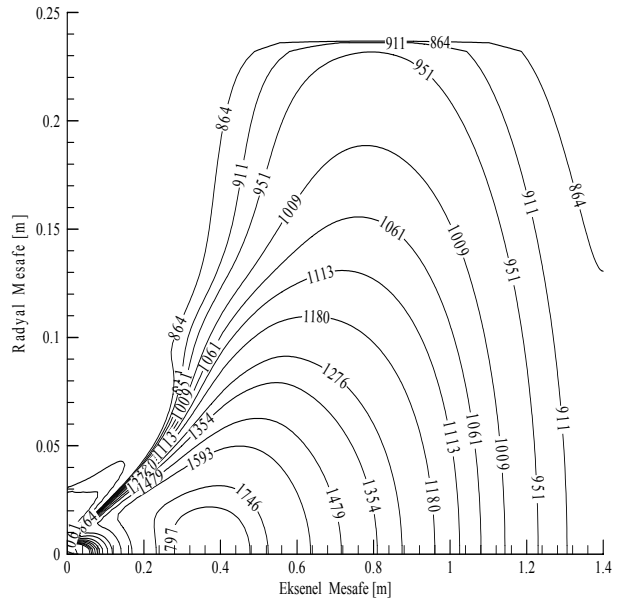
Yanma odası içerisindeki sıcaklık dağılımları Şekil 6a-b'de verilmiştir. Bu şekilden, yanma odası içerisinde sıcaklık dağılımı incelendiğinde yanma model sabitinin 4'den 1'e azalması ile sıcaklık seviyelerinde genel olarak azalmalar olduğu görülmektedir. Aynı şekilden model sabiti A 'nın değerinin azalmasına bağlı olarak alev bölgesinin bir miktar daha ileri doğru kaydığı görülmektedir. Bu durum A 'nın yüksek değerinde ($A=4$) yanmanın daha çabuk başladığını ve brülöre daha yakın bölgede gerçekleştiğini göstermektedir.

Model sabitinin 4 değerinde, yakıt ve oksijenin hızlı reaksiyonundan dolayı metanın (Şekil 7a-b) ve

hidrojenin (Şekil 8a-b) yandığı anlaşılmaktadır. Yanma odası çıkışında bütün hidrojen ve metanın tüketildiği Şekil 7-8'den görülmektedir. Şekil 9a-b incelendiğinde oksijenin çoğunun brülöre çok yakın bölgede tükendiği görülür. Model sabiti A 'nın değerinin 4'den 1'e azalması ile metan ve oksijen konsantrasyonlarının, bu gazların yavaş reaksiyonundan dolayı (A 'nın değerinin azalması nedeniyle) metan miktarının daha yüksek olduğu Şekil 7a-b'den, hidrojen miktarının da daha yüksek olduğu Şekil 8a-b'den anlaşılmaktadır. Oksijenin büyük miktarının brülöre çok yakın bölgede tükendiği Şekil 9a-b'den görülmektedir.

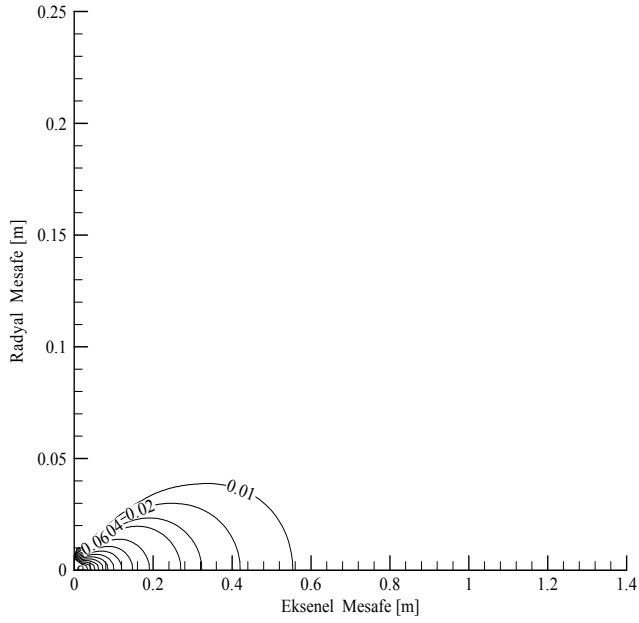


(a)

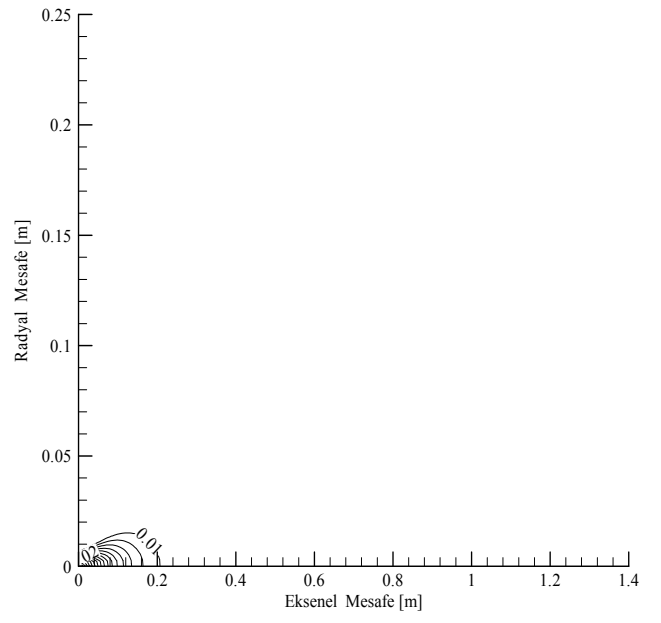


(b)

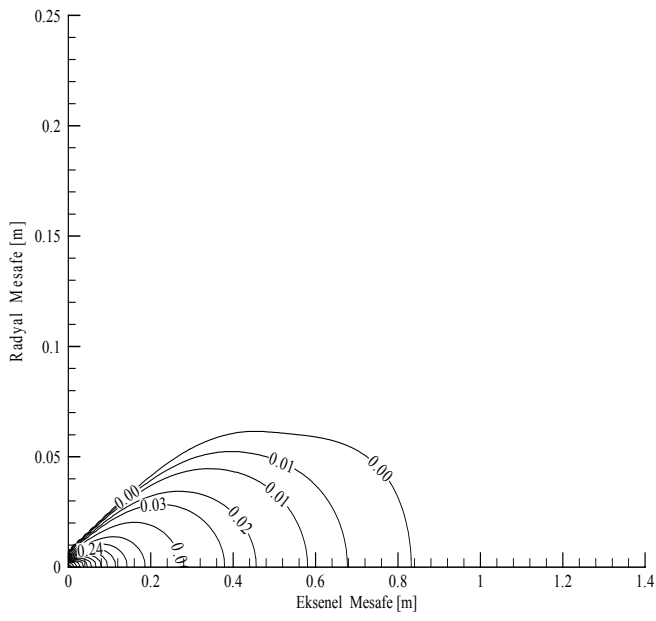
Şekil 6. Sıcaklık Dağılımı (K), a)- $A=4$, b)- $A=1$.



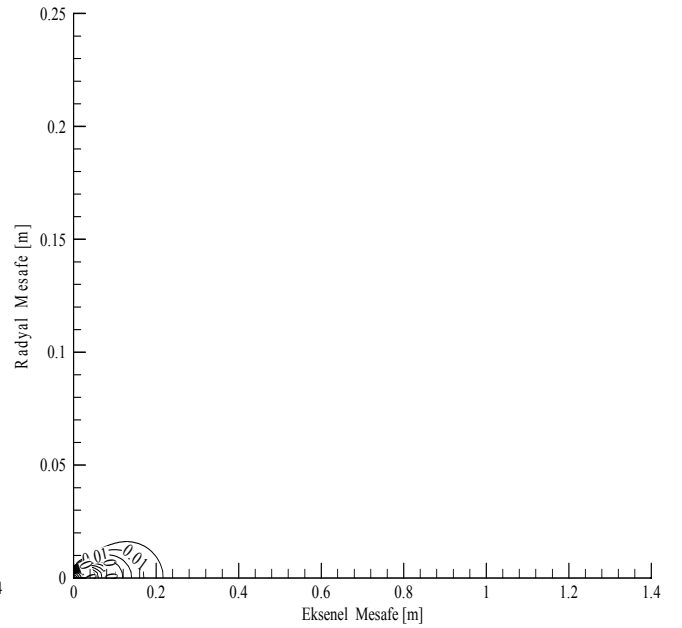
(a)



(a)



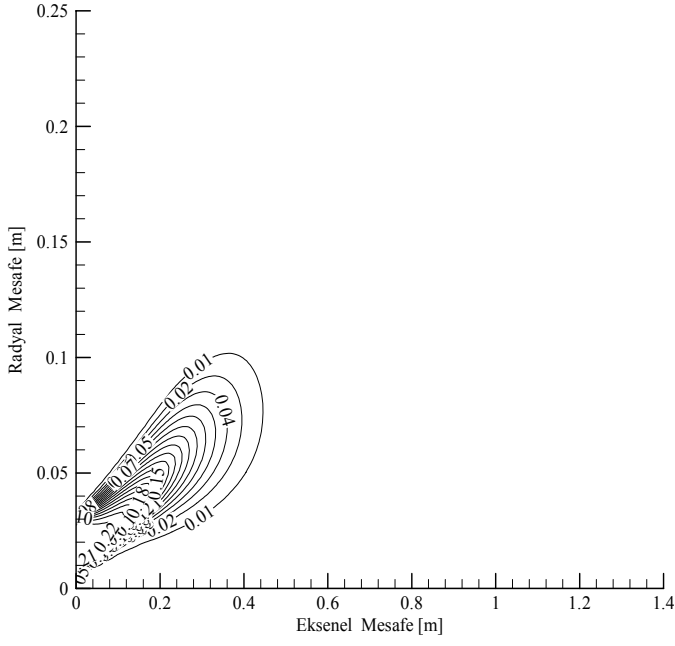
(b)



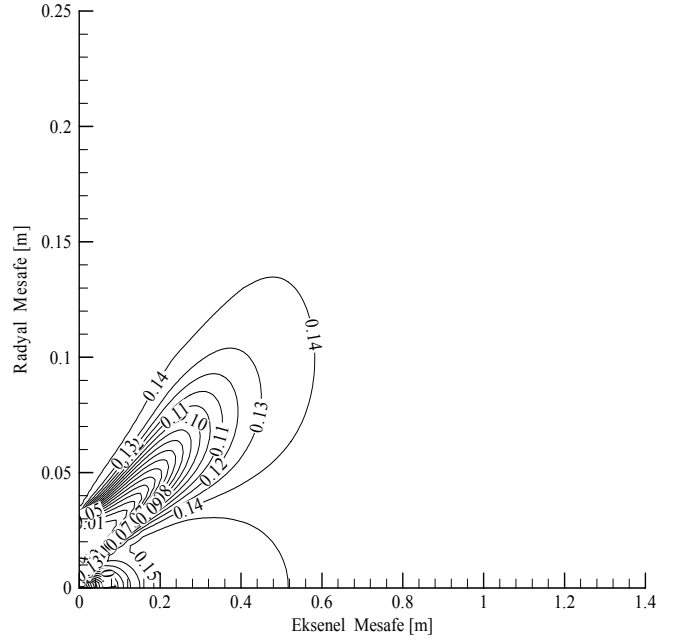
(b)

Şekil 7. CH₄ Dağılımı, a)-A=4, b)-A=1.

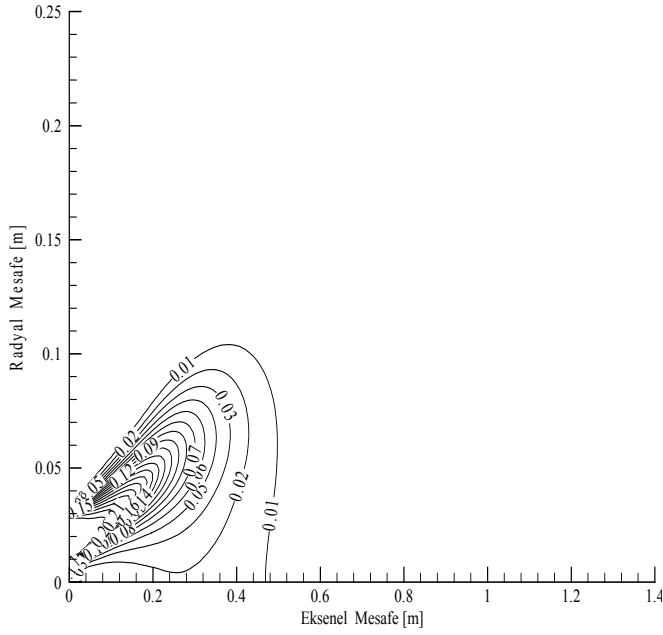
Şekil 8. H₂ Dağılımı, a)-A=4, b)-A=1.



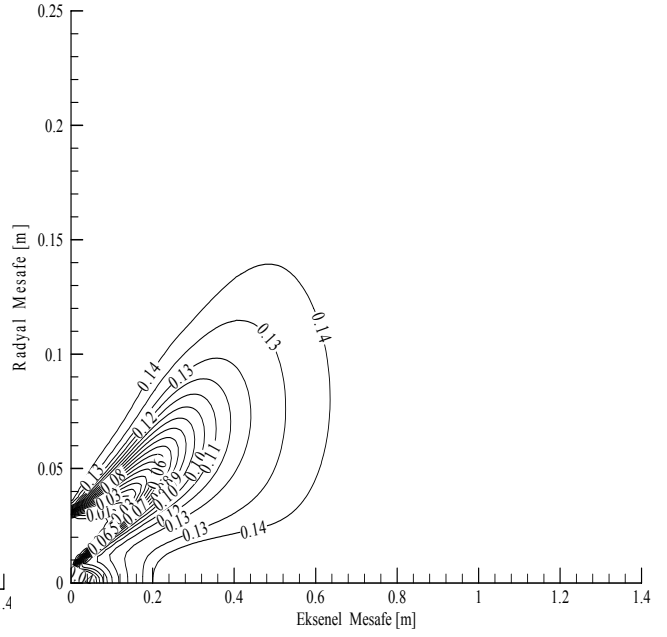
(a)



(a)



(b)



(b)

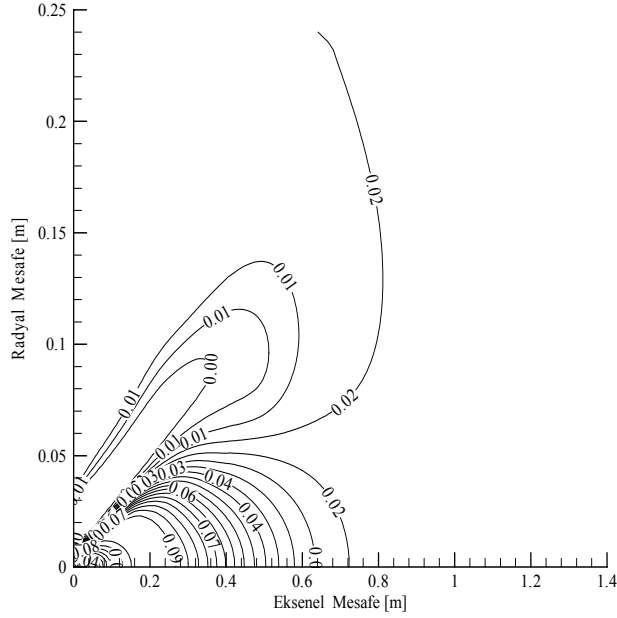
Şekil 9. O₂ Dağılımı, a)-A=4, b)-A=1.

Şekil 10. H₂O Dağılımı, a)-A=4, b)-A=1.

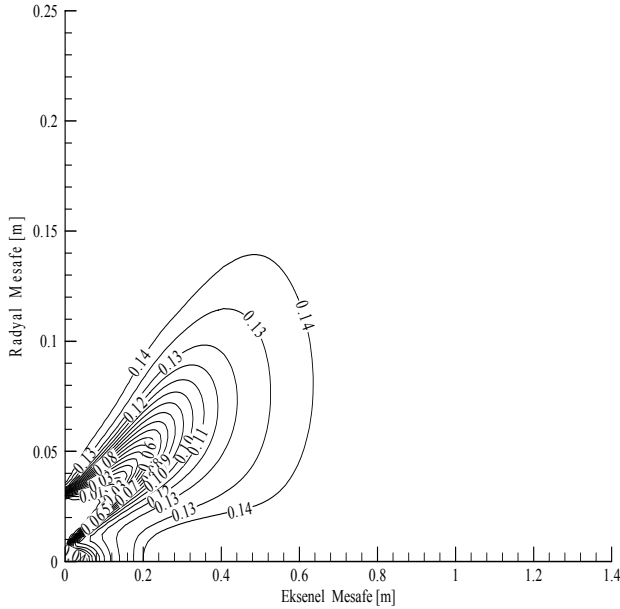
H₂O konsantrasyonunun model sabiti A'nın değerinin azalması ile bir miktar azaldığı Şekil 10a-b'den görülmektedir (A=4 için % 15, A=1 için ise % 13,65).

Model sabiti A'nın değerinin azalması ile maksimum CO miktarında artma olduğu Şekil 11a-b'den görülmektedir (A=4 için % 9 ve A=1 için ise % 8,1). Bu şekillerden de görüleceği gibi CO konsantrasyonu z=0,8 m'den sonra fazla değişmediği ve yanma odasının geniş bir alanına CO konsantrasyonunun yerleştiği anlaşılmaktadır. Bu durum ilk reaksiyonda CO oluşumunun yavaş ve ikinci reaksiyonda CO'nun CO₂'ye dönüşümünün yavaş olmasından kaynaklanmaktadır. Yanma odası çıkışında CO₂'ye

dönüşmeyen CO miktarı daha fazladır. A değerinin azalması ile ikinci reaksiyon kademesinin yavaşlamasından dolayı CO₂ miktarının azaldığı Şekil 12a-b'den görülmektedir.

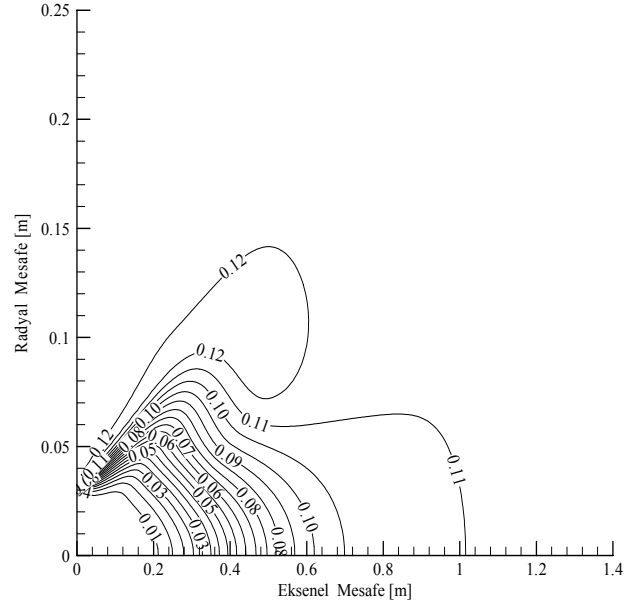


(a)

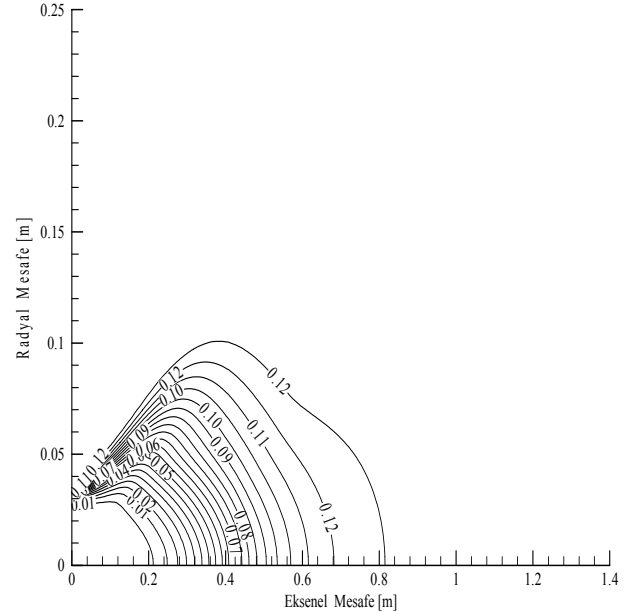


(b)

Şekil 11. CO Dağılımı, a)-A=4, b)-A=1.



(a)

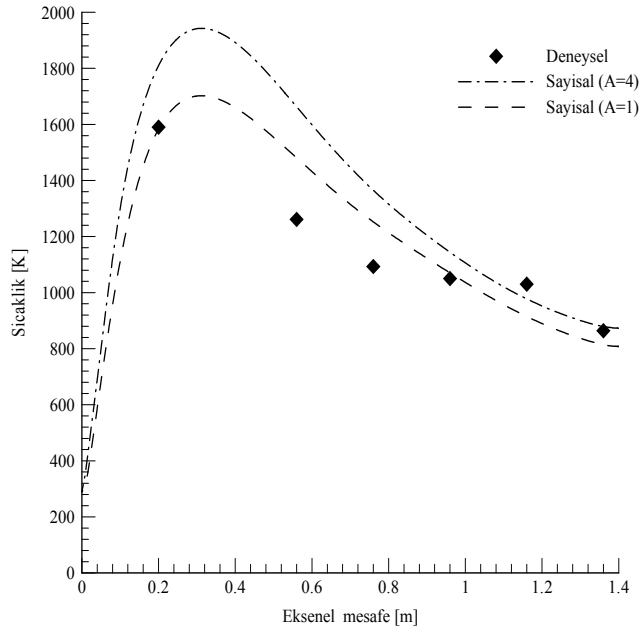


(b)

Şekil 12. CO₂ Dağılımı, a)-A=4, b)-A=1.

Deneyel Ölçümler ile Karşılaştırma

Hidrojen-metan karışımı yakıt yanmasında kullanılan model sabitinin yanma odası eksen sıcaklığı üzerindeki etkisi Şekil 13'de verilmiştir. Yanma model sabitinin iki farklı değerinde (4 ve 1) elde edilen eksenel sıcaklık dağılımı termal çiftler ile ölçülen sıcaklık seviyeleri ile karşılaştırıldığında, deneysel ölçüm değerlerine en yakın sonucun A'nın 1 değerinde elde edildiği görülmektedir. Model sabiti değerinin 4 alınması durumunda yanma reaksiyonunun meydana geldiği alev çekirdeğinde yaklaşık olarak 300 K civarında, brülörden daha uzak eksenel mesafelerde 400 K'ya yakın bir fark olduğu görülmektedir. Bu ölçülen ve tahmin edilen sıcaklık seviyelerindeki fark yanma odası çıkışına doğru, yanma reaksiyonunun tamamlanmasına bağlı olarak azalmaktadır.



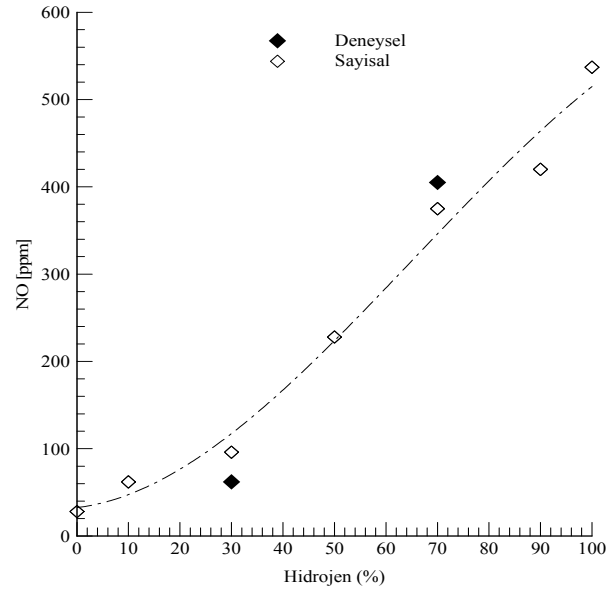
Şekil 13. Yanma Model Sabiti A'nın Sıcaklığa Etkisi.

Model sabiti A'nın 1 değeri kullanılarak hacimsel olarak %70 H₂ ve %30 CH₄ ve %30 H₂ ve %70 CH₄ kullanılarak elde edilen NO değeri ile ölçüm değerleri Şekil 14a'da verilmiştir. Hidrojen-metan karışımli kompozit yakıt yanmasında NO oluşum mekanizmasının ağırlıklı olarak ısıl kaynaklı olması nedeniyle A'nın 1 değeri için sıcaklık değerlerinin ölçüm değerlerine çok yakın olarak elde edilmesi (Şekil 13) ile aynı model sabiti ile elde edilen NO değerinin ölçüm değerlerine yakın olduğu Şekil 14a'dan anlaşılmaktadır.

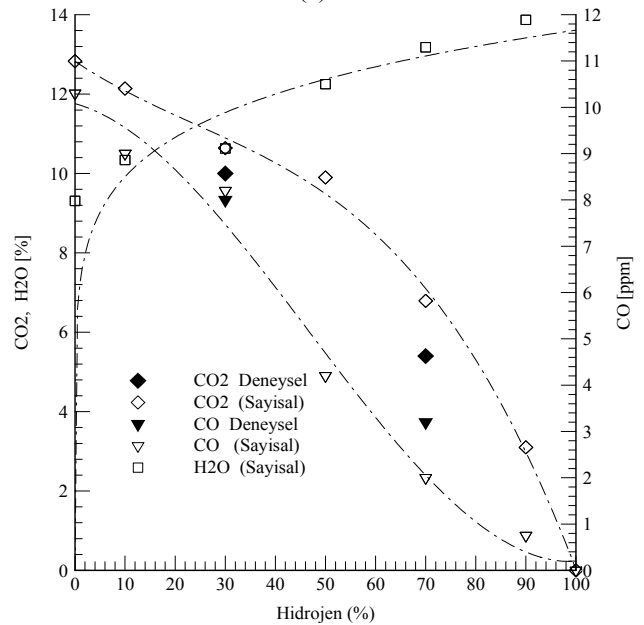
Model sabiti değeri 1 için hacimsel olarak %70 H₂ ve %30 CH₄ ve %30 H₂ ve %70 CH₄ içeren yakıtlar kullanılarak yapılan sayısal simülasyonlarda elde edilen CO ve CO₂ değerleri gaz analizörü ölçüm değerleri karşılaştırması Şekil 14b'de verilmiştir. Ölçülen emisyon değerleri ile tahmin değerlerinin uyumlu olduğu aynı şekilde görülebilmektedir. Şekil 14b'de tahmin edilen H₂O değerinin kompozit yakıttaki hidrojen miktarı ile değişimi de verilmiştir.

Yakıt karışımındaki hidrojen miktarının artması ile CO emisyonunun azaldığı yine Şekil 14b'den görülmektedir. CO emisyonunda yakıttaki hidrojen miktarının %30'dan %70'e yükselmesi ile daha keskin bir azalış olduğu aynı şekilde görülmektedir. Bu durum kompozit yakıttaki hidrojen içeriğinin artması ile karbon/hidrojen (C/H) oranının artmasından kaynaklanmaktadır. CO oluşum mekanizması pik alev sıcaklığına duyarlı değildir. Daha ziyade OH ve H gibi ara radikal konsantrasyonuna büyük ölçüde bağlıdır. CO yakıt ayrışması ile bir ara yanma ürünü olarak alevin yakıt zengin bölgesinde oluşmaktadır. Bu reaksiyon, sadece radikalleri içerdiğinden dolayı çok hızlıdır. Ayrıca, deneysel olarak ölçülen CO değerleri sayısal olarak hesaplanan değerlerden daha yüksek

olduğu Şekil 14b'den görülmektedir. Sayısal simülasyon tahminlerinde belirlenen H₂O miktarının değişimi aynı şekilde görülmektedir. Yakıt karışımındaki hidrojen içeriğinin artması ile H₂O miktarında artış olmaktadır. Bunun nedeni ise yakıt karışımında hidrojen miktarının artması ile yanma sistemine giren hidrojen miktarındaki artmadan kaynaklanmaktadır. Daha önceki yapılan çalışmalarda hidrojen-metan karışımli yakıtta hidrojen miktarının artması ile CO emisyonunun azaldığı ve H₂O miktarının arttığı belirlenmiştir (İlbaş, 2005 ve Yılmaz, 2008).



(a)



(b)

Şekil 14. Hidrojen Miktarı ile Emisyonların Değişimi: a) NO, b) CO₂, CO ve H₂O.

SONUÇLAR

Konik girişli paslanmaz çelikten imal edilmiş bir yanma odasında hacimsel olarak %30 hidrojen ve %70 metan ve %70 hidrojen ve %30 metan içeren kompozit yakıt kullanılarak %20 hava fazlalık değerinde ve 40 kW ısı güç için Fluent sayısal akışkan dinamiği programı yardımıyla difüzyon alevinin sayısal simülasyonu yapılmıştır. Sayısal simülasyonda yakıt ve hava karışımının yanması için kullanılan girdap ayrışma modelindeki (Magnussen model) model sabitinin iki farklı değeri kullanılarak, bunların sıcaklık, akış alanı ve emisyon üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada hidrojen-metan karışımı kompozit yakıt için yanma modeli sabitinin uygun olan değeri simülasyon sonuçları ile yazarlar tarafından yapılan deneysel ölçüm değerleri karşılaştırılarak belirlenmiştir. Yanma model sabitinin Magnussen modeldeki (Magnussen ve Hjertager, 1976) önerilen 4 değerinde alınması durumunda tahmin edilen sıcaklık değerlerinin ölçüm değerlerinden oldukça uzaklaştığı belirlenmiştir. Sunulan çalışmadaki yakıt ve işletme şartlarına bağlı olarak 400 K değerinde bir sıcaklık farkı meydana gelmiştir. Bu nedenle, Magnussen modeldeki A sabitinin kompozit gaz yakıt karışımlarının yanma simülasyonu için düzenlenmesine ihtiyaç bulunmaktadır. Model sabiti A'nın çalışmada kullanılan hidrojen-metan karışımı yakıtlar için 1 alınması halinde ölçüm değerlerine oldukça yakın sıcaklık ve gaz emisyonlarının tahmin edileceği görülmüştür.

Sunulan çalışma endüstriyel yanma odası tasarımında, kojenerasyon ünitelerindeki gaz türbin yakıcılarında ve kazanlar gibi yanma uygulamalarının sayısal çözümlenmesinde sıklıkla tercih edilen Fluent programını kullanan mühendis ve teknik personele oldukça yararlı bilgiler ve fikirler sağlayacaktır. Bu tip uygulamalarda programın kullanımında model sabitinin yakma sisteminde kullanılan işletme şartına bağlı olarak düzenleme yapılması halinde simülasyon sonuçlarının oldukça iyi sonuçlar vereceğini göstermektedir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar çalışmaya 105M037 nolu Bilimsel Araştırma projesi kapsamında desteği için Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Kurumuna (TÜBİTAK) teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

Fluent Incorporated, Fluent User's guide version 6.1., 2002.

İlbaş, M., Ultra low NO_x burner, Ph.D. Thesis, *University of Wales*, UK, 1997.

İlbaş, M., The effect of thermal radiation and radiation models on hydrogen-hydrocarbon combustion

modeling, *International Journal of Hydrogen Energy* 30, 1113-1126, 2005a.

İlbaş, M., Yılmaz, İ., Kaplan, Y., Investigations of hydrogen and hydrogen-hydrocarbon composite fuel combustion and NO_x emission characteristics in a model combustor, *International Journal of Hydrogen Energy*, 30, 1139-1147, 2005b.

İlbaş, M., Yılmaz, İ., Veziroğlu, T.N. Kaplan, Y., Hydrogen as burner fuel: modelling of hydrogen-hydrocarbon composite fuel combustion and NO_x formation in small burner, *International Journal of Energy Research*, 29, 973-990, 2005c.

Kaname, S., Use of prediction procedures to model swirl burner/furnace flows, Ph.D. Thesis, *University of Wales*, UK, 1994.

Lauder, B.E., Spalding, D., *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*, Academic Press, Newyork, 1974. Magnussen, B.F., Hjertager, B.H., On mathematical modeling of turbulent combustion with emphasis on soot formation and combustion, 16 th Syposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 719-729, 1976.

Scharler, R., Obernberger, I., Numerical optimisation of biomass grate furnaces, *Proceedings of the 5th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers*, ISBN-972-8034-04-0, Porto-Portugal, 2000.

Scharler, R., Fleckl, T., Obernberger, I., Modifikation der Magnussen-Parameter für Biomasse-Rostfeuerungen mittels Heißgas in-situ FT-IR Absorptionsspektroskopie, *Proceedings of the Conference 20. Deutscher Flammentag*, Essen-Germany, 2001.

Spangelo, O., Experimental and theoretical studies of a low NO_x swirl burner, Ph.D. Thesis, *Norwegian University of Science and Technology*, Norway, 2004.

Versteeg, H.K., Malalasekera, W., *Computational Fluid Dynamics*, Longman, Scientific&Technical, London, 1995.

Yılmaz, İ., Model bir yakıcıda hidrojen-metan karışımının yanmasının sayısal ve deneysel incelenmesi, *Erciyes Üniversitesi*, Doktora Tezi, 2006.

Yılmaz, İ., İlbaş, M., An experimental study on hydrogen-methane mixtured fuels, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35, 178-187, 2008.



İlker YILMAZ, 1976 yılında İstanbul da doğdu. 1999 yılında Erciyes Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 1999-2000 yılları arasında Köy Hizmetleri Adana Bölge Müdürlüğünde Mühendis olarak çalıştı. 2000 yılından beri Erciyes Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksek Okulunda görev yapmaktadır. 1999 yılında Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans eğitimine başladı ve 2001 yılında tamamladı. 2001 yılında Hidrojen enerjisi ve yanma konusunda Erciyes Üniversitesinde doktora eğitimine başladı ve 2006 yılında tamamladı. 2007 yılında Sivil Havacılık Yüksek Okulu Uçak Gövde-Motor Bölümüne Yrd. Doçent Dr. Olarak atandı. Çalışma konuları arasında yanma, hidrojen enerjisi ve gaz türbinleri bulunmaktadır.



Mustafa İLBAŞ, 1967 yılında Yozgat'ta doğdu. 1988 yılında Erciyes Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 1989 yılında E.Ü Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümüne Araştırma görevlisi olarak atandı. E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans eğitimini 1991 yılında tamamladı. 1993 yılında İngiltere(Birleşik Krallıklar) Wales Üniversitesi(UWCC), Makine ve Enerji Mühendisliği Bölümünde Doktora eğitimine başladı ve 1997 yılında tamamladı. Aynı yıl E.Ü mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde Yrd. Doçent, 2000 yılında Doçent ve 2006 yılında Profesör oldu. Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ yakıtlar ve yanma, hidrojen enerjisi, termodinamik ve enerji teknolojileri konularında çalışmaktadır.