

Ön Karışımli Model Bir Yakıcıda Propan Gazının Swirl Sayısı Değişimlerinde Yanma Karakteristiğinin Araştırılması

Caner SİPÇİK^{1*,3}, Murat TAŞTAN^{2,3}

¹ Uçak Gövde ve Motor Bakımı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye

² Uçak Gövde ve Motor Bakımı, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye

³ Yanma Araştırma Laboratuvarı, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye

*¹ caner.sipcik@gmail.com, ² mrt@erciyes.edu.tr

(Geliş/Received: 08/03/2023;

Kabul/Accepted: 29/05/2023)

Öz: Çalışmamızda swirl sayısı değişimlerine verdiği tepkileri incelemek için propan gazı 0,4/0,8/1,2/1,6 swirl sayılarında yakılmıştır. Yanma sonucu oluşan alevin sıcaklık değeri, baca gazı sıcaklık değeri, emisyon değerleri, ışık şiddeti ve dinamik basınç değişimleri incelenmiştir. En yüksek sıcaklık 0,8 swirl'de, en düşük sıcaklık ise 1,2 swirl'de ölçülmüştür. Eksenel mesafede ölçülen sıcaklık trendlerinde, 0,2-0,8 swirl sayıları arasında, swirl sayısı arttıkça sıcaklık düşmüş, ancak 1,2 ve 1,6 swirl sayıları arasında sıcaklık 1,6'da daha yüksek ölçülmüştür. Swirl sayısının değişimi baca gazı sıcaklık değerlerini büyük oranlarda değiştirmemiştir. Swirl sayısının artışı ile CO, CO₂ NO_x emisyonları azalmıştır. NO_x emisyonları için bu çalışmada kullanılan ölçü cihazının tolerans değerlerinde verimli sonuçlar elde edilememekle birlikte, yapılan çalışma ile, NO_x emisyonundaki değişimin, NO_x oluşum mekanizmalarıyla mı yoksa swirl sayısı değişim etkisinden mi kaynaklandığı net olarak açıklanamamıştır. Swirl sayısının artması, propan alevinin ışık şiddetini düşürdüğü ve belirli bir seviyede düşük tuttuğu gözlenmiştir ancak alevin dinamik basıncı üzerinde ciddi etki yaratmamıştır.

Anahtar kelimeler: Swirl sayısı, baca gazı sıcaklığı, emisyon, yanma, propan.

Investigation Of Combustion Characteristics Of Propane Gas At Swirl Number Variations In A Premixed Model Combustor

Abstract: In our study, propane gas was burned at 0.4/0.8/1.2/1.6 swirl numbers to examine reactions in swirl number changes. Temperature of flame, flue gas temperature, emission values, light intensity and dynamic pressure changes of flame were investigated. The highest temperature was measured at 0.8 swirl and the lowest temperature was measured at 1.2 swirl. In temperature trends measured in axial distance, between 0.2-0.8 swirl numbers, the temperature decreased as the swirl number increased, but the temperature was higher at 1.6 between 1.2 and 1.6 swirl numbers. The variation of the swirl number did not greatly change the flue gas temperature values. With the increase in the number of swirls, CO, CO₂ NO_x emissions decreased. Although efficient results could not be obtained in the tolerance values of the measuring device used in this study for NO_x emissions, it was not clear whether the change in NO_x emission was caused by the NO_x formation mechanisms or the swirl number change effect. It was observed that increasing the swirl number decreased the light intensity of the propane flame and kept it at a certain level, but did not have a serious effect on the dynamic pressure of the flame.

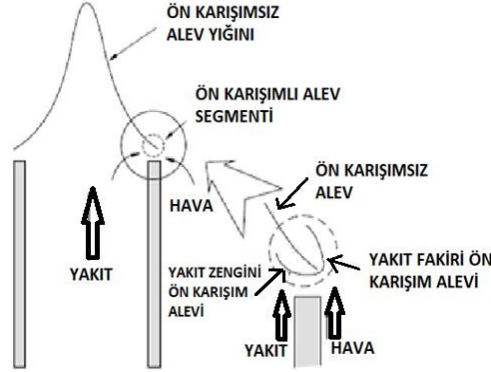
Key words: Swirl number, flue gas temperature, emission, combustion, propane.

1. Giriş

Yanma temel olarak, bir oksitleyici varlığında yakıtın yakıldığı kimyasal bir işlemdir. Isı ya da hem ısı hem de ışık üreten hızlı oksidasyon, nispeten az ısı ve ışısız eşlik eden yavaş oksidasyon olarak tanımlanabilir [1]. Yanma atomlar, moleküller ve katı sınırlar arasında moleküler düzeyde meydana gelen dinamik veya zamana bağlı olayların bir sonucudur [2]. Yanma olayı, alevli veya alevli olmayan şekillerde karşılık bulabilir ve alevli yanma olayları, ön karışım (önceden karıştırılmış) alevli veya difüzyon (önceden karıştırılmamış) alevli olarak sınıflandırılırlar [3]. Adlarından da anlaşılacağı gibi bu sınıflandırma, reaktanların karışıklık durumu ile ilgilidir [4]. Difüzyon alevlerinde yakıt ve oksijen bir araya gelerek yanıcı bir karışım oluşturur ve tutuşma meydana geldiğinde, bu karışımın oluşmasıyla birlikte yanma hemen başlar. Bu durumda alev, yakıt ve oksijen bölgeleri arasındaki sınırdan belirir [2]. Önceden karıştırılmış alev durumunda, yakıt ve oksitleyici yanma gerçekleşmeden önce moleküler düzeyde iyice karıştırılır [5]. Şekil 1'de her iki tür alev görselleştirilmiştir. Bu örnekte yakıt, yakıt nozulundan gelmekte, hava ise ayarlanabilir bir hava alığından alınmakta ve yakıt ile karıştırılmaktadır. Brülör çıkışında hava yakıt karışımının oluşturduğu alev, ön karışım alevidir. Hava akış oranının ayarlanabildiği

* Sorumlu yazar: caner.sipcik@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-1336-030X, ² 0000-0001-9988-2397

varsayılırsa, oluşan alev yakıt zengini veya yakıt fakiri olur. Eğer karışım zengin ise ön karışım alevini geçen fazla yakıt veya yakıt kaynaklı ara türler ortamda bulunan oksijenle tepkimeye girer ve difüzyon alevi oluşur [1].



Şekil 1. Önceden karıştırılmamış bir Bunsen alevinin, önceden karıştırılmış alev bölümü tarafından stabilizasyonunu

Yanma süreci içerisinde oluşan kararsızlıklar, sistemin kendi yapısı kaynaklı oluşan akustik dalgalardan ve alevin bulunduğu alandaki girdaplardan kaynaklanmaktadır [6]. Oluşan kararsızlık durumları, hız ve basınçta dalgalanmaları yani yanma ısısı salınım hızındaki salınımlarla ilişkili zarar verici basınç salınımlarını ve yanmanın gerçekleştiği alan duvarlarında termal gerilmeleri ortaya çıkarır. Nihayetinde bu süreç alevin geri tepmesine ve sönmesine sebep olur [7]. Kararsızlık mekanizmaları birkaç başlık altında incelenmiştir. Yakıt kompozisyonundaki bileşenlerin yoğunluk farklılıklarından dolayı düşük yoğunluğa sahip bileşen, yakıtın üzerinde kalarak daha önce yanmaya çalışır ve bu olay kütle kuvveti kararsızlıkları olarak adlandırılır. Yine ön karışımli alevlerin kendi yapısı gereği türbülanslı oluşu ve bu türbülansın yakıt içerisinde düzensizliğe yol açması hidrodinamik kararsızlık şeklinde kabul edilmiştir. Alevin kütlesi ve ısısı yanma boyunca birbiri içine geçerek yakıt karışımlarında ve alev hattında kararsızlığa yol açar. Difüzyiv-Termal kararsızlık olarak literatüre geçen bu olay alevin sönmesine sebep olan bir diğer etmendir [6]. Alevin akışında meydana gelen ısı üretimi yanma odası çeperlerinde titreşimlere ve akustik dalgalanmalara yol açar. Salınan sıcaklık dalgaları basıncın yukarıya kaymasına ve dinamik basınç değişimlerine yol açar. Termoakustik kararsızlık adı verilen bu davranış yanma odasına ve ünitelere ağır hasarlar verebilir [6]. Yanma boyunca kararsız olan alev, ses dalgaları üretmeye başlar ve bu dalgalar açık havada sönmüldükleri için bir sorun teşkil etmez fakat kapalı sistemlerde bu dalgalar yanma odası duvarları tarafından yansıtılır. Yansıyan ses dalgaları yanma odası geometrisine göre şekillenir ve basınç dalgalanmalarına yol açar. Bu da alevde kararsızlığa sebep olur [8]. Akustik ses dalgaları ile türbülanslı, önceden karıştırılmış alevlerin etkileşimini inceleyen L.Tim, türbülanslı alevlerin fazı kaydırıldığını ve alevin stabil kaldığı alanın genliğini azalttığını göstermiştir. Yani, stabil bir akustik etkinin sönmüleme kaynağı olarak hizmet ettiğini deneyimlemiştir. Sönmüleme kaynağı olan dalgalar, alev bozulmasının karakteristik ölçekleri düzeyinde veya ondan daha küçük olan bozulmalar için özellikle önemli olduğu sonucuna varmışlardır [14]. Alev kararsızlıklarına diğer bir bakış açısı, M. Fleifil et al tarafından, sistem akustiği ile kararsız ısı salınımı arasındaki bağlantı nedeniyle ortaya çıkan bir rezonans olgusu olarak tanımlanmıştır. Yaptıkları çalışmada, bir tüpün kenarında stabilize edilmiş laminer önceden karıştırılmış bir alevin hız salınımının dinamik tepkisini tanımlamak için analitik bir model oluşturmuşlardır. Bir boru akış hızı profili üzerine bindirilmiş üniform ve üniform olmayan hız bozulmalarını ele almışlardır. Bu modelin sonuçlarının deneysel gözlemlerle uyumlu olduğu ve tüm akustik kararsız modlar arasından yanma uyarılı modunun nasıl seçildiğini belirlemede faydalı olduğu gösterilmiştir [16]. Alev kararsızlıkları yakıt bileşeninde bulunan hidrojen miktarı ile de oldukça ilişkilidir. Yılmaz İ. et al. Hidrojen-kararsızlık ilişkisini incelemek için düşük girdaplı zayıf ön karışımli bir brülör için hidrojen-metan karışımını yakmışlardır ve yanma özelliklerinin hidrojen fraksiyonuna çok duyarlı olduğu bulunmuştur. Deney sonucunda, alevin, tüm koşullar için artan hidrojen konsantrasyonu ile alev tabanı bağlantısında ve alev sıkıştırmasında önemli artışlar gösterdiği, bu etkinin de rezonans olmayan frekanslarda alev tepkisini arttırırken, sadece minimum sıkıştırmayı indüklediği ve rezonans frekansında bağlantı yoğunluğunu azalttığını görmüşlerdir [17]. Hidrojen etkisini Propan ile deneyimleyen Chenglong T et al. deney sonucunda, Zeldovich sayısının hidrojen ilavesinin artmasıyla azaldığını ve bunun da karışımın aktivasyon sıcaklığını düşürdüğünü, Global Lewis sayısının, hidrojen fraksiyonunun artmasıyla azaldığını ve bunun ise hidrojen ilavesiyle tercihli difüzyon kararsızlıklarını arttırdığını gözlemlemişlerdir [13]. Sabit rezonans altında yapılan çalışmalara ek olarak Taştan M et al. Propan gazını akustik zorlama altında sabit denklik oranı (1.2), 7 kW termal güç, girdap sayısı (swirl sayısı = 1) ile yakmışlardır. Farklı dinamik basınç yaptırımı yapabilmek için yanma odası frekansı 110 Hz'den 330 Hz'e değiştirilmiş ve aynı zamanda

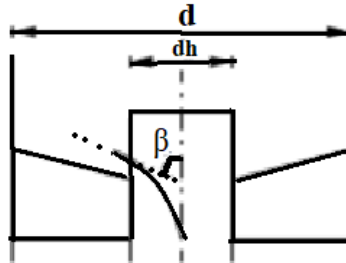
ışık şiddeti de kaydedilmiştir. 110Hz de hava ve saf propanın (%100 C₃H₈) yanması durumunda en yüksek ve en düşük dinamik basınç değerleri arasındaki dalgalanma yaklaşık 440 Pa olarak ölçülmüştür. 175 Hz akustik güç değerinde alev, 315 Pa, 330 Hz’de önceki rezonans değerinden daha düşük bir kuvvet etkisine sahip olduğundan burada genlik yaklaşık 130 Pa ölçülmüştür [12]. Deneysel çalışmalara ek olarak Propan yanmasına matematiksel model ile katkı sunan G.Russo et al. hidrojen ile zayıf propanın ön karışımı olarak yanmasını incelemiş ve saf propan, saf hidrojen ve ara karışımlar için kalış süresinin fonksiyonu olarak çatallanma diyagramları oluşturmuşlardır. Hidrojen-propan karışımlarının çatallanma diyagramları, saf yakıtların çatallanma diyagramlarının basit bir homotetik biçimlenmesi olarak görülemeyeceği, ancak yeni kararlılık özellikleri ortaya çıkacağını göstermiştir [9]. Kararsızlık çalışmalarında hidrojen etkisinin emisyon değerlerine etkisi de ayrıca merak konusu olmuştur. B. Alabas et al. çalışmasında önceden karıştırılmış ve girdap destekli bir sistemde akustik zorlama altında oksijenle zenginleştirilmiş yakıt karışımlarının kararsızlık değişimlerini incelemişlerdir. Yakıt olarak kullanılan metana farklı miktarlarda hidrojen (%0, %10, %20) eklenmiş ve hidrojen katkılı yakıt karışımlarında oksijen zenginleştirme işlemi (%21, %24, %26) uygulanmıştır. Yanma deneyleri sırasında alınan emisyon değerlerine göre oksijen ilavesi, artan adyabatik sıcaklık ve ani NO_x oluşumları nedeniyle NO_x emisyonlarını artırırken, CO emisyonlarının azalmasına katkıda bulunduğu sonucuna varmışlardır. Hidrojen ilavesi hava ile yanma durumunda NO_x emisyonlarını (%21 O) azaltsa da oksijen zenginleştirilmesi ile birleştiğinde kararsızlıkları tetiklediğinden CO emisyonlarını 2 ppm’den 13 ppm’ye çıkarmıştır [15]. Propan gazı emisyon değerleri için ise Oğuzhan B et al. deneysel araştırmalarında, karışımların emisyon değerlerini ve baca gazı değerlerini araştırmak ve belirlemek için hidrojenle zenginleştirilmiş propan kullanmışlardır. Karışım, sabit denklik oranı (1.2), girdap sayısı (1) ve 7kw termal enerji ile ön karışımı yanma odasında incelenmiştir. %10, %20 ve %30 hidrojen içeren karışımlar için, saf propanın hava ile yakılmasına kıyasla hidrojenle zenginleştirilmiş karışımların yanma kalorifik değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Karışımın hidrojen miktarının artmasıyla birlikte CO miktarı yaklaşık %80 oranında azalmıştır. Hidrojenin ısı değerinden dolayı karışımlardaki hidrojen miktarının artması ile NO_x emisyonları artmıştır. Karışımlardaki hidrojen miktarı arttıkça yanma odası çıkışında baca merkezinden alınan sıcaklık değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir [12]. Hidrojen etkisi yanmanın kararsız hallerinde büyük rol üstlenirken, swirl (girdap) sayısının etkisini araştıran Harun Y et al. yakıt bileşimi, eşdeğerlik oranı ve girdap sayısının, önceden karıştırılmış %100 CNG, CNG-H₂, CNG-H₂-CO ve CNG-H₂-CO₂-CO karışımlarının akustik koşullar altında alev davranışı (dinamik ve statik) üzerindeki etkilerini laboratuvar ölçekli girdap stabilize bir yakıcıda deneysel olarak incelemiş ve girdap sayısının alev stabilitesi özellikleri üzerinde monoton bir etkisi olduğu sonucuna varmışlardır [10].

2. Girdap Üretici (Swirl)

Hava ve yakıtın karışımının hızlı gerçekleşmesi ve yanmanın daha kararlı olabilmesi için girdap üreticili yakıcılar tasarlanmıştır [18]. Tasarım şeması Şekil 2’de gösterilmiştir. Bu çalışmada kullanılan girdap üreticileri Şekil 3’de gösterilmiştir.

$$S = \frac{2}{3} \left(\frac{1 - \left(\frac{dh}{d}\right)^3}{1 - \left(\frac{dh}{d}\right)^2} \right) \tan\beta \quad (1)$$

Yukarıda bir girdap üreticinin formülize edilmiş hali verilmiştir. Burada S girdap sayısı, dh üreticinin merkez çapı, d girdap üreticinin dış çapı, β girdap üreticinin çıkış açısıdır [19].



Şekil 2. Girdap üretici tasarımı



Şekil 3. Girdap üreteçleri

Tablo 1’de bu çalışma için kullanılan girdap üreteçlerinin bazı özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Girdap numarası ve özellikleri

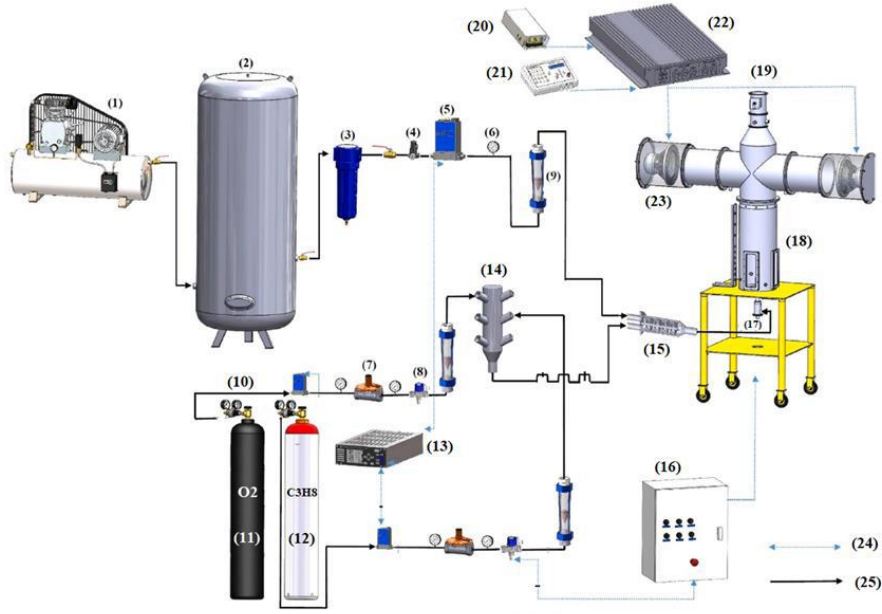
Girdap sayısı (S)	Çap oranı (d_h/d_0)	İç çap mm (d_h)	Dış çap mm (d_h)	Kanatçık açısı (α)
0.2	0.50	13.5	27	14,6°
0.4	0.50	13.5	27	28,1°
0.8	0.50	13.5	27	46,8°
1.2	0.50	13.5	27	58,1°
1.6	0.50	13.5	27	64,9°

3. Deney Sistemi

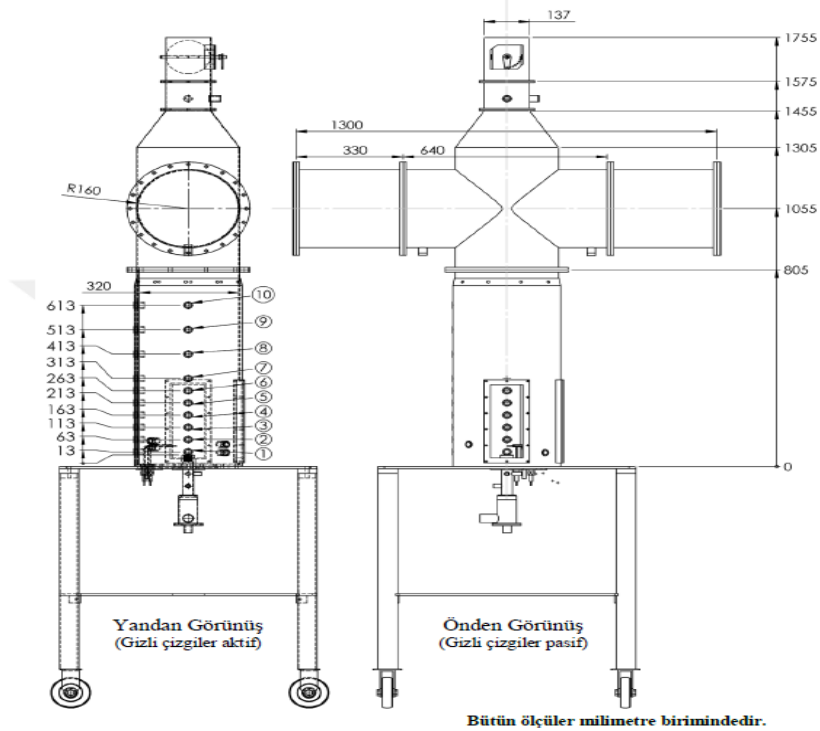
Bu çalışmada öncelikle propan gazının yanma davranışı, yanma stabilitesi ve swirl sayısı değişimlerinin yanmaya etkileri üzerine literatür araştırmaları sunuldu. Daha sonra gelişen yanma ve hidrojen bazlı motor teknolojileri ile beraber, modern hava araçları gaz türbin motorlarında propan gazının yakıt olarak kullanımının mümkün olup olamayacağı ve literatüre katkı sağlaması amacıyla bu çalışma yürütüldü. Çalışmanın üçüncü kısmında deney için kullanılan ekipmanlar ve deney düzeneği tanıtıldı. Dördüncü kısımda ise deneyin varyasyonları ve elde edilen veriler grafikler ile detaylıca sunuldu. Son olarak sonuç kısmında deneyden elde edilen bütün veriler açıklandı.

3.1. Yanma düzeneği

Çalışmada kullandığımız deney sisteminde (şekil 4), sisteme dahil edilecek gazlar, harici gaz silindirlerinde depolanır ve besleme miktarı altı kanallı bir vakum sistemi kontrolörü (MKS-946 Serisi) tarafından tam olarak kontrol edilen dijital kütle akış kontrolörü (MKS-GE50A) tarafından belirlenir. Vakum sistem kontrolörü, eşdeğerlik oranı ve termal güce göre, yakılacak gaz ve havanın miktarını manuel ayarlamaya yarar. Besleme hattındaki regülatörler gaz basıncını brülör çalışma aralıklarında (20 mbar) tutmak için kullanılır. Yanma havası kompresör tarafından sağlanır ve filtreden geçirilerek yağsız ve buharsız olarak kütle akış kontrolörü (MKS-1579A) üzerinden sisteme dahil edilir. Yanma gazları ve hava, ön karışım bölgesinde karıştırılarak yanma odasına yönlendirilir. Yanma odası (Şekil 5) içerisinde ateşleme sistemi ile yakılır. Yanma odasında alevin oluşmaması durumunda alev besleme hattında bulunan solenoid valfler aracılığıyla gaz akışı kesilir.



Şekil 4. Yanma düzeneği elemanları (1.Hava kompresörü(5.5 Hp ve 510 lt), 2.Harici hava tankı, 3.Filtre, 4.Basınç regülatörü, 5.Elektronik debi ölçer, 6.Manometre, 7.Basınç regülatörü, 8.Solenoid valf, 9.Yüzer tip debi ölçer, 10.Basınç regülatörü, 11.O2 tankı 12.C₃H₈ tankı, 13.Kontrol istasyonu, 14.Gaz kolektörü, 15. Hava/Yakıt ön karıştırıcısı 16.Kontrol istasyonu, , 17. Brülör,, 18. Yanma odası Kontrol paneli, 19. .Baca 20. Güç kaynağı, 21. Sinyal üretici, 22. Amplifikatör, 23. Hoparlör 24.Elektrik bağlantıları, 25.Gaz temin hatları)



Şekil 5. Yanma çalışmasında kullanılan deney düzeneği

Deney sırasında sistem basıncını ölçmek amacıyla basınç ölçerler kullanılır. Bu çalışmada 2 tür basınç ölçer kullanılmıştır. Bir tanesi piezo-dirençli 0-10 bar arası ölçüm yapabilen basınçölçer, diğeri ise sisteme akustik frekans ile müdahale edildiğinde değişen basıncı ölçebilen dinamik basınç ölçerdir. Sıcaklık ölçümleri seramik kaplı ısı çiftleri ile gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinde bulunan K tipi ısı çiftleri (şekil 5/ 5-10) 1200 °C ye

kadar, B tipi ısıt çiftler (Şekil 5/ 1-5) 1800 °C'ye kadar ölçüm yapabilmektedir. Yanma sonucunda oluşan emisyon değerleri taşınabilir emisyon ölçüm cihazı ile ölçülür. Bu çalışmada kullanılan NOVO Plus RCU tipi taşınabilir emisyon cihazı tolerans değerleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Emisyon ölçüm cihazı tolerans aralıkları

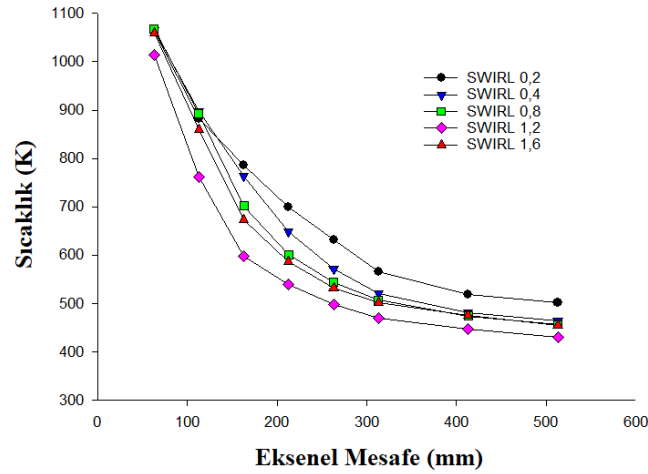
GAZLAR	ÖLÇÜM HATALARI	ÖLÇÜM ARALIĞI
O ₂	+/- %0.2	-
CO	+/- %5 yada +/- 5 ppm*	0-4000 ppm
CO	+/- %10	>4000 ppm
NO	+/- %5 yada +/- 10 ppm*	0-1000 ppm
NO	+/- %10	>1000
CO ₂	+/- %0.3	-

*Hangisi yüksek ise o kabul edilir.

3.2. Çalışma şartları

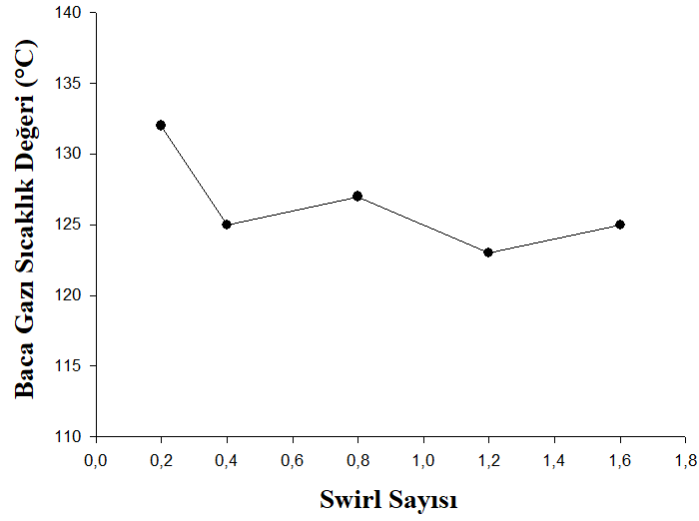
3.2.1. Swirl sayısının sıcaklık değerlerine etkisi

Propan gazı 5 kW ısıt güç ve 1,6 eşdeğerlik oranında, farklı swirl sayılarında yakılarak, oluşan alevin sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Şekil 6'da Propan gazının 0,2 / 0,4 / 0,8 / 1,2 / 1,6 swirl sayılarında aksel mesafe boyunca sıcaklık dağılımındaki değişim gösterilmiştir.



Şekil 6. Aksel mesafede swirl sayılarına göre sıcaklık dağılımı

Şekil 6'da görüldüğü üzere swirl sayısındaki artış, sıcaklık trendinde monoton bir artış göstermemiştir. Swirl sayısı 0,2-0,4-0,8 değerlerinde sırasıyla arttığında her aksel mesafede ulaşılan ortalama sıcaklık değeri de sırasıyla düşmüştür. Ancak 1,2 ve 1,6 swirl sayılarında elde edilen ortalama sıcaklık değerlerinde aritmetik bir düşüş söz konusu olmamıştır. Aksine 1,6 swirl'de elde edilen sıcaklık değerleri 1,2'ye göre daha yüksektir. Bu da swirl sayısı ile alevin ulaştığı sıcaklık değerleri arasında doğru bir orantı olmadığını bize göstermiştir. Bu çalışmada ilk ısıt çiftten alınan en yüksek sıcaklık 0,8 swirlde 1067K, en düşük sıcaklık ise 1,2 swirl'de 1014K'dir. Propan gazı kullanılan bir yakıt bileşeni için çok yüksek sıcaklık istendiğinde 0,8 swirl kullanımı tercih edilebilir olduğu tespit edilmiştir. En ideal ve stabil yanma eğrisi ise 1.6 swirl sayısında gözlenmiş, alev kararsızlığının en optimum yakalandığı değer 1,6 swirl sayısı olmuştur. Yanmanın gerçekleştiği ve aleve en yakın noktadaki ısıt çiftlerden alınan değerler, alevin karakteristiği hakkında bilgiler sunarken, bir diğer parametre olan baca gazı sıcaklık değerleri de aynı şekilde alevin yanma karakteristiği hakkında bilgiler vermektedir. Şekil 7'de değişen swirl sayılarında propan alevinin yanması sonucu ölçülen baca gazı sıcaklık grafiği verilmiştir.

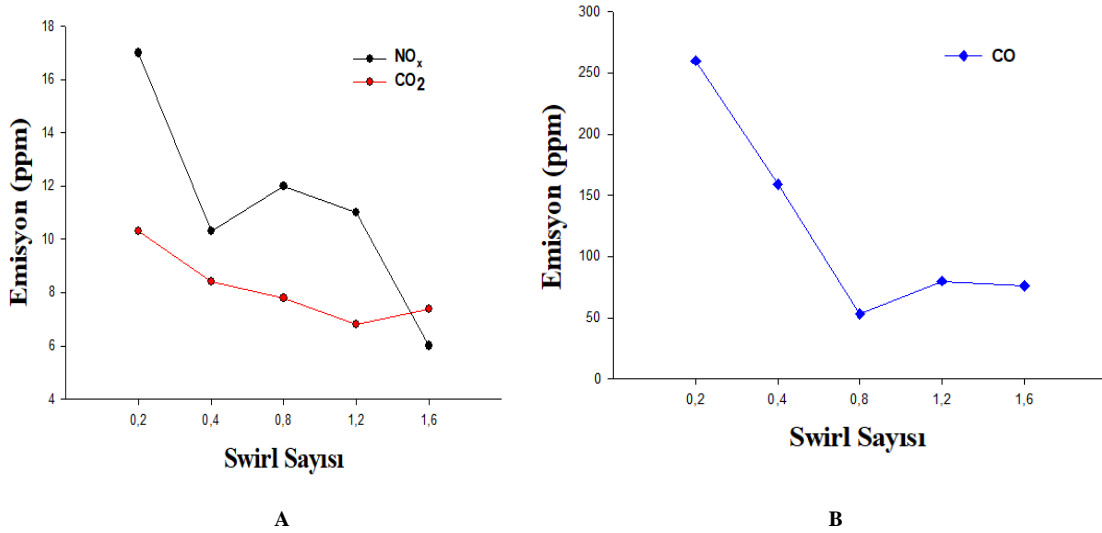


Şekil 7. Değişen swirl sayılarına göre ölçülen baca gazı sıcaklığı

Sönme limiti olarak belirlenen 0,2 swirl sayısında ölçülen baca gazı sıcaklık değeri 132 °C ile en yüksek seviyede gözlenmiştir. Daha sonra swirl sayısı 0,4-0,8-1,2-1,6 değerlerine kademeli olarak yükseltildiğinde elde edilen baca gazı sıcaklıkları daha düşük seviyelerde ölçülmüştür. 1,2 swirl'de 123 °C ile en düşük seviyesine gelen baca gazı sıcaklığı 0,4-0,8-1,6 swirl sayılarında sırasıyla 125,127,125 °C değerlerinde neredeyse aynı hesaplanmıştır. Swirl sayılarındaki değişime propan gazı alevi keskin tepkiler vermemiş, ölçülen değerler birbirine çok yakın olmuştur. Buradan hareketle, propan gazı yakıldığında, swirl sayısının baca gazı sıcaklıkları üzerindeki etkisi kayda değer bulunmamıştır.

3.2.3. Swirl sayısının emisyon değerlerine etkisi

Swirl sayısı değişiminin CO, CO₂ ve NO_x salınımlarına etkisi incelendiğinde Şekil 8'deki grafikler elde edilerek, propan alevinin çevre ve atmosfer üzerindeki kirletici etkisi değerlendirilmiştir.

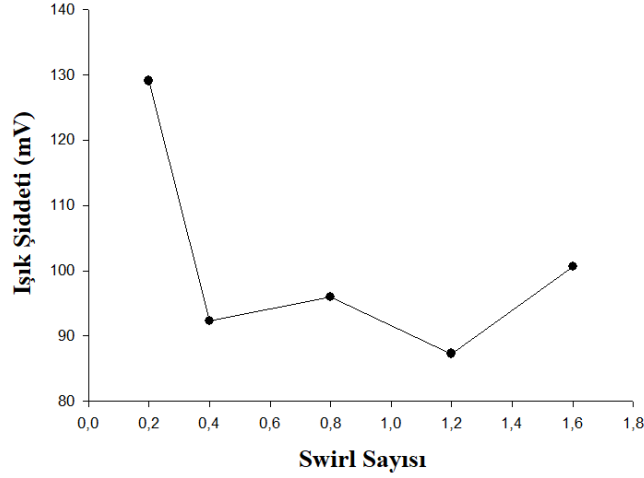
Şekil 8. Swirl sayısının emisyon değerlerine etkisi A) NO_x ve CO₂, B) CO

CO emisyonu bir yanma tepkimesi için istenmeyen bir üründür. Çünkü yakıt bileşeninde bulunan C atomlarının CO'ya dönüşmesi tepkimenin tam gerçekleşmediğini ve yanma veriminin düşük olduğunu göstermektedir. Bir yakıtın yanmasıyla elde edilen CO salınımının minimum seviyede olması beklenmektedir. Kullanılan swirl sayılarında (0,2-0,4-0,8-1,2-1,6), CO salınımları da sırasıyla 260-159-53-80-76 ppm değerlerinde gözlenmiştir. Bu verilere göre en yüksek CO salınımına propan gazının sönme limiti olan 0,2 swirl sayısında ulaşılmıştır. En düşük CO salınımı ise 0,8 swirl sayısında, alevde hiçbir akustik zorlama olmaksızın gözlenmiştir. Bu verilerden hareketle propan alevinin sönme alt ve üst limitleri içerisinde, swirl sayısının artışıyla CO emisyonu düşerek kirletici etkisi oldukça azalmıştır. Yanma tepkimelerinde bir diğer önemli parametre karbondioksit ürünüdür. CO₂ salınımının tam verimli bir yanmada maksimum seviyede olması beklenir. Çünkü yakıt bileşeninde bulunan C atomlarının tamamı yanma sonrasında CO₂ ye dönüşecek ve yanma tam olarak gerçekleşmiş olacaktır. Şekil 8'de görüldüğü gibi, kullanılan swirl sayılarında (0,2-0,4-0,8-1,2-1,6) CO₂ emisyonları da sırasıyla 10,3-8,4- 7,8- 6,8- 7,4 ppm değerinde gözlenmiştir. Propan gazının alt sönme limiti olan swirl 0,2 de CO₂ emisyonu en yüksek değerdedir. Bununla birlikte swirl sayısı arttırıldıkça CO₂ emisyonunda düşüş gözlenmiştir. Bu çalışmada yakıt olarak sadece propan gazı ve yakıcı olarak atmosfer havası kullanılmıştır. Yanmaya dahil edilen yakıt bileşeninde azot (N) bulunmamasına rağmen atmosfer havası içerisinde miktar, basınç, nem gibi parametreleri ölçülemeyen N₂ gazı bulunmaktadır. Deney sonucu elde edilen NO_x salınımları, emisyon cihazının tolerans değerlerinde net olarak ölçülememiştir. Bu sebeple çalışmamız NO_x oluşumunun hangi mekanizmalar ile gerçekleştiğini belirtmemekle birlikte sadece swirl sayısı etkisinde NO_x salınımının değişkenliğini gözler önüne sermiştir. Şekil 8'de belirtilen grafik incelendiğinde NO_x emisyonları swirl sayısının artışıyla sırasıyla 17- 10,5-12- 11- 6 ppm değerlerinde gözlenmiştir. 0,2 Swirl'de en yüksek değerini (17ppm) alan NO_x, 1,6 swirl sayısında minimum değerini (3ppm) almıştır. Propan gazının yakıt olarak kullanacak olan bir gaz türbin motorunda, aynı sıcaklık parametrelerinde olduğu gibi emisyon değerlerinde de 1,6 swirl sayısı kullanımı motor-yakıt performansı açısından oldukça verimli olacaktır.

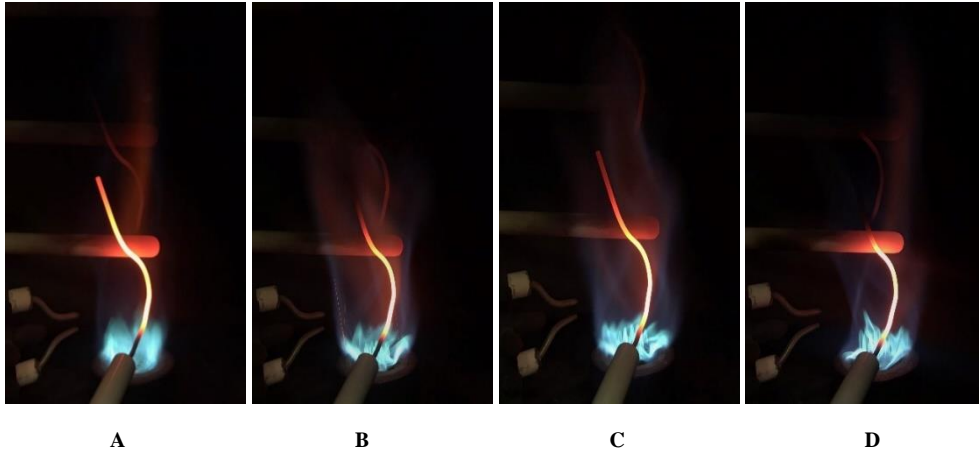
3.2.4. Swirl sayısının yanma karakteristiklerine etkisi

Girdaplı akışlar, alevi istenilen alanda sabit tutmak için kullanılan en etkili yöntemlerden biridir. Girdaplı akış, akışa teğet bileşen kazandırarak, eksenel-halka formunda girdap üreteçleri kullanarak, spiral biçimli kanatçıkları bulunan girdap üreteçleri kullanarak ya da mekanik akış çeviricileri kullanarak oluşturulabilir. Oluşturulan girdaplı akış, hava/yakıt kompozisyonunu homojenize eder ve böylece yakıt tüketimini ve yanma sonu zararlı ürünlerin salınımını azaltır. Girdap yoğunluğunun fazla olması durumunda ise alev boyunca eksenel akışın tersine dönerek akışın dışa doğru yayılmasına neden olur. Bu da ısı salınım oranında değişiklik yaratarak girdaplı akışın olumlu etkilerini tersine döndürebilir. Swirl sayısındaki değişiklikler, akış alanını, karışım bölgesinin boyutunu ve yerleşimini, alev sıcaklığını, tür konsantrasyon dağılımlarını, türbülans yoğunluğunu ve yanma karakteristiklerini etkiler. Bu etkilerden hangisinin baskın gelerek yanma özelliklerinde ne gibi değişiklikler meydana getireceği belli değildir. Bu sebeple bu çalışmada swirl sayısını değiştirerek propan gazı alevinin davranışı incelenmiştir.

Şekil 9'da, artan swirl sayıları boyunca dakikada 60.000 veriden elde edilen ışık şiddeti ölçümlerinin ortalama değerleri gösterilmiştir. Propan alevi 0,5 kW güçte 1,6 Eq oranında yakılmış ve elde edilen ışık şiddeti ölçümlerinde alevin 0,2 swirl'de (sönme limiti) daha yüksek ışık şiddeti oluşturduğu gözlenmiştir. Swirl sayısının 0,4 ve sırasıyla 0,8-1,2-1,6 değerlerine artırılmasıyla, grafikte açıkça görüldüğü gibi ışık şiddetinde 0,2'ye oranla keskin bir düşüş olduğu ancak 0,4 ve sonraki girdap değerlerinin artmasıyla ışık şiddetinin dalgalanma eğilimi göstermediği fark edilmiştir. Bunun sebebi alevin artan swirl sayılarında kararlı yanma alanına girmesidir. Propan alevinin kararlı yanma davranışı, alevin ışık şiddetinde radikal değişimlere meyletmesinin önüne geçmiştir. 0,2 swirl sayısında, yani alevin sönme limitinde, alevin kararsız hali ışık şiddetinde 129,1 mV değerlerinde gezerken, kararlı hale dönüşen alev, girdaplara adaptasyon sağlayarak 90-100 mV değerlerinde stabil sayılabilecek davranış sergilemiştir. Şekil 10'da farklı swirl sayılarında anlık alev görüntüleri verilmiştir.



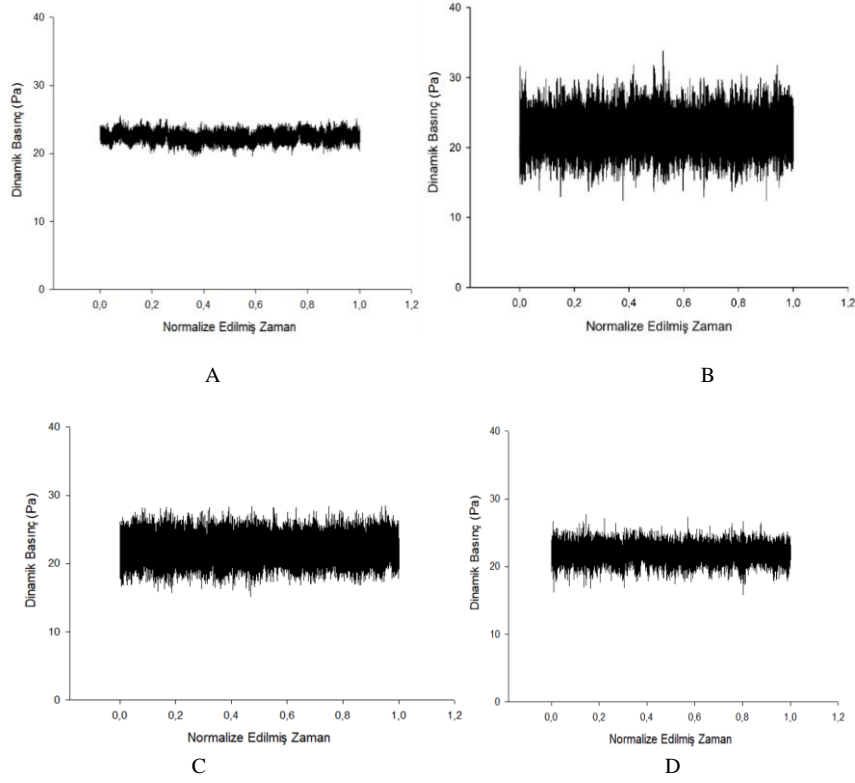
Şekil 9. Swirl sayılarına göre yayılan ışık şiddeti



Şekil 10. Farklı Swirl sayılarında anlık alev görüntüleri (Swirl sayısı; A: 0,4, B:0,8, C: 1,2, D: 1,6)

Yanma odası içerisinde yanan alev üzerinde, oda çeperlerinde oluşan frekanslar sebebiyle dinamik basınç dalgalanmaları yaşanmaktadır. Bu dalgalanmalar alevin kararsızlığını etkileyen bir diğer önemli faktördür. Propan gazının yakımı süresince değişen swirl sayılarında dinamik basınç dalgalanmaları ölçülerek, basınç dalga grafikleri Şekil 11’de sunulmuştur. Dalgalanmanın açık olarak propan alevi üzerindeki dinamik basıncın değişmesine sebep olduğu gözlenmiştir.

Propan alevinin, bir dakika boyunca ve dakikada 60.000 veri ile dinamik basınç ölçümleri yapılmıştır. Basınç dalgalanmaları 0,4 swirl sayısında yakılan propan alevi için 21 ve 24 Pa değerlerinde salınım yaparak, alevin dinamik basıncı 3 Pa olarak ölçülmüştür. 0,8 swirl sayısında basınç dalgalanmalarının 18 ve 25 Pa değerlerinde stabil kaldığı gözlenerek yaklaşık olarak 7 Pa dinamik basınç gözlenmiştir. 1,2 swirl sayısında bu değer 8 Pa olarak değerlendirilmiştir. 1,6 swirl sayısında ise 6 Pa dinamik basınç elde edilmiştir. Swirl sayısının 0,4 ten 0,8’e artışı ile dinamik basınç değeri artmış ancak 0,8’den sonraki swirl sayılarının artışı ile dinamik basıncın düştüğü gözlenmiştir. Buradan hareketle propan alevinin 0,8 swirl sayısından sonra yanma stabilitesinin arttığını ve daha kararlı geçtiği değerlendirilmiştir.



Şekil 11. Swirl sayısı değişimlerinde elde edilen basınç dalgalanmaları (Swirl sayısı; A: 0.4, B:0.8, C: 1.2, D: 1.6)

4. Sonuçlar

Bu çalışmada propan gazının 5 kW güç, 1,6 eşdeğerlik oranı ve değişen swirl sayılarına göre elde edilen sıcaklık, basınç, ışık şiddeti ve emisyon değerleri ön karışımli-girdap üreteçli, laboratuvar ölçekli bir yakıcıda araştırılmıştır. Yapılan ölçümlerde alevin yanma karakteristiği incelenmiş ve grafikler ile desteklenmiştir. Tim L. ve M.Fleifil'in çalışmalarında değindiği, türbülanslı akışın yanmanın dinamik etkilerini değiştirmesi ve alevde kararsızlığa sebep olması, bu çalışmada propan alevinin swirl sayısı artırılarak kuvvetlendirilmiştir. Swirl artışı ile türbülansı artan alevin dinamik basınç değişimleri 0,8 swirl sayısına kadar artarken, daha yüksek sayılarda alevin kararlılığını artırması ile dinamik basınç üzerindeki etki stabil kalmıştır. Artan swirl sayıları ile alevin ışık şiddeti giderek azalmış ve düşük seviyelerde seyretmiştir.

G.Russo, Yılmaz İ ve Chlong'un yakıt içerisindeki hidrojen miktarının alev davranışlarını etkilediğini bildirmeleri üzerine, yüksek hidrojen içerikli propan gazı (C_3H_8) yakıt olarak seçilmiş ve literatürdeki çalışmalara ek olarak yüksek hidrojenli bir yakıtın swirl sayısı etkisiyle sıcaklığı, alev en yakın noktada, 0,8 swirl sayısında en yüksek, 1,2 swirl sayısında en düşük değerde ölçülmüştür. Sıcaklık verilerine göre yüksek hidrojenli yakıtın kaarlı davranış sergilemede zorlandığı sonucuna varılmıştır. Propan gazının swirl sayısı değişimlerinde kararsızlığı incelendiğinde, Taştan M.'nin çalışmasına ek olarak literatür boşluğu doldurulmuş ve propan için akustik zorlama olmaksızın emisyon değerleri ölçülmüştür. Swirl sayısının artması ile CO, CO₂, NO_x emisyonunda azalma meydana gelmiştir. Baca gazı sıcaklığı için hidrojen ilavesinin sıcaklığı arttırdığı bilinmektedir. Oğuzhan B. çalışmasında bu görüşe yer verirken, artan sıcaklığın düşürülmesi yahut sabit tutulabilirliği incelendiğinde, swirl sayısının baca gazı sıcaklığına kayda değer bir etkisine rastlanılmamıştır.

Kaynaklar

- [1] Law C. Combustion Physics. Cambridge, Birleşik Krallık. Cambridge University Press. 2006.
- [2] F.Mahallawy, S. Habik. Fundamentals And Technology Of Combustion. Elsevier Science. 2002
- [3] Yılmaz H. Sentetik Gaz Yakıtların Yanma Karakteristiklerinin Deneysel İncelenmesi. Doktora Tezi. Erciyes Üniversitesi. Kayseri. 2008.
- [4] Turns S. An Introduction To Combustion Concepts And Applications 2nd Edition. New York City,Amerika. McGraw-Hill Book Co. 2000
- [5] Mishra D. Experimental Combustion: An introduction. Florida,Amerika. CRC Press. 2014
- [6] Alabaş B. Oksijenle Zenginleştirilen Sentetik Gaz Yakıtların Yanma Kararsızlığının Deneysel İncelenmesi. Doktora Tezi. Erciyes Üniversitesi. Kayseri. 2021.
- [7] Lieuwen T, McDonell V, Santavicca D, Sattelmayer T. Burner development and operability issues associated with steady flowing syngas fired combustors. Combustion Science and Technology. 2008. 180:1169–1192.
- [8] ÇAM Ö. Sentetik Yakıtların Yanma Kararsızlığının Deneysel İncelenmesi. Doktora Tezi. Erciyes Üniversitesi. Kayseri. 2019
- [9] Benedetto A, Marra F, Russo G, Bifurcation analysis of lean premixed combustion of hydrogen/propane mixtures. United Kingdom. Combustion Science and Technology. 2005. 177:413–434.
- [10] Yılmaz H, Çam Ö, Yılmaz İ. Experimental investigation of flame instability in a premixed combustor, Netherlands .Fuel, 2018. 262:116594.
- [11] Mutlu K, Taştan M. Effect of acoustic enforcement on the instability of propane flame, 8th International Conference on Renewable Fuels, Combustion and Fire (FCE'21). 2021. Ankara, Türkiye. 191-196
- [12] Taştan M, Boztoprak O. Experimental investigation of hydrogen enriched propane in terms of emission values and flue gas temperature. 5th International Hydrogen Technologies Congress 2021. Niğde, Türkiye. 164-166
- [13] Tang C. Laminar burning velocities and combustion characteristics of propane-hydrogen-air premixed flames, United Kingdom. International Journal of Hydrogen Energy. 2008. 33:4906–4914.
- [14] Lieuwen T. Analysis of acoustic wave interactions with turbulent premixed flames. Amerika. Proceedings of the Combustion Institute. 2002 29:1817–1824.
- [15] Alabaş B, Tunç G, Taştan M, Yılmaz İ. Experimental investigation of the emission behaviour and flame stability of the oxygen and hydrogen enriched methane under acoustic enforcement. Netherlands .Fuel. 2020 290:120047.
- [16] Fleifil M, Annaswamy A, Ghoneim Z, Ghoniem A, Response of a laminar premixed flame to flow oscillations: A kinematic model and thermoacoustic instability results. Amerika. Combustion and Flame, 1996. 106:487–510.
- [17] Yılmaz İ, Ratner A, Ilbas M, Huang Y, Experimental investigation of thermoacoustic coupling using blended hydrogen-methane fuels in a low swirl burner, United Kingdom. International Journal of Hydrogen Energy. 2010 35: 329–336.
- [18] Spangelo Ø. Experimental and Theoretical Studies of a Low NOx Swirl Burner. Doktora Tezi. The Norwegian Üniversitesi.Trondheim/Norveç. 2004.
- [19] İlbaş M, Karyeyen S, Yılmaz İ, Effect of swirl number on combustion characteristics of hydrogen-containing fuels in a combustor, United Kingdom. International Journal of Hydrogen Energy, 2016. 41:7185–7191.