



## ATMOSFERİK BRÜLÖRDE ENJEKTÖR ÇAPLI, ENJEKSİYON HIZI VE HAVA GİRİŞ DELİKLERİ SAYISININ HAVA-YAKIT KARIŞMASINA ETKİSİNİN NÜMERİK İNCELENMESİ

<sup>1</sup>Seyda ÖZBEKTAŞ , <sup>2</sup>Bilal SUNGUR , <sup>3</sup>Bahattin TOPALOĞLU 

<sup>1,3</sup>Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Samsun, TÜRKİYE

<sup>2</sup>Samsun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Samsun, TÜRKİYE

<sup>1</sup>seyda.ozbektas@omu.edu.tr, <sup>2</sup>bilal.sungur@samsun.edu.tr, <sup>3</sup>btopal@omu.edu.tr

(Geliş/Received: 07.06.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 11.10.2021)

**ÖZ:** Dünya enerji ihtiyacının büyük bir kısmı fosil kökenli kaynaklardan karşılanmaktadır. Ancak fosil enerji kaynaklarının giderek azalması, araştırmacıları mevcut kaynaklara alternatif olabilecek yeni yakıt arayışlarına ve eldeki kaynakları daha verimli kullanmaya yöneltmiştir. Ayrıca enerji üretilirken genelde bir yakma sisteminden faydalanılır ve yakma sisteminin verimi yanma kalitesiyle yakından ilgilidir. Gaz yakıtın durgun hava içine enjekte edildiği ve gereken yakma havasını emmek suretiyle yakma havasını yakıtın kendisinin temin ettiği yakıcılar atmosferik yakıcılar olarak bilinir ve bu yakıcılarda hava-yakıt karışma oranları yanma kalitesini belirlemede önemli bir paya sahiptir. Bu çalışmada örnek bir atmosferik brülörde enjektör çapının ve enjeksiyon hızının hava-yakıt karışmasına etkisi nümerik olarak incelenmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında iki, dört, sekiz ve sonsuz hava giriş delikli tasarımların brülördeki hava/yakıt karışmasına etkisi incelenmiştir. Hesaplamalar üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Türbülansın modellenmesinde Standard k-ε modeli kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, enjeksiyon hızının artması sürüklenen hava hızını arttırıcı yönde etki göstermiş, artan enjeksiyon hızıyla birlikte oluşan girdapların da boyutlarının büyüdüğü görülmüştür. Ayrıca hava giriş delik sayısının artmasıyla birlikte havanın içeri daha fazla nüfuz ettiği ve buna bağlı olarak λ değerinin arttığı görülmüştür. Ancak bu artışın önemli seviyelerde olmadığı belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Atmosferik brülör, Enjektör, Nümerik modelleme

### Numerical Investigation of the Effect of Injector Diameter, Injection Velocity and Air Inlet Hole Numbers on Air-Fuel Mixing In Atmospheric Burner

**ABSTRACT:** The world's energy needs are mostly supplied from fossil sources. However, the gradual decrease in fossil energy resources has led researchers to search for new fuels that can be an alternative to existing resources and to use the available resources more efficiently. In addition, a combustion system is generally used when generating energy and the efficiency of the combustion system is closely related to the combustion quality. Burners in which gaseous fuel is injected into still air and the combustion air supplied by the fuel itself by sucking the required combustion air are known as atmospheric burners, and air-fuel mixing ratios in these burners have an important role in determining the combustion quality. In this study, the effect of injector diameter and injection velocity on air-fuel mixing in a sample atmospheric burner was investigated numerically. Additionally, the effect of designs with two, four, eight and infinite air inlet holes on the air/fuel mixing in the burner was investigated. Calculations were made at three dimensional conditions. Standard k-ε model was used as turbulence model. Results showed that the increase in the injection velocity increased the entrained air velocity, and with the increasing injection velocity vortices size increased. In addition, it has been observed that with the increase in the number of

air intake holes, the air penetrates more and consequently the  $\lambda$  value increases. However, it was determined that this increase was not significant.

**Key Words:** *Atmospheric burner, Injector, Numerical modeling*

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji, günlük yaşamın vazgeçilmez bir unsurudur ve gün geçtikçe artan nüfus ve teknolojiye paralel olarak enerji ihtiyacı da artmaktadır. Bununla birlikte enerji üretiminde kullanılan kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil kaynaklı yakıtlar giderek tükenmektedir ve bu kaynaklar çevreye zararlı emisyonlar yaymaktadır.

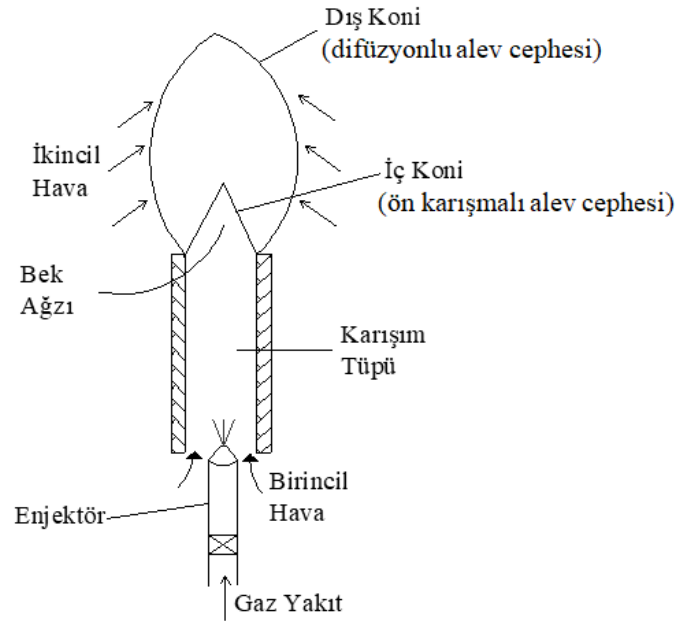
Gaz yakıtlar denildiğinde akla ilk gelen ve en çok kullanılan yakıt doğalgazdır. Özellikle son yıllarda konut, sanayi ve sosyal tesislerde doğalgaz kullanımı yaygınlaşmıştır. Doğal gaz kullanımının artmasıyla birlikte karbon emisyonlarında da artış beklenmektedir. Ayrıca enerji fiyatlarının her geçen gün artması da doğalgazın uygun sistemlerle verimli bir şekilde kullanılması gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır.

Gaz yakıtlı brülörlerde, brülör geometrisi, yakıt tipi, birincil ve ikincil hava miktarları, hava fazlalık katsayısı gibi pek çok parametre değiştirilerek verim artışı sağlanabilir. Tüm bu parametrelerin deneysel olarak incelenebilmesi oldukça pahalı ve zaman alıcıdır. Bu nedenle bu tarz problemlerin çözümünde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) programlarından yararlanılabilir. Özellikle son yıllarda bilgisayar teknolojisinde olan hızlı ilerlemeler HAD programlarını daha cazip hale getirmiştir ve yanma gibi kompleks problemlerin çözümünde oldukça tercih edilir.

Yanma veya alev çeşitleri yakıtla oksijenin karıştırılmasına göre ön karıştırmalı, kısmen ön karıştırmalı ve sonradan karıştırmalı şeklinde sınıflandırılabilir. Gaz yakıtın durgun hava içine enjekte edildiği ve gereken yakma havasını emmek suretiyle yakıtın kendisinin temin ettiği yakıcılar atmosferik yakıcılar adıyla bilinir. Böylece bir fana gerek kalmamaktadır. Şekil 1’de bir atmosferik gaz yakıcısının şematik gösterimi verilmiştir. Enjektörden gelen gaz jeti etrafında negatif basınç oluşturur. Bu negatif basınç nedeniyle, ortam havası yakıt jeti etrafında sürüklenir. Yakıt jeti ile birlikte sürüklenen birincil hava karışım tüpüne girer. Daha sonra birincil hava ve gaz karıştırma odasında karışır. Elde edilen karışım, karışım tüpünden çıkar ve ikincil hava ile karşılaşır. İlk kıvılcım verildikten sonra yanma işlemi gerçekleşir. Bu durumda yakıt ve hava yanmadan önce (en azından kısmen) karışmakta ve yanma ortamında tutuşarak yanmaktadır. Bunlar (kısmen) ön karışmalı alevlerdir (Topaloglu ve diğ., 2020).

Ön karıştırmalı alevler seyrek uygulanmakla birlikte basit olmaları açısından önemlidir. En fazla görülen ön karıştırmalı yakıcı Bunsen brülörüdür. Bu alette gaz yakıtla hava önceden karıştırılır ve borunun ağzından yakılır. Böyle birkaç yakıcı bir araya getirilerek bir ocak elde edilebilir. Karışma borusuna giren (birincil) hava minimum (stokiyometrik) hava miktarının altındadır. Bu nedenle Şekil 1’de görüldüğü gibi genellikle ön karışmalı yanmanın üzerinde difüzyon alevi oluşur. Alevin çevresindeki hava (eksik) yanma ürünleri içine difüzyonla karışarak yanmayı tamamlar. Mutfaklarda kullanılan gaz yakıtlı ocaklar bu prensiple çalışmaktadır.

Hava ve yakıt karışımının önemli olduğu alanlardan birisi de gaz motorlarıdır ve bu motorlarda gaz karıştırıcı adı verilen ve hava-yakıt gazını karışmasını sağlayan önemli bir eleman vardır. Venturi gaz karıştırıcıları, bir sıvının (havanın) basınç enerjisini boğazdaki hız enerjisine dönüştürerek bir düşük basınç bölgesi oluşturan ve Bernoulli’nin yakınsak-uzaklaşan nozül ilkesinin özel bir örneği olan cihazlardır. Bu düşük basınç bölgesi, yakıtın karışma odasına sürüklenmesine neden olur ve hava ile karışımı sağlar. Üretilen karışımın hava-yakıt oranı belirli bir aralıkta olmalıdır aksi takdirde düşük performans ve yüksek egzoz emisyonları oluşabilir. Hava veya yakıt gazı girişinde ek basınç yoksa, karıştırıcının hava-yakıt oranı yalnızca karıştırıcı tasarımına bağlı olacaktır ve bu nedenle karıştırıcı tasarımı oldukça önemlidir.



Şekil 1. Bir atmosferik gaz yakıt yakıcısının şeması (Topaloglu ve diğ., 2020)

Figure 1. A schematic view of atmospheric burner

Emisyon değerlerini azaltmak ve verimli yanma sağlamak için yanma işlemi sırasında yeterli miktarda birincil hava alınmalıdır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde hava ile yakıtın karışmasına etki eden geometrik faktörler üzerine yoğunlaşıldığı tespit edilmiştir. Venturi karıştırıcısının hava-yakıt oranı ve basınç kaybı venturi boğaz çapı, venturi boğaz alanı, boğaz konumu, gaz giriş alanı, gaz giriş yeri ve gaz delikleri sayısı gibi çeşitli özelliklerden etkilendiğini belirten çalışmalar mevcuttur (Baylar ve diğ., 2009, 2010, 2007; Danardono ve diğ., 2011). Danardono ve diğ. (2011) hava ile sentetik gazı karıştırmak amacıyla venturi karıştırıcısı geliştirmişlerdir. Boğaz çapı, gaz odası kalınlığı ve gaz çıkış çapının karıştırıcı özellikleri ve performansı üzerindeki etkisini araştırmak ve analiz etmek için hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı kullanmışlardır. Romańczyk ve Elsner (2019), bir venturi gaz karıştırıcısında karıştırma kalitesinin iyileştirilmesi üzerine çalışmışlardır. Karışma sürecini iyileştirmek ve gaz ile hava arasındaki karıştırma süresini arttırmak için venturi borusuna silindirik türbülötör şeklinde elemanlar yerleştirmiş ve türbülötörlerin karışmaya olan etkisini nümerik olarak incelemişlerdir. Türbülötör eklenmesinin karışma sürecini olumlu etkilediğini ancak basınç kayıplarını arttırdığını ifade etmişlerdir. Pritchard ve diğ. (1977) birincil hava sürüklenme seviyesini hesaplamak için basitleştirilmiş bir teorik formülasyon önermiştir. Elde ettikleri sonuçlar, birincil hava sürüklenmesinin yakıt gazı akış hızı, yakıt gazı tipi, enjektör geometrisi, karıştırma borusu geometrisi ve brülör delik geometrisinin bir fonksiyonu olduğunu göstermiştir. Singh ve diğ. (1999) sonlu elemanlar modeli kullanarak soğuk test durumu şartlarında birincil hava sürüklenme seviyesini tahmin etmişlerdir. Yakıt yoğunluğu yüksek olduğunda birincil hava sürüklenmesinin daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Singh ve diğ. (2003) daha sonra soğuk test durumunun birincil hava sürüklenmesini belirlemek için deneysel bir çalışma da gerçekleştirmiştir. Brülör çıkışının enjektör deliği çapına oranı arttığında ölçülen birincil hava sürüklenmesinin daha yüksek olduğu bulunmuştur. Ayrıca ölçülen birincil hava sürüklenmesi değerlerinin teorik sonuçlarla iyi uyum sağladığını belirtmişlerdir. Namkhat ve Jugjai (2010) atmosferik brülörün birincil hava sürüklenme özelliklerini deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. Birincil hava sürüklenmesinin, yakıt debisi, yakıt tipi, enjektör geometrisi, karıştırma borusu geometrisi ve brülör deliği geometrisinin bir fonksiyonu olduğunu belirtmişlerdir. Birincil hava sürüklenme seviyesinin, yakıtın artan momentum oranıyla arttığını ifade etmişlerdir. Milivojevic ve diğ. (2020), düşük güçlü atmosferik brülörlerin performansının optimizasyonu süreci ile ilgili teorik ve deneysel çalışma yapmışlardır. Teorik çalışmalarının ana hedefi olarak düşük güçlü atmosferik gaz brülöründe brülör geometrisi, birincil ve

ikincil hava etkisi ve farklı gaz karışımlarının etkisini incelemek olduğunu ifade etmişlerdir. Teorik olarak elde ettikleri sonuçlar ile deneysel sonuçların birbirleriyle uyum içerisinde olduğunu belirtmişlerdir. Jugjai ve diğ. (2001) ve Hou ve diğ. (2007) yakıt olarak LPG kullanan atmosferik brülörlerin ısı performanslarının iyileştirilmesi üzerine araştırmalar yapmışlardır. Alevin akış şeklini radyal bir akıştan dönen (swirl) bir akışa değiştirerek termal verimliliğin artırılabilirliğini elde etmişlerdir. Hemidi ve diğ. (2009) süpersonik ejektörlerde hava sürüklenmesini deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Tüm çalışma koşulları aralığında, genel sapmanın  $k-\epsilon$  modeli için % 10'un altında olduğunu, ancak  $k-\omega$ -sst modelleri için sonuçların daha az uyum içinde olduğunu belirtmişlerdir. Zhu ve diğ. (2009) birincil nozul çıkış konumu ve karıştırma bölümünün yakınsak açısı gibi iki önemli ejektör parametresinin performansa etkisini nümerik olarak araştırmışlardır. Liu ve diğ. (2013) ön karıştırmalı yanma teorisine dayanan düşük  $\text{NO}_x$  brülör ejektörü geliştirmişlerdir. Ejektörün akış ve karıştırma işlemlerine odaklanan yeni tasarlanmış brülörün performansını nümerik ve deneysel olarak kıyaslamışlardır. Şener ve diğ. (2019), ev tipi ocaklarda verim artışını hedeflemişlerdir. Bu kapsamda ocaktan brülör kafasına olan mesafeyi ve brülör çapını değiştirerek hilal şeklinde alev kanallarına sahip bir ev tipi brülörün ısı verimini sayısal olarak hesaplamışlardır. Yakıt olarak metan kullanmışlardır ve üç farklı çap ve mesafe parametrelerinde hesaplamalar yapmışlardır. Sonuç olarak ocak çapı ve mesafe parametresinin artmasıyla yüzey sıcaklığının ve yanmamış CO, NO ve HC emisyon değerlerinin azaldığını belirtmişlerdir. Önal ve Ağra (2017), birincil hava sürüklenmesini etkileyen parametrelerden enjektör geometrisini incelemişlerdir. Bu bağlamda enjektör ağzının çapını sabit tutmuş enjektör ağzının çıkış açısını değiştirilmişler ve nümerik hesaplamalar yapmışlardır. Sonuç olarak enjektör çıkış açısının artması ile daha çok havanın içeriye sürüklendiğini belirtmişlerdir.

Daha önce belirtildiği gibi literatürde yapılan çalışmalarda hava-yakıt karışması genellikle venturi tipinde irdelenmiştir ve venturi boğaz çapı, venturi boğaz alanı, boğaz konumu, gaz giriş alanı, gaz giriş yeri ve gaz delikleri sayısı gibi parametreler üzerine odaklanılmıştır. Ancak atmosferik brülörlerde enjektör çapının, hızının ve hava giriş delikleri sayısının hava-yakıt karışmasına etkisi ile ilgili yapılan çalışmalar sınırlı sayıdadır. Ayrıca bu üç parametrenin (enjektör çapı, hızı ve hava giriş delikleri sayısı) birlikte incelendiği çalışmaya literatürde rastlanılmamıştır. Bu çalışmada, örnek bir atmosferik brülörde enjektör çapının, enjeksiyon hızının ve hava giriş delikleri sayısının hava-yakıt karışmasına etkisi nümerik olarak incelenmiştir. Hesaplamalar üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Türbülansın modeli olarak Standard  $k-\epsilon$  modeli kullanılmıştır. Enjektör çapı ve enjeksiyon hızına göre oluşan hız vektörleri, akım çizgileri, hava-yakıt karışım oranları incelenerek sonuçlar değerlendirilmiştir.

## MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

Gaz yakıtlar genelde birçok saf bileşenin karışımından oluşmaktadır. Bu bileşenlerin yanması kolayca temel reaksiyonlarla hesaplanabilir. Yanma işleminin analizinde Hava-Yakıt karışım oranı ( $H/Y$ ) ile tanımlanan bir parametre sıklıkla kullanılır ve yakıt-hava miktarlarını sayısal olarak ifade etme kısmında oldukça önemlidir.

$$H/Y = \frac{\text{Hava Miktarı}}{\text{Yakıt Miktarı}}$$

Bir yakıtın tam yanması için gereken hava miktarına stokiyometrik (minimum) hava ihtiyacı ( $H_{\min}$ ) adı verilir. Gaz yakıtların bileşimi hacimsel olarak verilir. Bu durumda, stokiyometrik hava/yakıt oranını da hacimsel olarak belirlemek daha pratik olacaktır. Uygulamada yanmanın tam olmasını sağlamak için gerekenden biraz fazla hava ( $H_{\text{gerçek}}$ ) verilir:

$$H_{\text{gerçek}} = \lambda * H_{\min}$$

Bu eşitlikle tanımlanan  $\lambda$  hava fazlalık katsayısıdır. Genel olarak tam yanma için  $\lambda > 1$  seçilir. Ancak atmosferik brülörlerin karışma borusunda  $\lambda < 1$  olur.

Herhangi bir yakma sisteminde hava fazlalık miktarı arttıkça (bu artış çok aşırı olmadığı takdirde) karbonmonoksit ve yanmamış hidrokarbonların baca gazındaki oranı azalmaktadır. Ancak yanma veriminin hava fazlalığındaki artış ile belirli bir noktaya kadar arttığı ve daha sonra düştüğü bilinmektedir. Sisteme beslenen aşırı hava yanma sıcaklığını düşürerek yanmanın tamamlanmamasına neden olabilir. Bu nedenle yakıt ve yakma sisteminin bir fonksiyonu olarak optimum bir yanma havası miktarının belirlenmesi faydalı olacaktır. Böylece hem hava kirliliği önlenmiş olur hem de verimli bir yanma sağlanır. Mutfak ocağı, bunsen brülörü gibi yakıcılarda ise yanma işlemi kısmen ön karışmalı olarak gerçekleşir. Daha önce belirtildiği gibi bu tip yakıcılarda karışım borusu içerisinde  $\lambda < 1$  seçilir ve genellikle metan için bu değer yaklaşık olarak 0.5 civarındadır. Daha sonra çevreden emilen ikincil taze hava ile birlikte  $\lambda$  değeri artar ve yanma işlemi tamamlanır.

Bilgisayar alanında yaşanan gelişmeler ile birlikte mühendislik problemlerinin çözümünde nümerik yöntemler oldukça sık kullanılmaya başlanmıştır. Temel olarak akış problemlerinin çözümünde, analitik, deneysel ve nümerik yöntemler uygulanabilir. Belirtilen yöntemler ayrı ayrı kullanılabilirdiği gibi, birlikte de kullanılabilirler. Bu çalışmada nümerik yöntemleri kullanan bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı olan Fluent paket programı kullanılmıştır (Ansys Fluent, 2017) ve programda kullanılan modellerin detayları hakkında bilgiler verilmiştir.

En genel halde genel korunum denklemi şu şekilde ifade edilir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \Phi) + \text{div}(\rho v \Phi - \Gamma_{\Phi} \text{grad} \Phi) = S_{\Phi} \quad (1)$$

Bu denklemde  $\Phi$  bağımlı değişkeni,  $\Gamma_{\Phi}$   $\Phi$  değişkeninin taşınım katsayısını ve  $S_{\Phi}$   $\Phi$  değişkeninin kaynak terimini ifade etmektedir.  $\Phi$ ,  $\Gamma_{\Phi}$  and  $S_{\Phi}$  ifadelerinin anlamı Tablo 1'de verilmiştir.

**Çizelge 1.**  $\Phi$ ,  $\Gamma_{\Phi}$  ve  $S_{\Phi}$  ifadelerinin açıklama gösterimi

*Table 1.* Peprsentation of the expressions of  $\Phi$ ,  $\Gamma_{\Phi}$  ve  $S_{\Phi}$

Eşitlik	$\Phi$	$\Gamma_{\Phi}$	$S_{\Phi}$
Süreklilik	1	0	0
Momentum	$v$	$\mu_e$	$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_e \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial p}{\partial x_j} \left( \mu_e \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) + \rho g_i$
Türbülans kinetik enerjisi	$k$	$\frac{\mu_e}{\sigma_k}$	$G_k - \rho \epsilon$
Yutulma	$\epsilon$	$\frac{\mu_e}{\sigma_{\epsilon}}$	$\frac{\epsilon}{k} (C_1 G_k - C_2 \rho \epsilon)$
Türlerin kütle korunumu	$Y_k$	$\frac{\mu_e}{\sigma_h}$	

Türbülanslı akışı simüle etmek için birçok türbülans modeli mevcuttur ve Standard k- $\epsilon$  modeli bunlardan birisidir. Standard k- $\epsilon$  model ısı transferi ve akışkan akış analizi için yaygın olarak tercih edilen bir modeldir (Choi ve diğ., 2011; Danardono ve diğ., 2011) ve bu nedenle bu çalışmada da Standard k- $\epsilon$  türbülans modeli kullanılmıştır. Standard k- $\epsilon$  model, türbülans kinetik enerjisi ( $k$ ) ve yutulma ( $\epsilon$ ) için taşınım eşitliklerini modellemeye dayanan yarı ampirik iki eşitlikli bir modeldir. Bu modelde türbülans viskozitesinin, türbülans hızı ve uzunluk ölçeği ile orantılı olduğu kabul edilir. Bu hız ve uzunluk ölçekleri  $k$  ve  $\epsilon$ 'dan elde edilir (Özdoğan ve diğ., 2016). Türbülans kinetik enerjisi ( $k$ ) ve yutulma ( $\epsilon$ ) aşağıdaki eşitliklerden elde edilir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\epsilon}} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_{\epsilon} \quad (3)$$

Bu denklemlerde  $G_k$  ortalama hız gradyentinden kaynaklanan türbülans kinetik enerji üretimi,  $G_b$  kaldırma kuvvetleri etkisinden kaynaklanan türbülans kinetik enerji üretimi,  $Y_M$  toplam yutulma oranına sıkıştırılabilir türbülanstaki çalkantı ayrılmasından dolayı oluşan katkı,  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  ve  $C_{3\varepsilon}$  sabitlerdir.  $\sigma_k$  ve  $\sigma_\varepsilon$ ,  $k$  ve  $\varepsilon$  için türbülans Prandtl sayıları,  $S_k$  ve  $S_\varepsilon$  kullanıcı tanımlı kaynak terimleridir. Standard k- $\varepsilon$  modelde kullanılan sabitlerin değerleri Çizelge 2’de verilmiştir.

**Çizelge 2.** Standard k- $\varepsilon$  modelde kullanılan sabitler ve değerleri

*Table 2. The values of the constants used in the Standard k- $\varepsilon$  model*

Sabit	Değer
$C_{1\varepsilon}$	1.44
$C_{2\varepsilon}$	1.92
$C_\mu$	0.09
$\sigma_k$	1.0
$\sigma_\varepsilon$	1.3

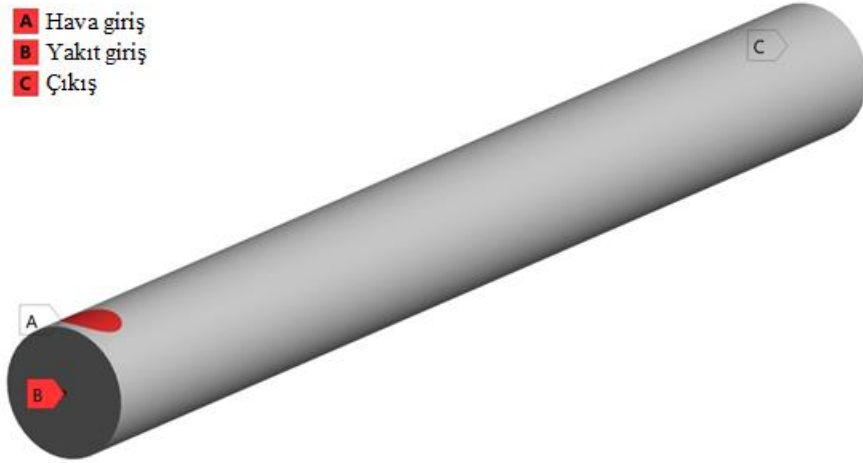
Basınç-hız çiftinin çözümünde SIMPLE algoritması kullanılmıştır. Çözümlerde basınç denklemlerinin dışındaki denklemlerin ayrıklaştırılması için birinci dereceden Upwind Şema kullanılmıştır. Çözümlemelerin tümünde süreklilik ve diğer yakınsama kriterleri,  $10^{-6}$  mertebesine yakınsayana kadar iterasyonlar sürdürülmüştür.

Hesaplamalar sonucu elde edilen hız vektörleri, akım çizgileri, hava-yakıt karışım oranları incelenerek sonuçlar değerlendirilmiştir.

#### **Enjektör Çapı ve Enjeksiyon Hızı (Injector Diameter and Injection Velocity)**

Çalışmanın bu kısmında uygulamada kullanılan iki hava giriş delikli Bunsen brülörü için enjektör çapının ve enjeksiyon hızının hava-yakıt karışmasına etkisi nümerik olarak incelenmiştir. Bu kapsamda enjektör çapları 0.5 mm, 0.75 mm ve 1 mm olmak üzere üç ayrı çap değerinde seçilmiştir. Ayrıca her çap değeri için 50 m/s, 70 m/s ve 90 m/s olmak üzere üç ayrı hız değeri ile hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Her durum için karışma borusunun uzunluğu 100 mm, çapı ise 10 mm alınmış olup, hava giriş deliklerinin çapı bu durum için 4.46 mm olarak belirlenmiştir.

Yapılan hesaplamalarda çıkış bölgesi basınç çıkışı (pressure outlet), yakıt girişi hız girişi (velocity inlet), hava girişi ise basınç girişi (pressure inlet) olarak alınmıştır. Şekil 2’de brülör geometrisinin izometrik görünümü ve sınır adlandırmaları verilmiştir. Yakıt olarak metan girilmiştir. Duvarlarda yapışma şartı (hız sıfır) kabul edilmiştir.



Şekil 2. Brülör geometrisinin izometrik görünümü ve sınır şartları

Figure 2. Isometric view of the burner geometry and boundary conditions

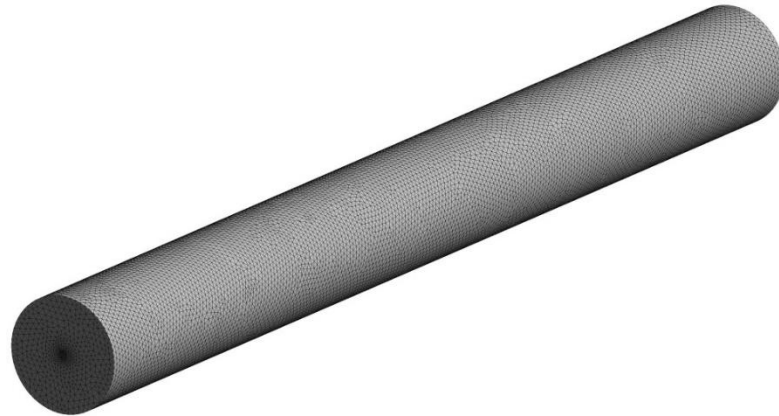
Hesaplamaların yapılabilmesi için geometrinin bir ağ ile örülmesi gerekmektedir. Fiziksel büyüklüklerin hızla değiştiği bölgeler (enjektör çevresi) daha sık ağ yapısı ile donatılmıştır. Ayrıca çözümün ağ yapısından bağımsızlığını test etmek amacıyla daha sık ve daha kaba olmak üzere toplamda altı farklı ağ yapısı oluşturulmuştur. Ağdan bağımsızlaştırma çalışmasında hava fazlalık katsayısının değişimi göz önünde bulundurulmuştur. Elde edilen sonuçlar Çizelge 3'te gösterilmiştir. Çözümün ağdan bağımsızlık kıyaslaması yapıldığında Ağ-5 adlı ağ yapısının uygun olduğu belirlenmiş ve tüm hesaplamalarda bu ağ yapısı tercih edilmiştir.

Çizelge 3. Ağ yapılarının karşılaştırılması

Table 3. Comparison of mesh structures

Ağ yapısı	Eleman sayısı	Nokta sayısı	Hava fazlalık katsayısı( $\lambda$ )
Ağ-1	17999	4036	0.436
Ağ-2	18501	4130	0.543
Ağ-3	19506	4318	0.583
Ağ-4	27251	5766	0.646
<b>Ağ-5</b>	<b>265798</b>	<b>52618</b>	<b>0.650</b>
Ağ-6	885030	170138	0.653

Ağ-5 ile örülmüş brülör geometrisinin izometrik görünümü Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Ağ yapısı izometrik görünümü

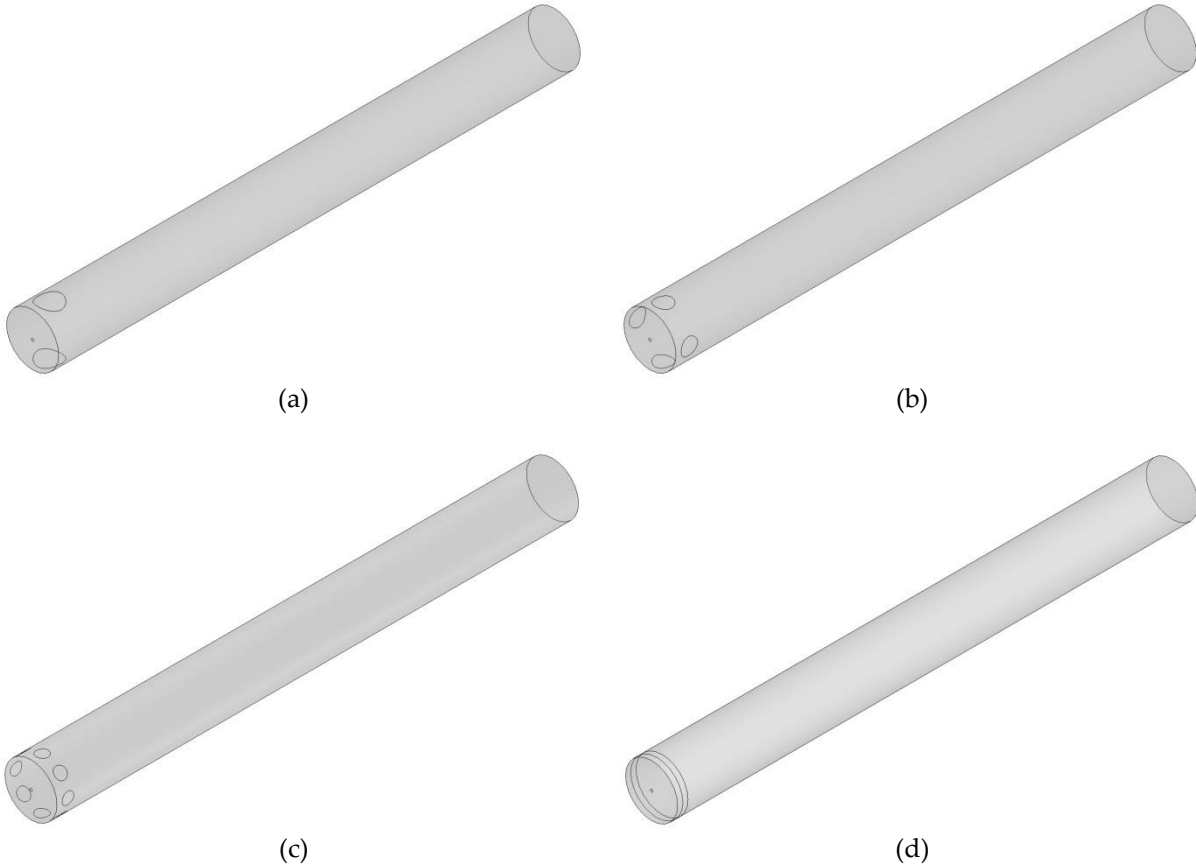
Figure 3. Isometric view of the mesh structure

#### Hava Giriş Delikleri Sayısı (Number of Air Inlet Holes)

Bu kısımda iki, dört, sekiz ve sonsuz hava giriş delikli tasarımların brülördeki hava/yakıt karışmasına etkisi incelenmiştir. Brülöre giren yakıt hızı 50 m/s ve giriş çapı 0.5 mm olarak belirlenmiştir. Yakıt olarak metan seçilmiştir. Sonsuz hava giriş delikli durumda hava girişi halka şeklinde modellenmiş olup halkanın genişliği 1 mm olarak alınmıştır. Hava giriş alanları tüm geometriler için aynı tutulmuştur. Böylece 2 girişli durumda hava giriş delik çapı 4.46 mm, 4 girişli durumda 3.16 mm, 8 girişli durumda 2.24 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 4'te farklı hava giriş delik sayılarına sahip brülör geometrilerinin izometrik görünüşleri verilmiştir.

Oluşturulan geometrilerin nümerik hesaplamalarının yapılabilmesi için bir ağ ile örülmeleri gerekliliği daha önce belirtilmişti. Enjektör çevresi gibi fiziksel büyüklüklerin hızla değiştiği bölgeler daha sık ağ yapısı ile donatılmıştır ve Şekil 3'teki ağ yapısına benzer bir ağ yapısı oluşturulduğundan ayrıca verilmemiştir.

Yapılan hesaplamalarda çıkış bölgesi basınç çıkışı (pressure outlet), yakıt girişi hız girişi (velocity inlet), hava girişi ise basınç girişi (pressure inlet) olarak alınmıştır. Duvarlarda yapışma şartı (hız sıfır) kabul edilmiştir.



**Şekil 4.** Brülör geometrilerinin izometrik görünüşleri, (a) İki hava girişli, (b) Dört hava girişli, (c) Sekiz hava girişli, (d) Sonsuz hava giriş delikli

*Figure 4.* Isometric views of burner geometries, (a) Two air inlets, (b) Four air inlets, (c) Eight air inlets, (d) Infinite air inlets



## BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSIONS)

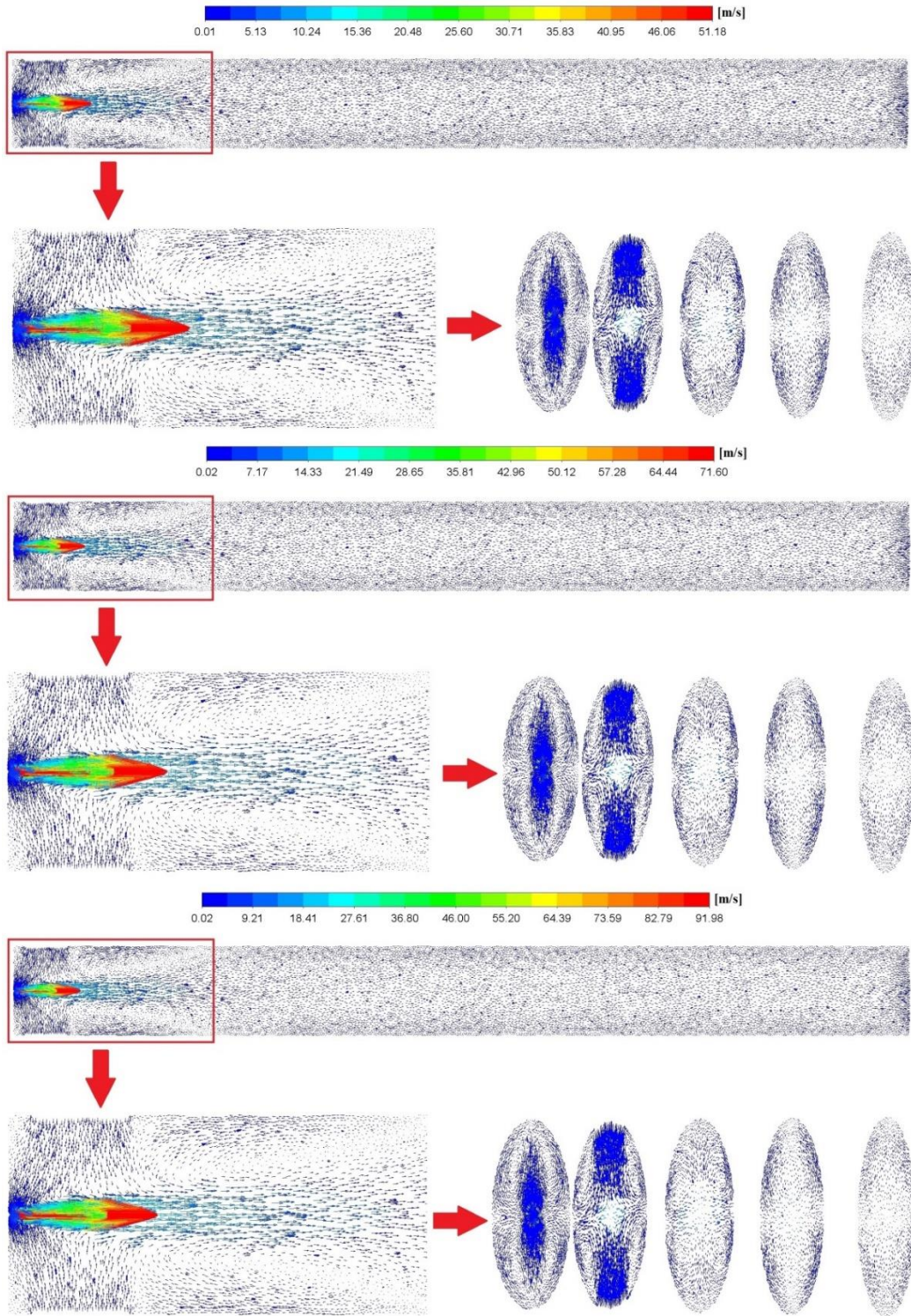
### Enjektör Çapı ve Enjeksiyon Hızının Etkisi (Effect of the Injector Diameter and Injection Velocity)

Bu bölümde enjektör çapının 0.5 mm olması durumunda farklı yakıt giriş hızlarına bağlı olarak elde edilen hız vektörleri, akım çizgileri ve  $CH_4$  mol konsantrasyonları dağılımları gösterilmiştir. Hesaplanan diğer enjektör çap değerlerinde (0.75 ve 1 mm) anılan parametreler için benzer görüntüler elde edildiğinden bunlar ayrıca verilmemiştir.

Enjektör çapının 0.5 mm olması durumunda farklı yakıt giriş hızlarına bağlı olarak elde edilen hız vektörleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde yakıt giriş hızlarının artmasıyla birlikte yakıt tarafından sürüklenen hava hızlarının da arttığı görülmektedir. Şekilde ayrıca sağ altta akış yönünde enjeksiyon noktalarından itibaren sırasıyla  $x=0.5, 5, 10, 15, 20$  mm mesafelerinde akışa dik kesitlerdeki hız vektörleri gösterilmektedir. Görüldüğü gibi akışa dik yönde, hız vektörleri akım yönünde zayıflamaktadır.

Şekil 6'da enjektör çapının 0.5 mm olması durumunda farklı yakıt giriş hızlarına bağlı olarak elde edilen akım çizgilerinin konturları verilmiştir. Hava girişi ile yakıt-hava karışımının boru duvarına ulaştığı kesit arasında girdapların oluştuğu görülmektedir. Yakıt giriş hızlarının artmasıyla birlikte girdap dönüş hızları da artmakta, ancak girdap boyutları fazla değişmemektedir. Şekilde ayrıca sağ altta akış yönünde enjeksiyon noktalarından itibaren sırasıyla  $x=0.5, 5, 10, 15, 20$  mm mesafelerinde akışa dik kesitlerdeki akım çizgileri gösterilmektedir. Görüldüğü gibi akışa dik yönde, ikincil akımlara bağlı olarak iki çift girdap oluşmakta, bunlar daha sonra akım yönünde zayıflamakta ve kaybolmaktadır.

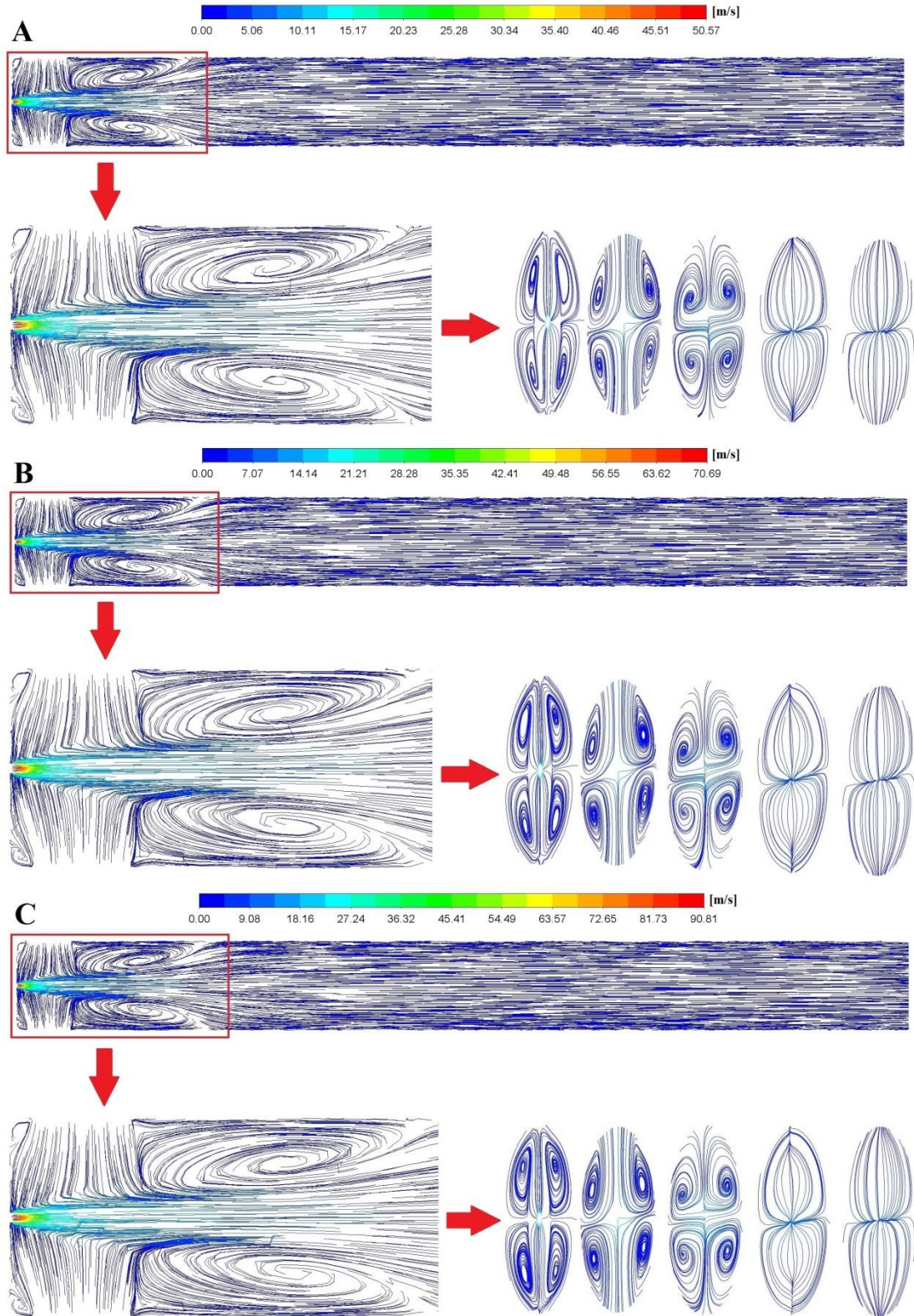
Şekil 7'de enjektör çapının 0.5 mm olması durumunda farklı yakıt giriş hızlarına bağlı olarak elde edilen  $CH_4$  mol konsantrasyonlarının konturları verilmiştir. Şekilde ayrıca sağ altta akış yönünde enjeksiyon noktalarından itibaren sırasıyla  $x=0.5, 5, 10, 15, 20$  mm mesafelerinde akışa dik kesitlerdeki konsantrasyon konturları da gösterilmektedir. Görüldüğü gibi akış yönünde ve akışa dik yönde oluşan girdaplı akımlar sonucu yakıt ve hava hızla karışmakta ve homojen bir karışım ortaya çıkmaktadır. Artan yakıt hızıyla birlikte havanın sürüklenme hızının da artmasının etkisiyle birlikte artan türbülans nedeniyle karışma hızının da arttığı, böylece karışma mesafesinin toplamda fazla değişmediği söylenebilir.



**Şekil 5.** Enjektör çapının 0.5 mm olması durumunda farklı yakıt giriş hızlarına bağlı olarak elde edilen hız vektörleri: A:50 m/s, B:70 m/s, C:90 m/s. Her üç durum için, sağ altta sırasıyla  $x=0.5, 5, 10, 15, 20$  mm mesafelerinde akışa dik kesitlerdeki hız vektörleri

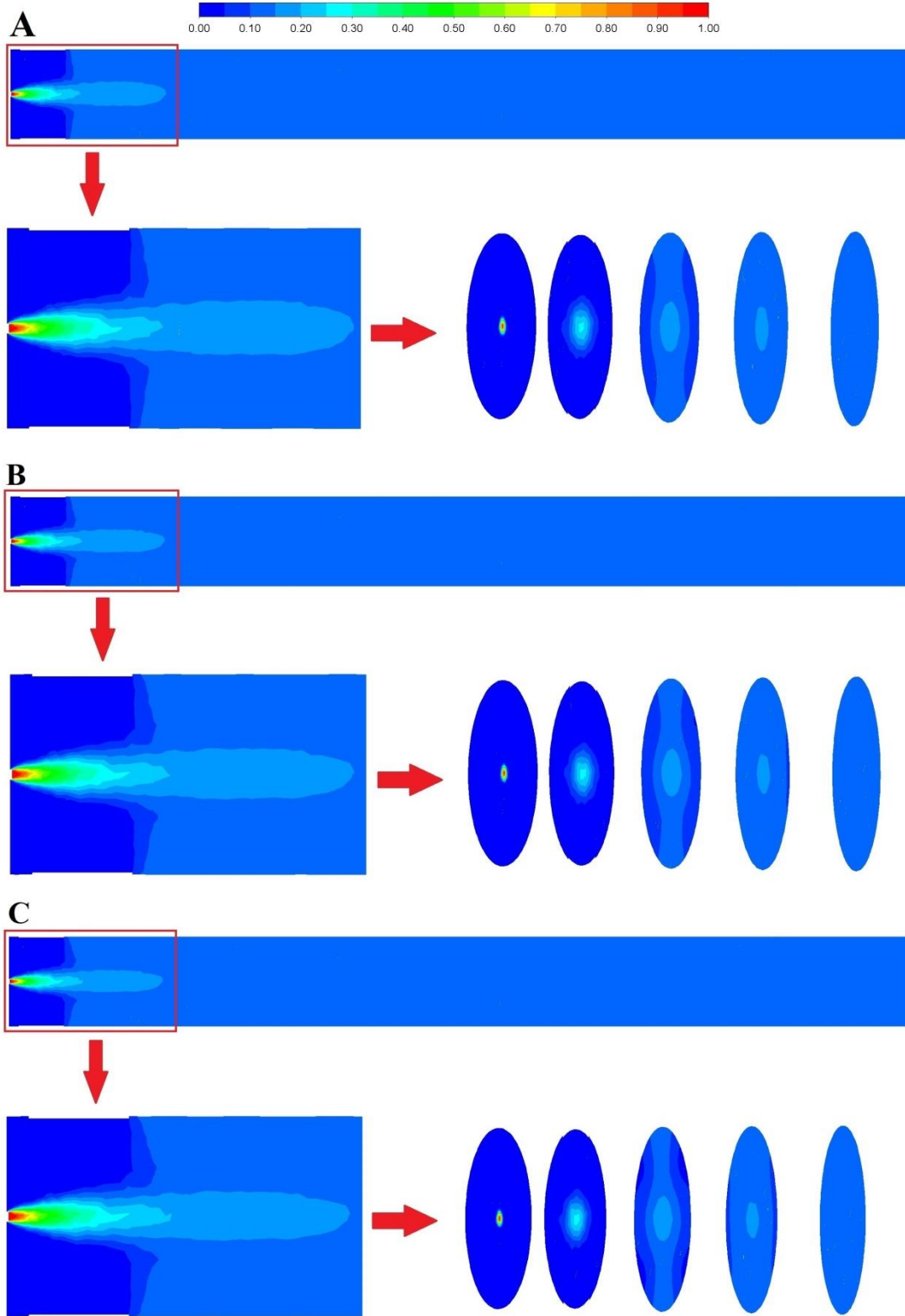
*Figure 5.* In the case of 0.5 mm injector diameter, the velocity vectors obtained depending on different fuel inlet velocities: A:50 m/s, B:70 m/s, C:90 m/s. For all three cases, velocity vectors in cross-sections perpendicular to the flow at  $x=0.5, 5, 10, 15, 20$  mm distances, respectively, at the bottom right





**Şekil 6.** Enjektör çapının 0.5 mm olması durumunda farklı yakıt giriş hızlarına bağlı olarak elde edilen hız akım çizgileri: A:50 m/s, B:70 m/s, C:90 m/s. Her üç durum için, sağ altta sırasıyla x=0.5, 5, 10, 15, 20 mm mesafelerinde akışa dik kesitlerdeki hız akım çizgileri

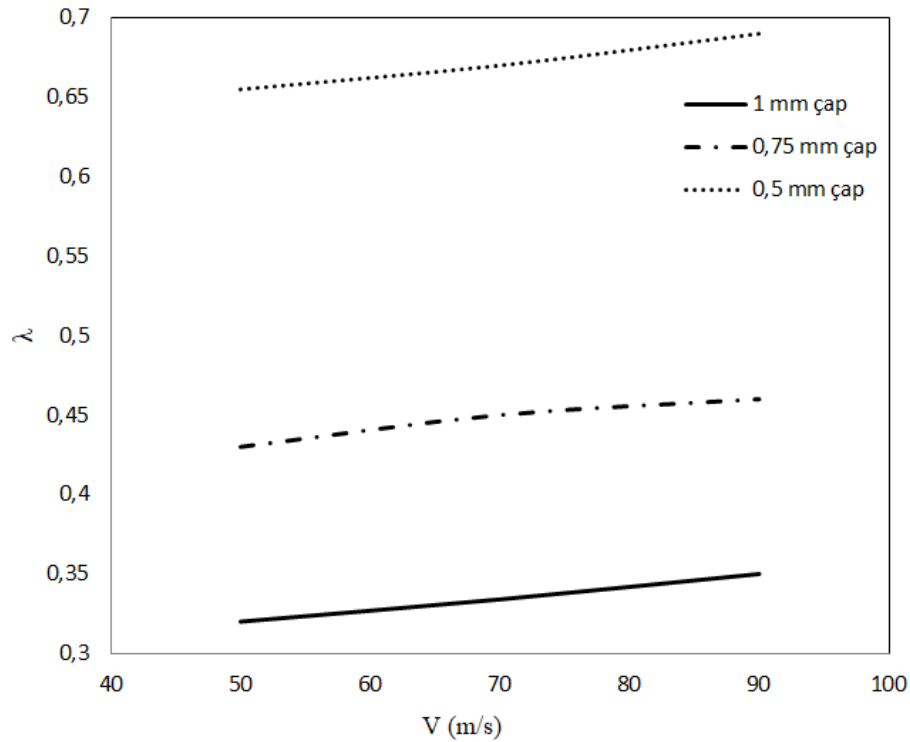
**Figure 6.** In the case of 0.5 mm injector diameter, the velocity streamlines obtained depending on different fuel inlet velocities: A:50 m/s, B:70 m/s, C:90 m/s. For all three cases, velocity streamlines in cross-sections perpendicular to the flow at x=0.5, 5, 10, 15, 20 mm distances, respectively, at the bottom right



**Şekil 7.** Enjektör çapının 0.5 mm olması durumunda farklı yakıt giriş hızlarına bağlı olarak elde edilen  $\text{CH}_4$  mol konsantrasyonları: A:50 m/s, B:70 m/s, C:90 m/s. Her üç durum için, sağ altta sırasıyla  $x=0.5, 5, 10, 15, 20$  mm mesafelerinde akışa dik kesitlerdeki mol konsantrasyonları

*Figure 7.* In the case of 0.5 mm injector diameter, the mole concentrations of  $\text{CH}_4$  obtained depending on different fuel inlet velocities: A:50 m/s, B:70 m/s, C:90 m/s. For all three cases, mole concentrations in cross-sections perpendicular to the flow at  $x=0.5, 5, 10, 15, 20$  mm distances, respectively, at the bottom right

Farklı enjektör çapı ve farklı yakıt giriş hızları sonucunda elde edilen  $\lambda$  değerleri Şekil 8’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde tüm durumlarda artan yakıt hızı ile birlikte  $\lambda$  değerlerinin arttığı görülmektedir. Ancak yakıt hızının artışıyla gerçekleşen  $\lambda$  değerlerinin artışı fazla değildir. Enjektör hızının 50 m/s’den 90 m/s’ye artması durumunda  $\lambda$  değeri, enjektör çapı 0.5 mm durumunda %5.5, 0.75 mm durumunda %7.2, 1 mm durumunda ise %9.6 oranında artmıştır. Diğer taraftan enjektör çapının büyümesi ile  $\lambda$  değerleri azalmıştır. Aslında bu durumda emilen hava miktarı mutlak olarak artmaktadır. Buna göre emilen hava debisi birim yakıt debisine oranla azalmıştır. Ayrıca Şekil 8’de görüldüğü gibi  $\lambda$  değerleri 0.32-0.68 arasında elde edilmiştir. Böylece daha önce belirtildiği gibi uygulamada kullanılan Bunsen brülörü karışma borusu içerisinde metan için hedeflenen  $\lambda \approx 0.5$  civarında değerlere ulaşılmaktadır.



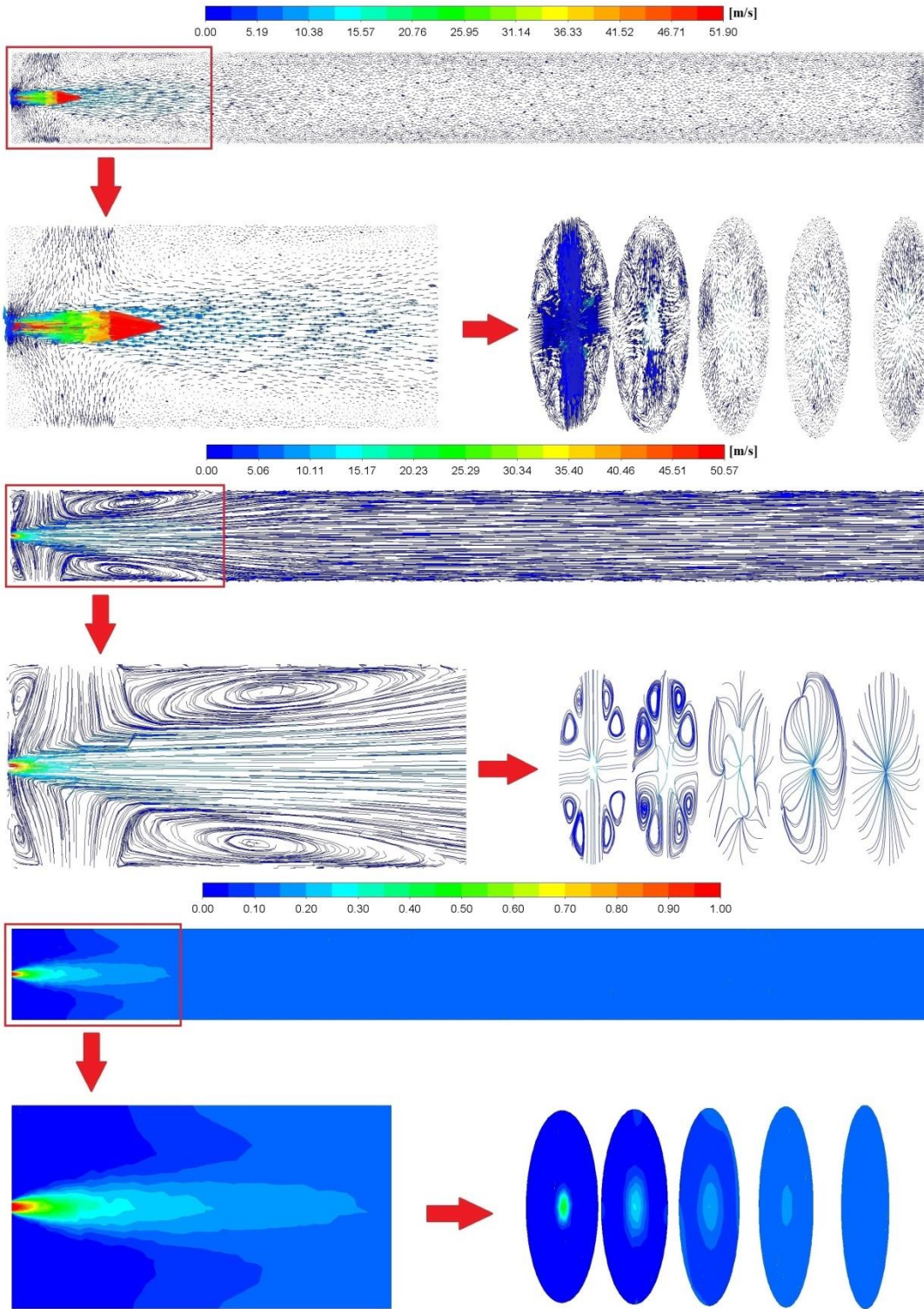
Şekil 8.  $\lambda$  – Yakıt giriş hızı grafiği  
Figure 8. The graph of  $\lambda$  – fuel inlet velocity

#### Hava Giriş Delik Sayısının Etkisi (Effect of the Number of Air Inlet Holes)

İki, dört, sekiz ve sonsuz hava giriş delikli tasarımlar için hesaplamalar karşılaştırıldığında asıl akış yönünde benzer görüntüler oluştuğu görülmüştür. Ancak akışa dik yöndeki ikincil akımlar nedeniyle oluşan girdapların sayısı ve boyutları değişmektedir. İki hava giriş delikli durumda iki çift girdap oluşurken (Şekil 6), dört delikli durumda dört çift (Şekil 9), sekiz delikli durumda sekiz çift girdap ortaya çıkmaktadır.

Şekil 9’da enjektör çapının 0.5 mm, enjeksiyon hızının 50 m/s ve hava giriş delik sayısının dört olması durumunda elde edilen hız vektörleri, hız akım çizgileri ve  $CH_4$  mol konsantrasyonları dağılımları gösterilmiştir.

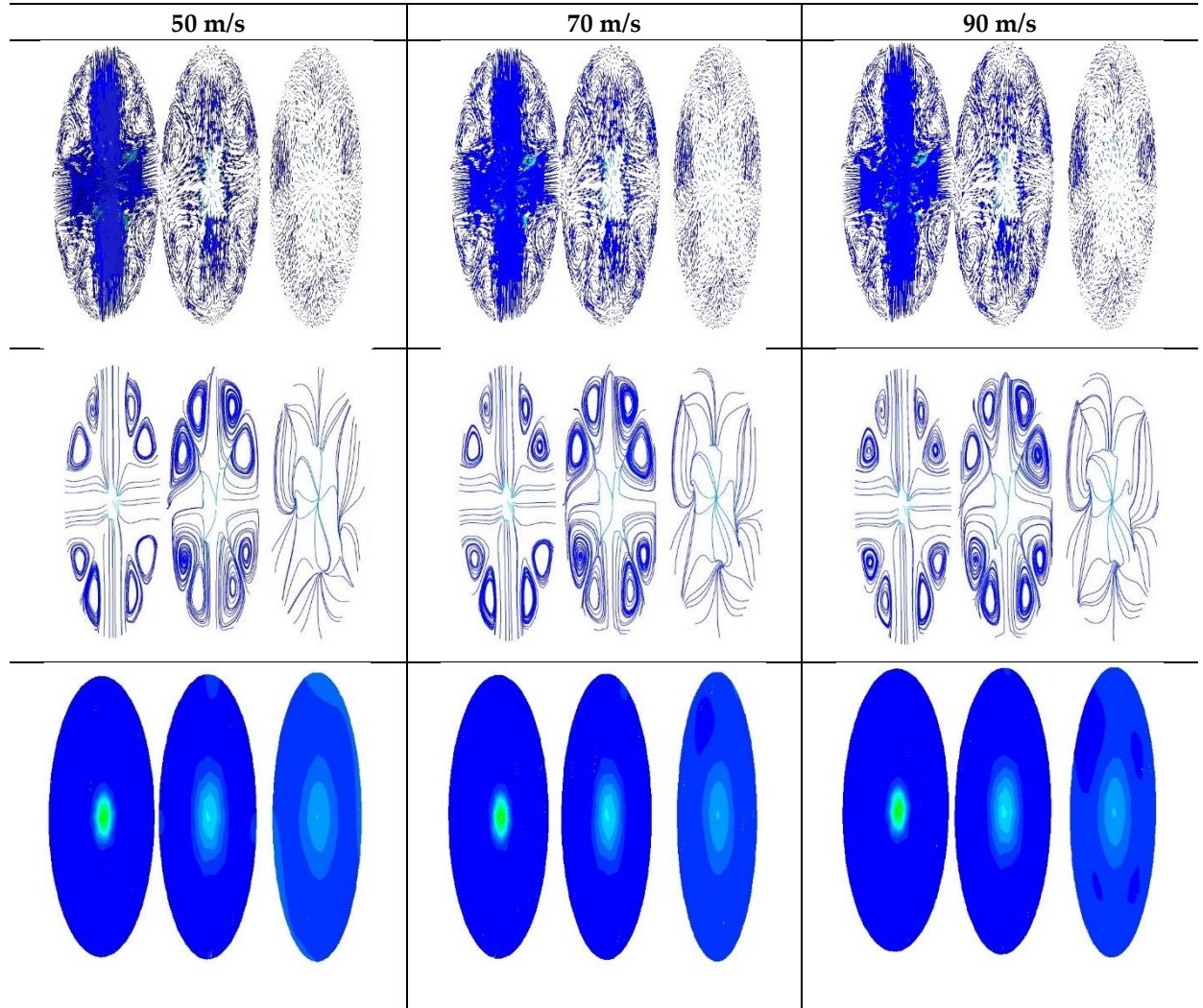




Şekil 9. Enjektör çapının 0.5 mm, enjeksiyon hızının 50 m/s ve hava giriş delik sayısının dört olması durumunda elde edilen hız vektörleri (üstte), hız akım çizgileri (ortada) ve  $\text{CH}_4$  mol konsantrasyonları (altta). Her üç durum için, sağ altta sırasıyla  $x=0.5, 5, 10, 15, 20$  mm mesafelerinde akışa dik kesitlerdeki değişim

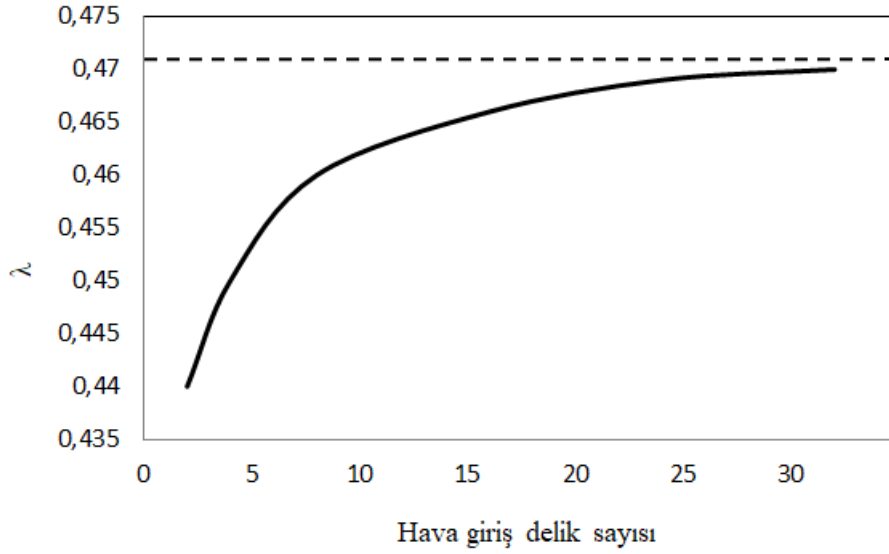
Figure 9. Velocity vectors (top), velocity streamlines (middle) and  $\text{CH}_4$  mole concentrations (bottom) obtained when the injector diameter is 0.5 mm, the injection rate is 50 m/s, and the number of air inlet holes is four. For all three cases, change in cross-sections perpendicular to the flow at  $x=0.5, 5, 10, 15, 20$  mm distances, respectively, at the bottom right

Şekil 10'da 0,5 mm enjektör çapında ve farklı enjeksiyon hız değerlerinde elde edilen hız vektörleri (üstte), hız akım çizgileri (ortada) ve CH<sub>4</sub> mol konsantrasyonları (altta) bir arada gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi tüm hız değerlerinde benzer görüntüler elde edilmiştir ve bu nedenle hesaplanan diğer enjektör çap ve enjeksiyon hız değerlerinde anılan parametreler ayrıca verilmemiştir. Bu anlamda sekiz delikli durum için de benzer görüntüler elde edildiğinden hız ve konsantrasyon dağılımları ayrıca verilmemiş olup, hava giriş delik sayılarının yakıt-hava ön karışmasına etkisi Şekil 11'de verilen 0.75 mm enjektör çapında  $\lambda$ -delik sayısı grafiği üzerinden değerlendirilmiştir.



**Şekil 10.** Enjektör çapının 0.5 mm, hava giriş delik sayısının dört olması durumunda farklı enjeksiyon hızlarında elde edilen hız vektörleri (üstte), hız akım çizgileri (ortada) ve CH<sub>4</sub> mol konsantrasyonları (altta). Her üç durum için, sağ altta sırasıyla  $x=0.5, 5, 10$  mm mesafelerinde akışa dik kesitlerdeki değişim  
*Figure 10.* Velocity vectors (top), velocity streamlines (middle) and CH<sub>4</sub> mole concentrations (bottom) at different injection rates obtained when the injector diameter is 0.5 mm, and the number of air inlet holes is four. For all three cases, change in cross-sections perpendicular to the flow at  $x=0.5, 5, 10$  mm distances, respectively, at the bottom right

Şekil 11 incelendiğinde hava giriş delik sayısının artmasıyla birlikte havanın içeri daha fazla nüfuz ettiği ve buna bağlı olarak  $\lambda$  değerinin arttığı görülmüştür. Ancak bu artışın önemli seviyelerde olmadığı görülmektedir. İki delikli durum referans alındığında  $\lambda$  artışı dört delikli durumda %2.1, sekiz delikli durumda %4.4, sonsuz delik durumunda ise yaklaşık %7 seviyelerindedir.



Şekil 11.  $\lambda$  –Hava giriş delik sayısı grafiği

Figure 11. The graph of  $\lambda$  – air inlet hole number

## SONUÇLAR ve ÖNERİLER (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, örnek bir atmosferik brülörde farklı enjektör çaplarının (0.5 mm, 0.75 mm ve 1 mm), enjeksiyon hızlarının (50 m/s, 70 m/s ve 90 m/s) ve hava giriş delikleri sayısının (iki, dört, sekiz ve sonsuz delikli) hava-yakıt karışmasına etkisi nümerik olarak incelenmiştir. Hesaplamalar üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Türbülansın modellenmesinde Standard k- $\epsilon$  modeli kullanılmıştır. Enjektör çapı ve enjeksiyon hızına göre oluşan hız vektörleri, akım çizgileri, hava-yakıt karışım oranları incelenerek sonuçlar değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde:

- Enjeksiyon hızının artması sürüklenen hava hızını arttırıcı yönde etki göstermiştir.
- Artan enjeksiyon hızıyla birlikte oluşan girdapların da boyutlarının büyüdüğü görülmüştür.
- Yakıt hızının artmasıyla birlikte sürüklenen hava miktarı artmıştır. Ancak  $\lambda$  değerleri ve buna bağlı olarak sürüklenen hava miktarı yakıt oranla fazla artmamıştır. Örneğin, 50 m/s ve 90 m/s enjektör hızı arasında  $\lambda$ , enjektör çapı 0.5 mm için %5.5, 0.75 mm için %7.2, 1 mm için %9.6 oranında artış göstermiştir.
- Enjeksiyon çapının artmasıyla birlikte sürüklenen hava miktarı artmıştır, ancak  $\lambda$  değerleri küçüldüğünden sürüklenen hava miktarı yakıt oranla azalmıştır.
- Hava giriş delik sayısının artmasıyla birlikte havanın içeri daha fazla nüfuz ettiği ve buna bağlı olarak  $\lambda$  değerinin arttığı görülmüştür. Bu artış iki delikli duruma göre dört delikli durumda %2.1, sekiz delikli durumda %4.4, sonsuz delikli durumda ise yaklaşık %7 seviyelerindedir.

İlerdeki çalışmalarda hava giriş deliklerinin pozisyonu ve boyutları, karışımdan sonra oluşacak yanmanın modellenmesi gibi konuların incelenmesinin yararlı olacağı düşünülmektedir.

## SEMBOLLER (SYMBOLS)

$C_1$ : Türbülans model sabiti

$C_2$ : Türbülans model sabiti

$G_b$ : Kaldırma kuvveti nedeniyle türbülans kinetik enerji oluşumu

$G_k$ : Ortalama hız gradyanlarından dolayı türbülans kinetik enerji oluşumu



H: Hava

H/Y: Hacimsel hava /yakıt oranı

$H_{gerçek}$ : Gerçek hava ihtiyacı

$H_{min}$ : Stokiyometrik (minimum) hava ihtiyacı

$k$ : Türbülans kinetik enerjisi

$S_{\phi}$ : Bağımlı değişkenin kaynak terimi

$v$ : Hız

$x$ : Asıl akış yönündeki koordinat

$Y$ : Yakıt

$\Gamma_{\phi}$ : Bağımlı değişkenin taşınım katsayısı

$\epsilon$ : Yutulma

$\lambda$ : Hava fazlalık katsayısı

$\mu_e$ : Efektif viskozite

$\rho$ : Yoğunluk

$\sigma_k$ : Türbülans kinetik enerji için türbülanslı Prandtl sayısı

$\sigma_{\epsilon}$ : Türbülans kinetik enerjinin dağılma oranı için türbülanslı Prandtl sayısı

$\Phi$ : Bağımlı değişken

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Baylar, A., Aydın, M. C., Unsal, M., Ozkan, F. 2009. "Numerical Modeling of Venturi Flows for Determining Air Injection Rates Using Fluent V6.2". *Mathematical and Computational Applications* .
- Baylar, A., Ozkan, F., Unsal, M. 2010. "Effect of air inlet hole diameter of venturi tube on air injection rate". *KSCE Journal of Civil Engineering*, 14(4), 489–492.
- Baylar, A., Unsal, M., Ozkan, F. 2007. "Determination of the Optimal Location of the Air Hole in Venturi Aerators". *CLEAN – Soil, Air, Water*, 35(3), 246–249.
- Choi, J. T., Kwon, O. K., Cha, D. A. 2011. "A numerical study of the heat transfer and fluid flow of micro-channeled water block for computer CPU cooling". *Journal of Mechanical Science and Technology*, 25(10), 2657.
- Danardono, D., Kim, K.-S., Lee, S.-Y., Lee, J.-H. 2011. "Optimization the design of venturi gas mixer for syngas engine using three-dimensional CFD modeling". *Journal of Mechanical Science and Technology*, 25(9), 2285.
- Fluent User's Guide, Fluent 18 version, 2017, Fluent Incorporated.
- Hemidi, A., Henry, F., Leclaire, S., Seynhaeve, J.-M., Bartosiewicz, Y. 2009. "CFD analysis of a supersonic air ejector. Part I: Experimental validation of single-phase and two-phase operation". *Applied Thermal Engineering*, 29(8), 1523–1531.
- Hou, S.-S., Lee, C.-Y., Lin, T.-H. 2007. "Efficiency and emissions of a new domestic gas burner with a swirling flame". *Energy Conversion and Management*, 48(5), 1401–1410.
- Jugjai, S., Tia, S., Trewetaskorn, W. 2001. "Thermal efficiency improvement of an LPG gas cooker by a swirling central flame". *International Journal of Energy Research*, 25(8), 657–674.
- Liu, F.-G., You, X.-Y., Wang, Q., Zhang, R. 2013. "On optimal design and experimental validation of household appliance burner of low pollutant emission". *Energy Conversion and Management*, 76, 837–845.
- Milivojevic, A., Adzic, M., Gojak, M., Stamenic, M., Adzic, V. 2020. "Analysis of the performance of a low-power atmospheric burner for gas appliances for households and their impact on the emission and stability of the burner". *Thermal Science*, 25, 302.
- Namkhat, A., Jugjai, S. 2010. "Primary air entrainment characteristics for a self-aspirating burner: Model and experiments". *Energy*, 35(4), 1701–1708.
- Önal, M., Ağra, Ö., "The Effect of Injector Geometry on Primary Air Entrainment", *International*

- Conference on Energy and Thermal Engineering, YTU, Istanbul, 1-6, 25-28 April 2017.
- Özdoğan, M., Sungur, B., Namlı, L., Topaloğlu, B., Durmuş, A. 2016. "A Comparative Study of Turbulence Model Effects in Numerical Analyzing Flow around the Buildings Having Various Aspect Ratios / Farklı En-Boy Oranlarına Sahip Binaların Etrafındaki Akışın Sayısal Çözümünde Türbülans Modellerinin Etkisinin Karşılaştırmalı ". Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi.
- Pritchard, R., Guy, J. J., Connor, N. 1977. "Handbook of industrial gas utilization: Engineering principles and practice".
- Romańczyk, M., Elsner, W. 2019. "Effect of Cylindrical Turbulators on the Mixing Process in Basic Venturi Gas Mixer Using OpenFOAM". MATEC Web of Conferences, 252, 4004.
- Singh, G., Sharma, L. D., Ahmad, A. H., Singh, S. P. 1999. "Fenvalerate Induced Dermal Toxicity in Buffalo Calves". Journal of Applied Animal Research, 16(2), 205–210.
- Singh, G., Sundararajan, T., Bhaskaran, K. A. 2003. "Mixing and Entrainment Characteristics of Circular and Noncircular Confined Jets". Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, 125(5), 835–842.
- Şener, R., Ozdemir, M., Yangaz, M. 2019. "Effect of the Geometrical Parameters in a Domestic Burner with Crescent Flame Channels for an Optimal Temperature Distribution and Thermal Efficiency". Journal of Thermal Engineering, 171–183.
- Topaloğlu, B., Özcan, H., Sungur, B., 2020, Yakma Sistemleri (1.basım), Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, Türkiye.
- Zhu, Y., Cai, W., Wen, C., Li, Y. 2009. "Numerical investigation of geometry parameters for design of high performance ejectors". Applied Thermal Engineering, 29(5), 898–905.