ARAŞTIRMA MAKALESİ

Ev Tipi Gazlı Fırın Brülörlerinde Geri Tepmenin Deneysel ve Sayısal Analizi

Ahmet İlyas KODAL*
Özlem EMANET**
N. Alpay KÜREKCİ***

* Mak. Yük. Müh. Ahmet İlyas KODAL, BSH Ev Aletleri San. ve Tic AŞ, Freestanding Geliştirme, Tekirdağ, ahmet-ilyas.kodal@bshg.com,
orcid: 0000-0002-8180-0805

** Dr. Özlem EMANET, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İSTANBUL, panzehir@yildiz.edu.tr,
orcid: 0000-0002-1947-7699

*** Doç. Dr. N. Alpay KÜREKCİ, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İSTANBUL, kurekci@yildiz.edu.tr,
orcid: 0000-0002-0450-4818

ÖZ

Atmosferik brülörlerde alevin brülöre geri yayılmasına geri tepme adı verilir. Geri tepme yakıt-hava karışımının brülör içinde yanabilir sınıra gelmesi veya alevin yakıt-hava karışımından daha hızlı yayılması durumlarında meydana gelir. Geri tepme durumu güvenliği ve operasyonel verimliliği tehlikeye atabilir. Bu çalışmada, enjektör çapının yakıt-hava karışım oranı ve geri tepme oluşma potansiyeli üzerindeki etkisi ve bunun propilenin yanıcılık sınırlarıyla uyumu incelenmiştir. Ev tipi gaz fırını brülörlerindeki geri tepme olgusu, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) simülasyonları ve deneysel çalışma sonuçları kullanılarak incelenmiştir. Simülasyonlar 0,73 ve 0,82 mm'lik iki enjektör için yapılmış olup, 0,82 mm enjektör çapının yakıt-hava karışımını yanıcılık aralığının dışına kaydırarak, geri tepmeyi etkili bir şekilde önlediğini göstermektedir. Deneysel sonuçlar da simülasyon sonuçlarını doğrulayarak, brülör kararlılığını ve güvenliğini sağlamada enjektör geometrisinin önemini vurgulamaktadır.

Anahtar kelimeler: *Ev tipi gazlı fırın, ateşleme, geri tepme, enjektör, gaz brülörü*

Numerical and Experimental Analysis of Lightback in Domestic Gas Oven Burners

ABSTRACT

In atmospheric burners, the phenomenon of flame spreading back into the burner is referred to as light back. Light-back occurs when the flame propagates backwards into the burner, which can compromise safety and operational efficiency. This study examines the phenomenon of light-back in domestic gas oven burners, utilizing computational fluid dynamics (CFD) simulations to evaluate and mitigate associated risks. Simulations demonstrate that an injector diameter of 0.82 mm effectively prevents light-back by shifting the fuel-air mixture outside the flammability range. Experimental tests confirm the simulation results, emphasizing the importance of injector geometry in ensuring burner stability and safety.

Keywords: *Domestic gas oven, ignition, light-back, injector, gas burner*

Geliş Tarihi: 08.08.2025
Kabul Tarihi: 13.08.2025

Kodal, İ. A., Emanet, Ö., Kürekçi, N.A., Ev Tipi Gazlı Fırın Brülörlerinde Geri Tepmenin Deneysel ve Sayısal Analizi
Tesisat Mühendisliği Dergisi, Sayı: 209 Temmuz/Ağustos 2025.

1. GİRİŞ

Ev tipi gazlı fırınlar, modern evlerde pişirme ve fırınlama için etkili ve güvenilir bir araç sağlayarak önemli bir rol oynar [1,2]. Gazlı fırınların optimum performansını ve güvenliğini sağlayan temel bileşenlerden biri, verimli yanma için hassas yakıt-hava karışım oranlarını koruması gereken brülördür. Ancak brülörlerde, alevin brülör sistemine geri yayıldığı geri tepme, eksik yanma, düşük verimlilik ve güvenlik tehlikeleri gibi potansiyel riskler mevcuttur.

Brülör alev kararlılığı, ev tipi gaz fırınlarının güvenli ve verimli çalışmasında kritik bir faktördür. Gaz karışımının akış hızı yanma hızına eşit olduğunda kararlı bir alev elde edilir. Bu dengedeki bozulmalar iki belirgin olguya yol açabilir: alevin aşırı akış hızı nedeniyle brülör portlarından ayrıldığı alev kaldırma ve alevin yanma hızına göre yetersiz akış hızı nedeniyle brülöre geri yayıldığı geri tepme [3].

Geri tepme, brülör bileşenlerinde olası hasar ve artan gaz sızıntısı riski gibi önemli güvenlik riskleri oluşturur. Bu soruna çözüm bulmak, brülör içindeki yakıt-hava karışımı dinamiklerinin yanı sıra enjektör geometrisinin bu dinamikleri modüle etmedeki rolünün hassas bir şekilde anlaşılmasını gerektirir.

Geri tepme, alev dengesizliği ve tehlikeli alev geri akışı gibi istenmeyen koşullara yol açabilir ve bu durum yalnızca performansı etkilemekle kalmaz, aynı zamanda kullanıcı güvenliğini de tehlikeye atabilir. Bu nedenle, geri tepmenin meydana geldiği koşulları anlamak ve kararlılığın sınırlarını tanımlayan yakıt-hava karışımı sınırlarını belirlemek esastır.

Çok sayıda çalışmada bek ve brülör tasarımı üzerinden yanma incelenmiştir [4, 5], ancak ev tipi gaz fırınlarına özgü uygulama konusundaki çalışma sayısı azdır.

Yanma kararlılığı ve geri tepme mekanizmaları üzerine yapılan çeşitli deneysel ve sayısal çalışmalar, farklı yanma sistemlerinde bu olgunun nasıl ortaya çıktığını ve kontrol edilebileceğini ortaya koymaktadır. Fine (1958), türbülanslı ve laminer yanma koşullarındaki geri tepme mekanizmalarını karşılaştırarak düşük basıncın kritik sınır hızı gradyanı üzerindeki etkisini incelemiştir. Daha sonraki çalışmalarda, Lee ve T'ien (1982) ile Lammers ve de Goey (2003) sayısal analizler ile geri tepme bölgelerini ve önceden karıştırılmış alevlerin karalılık limitlerini değerlendirmişlerdir. Bu çalışmalar, yanma sistemlerinde geri tepme mekanizmalarının kontrolü için yakıt karışım oranlarının, oksijen içeriğinin, türbülans seviyelerinin ve brülör geometrisinin kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir. Endüstriyel cihazlarda kullanılan farklı brulör tipleri için birçok çalışma mevcuttur. Jerzak ve Kuźnia (2016), swirl sayısının ve oksijen-karbondioksit içeriğinin doğal gaz yanması üzerindeki geri tepme ve üfleme sınırlarına etkisini incelemişlerdir. Yüksek swirl sayısının geri tepme riskini azaltırken, CO_2 eklenmesinin geri tepme eğilimini iyileştirdiği belirlenmiştir. Giles vd. (2016), çelik endüstrisi proses gazlarının yanma kararlılığı değerlendirerek Peclet modelinin geri tepme ve üfleme sınırlarını tahmin etmedeki başarısını analiz etmişlerdir. Kok fırını gazının (COG) yüksek hidrojen içeriği nedeniyle en düşük geri tepme direncine sahip olduğu, bazik oksijen çelik üretimi gazı (BOS) ve yüksek fırın gazının (BFG) ise daha kararlı yanma özellikleri gösterdiği belirlenmiştir. Evsel gazlı fırınlarla ilgili çalışmalar genelde pişirici bölümüne odaklanmıştır. Fırın brulörü konusundaki çalışmalar ise sınırlıdır. Rashwan vd. (2017), oksijenle zenginleştirilmiş yanmanın alev kararlılığı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma, oksijen oranının %42'yi aşması durumunda kimyasal reaksiyonların hızlanarak alevin yanma bölgesine geri çekilmesine ve nihayetinde söndürülmesine neden olduğunu göstermektedir. Özdemir (2017), ev tipi kendiliğinden havalandırmalı gazlı fırınlarda türbülanslı yanmayı simüle eden çalışmasında, geri tepme ve alev üfleme sorunları açısından birincil ve ikincil havalandırma süreçlerini değerlendirmiştir. Çalışma, girdap hareketlerinin alev bölgesine sıcak baca gazlarını geri besleyerek yanma şiddetini azalttığını ortaya koymuş ve hava giriş çıkış yuvalarının sıcaklık homojenliği açısından önemini vurgulamıştır. Deymi-Dashtebayaz vd. (2023), yeni tasarlanmış bir doğal gaz brülörünün enerji verimliliğini artırmak ve çevresel kirliliği azaltmak amacıyla deneysel ve sayısal analizlerini sunmuşlardır. Çalışmada, yakıt içeriği ve brülör geometrisinin geri tepme riskini nasıl etkilediği değerlendirilmiştir.

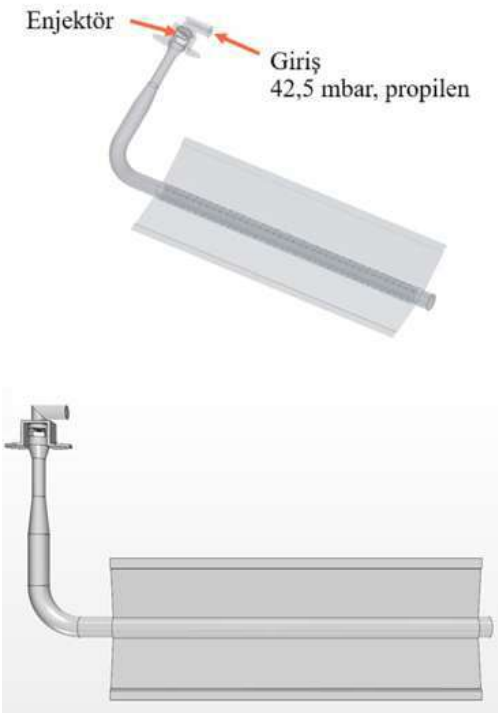
Bu çalışmanın amacı, CFD simülasyonları aracılığıyla ev tipi gaz fırını brülörlerinde geri tepmenin oluşumunu araştırmaktır. Farklı enjektör çapları kullanılması durumunda ev tipi gaz fırın brülörlerindeki yakıt-hava karışımlarının davranışı modellenmiştir. Bu çalışma enjektör çapının ve dolayısıyla yakıt hava karışım oranının geri tepme üzerindeki etkilerine odaklanarak, bu parametrelerin brülör güvenliğini ve performansını nasıl etkilediğine dair bir genel bakış sağlayacaktır.

2. MATERYAL VE METOD

Ev tipi gazlı fırını brülörlerindeki geri tepme oluşumunu incelemek amacıyla iki farklı enjektör çapına sahip brülör sayısal olarak modellenmiştir. Elde edilen sonuçların doğrulanması amacıyla deneysel çalışma yapılmıştır.

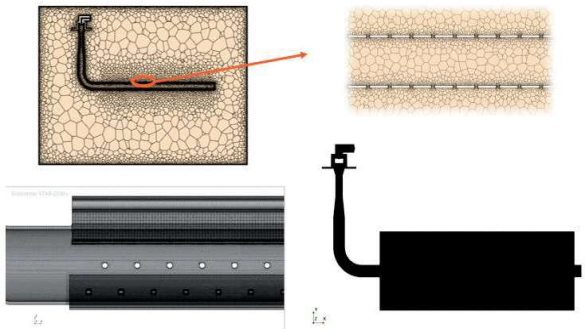
2.1 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) Analizi

Brülör içindeki akış ve karıştırma özelliklerini sayısal olarak analiz etmek için Star CCM+ yazılımı kullanılarak CFD simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Farklı çaplardaki (0,73 mm ve 0,82 mm) enjektörlerden akan propilen gazının davranışı 42,5 mbar çalışma basıncında modellenmiştir. TS EN 437:2021 (Deney gazları- deney basınçları- cihaz kategorileri) standardında 50 mbar basınçta çalışan cihazlarda geri tepmenin en çok olduğu minimum basınç 42,5 mbar olarak belirtilmiştir. Bu nedenle testler 42,5 mbar basınçta gerçekleştirilmiştir. Gaz brülörünün CFD modeli Şekil 1'de görülmektedir. Hesaplama alanı enjektör ve brülörden oluşmaktadır.



Şekil 1. Gaz brülörü CFD modeli

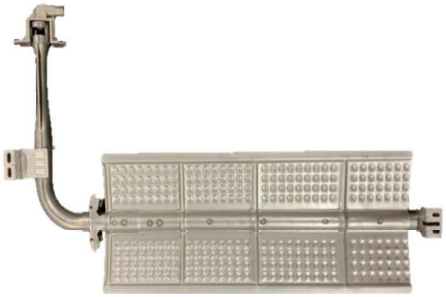
Türbülans ve karışım şartlarını yakalamada doğruluk sağlamak için ortalama hücre boyutu 0,1 mm olan yüksek çözünürlüklü (skewness değeri 0,6 olan) bir ağ yapısı kullanılmıştır. CFD analizinde kullanılan gaz brülörü modeli ve ağ yapısı Şekil 2'de görülmektedir. Şekil 2'de ara yüzü verilen model yapısını önemli derecede etkileyen bölgelerinde daha sık ağ yapısı oluşturulmuş, sınır tanımlamaları yapılmıştır. Modelde 8563848 adet polyhedral hücre yapısı oluşturulmuştur. Giriş koşulları 42,5 mbar basınca ve 298 K ortam sıcaklığına ayarlanırken, çıkış atmosferik basınçlı açık bir sınır olarak tanımlanmıştır. Türbülanslı karıştırmayı doğru şekilde simüle etmek için k-ε türbülans modeli kullanılmıştır.



Şekil 2. Gaz brülörü modeli ve ağ yapısı

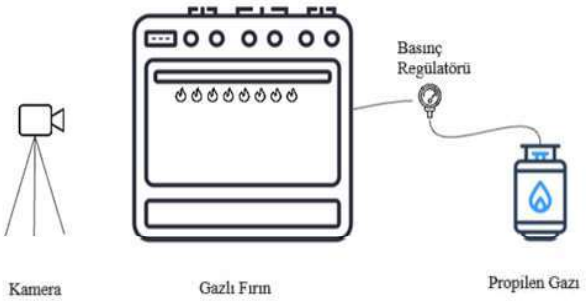
2.2 Deneysel Çalışma

Deneyler, ev tipi gazlı fırınlarda kullanılan 4,4 kW kapasiteye sahip atmosferik brülörler ile yapılmıştır. Kullanılan brülör Şekil 3'te görülmektedir. 0,73 mm ve 0,82 mm çapta enjektörler kullanılmıştır. Yakıt olarak 42,5 mbar basınçta propilen (C_3H_6) kullanılmıştır.



Şekil 3. Deneylerde kullanılan brülör

Deney setinin şematik resmi Şekil 4'te, brülörün fırın içindeki konumu Şekil 5'te görülmektedir. Yakıt enjektörden brülöre doğru akarken bir miktar havayı da (birincil hava) beraberinde götürmektedir. Ateşleme sonrası, yakıt hava karışımı özelliklerine göre oluşan alevin davranışı gözlemlenmektedir. Deney süresince yüksek hızlı kamera (Nikon CoolPix P1000) kullanılarak brülördeki yanma prosesi görüntülenmiştir. Elde edilen görüntüler farklı enjektör çapları kullanıldığında geri tepmenin oluşumunu ve alev kararlılığını değerlendirmek için kullanılmıştır.



Şekil 4. Deney setinin şematik resmi

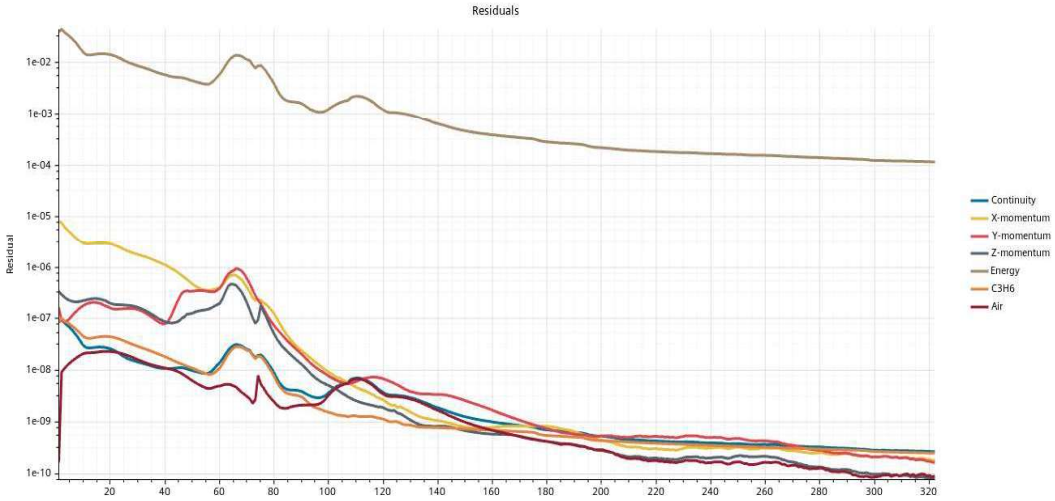


Şekil 5. Brülörün fırın içindeki konumu

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

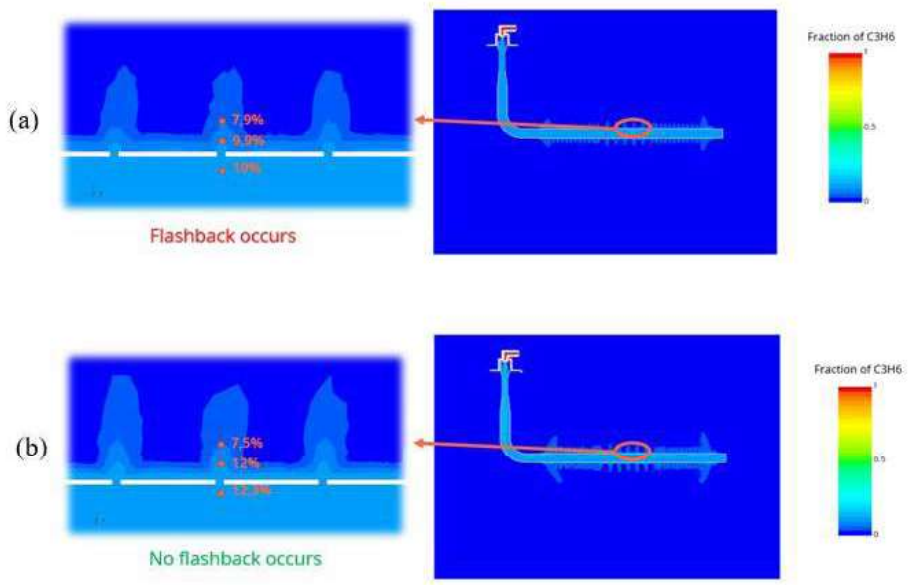
3.1 Enjektör Performansının CFD Analizi

CDF analizi yakınsama eğrileri Şekil 6'da gösterilmiştir. 320 iterasyon sonucunda eğrilerin yataylaşması ile analiz sonlandırılmıştır.



Şekil 6. Gaz brülörü CFD modelinin yakınsama eğrileri

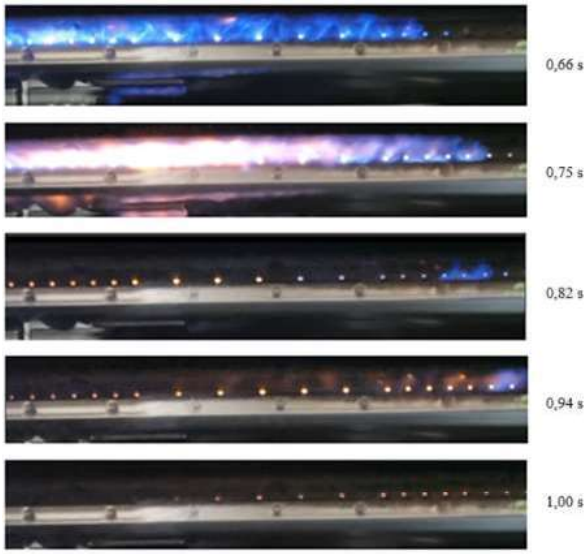
Simülasyonlar, enjektör çapına bağlı olarak akış ve karıştırma davranışında önemli farklılıklar olduğunu ortaya koymuştur. Şekil 7a'da görüldüğü gibi, 0,73 mm enjektörde elde edilen yakıt-hava karışım oranı, geri tepmeye olan duyarlılığı arttırmıştır. Tersine, 0,82 mm enjektörde karışım oranını üst yanıcılık sınırının ötesine kaydırdığı ve geri tepme riskini etkili bir şekilde azalttığı görülmüştür. (Şekil 7b). Hız profilleri, büyük çaplı enjektörün küçük çaplı olandan %15 daha yüksek bir debiye ulaştığını ve yakıthava karışımının yanıcı aralığın dışında kalmasını sağladığını göstermiştir.



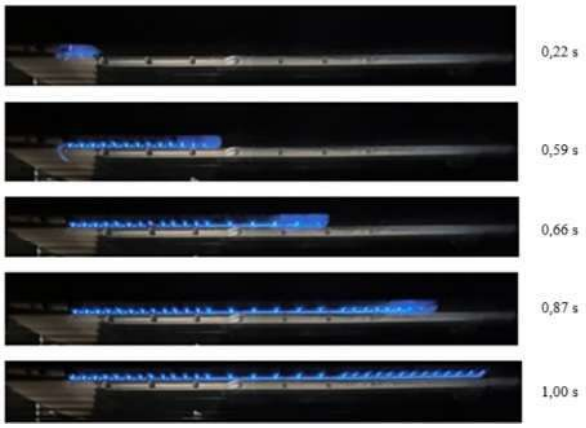
Şekil 7 (a) 0,73 mm enjektör CFD sonucu (b) 0,82 mm enjektör CFD sonucu

3.2 Deneysel Gözlemler

Deneylerde elde edilen görsel sonuçlar Şekil 8 ve 9'da verilmiştir. Deney sonuçları CFD sonuçlarıyla uyum göstermektedir. Şekil 8'de 0,73 mm enjektör ile alev davranışı görülmektedir. Ateşlemeden sonra alev önce hızlıca ilerlemekte sonra brülör içine doğru yayılmaktadır. 0,73 mm enjektör ile yapılan deneylerin %85'inde geri tepme görülmüştür. Şekil 9'da 0,82 mm enjektör ile alev davranışı görülmektedir. Ateşleme sonrasında alev düzgün bir şekilde brülör portlarına ilerlemekte ve kararlı bir alev yapısı sergilemektedir. 0,82 mm enjektör ile yapılan deneylerde geri tepme olmadan kararlı alev davranışı korunmuştur.



Şekil 8 0,73 mm enjektör ile alev davranışı



Şekil 9 0,82 mm enjektör ile alev davranışı

Bulgular, brülör stabilitesini sağlamada enjektör çapının kritik rolünü vurgulamaktadır. Enjektör çapının artırılması debinin artmasına ve dolayısıyla yakıt-hava karışımının yanıcılık sınırlarının ötesine kaymasına neden olur. Ancak, bu ayarlama genel yanma verimliliği ve alev kaldırmanın potansiyel riskleri dikkate alınarak dengelenmelidir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, ev tipi brülörlerde güvenlik problemlerinden biri olan geri tepme konusu irdelenmiştir. Brülördeki hava yakıt karışım oranı enjektör çapına göre değişmektedir. Yakıt debisinin azalması durumunda geri tepme meydana gelmektedir. Bu durumda alev brülörün içine doğru ilerlemekte ve güvenlik zafiyetine neden olmaktadır. Enjektör çapının geri tepme olayına etkisini belirleyebilmek amacıyla sayısal (CFD) ve deneysel çalışmalar yapılmıştır.

İlk yapılan CFD çalışmasında 0,73 mm çapında enjektör için denemeler yapılmıştır. Yapılan çalışmada bu çap için geri tepme tespit edilmiştir. Daha sonra 0,82 mm çapındaki enjektör için CFD çalışması yapılmıştır. Bu çap için geri tepme tespit edilmemiştir.

Yapılan CFD analizlerin doğruluğunu teyit etmek için CFD çalışmalarda kullanılan enjektör çapları için deneyler yapılmıştır. Yüksek hızlı görüntü çekebilen bir kamera ile görüntüler alınmış ve alev gözlenmiştir. 0,73 mm çapındaki enjektörde kısa sürede alev tüm brülörü kaplamış, ilerleyen zamanlarda alev brülörün içine doğru hareket etmiştir. Yapılan deneylerin %85'inde geri tepme gerçekleşmiştir. Aynı deney düzeneğinde enjektör değiştirilmiş ve 0,82 mm çapındaki enjektörle deneyler tekrarlanmıştır. Bu deneylerde alevin brülör boyunca düzenli yayıldığı görülmüş ve ilerleyen zamanlarda geri tepme gözlenmemiştir.

Elde edilen sayısal ve deneysel sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Sonuç olarak enjektör çapının hava yakıt karışım oranı ve geri tepme olayı üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir.

Farklı yakıtlar için tespit edilecek kritik minimum basınç değeri için yapılacak CFD çalışmaları ile geri tepmenin gerçeklememesi için kullanılması gereken enjektör çapı tespit edilebilir. Hatta yapılacak deneysel çalışmalarla da sayısal çalışmalar doğrulanabilir.

Ayrıca bu çalışma CFD simülasyonlarının ev tipi gaz fırını brülörlerinde geri tepme ile ilgili güvenlik endişelerini ele almadaki etkinliğini göstermiştir. Enjektör çapı optimize edilerek, genel brülör performansından ödün vermeden geri tepme riski önemli ölçüde azaltılabilir. Deneysel çalışma ile de bu yaklaşım doğrulanarak brülör tasarımında daha fazla ilerleme sağlanabilir.

TEŞEKKÜRLER

BSH Ev Aletleri San. ve Tic. A.Ş Freestanding Cooking Development personeline ve yöneticilerine değerli katkıları ve maddi destekleri için teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

[1] Park, D. H., et al. (2018). The study on the heater usage for better energy efficiency of domestic convection oven. Journal of Mechanical Science and Technology, 32(2), 907–914. doi:10.1007/s12206-018-0141-1.

[2] Yang, J., et al. (2019). Dilution effects of N_2 and CO_2 on flame structure and reaction characteristics in CH4/O2 flames. Experimental Thermal and Fluid Science, 108, 16–32. doi:10.1016/j.expthermflusci.2019.06.003.

[3] Jones, H. R. N. (1989). The application of combustion principles to domestic gas burner design. Taylor & Francis.

[4] Reed, S. B. (1969). An approach to the prediction of aerated-burner performance. Combustion and Flame, 13(6), 583–595.

[5] Dwivedi, G., et al. (2021). Numerical investigation of thermodynamic parameters for performance evaluation of cooking gas stove burner by appending of flame shield. Materials Today Proceedings, 46, 5696–5702. doi:10.1016/j.matpr.2020.09.836.

[6] B. Fine, The flashback of laminar and turbulent burner flames at reduced pressure, Combustion and Flame, Volume 2, Issue 3, 1958, 253-266.

[7] Lee, S.T., T'ien, J.S. "A Numerical Analysis of Flame Flashback in a Premixed Laminar System", Combustion and Flame, 48 (1982), pp. 273-285.

[8] Lammers, F.A., de Goey, L.P.H., "A numerical study of flash back of laminar premixed flames in ceramic-foam surface burners", Combustion and Flame, 133 (2003), pp. 47-61.

[9] Jerzak, W., & Kuźnia, M. (2016). Experimental study of impact of swirl number as well as oxygen and carbon dioxide content in natural gas combustion air on flame flashback and blow-off. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 29, 46-54. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.12.054.

[10] Giles, A., Marsh, R., Bowen, P., & Valera-Medina, A. (2016). Applicability of the Peclet number approach to blow-off and flashback limits of common steelworks process gases. Fuel, 182, 531-540. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.05.082.

[11] Rashwan, S. S., Ibrahim, A. H., Abou-Arab, T. W., Nemitallah, M. A., & Habib, M. A. (2017). Experimental study of atmospheric partially premixed oxy-combustion flames anchored over a perforated plate burner. Energy, 122, 159-167. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.086.

[12] Özdemir, İ. B. (2017). Simulation of turbulent combustion in a self-aerated domestic gas oven. Applied Thermal Engineering, 113, 160-169. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.205.

[13] Deymi-Dashtebayaz, M., Rezapour, M., Sheikhani, H., Afshoun, H. R., & Barzanooni, V. (2023). Numerical and experimental analyses of a novel natural gas cooking burner with the aim of improving energy efficiency and reducing environmental pollution. Energy, 263, 126020. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126020.

[14] TS EN 437 Deney gazları- deney basınçları- cihaz kategorileri