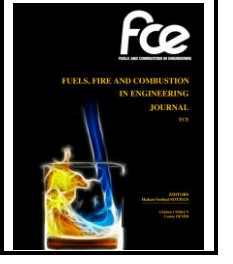
	MÜHENDİSLİKTE YAKITLAR, YANGIN VE YANMA DERGİSİ MÜHENDİSLİK DERGİSİNDE YAKITLAR, YANGIN VE YANMA	
	eISSN : 2564-6435 Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/fce	
	Geliş/ Alındı 20.02.2024 Kabil / Kabul edildi 01.07.2024	Doi: https://doi.org/10.52702/fce.1440186



HİDROJEN TAKVİYELİ DOĞALGAZ KULLANIMININ YOĞUŞMALI KAZANLARA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Volkan TÜR^{*1,2}, Ekrem BÜYÜKKAYA³

ÖZET

Gaz sektörünün karbondan arındırılması için en umut verici alternatif yakıtlar biyogaz ve hidrojendir. Fosil yakıtları karbon içermeyen yakıtlarla değiştirmek, nihai karbon nötrlüğü hedefine ulaşmak için önemli bir adımdır. Doğrudan mevcut doğal gaz enerji sistemlerinden saf hidrojene geçmek yerine, doğal gaza kademeli olarak hidrojen takviye edilmesi, sorunsuz bir geçiş sağlayabilir.

Bu makalede, ülkemizde ev ve ticari binaların ısıtılmasında kullanılan yoğuşmalı kazanlarda, %20 oranında hidrojen takviyeli doğalgaz kullanımının etkileri incelenmiştir. Yapılan teorik incelemenin sonuçları, deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır. Deney sonuçlarına göre mevcutta %100 doğalgaz ile çalışmak üzere tasarlanmış bir duvar tipi kazanın, %20 oranında hidrojen ve %80 oranında doğalgaz içeren bir karışım gazıyla yakılması durumunda cihazın ısı gücünde yaklaşık %5'lik bir düşüş gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra cihazın baca gazı emisyonlarında azalma tespit edilmiştir. Maksimum ısı gücünde ölçülen baca gazındaki CO₂ konsantrasyonu %9,3 seviyesinden %8,3'e, CO konsantrasyonları 71 ppm seviyesinden 42 ppm'e ve NO_x konsantrasyonu da 19 mg/kWh mertebelerinden 12 mg/kWh'e düşmüştür.

Anahtar Kelimeler: Hidrojen, Doğalgaz, Yanma, Yoğuşmalı kazan, Yoğuşmalı kombi, Emisyon

¹Daikin Isıtma ve Soğutma Sistemleri San. T. A.Ş. 54300 Kargalı Hanbaba Osb/Hendek/Sakarya, turvolkan@gmail.com, 0000-0003-4282-7228

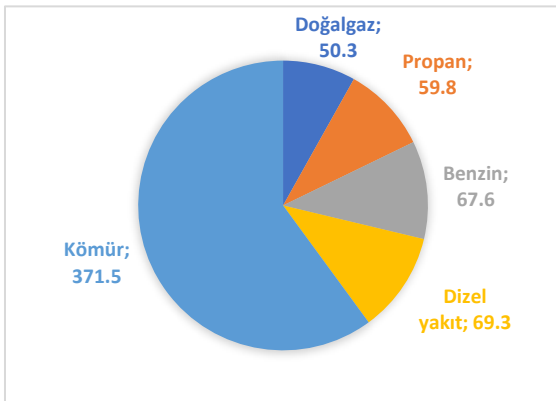
²SAÜ. Fen Bilimleri Ents. Makina Müh. Böl. 54180 Esentepe /Sakarya.

³SAÜ. Müh.Fak. Makina Müh. Böl. 54180 Esentepe /Sakarya

1. GİRİŞ

İklim değişikliği günümüzün en önemli küresel sorunlarından biridir. Başta karbondioksit (CO₂) olmak üzere sera gazı emisyonları sebebiyle artan küresel ısınma, insanlığın şu anda karşı karşıya olduğu önemli bir iklim sorunudur. Sera gazı emisyonları genellikle enerjinin kullanımı ve tedariki ile yakından ilişkili olduğundan, emisyonları önleme hedefi, üretimden son kullanıma kadar enerji zincirinin tüm parçalarını içeren sisteminin temelden yeniden yapılandırılmasını gerektirir.

Doğal gaz, elektrik üretimi, sanayi ve bireysel kullanım da dahil farklı alanlarda kullanımıyla bugün Avrupa'nın birincil enerji kaynaklarından biridir. Doğal gaz bir fosil yakıt olduğundan, bir sera gazı olan CO₂ emisyonundan ciddi ölçüde sorumlu olduğu bilinmektedir. Şekil 1'de, fosil yakıtlardan elde edilen CO₂ emisyon miktarları gösterilmektedir [1].



Şekil 1. 2020'de milyon kJ enerji başına çeşitli yakıtlardan salınan CO₂ miktarı (kg)

Bugün itibariyle konut ve ticari alanlar, tahmini 300 milyondan fazla kurulu cihaz sayısı dikkate alındığında Avrupa Birliği kapsamında doğal gaz için en büyük kullanım alanıdır [2]. Gaz sektörünün karbondan arındırılması için en umut verici alternatif yakıtlar biyogaz ve hidrojendir. Geri dönüştürülebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik ve sudan hidrojen üretmek, enerji taleplerini karşılamanın yanı sıra üretilen hidrojenin sıvı halde muhafaza edilmesi yoluyla bu enerjinin depolanmasını da mümkün kılmaktadır. Dolayısıyla, enerjiyi hidrojene çevirip depolamaya ve kullanmaya yönelik teknolojiler, yeni bir altyapı gerektirmeksizin mevcut gaz dağıtım alt yapısının bu amaç doğrultusunda kullanılabilir olma ihtimali de dikkate alındığında Avrupa'nın enerji dönüşümünde önemli bir rol oynayabilir. Bununla birlikte, dağıtılan gazın

fiziksel özelliklerinin değişiyor olması, bunu yakıt olarak kullanan kombi, ocak, şofben, doğalgaz sobası vb. çok çeşitli son kullanım uygulamalarının kontrolü ve doğrulanmasını gerektirmektedir.

Küresel olarak akademik kurumlar, endüstri ve hükümetler (Türkiye'de CleanGas Center, İngiltere'de HyDeploy, Amerika'da HyBlend, Fransa'da GRHYD, Avrupa'da THyGA vb.) önümüzdeki on yıl içinde karbon azaltma hedefine ulaşmak için verimli yollar geliştirmeye çalışan diğer projeler gibi hidrojen harmanlama projelerinin araştırmasını, geliştirilmesini ve uygulanmasını desteklemektedir.

Yukarıdaki uluslararası projelere ek olarak, literatürde doğalgaza hidrojen takviyesinin olası etkilerini teorik olarak inceleyen birçok çalışma mevcuttur [3, 4, 5, 6]. Buna ilave olarak konuyla ilgili yapılmış deneysel çalışmalara da literatürde rastlanabilir fakat [7, 8] fakat bu deneysel çalışmalar direk olarak konut tipi gaz yakan cihazları konu almamaktadır. Yapılan literatür araştırmasında, konut tipi cihazlarda hidrojen takviyeli doğalgaz yakılmasının baca gazı emisyonlarına ve yanma verimine olası etkilerini deneysel olarak inceleyen bir çalışmaya rastlanmıştır [9]. Fakat bu makaleye konu olan çalışma, karışım gazının yalnızca verim ve emisyonlara olan etkisini incelemekle kalmayıp, hidrojen takviyesinin; Isıl güce olan etkisinin ölçülmüş olması, tüm modülasyon aralığında yanma stokiyometrisine ve iyonizasyon akımına olan etkisini deneysel olarak incelenmiş olması ve geri tepme riskinin test edilmiş olması açısından özgünlük taşımaktadır.

Bu makalede, saf doğalgaz yerine belirli oranlarda hidrojen gazı içeren karışım gazının, yanma reaksiyonuna ve gaz yakan cihazlara olabilecek etkileri teorik olarak incelenmiştir. Ayrıca hali hazırda Türkiye ve Avrupa'da satışı yapılan ve doğalgaz ile uyumlu olarak tasarlanıp belgelendirilen bir ani ısıtıcı yoğuşmalı duvar tipi kazan (kombi) modeli seçilerek, yoğuşmalı kazanlarda belirli oranda hidrojen takviyeli doğalgaz kullanımının verimlilik, performans ve güvenliğe olan etkileri test edilmiş, sonuçlar teorik inceleme sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Clean Gas Türkiye Projesi, yenilenebilir kaynaklar kullanılarak iklim değişikliği etkilerinin azaltılması çalışmalarının yürütülmesi için 2019 yılında Gazbir-Gazmer tarafından başlatılmıştır. Gazbir-Gazmer, hidrojen ve biyogazın doğal gaz

sistemlerine enjekte edilmesi ile ilgili hem laboratuvar hem de pilot bölge çalışmaları bu çatı altında yürütmüştür. Bu projenin ilk sonuçlarına göre, şu anki doğal gaz iç tesisatlarında ve tüketici cihazlarında önemli bir değişikliğe gerek kalmaksızın hidrojenin, dağıtım ağlarında doğal gazla birlikte en fazla %20 oranında karıştırılabileceği düşünülmektedir [10].

HyDeploy projesi, hidrojenin mevcut doğal gaz dağıtım sistemine güvenli bir şekilde karıştırılmasını inceler ve bu konuda İngiltere'deki ilk pratik girişimdir. Temel amaç, mevcut şebekeye hidrojen karıştırılmasının, cihazlarda değişiklik yapılmasını gerektirmeden gerçekleştirilebileceğini göstermektir. Bu proje, İngiltere'nin daha sürdürülebilir enerji uygulamalarına doğru bir adım olarak hidrojenle zenginleştirilmiş doğal gaz altyapısına geçişe odaklandığını göstermektedir. Proje kapsamında yapılan testler ve incelemeler sonucunda, test edilen ev tipi duvar tipi kombilerin, %28,4'e kadar hidrojen içeren yakıt karışımlarında güvenli bir şekilde çalışabilecekleri raporlanmıştır [11].

THyGA projesi, Avrupa komisyonu tarafından, mevcutta yakıt olarak kullanılan doğalgaza hidrojen takviyesinin konut ve ticari gaz yakan cihazlar üzerindeki teknik etkilerine ilişkin bilgi boşluklarını kapatmak amacıyla 2019 yılında başlatılmıştır. Projenin amacı, doğal gaz ve hidrojen karışımlarının özellikle evsel ve ticari sektördeki son kullanım uygulamaları üzerindeki etkisinin ayrıntılı bir şekilde anlaşılmasını sağlamak ve ayrıca edinilen tüm bilgiler ışığında gelecekte oluşturulacak standartlar ve saha uygulamaları için önerilerde bulunmaktadır. Proje çıktılarına göre sahada kurulu tipik ürünler, güvenlik risklerine yol açmadan belirli hidrojen katkı seviyelerine kadar kullanılabilirken, özellikle yüksek hidrojen oranları söz konusu olduğunda, yeni ve farklı ürün ihtiyaçları doğacaktır [12].

Hidrojenin doğal gaza katılması durumunda, yeni karışıma ait yakıt özelliklerinin ve yanma özelliklerinin saf doğal gaza kıyasla değişeceği bilinen bir gerçektir. Metan ile hidrojenin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin önemli ölçüde farklı olduğu düşünüldüğünde, doğal gaza hidrojen katkısının artması, yakıt özelliklerinin değişmesinden dolayı yanma sürecinde değişikliklere yol açacaktır. Bu noktada metan gazına hidrojen takviyesinin temel yanma ve gaz özelliklerine, yanma sıcaklıklarına, yanma stokiyometrisine, laminar alev hızına ve baca gazı

emisyonlarına etkilerinin teorik ve deneysel olarak irdelenmesi faydalı olacaktır.

Bu çalışma kapsamında, CH₄ yakıtına farklı oranlarda H₂ ilavesi ve hava fazlalık oranına bağlı olarak CO ve CO₂ emisyonları, adyabatik alev sıcaklığı, laminar alev hızı gibi parametrelerin değişimini sayısal olarak çözmek için "Cantera" yazılımı kullanılmıştır. Cantera açık kaynak kodlu ve nesne tabanlı bir yazılım olup C++, Python gibi yazılım dillerinde arayüze sahiptir. Bu özelliklerinin yanısıra, Cantera ile birçok termodinamik ve akış problemleri için 1 Boyutlu sayısal analizlerinin yapılabilmesi bu çalışmada tercih sebebi olmuştur.

2. TEORİK İNCELEME

2.1. Kalorifik Değer

Gerçekte şebekede dağıtılan doğal gaz, bölgeden bölgeye değişmekle birlikte başka hidrokarbonlar (C_xH_y), CO₂ veya nitrojen (N₂) gibi diğer gaz türlerini içermesine rağmen genellikle hacimce en az %90 CH₄ içerdiğinden, testlerde CH₄ referans gaz olarak kullanılır.

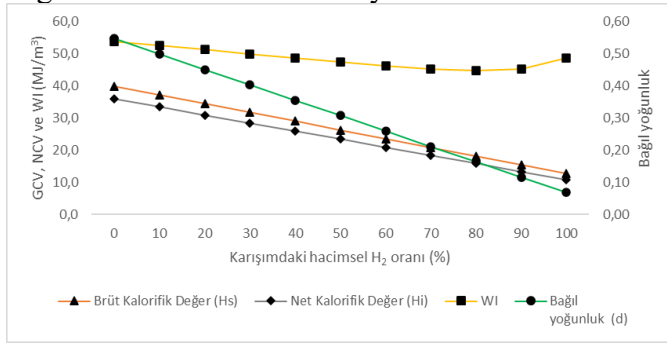
Brüt kalorifik değer (üst ısı değer), bir yakıtın tam yanması sonucu açığa çıkan toplam enerjiyi ifade eder. Wobbe indeksi ise, gaz yakıtların yanma performansını değerlendirmede ve farklı gazların karşılaştırılmasında kullanılan bir ölçüttür. Gazların enerji içeriği ve yoğunluk özelliklerini birleştirerek aynı brülörde farklı gazların kullanılması durumunda ortaya çıkacak yanma performansını belirler. Bu anlamda karışım gazı ile saf doğalgaz karşılaştırmak açısından Wobbe indekslerinin kullanılması daha anlamlıdır.

Farklı oranlarda H₂ ve CH₄ içeren karışım gazlarının net kalorifik değerleri, brüt kalorifik değerleri ve Wobbe indeksleri hesaplama yoluyla bulunmuştur. Saf metan ve saf hidrojene ait kalorifik değerler [13] ve bu saf gazların yoğunlukları [14, 15] bilinmektedir. Bu sayede denklem 1'den [16] faydalanılarak farklı karışım gazlarının Wobbe indeksleri hesaplanmıştır.

$$W_s = \frac{H_s}{\sqrt{\frac{\rho_{n,yakit}}{\rho_{n,hava}}}} = \frac{H_s}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

Şekil 2, bu hesaba dayalı olarak karışım gazı içerisindeki hidrojen oranının artması ile bağlı yoğunluk, net kalorifik değer, brüt kalorifik değer ve Wobbe indeksinin değişimini göstermektedir. Yakıt gazının hacimsel enerji içeriğinin (yani

hacimsel kalorifik değeri), artan hidrojen konsantrasyonları ile doğrusal olarak azaldığı görülebilir. Saf hidrojenin net ve brüt kalorifik değerleri metana oranı sırasıyla %30 ve %32'dir.



Şekil 2. Metana hidrojen karışımının bir fonksiyonu olarak ana gaz kalite kriterlerinin değişimi

Wobbe indeksindeki değişim saf metandan saf hidrojene geçerken çok keskin değildir çünkü ısı değerindeki değişiklik yoğunluklardaki değişikliklerle büyük ölçüde dengelenir. Böylece CH₄ ve H₂ arasında kalorifik değerlerdeki farklılıklar %70 mertebelerinde iken Wobbe indisindeki fark, %9,6'dır. Ayrıca, Wobbe indisi, kalorifik değerlerin veya yoğunluğun aksine, karışım alanının tüm aralığı boyunca düzenli bir şekilde azalmaz. Şekil 2'de görüldüğü üzere çok yüksek hidrojen içeriğine sahip yakıt karışımları için artan hidrojen konsantrasyonları ile bir miktar yükselir.

Tablo 1. Saf CH₄, Saf H₂ ve %20 H₂ içeren karışım gazının Wobbe İndeksi hesabı

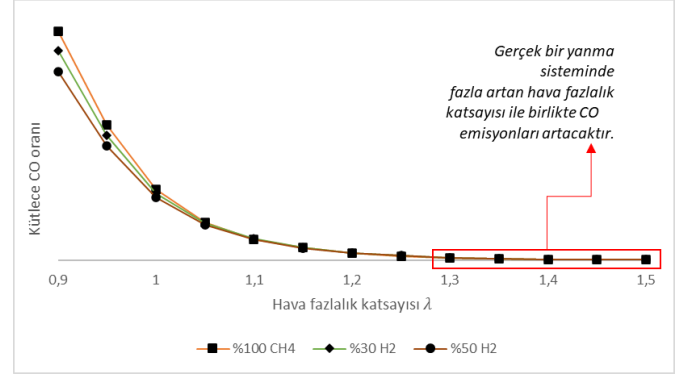
CH ₄	H ₂	Brüt Kalorifik Değer (H _s)	Yoğunluk (ρ _n)	Bağıl yoğunluk (d)	Wobbe indeksi (Ws)	Fark
%	%	MJ/m ³	kg/m ³	-	MJ/Nm ³	%
100	0	39,9	0,67	0,55	53,97	-
80	20	34,5	0,55	0,45	51,33	%4,9
0	100	12,8	0,08	0,07	48,78	%9,6

Teorik incelemede, hidrojen gazının metana kıyasla hacimsel olarak kalorifik değeri daha düşük olduğu için, karışım gazından elde edilecek ısı gücün düşeceği ön görülmüştür. Tablo 1, denklem 1 yardımı ile saf metan ve saf hidrojene için hesaplanan Wobbe indeksine ek olarak, %80 CH₄ ve %20 oranında H₂ içeren gaz karışımı için hesaplanmış Wobbe indeksini de göstermektedir. Bu karışım gazı ile saf metan arasında yaklaşık %5'lik bir fark hesaplanmıştır. Yani teorik incelemeye göre ısı gücün yaklaşık %5 düşmesi beklenmiştir.

2.2. Baca Gazı Emisyonları

Bu bölümde, doğalgaz'a hidrojen takviyesinin, yanma sonucu oluşan CO, CO₂ ve NO_x emisyonlarına olan etkisi irdelenecektir.

CO, hidrokarbon yakıtların eksik yanmasının bir sonucudur ve bu nedenle, Şekil 3'de görüldüğü üzere hava fazlalık katsayısı ile yakından ilişkilidir.

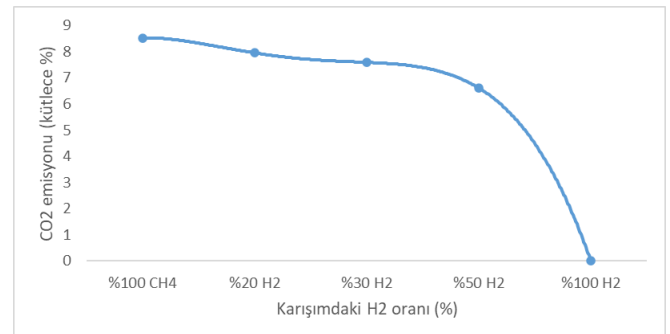


Şekil 3. Metan, hidrojen ve karışım gazı için hava fazlalık oranının bir fonksiyonu olarak teorik CO emisyonları

CH₄ yakıtına farklı oranlarda H₂ ilavesinin, hava fazlalık katsayısına bağlı olarak CO ve CO₂ emisyonlarında yarattığı değişimini sayısal olarak çözmek, bu sayede Şekil 3 ve Şekil 4'deki grafikleri oluşturmak için "Cantera" yazılımı kullanılmıştır.

Şekil 3, teorik olarak, artan hava fazlalık katsayısı ile birlikte baca gazındaki kütlece CO oranının değişimini, bir dizi adyabatik kimyasal denge hesaplamasına dayanarak göstermektedir. Fakat gerçek bir yanma sisteminde hava fazlalık katsayısı arttıkça alev giderek daha kararsız hale gelebilir, bu eksik yanmaya ve dolayısı ile artan CO emisyonlarına sebep olabilir.

Doğalgaz'ın hidrojen ile beslenmesindeki ana motivasyonlardan biri CO₂ emisyonlarını azaltmaktır. Şekil 4, sabit bir hava fazlalık oranında, baca gazındaki CO₂ emisyonlarının doğalgaz içerisindeki artan hidrojen oranı ile nasıl azaldığını göstermektedir.



Şekil 4. Metan / hidrojen karışımlarının yanması sonucu CO₂ emisyonlarının teorik değişimi ($\varphi=1$)

Grafikten de anlaşılacağı üzere, yalnızca yanma dikkate alındığında hidrojen ilavesi ile CO₂ emisyonlarında dramatik bir azalış elde etmek pek mümkün değildir. Doğalgaza %20 hidrojen ilavesi, aynı ısı gücü elde edilmesi sonucunda oluşan CO₂ emisyonlarında yaklaşık %7'lik bir azalma sağlamaktadır. Bu oran %40'a çıktığında emisyonlarda %17, %60'a çıktığında ise emisyonlarda %31'lik bir iyileşme gözlemlenebilir.

NO_x oluşumu ise yanma odası sıcaklıkları ve bu sıcak bölgelerdeki oksijen varlığı ile doğrudan orantılıdır. Hava fazlalık katsayısının sabit kaldığı varsayarsak, doğalgaz içerisine hidrojen karışmasının, hidrojenin adyabatik alev sıcaklığı daha yüksek olduğu için alev sıcaklıklarını yükseltmesi beklenir. Diğer bir yandan, konutlarda kullanılan gaz yakan cihazlar göz önüne alındığında bu cihazlar zaten yüksek hava fazlalık katsayılarıyla çalışmaktadır ve yakıtta hidrojen takviyesi, 2.3. Yanma Stokiyometrisi başlığında anlatılacağı üzere hava fazlalık katsayılarının daha da arttırarak yanma odasındaki yerel sıcaklıkların azalmasına sebebiyet verecektir. Bu sebeple ön karışimli brülörlerde doğalgazla belirli bir orana kadar hidrojen ilavesinin net etkisinin, NO_x emisyonlarını azaltacak şekilde olması beklenmelidir fakat bunu teyit etmek için test ve ölçümler gerekmektedir.

2.3. Yanma Stokiyometrisi

Hava fazlalık katsayısı her tür yanma işlemi için en önemli parametrelerden biridir ve yakıt gazı bileşimi ile yakından ilişkilidir. Sadece yanma sisteminde meydana gelen sıcaklıkları değil, aynı zamanda enerji verimliliğini ve baca gazı emisyonları da etkilemektedir. Bununla birlikte, bir yanma sürecinde stokiyometrinin tam olarak nasıl etkilendiği yalnızca yakıt bileşimine değil, aynı zamanda yakıt ve yakıcının nasıl karıştırıldığı gibi diğer faktörlere de (örneğin aktif yanma kontrolünün olup olmaması gibi) bağlıdır.

Hidrojen, metana kıyasla daha düşük minimum hava gereksinimine sahip olduğundan, herhangi bir CH₄ ve H₂ karışımı, tam yanma için saf metandan mol başına daha az hava gerektirecektir. Tez kapsamında test edilecek üründe olduğu gibi, konut ısıtması için kullanılan cihazların çok büyük çoğunluğunda geçerli olan, hava debisi ve enjektör basıncının sabit kaldığı durum için hava fazlalık katsayısındaki değişim aşağıdaki denklem ile hesaplanır [17].

$$\lambda_{karisim} = \frac{CARI_{CH_4}}{CARI_{karisim}} \cdot \lambda_{CH_4} \quad (2)$$

Bu tür sistemlerde hava fazlalık katsayısını, yanma denkleminde bakarak hesaplamaya çalışmak uygun olmayabilir. Bunun yerine, Wobbe indeksine benzer şekilde tanımlanan ve yanma havası ihtiyaç endeksi (CARI: Combustion Air Requirement Index) adı verilen bir parametre kullanılır. [17]

$$CARI = \frac{\text{Minimum hava}}{\sqrt{d}} = \frac{\text{Minimum hava}}{\sqrt{\frac{\rho_{n,yakit}}{\rho_{n,hava}}}} \quad (3)$$

Buna göre örnek olarak saf metan ile 1,25 hava fazlalık katsayısında yanan bir cihaz sırasıyla %10, %20 ve %30 oranında hidrojen takviyeli karışım gazı ile yakıldığında beklenen hava fazlalık katsayıları Tablo 2'de gösterildiği gibi olacaktır.

Tablo 2. Karışım gazındaki hidrojen oranına bağlı olarak hava fazlalık katsayısındaki değişim

CH ₄ oranı	H ₂ oranı	Minimu m hava ihtiyacı	Bağlı yoğunluk (d)	CARI	Hava fazlalık katsayısı (λ)	Fark
%	%	m ³ /m ³	-	-	-	
100	0	9,5	0,55	12,84	1,25	
90	10	8,8	0,50	12,43	1,29	%3,3
80	20	8,1	0,45	12,00	1,34	%6,9
70	30	7,4	0,40	11,57	1,39	%10,9

H₂'nin ve CH₄'ün yanması için minimum oksijen gereksinimi, yanma denklemlerine göre sırası ile 0,5 mol O₂ / 1 mol H₂ ve 2 mol O₂ / 1 Mol CH₄'dür. 1 mol havanın yaklaşık olarak 0,2095 mol O₂ içermektedir, buna bağlı olarak minimum hava ihtiyacı oranı saf H₂ ve CH₄' için sırasıyla 2,381 ve 9,524 olarak hesaplanabilir. Tablo 2'de, farklı karışım gazlarını için minimum hava ihtiyacı ve bağlı yoğunluklar hesaplandıktan sonra, denklem 2 ve denklem 3 kullanılarak bulunan hava fazlalık katsayılarındaki değişimler gösterilmiştir. Teorik incelemede göre H₂'nin CH₄'e kıyasla daha düşük minimum hava gereksinimine sahip olmasından dolayı, %20 oranında H₂ içeren karışım için saf CH₄'e kıyasla yakıt birimi başına daha az hava gerekeceği sonucu çıkarılmıştır.

2.4. İyonizasyon akımı

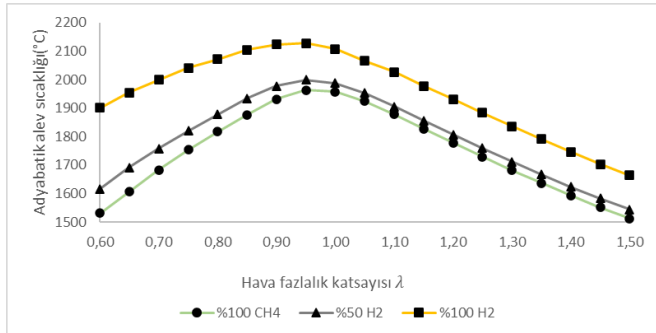
İyonizasyon elektrodu kullanılan cihazlarda alev varlığı, yanma sonucu oluşan iyonlar sayesinde tespit edilir. Hidrojen gazı yandığında, doğalgaza kıyasla daha az iyon açığa çıkar. Bu sebeple yakıt olarak kullanılan doğalgaz içerisindeki hidrojen oranı arttıkça, alev içeriğindeki iyon miktarı

azalacak ve alev tespiti için ölçülen iyonizasyon akımı düşecektir. Özellikle alev boyunun kısa olduğu düşük kapasitelerde oluşan iyonizasyon akımının, hidrojen takviyesi sebebiyle sınır değer altına düşmesi cihazın hata vermesi ve bu sebeple çalışmamasıyla sonuçlanabilir.

2.5. Alev Sıcaklıkları ve Alev Hızları

Yanma reaksiyonlarında ortaya çıkan sıcaklıklar çok önemlidir. Sıcaklıklar, ısı transferi ve verim üzerinde etkili olduğu gibi, nitrojen oksitler (NO_x) gibi baca gazı emisyonları oluşumunda da etkilidir. Hidrojen karışımının doğal gaz için tasarlanmış yanma prosesleri üzerindeki etkisinin teorik değerlendirmesi için, adyabatik alev sıcaklıklarına bakmak faydalı olacaktır. Adyabatik alev sıcaklığı, herhangi bir kayıp olmaksızın bir yanma sürecinde elde edilebilecek teorik maksimum sıcaklıktır.

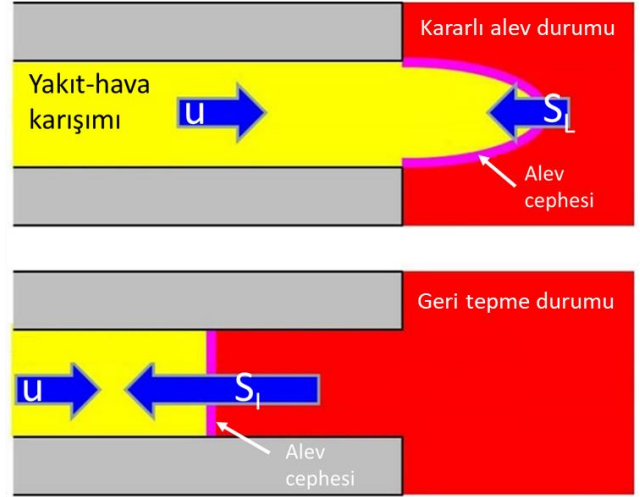
Şekil 5, geniş bir hava fazlalık katsayısı aralığında saf CH_4 , %50 CH_4 ve %50 H_2 içeren gaz karışımı ve saf H_2 gazlarının adyabatik alev sıcaklıklarını göstermektedir. Bu grafik dikkate alındığında saf hidrojen ve karışım gazı arasındaki fark, karışım gazı ve saf metan arasındaki farktan görece olarak çok daha fazladır. Örneğin $\lambda:1$ için saf H_2 ve karışım gazı arasındaki fark 150°C 'den fazla iken, karışım gazı ile CH_4 arasındaki fark 30°C civarındadır.



Şekil 5. Hava fazlalık katsayısının fonksiyonu olarak saf CH_4 , %50 CH_4 / %50 H_2 ve saf H_2 'nin adyabatik alev sıcaklıkları. $T_{\text{yakıt}} = 300\text{K}$, $T_{\text{hava}} = 300\text{K}$, $p = 1 \text{ atm}$.

CH_4 yakıtına farklı oranlarda H_2 ilavesinin, hava fazlalık katsayısına bağlı olarak adyabatik alev sıcaklıklarında yarattığı değişimini sayısal olarak çözmek ve bu sayede Şekil 5'teki grafiği oluşturmak için "Cantera" yazılımı kullanılmıştır.

Kombi gibi bireysel ısıtmaya yönelik kullanılan gaz yakan cihazların çoğu ön karışımli brülör kullanır. Yani yakıt ve hava, yanma odasına enjekte edilmeden önce iyice karıştırılır. Bu brülörlerde laminer alev hızı (S_L), alev stabilitesi ve alev şeklini belirlemede önemli bir rol oynar.

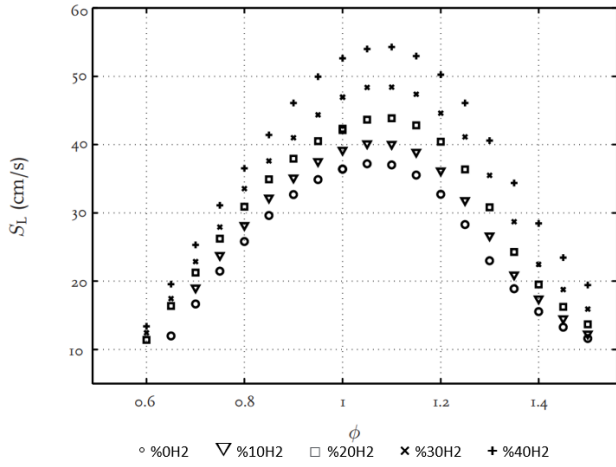


Şekil 6. Yakıt ve yakıcı karışımın akış hızı u ve laminer alev hızı S_L [18]

Şekil 6, artan laminer alev hızıyla birlikte alev cephesi konumundaki değişimi ve buna bağlı olarak oluşabilecek geri tepme durumunu resmetmektedir. Laminer alev hızı, geri tepmeyi etkileyen en önemli faktör olmasına rağmen, alev ve brülör deliği arasındaki termal denge de bu hususta kritik bir rol oynar. Alev ve yakıt-hava karışımının hızı arasında bir denge olduğu gibi oluşan ısı ve bunun alev cephesinde dağılımı arasında bir termal denge vardır. Alev cephesi brülöre yaklaştığında, alev cephesinde oluşan ısı brülör yüzeyinde dağılarak alevin sönmeye sebep olabilir. Bu fenomen "alev söndürme / *flame quenching*" olarak da bilinir.

Ön karışımli bir brülör söz konusu ise, laminer alev hızı arttıkça (örneğin yakına hidrojen takviyesiyle) alev brülöre daha da yaklaşır ve alevden brülöre ısı kaybı artar. Eğer brülör deliği büyükse, geri tepme gerçekleşebilir. Fakat brülör deliği yeterince küçükse, ısı kaybı nedeniyle alevin sönmeye ihtimali artar ve geri tepme ihtimali azalır. Buna göre hidrojenin sorunsuz şekilde yanması için kullanılması gereken brülör deliklerinin boyutları, metana kıyasla çok daha küçük olmalıdır. Farklı gazlar için teorik olarak gerekli minimum delik çaplarının hesaplandığı çalışmalar mevcuttur [19].

Şekil 7, farklı eşdeğerlilik oranları için metana eklenen hidrojen gazının laminer yanma hızını nasıl arttırdığını göstermektedir. Bu durum, ön karışımli brülörler için risk teşkil eder çünkü yakıtta hidrojen ilavesi ile laminer yanma hızı ve akış hızı arasındaki denge bozulur ve bu durum geri tepmeye sebep olabilir.



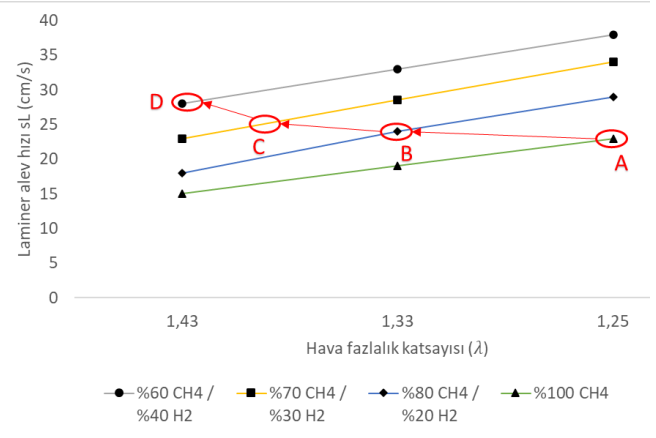
Şekil 7. Eşdeğerlik oranının bir fonksiyonu olarak farklı karışımlar için laminar alev hızları [20].

Metan ile çalışmak üzere tasarlanmış bir yanma sistemi metan-hidrojen karışımı ile beslendiğinde, oluşacak gerçek laminar alev hızını etkileyecek bir dizi faktör vardır. Yukarıdaki bilgilerden anlaşıldığı üzere şüphesiz ki hidrojen ilavesi laminar yanma hızında artışa sebebiyet verir. Fakat aynı zamanda sistemde aktif bir yanma kontrol sistemi yoksa, sistemin stokiyometrisi ve buna bağlı olarak yanma sıcaklıkları da değişecektir. Eşdeğerlik oranının 1'den küçük olduğu, yani hava fazlalık katsayısının 1'den büyük olduğu durumlarda bu bahsedilen etkiler birbirini belirli ölçüde yok edecektir ve artan hidrojen oranı ile yükselmesi beklenen laminar yanma hızı ve sıcaklıklar, aynı anda artan hava fazlalık katsayılarıyla bir yere kadar dengelenecektir.

Yanma kontrol sistemi kullanılmayan, hava debisi ve enjektör basıncının sabit kaldığı durum ev tipi ısıtma cihazları için Şekil 8 ve Tablo 3, bu durumu görselleştirmektedir. Grafiğin en altındaki eğri saf metan için 1,25'lik bir hava fazlalık katsayısında çalışacak şekilde ayarlanan cihazı temsil eder. Bu cihaz hacimce %80 CH₄ ve hacimce %20 H₂ ile beslenirse, hava fazlalığı oranı artar ve 1,34'e çıkar.

Tablo 3. Hava fazlalık katsayısının bir fonksiyonu olarak farklı karışımlar için laminar alev hızları ve adyabatik alev sıcaklıkları

	A	B	C	D
	CH ₄	80 % CH ₄ 20 % H ₂	70 % CH ₄ 30 % H ₂	60% CH ₄ 40% H ₂
λ	1,25	1,34	1,39	1,44
Φ	0,8	0,75	0,72	0,69
sL	23	24	25,75	28
Tad	1729	1645	1607	1575



Şekil 8. Hava fazlalık katsayısının bir fonksiyonu olarak farklı karışımlar için laminar alev hızları

Stokiyometrideki bu kayma, yakıtta hidrojen ilavesi ile artması beklenen laminar yanma hızını büyük ölçüde dengeleyerek artışın %4'ten fazla olmamasını sağlar. Ayrıca hava fazlalık katsayısının artmasıyla adyabatik alev sıcaklığı da düşmektedir.

Alev Geri Tepmesi

Doğalgaza hidrojen karışımı, brülör tasarımının da etkisiyle alevin konumu üzerinde etkili olacaktır. Bu bağlamda dikkate alınması gereken iki önemli fiziksel etki vardır. Yakıtta hidrojenin girmesi ve minimum hava gereksiniminin azalması nedeniyle yanma işleminin stokiyometrisi değişecektir ve hava fazlalık katsayısı artacaktır. Yüksek hava fazlalık katsayılarında potansiyel olarak alev kopması meydana gelebilir. Bununla birlikte, aynı zamanda, hidrojen karışımı, laminar yanma hızlarının ve alev sıcaklıklarının artmasına neden olarak ters etkiye, yani alevi brülöre yaklaştırmaya yol açacaktır. Bu durum ise brülörün aşısı ısınması ve alev geri tepmesi risklerini doğurur.

2.6. Verim

Teorik olarak, hidrojen karışımı, belirli bir baca gazı sıcaklığında su buharından daha fazla gizli ısı geri kazanılabileceğinden, cihaz verimliliğinde genel bir iyileşmeye yol açacaktır. Fakat bu teorinin ne kadar pratiğe yansıtacağı büyük ölçüde cihaz tasarımına da bağlıdır. Hava fazlalık katsayılarındaki değişiklikler, artan yoğuşma suyu üretimi veya su sıcaklıklarındaki değişiklikler gibi farklı etkiler verime etkisi açısından birbirini nötrleyebilir veya güçlendirebilir.

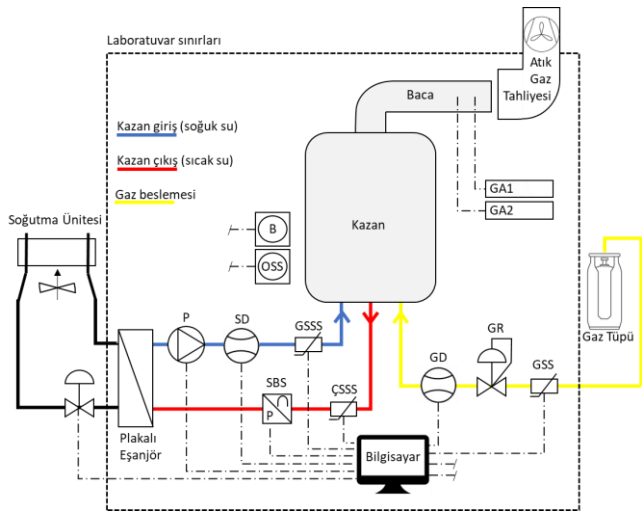
Teorik incelemeye göre yanma gazındaki artan hidrojen oranı ile yanma reaksiyonunda verimi hem azaltıcı hem de artırıcı farklı etkiler meydana gelmesi beklenmektedir. Bu etkilerin birbirini ne derece dengeleyeceğine dair bir ön görüde bulunulamamıştır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Teste konu olan ürün, Daikin markalı, D2CNL024 model kodlu ve ticari ismi CSU Premix 24 kW olan tam yoğuşmalı kombidir. Ürünün beyan edilen ısı yükü minimum kapasitede 4 kW ve maksimum kapasitede 23,5 kW olmakla birlikte, verim değeri ise (maksimum ısı yükü, 80/60°C sıcaklık rejiminde) %96,5'tir. Ürün hermetik bir kabine sahip olmakla birlikte, aktif bir yanma kontrol tertibatı içermemektedir.

Makale kapsamında deneysel çalışmanın yürütüldüğü test standı, TS EN15502:2021, TS EN 15502-2-1:2022 ve TS EN 15502-2-2:2014 numaralı standartların gerektirdiği testleri yapabilecek kapasitede tasarlanmıştır.

Testler esnasında kullanılan ve hacimsel olarak %20 oranında hidrojen, %80 oranında metan içeren karışım gazı, test gazı tedarikçisi firmadan tüketmeye hazır tüp şeklinde temin edilmiştir.



Şekil 9. Test standının şematik gösterimi

Şekil 9, deneysel çalışmanın yürütüldüğü test standının tasarımını, basitleştirilmiş bir devre şeması şeklinde göstermektedir ve test standına ait ekipmanların her birine semboller atanarak, bu sembollere karşılık gelen ekipmanların fonksiyonu, marka/model bilgisi ve ölçüm aralıkları Tablo 4’de belirtilmiştir.

Tablo 4. Test standına ait parçalar ve özellikleri

Sembol	Parça	Ölçüm aralığı
	Marka ve model	
P	Sirkülasyon pompası	-----
	Wilo Stratos GIGA	
SD	Su debimetre	20-4500 l/h
	Proline Promag P 300	
GSSS	Giriş suyu sıcaklık sensörü	10 - 120 °C
	Omega PR-21 Series	
ÇSSS	Çıkış suyu sıcaklık sensörü	10 - 120 °C
	Omega PR-21 Series	
GSS	Gaz sıcaklık sensörü	10 - 30 °C
	ABB TSP300-W	
GD	Gaz debimetre	0.06 - 10 m3/h
	Itron GALLUS	
GR	Gaz regülatörü	-----
	Pietro Fiorentini Norval	
B	Barometre	800 - 1100 hPa
	Testo 512	
SBS	Su basınç sensörü	0 - 150 PSI
	Yokogawa EJA110E	
OSS	Ortam sıcaklık sensörü	0 - 50°C
	Testo 605-H1	
CHPID	PID Vana	-----
	Honeywell V5011N	
Sembol	Parça	Ölçülen gazlar
GA1	Gaz analizörü 1	CO, CO ₂ , O ₂
	Siemens ULTRAMAT 23	
GA2	Gaz analizörü 2	NO _x
	ECOPHYSICS CLD60	

3.1. Deneysel Sonuçları

3.1.1. Kalorifik Değer

EN15502, madde 8.4.1’e uygun şekilde yapılan “Anma ısı girdisinin veya en yüksek ve en düşük ısı girdisinin tayini” testlerinin sonuçları Tablo 5’te gösterilmiştir.

Tablo 5. %20 oranında H₂ takviyesinin minimum ve maksimum ısı yüküne etkisi

Isıl Yük	Sembol	% 100 CH ₄ % 0 H ₂	% 80 CH ₄ % 20 H ₂	Fark
-	-	kW	kW	%
Min.	Q _{n min}	3,94	3,79	%4,0
Maks.	Q _n	22,53	21,40	%5,0

Daha önce kısmi ön karışımli deney düzeneği ile yapılan deneysel çalışmalar, ısı yükündeki düşüşün %7 ila %9 mertebelerinde olacağını ön görmüştür [7].

Tam ön karışımli sistemle yapılan testler neticesinde ise ısıl gücün, minimum kapasitede %5, maksimum kapasitede ise %4,0 oranında azaldığı gözlemlenmiştir.

Buna göre bu makalede yapılan teorik inceleme ile deneysel çalışmanın sonuçları örtüşmektedir.

3.1.2. Baca Gazı Emisyonları

EN15502, madde 8.4.1'e uygun şekilde yapılan "Anma ısı girdisinin veya en yüksek ve en düşük ısı girdisinin tayini" testleri esnasında baca gazında ölçülen CO, CO₂ ve O₂ konsantrasyonlarına ilave olarak madde 8.13'e uygun şekilde yapılan NO_x ölçümlerinin sonuçları Tablo 6'daki gibidir.

Tablo 6. Baca Gazı Ölçüm Sonuçları

Üm	Kapasite	Birim	% 100 CH ₄ % 0 H ₂	% 80 CH ₄ % 20 H ₂
CO ₂	Min.	%	8,7	7,76
Konsantrasyonu	Maks.	%	9,3	8,26
CO	Min.	ppm	10	10
Konsantrasyonu	Maks.	ppm	71	42
O ₂	Min.	%	5,44	6,26
Konsantrasyonu	Maks.	%	4,34	5,4
NO _x	Bkz. EN15502 madde 8.13	mg/kWh	18,90	11,66

CO₂ emisyonları: Teorik incelemede yanma reaksiyonuna giren metan oranının, yani karbon temelli yakıtın azalmasına paralel olarak CO₂ emisyonlarının azalması ön görülmüştür ve bu test sonuçlarıyla doğrulanmıştır.

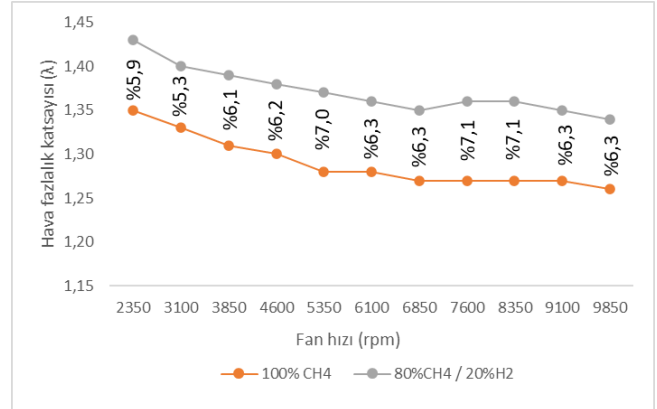
CO emisyonları: Testler esnasında artan hava fazlalık katsayısının alev stabilizasyonuna olumsuz bir etkisinin olmadığı, alevin kararlı bir şekilde oluştuğu ve dolayısı ile CO emisyonlarını artıracak yönde bir etki yaratmadığı teyit edilmiştir. Dolayısı ile CO emisyonlarının, ön görüldüğü şekilde azaldığı gözlemlenmiştir.

NO_x emisyonları: Teorik incelemeye göre NO_x oluşumuna ilişkin öngörü, NO_x emisyonları yakıt içeriğinden ziyade yanma odası sıcaklıkları ve bu sıcak bölgelerdeki oksijen varlığı ile orantılı olduğundan dolayı, her ne kadar beklenti azalacağı yönünde olsa da CO ve CO₂ emisyonlarına oranla teyide daha muhtaçtır. Yapılan testlerde, zaten yüksek olan hava fazlalık katsayısının hidrojen takviyesi ile daha da artması, yakıt özellikleri sebebiyle yükselecek adyabatik alev sıcaklıklarını dengelemiştir ve sonuç olarak NO_x emisyonları azalmıştır. Buna göre bu deneysel çalışmanın

sonuçları, bu makalede yapılan teorik incelemenin ve literatürdeki benzer çalışmaların [7, 8, 9] sonuçlarıyla örtüşmektedir.

3.1.3. Yanma Stokiyometrisi

Şekil 10'da gösterildiği üzere, deneysel çalışma sonucunda karışım gazı ile yapılan testlerde alınan baca gazı emisyonu ve baca gazındaki O₂ ölçümleri sonucu yapılan hesaplara göre hava fazlalık katsayısının, tüm modülasyon aralığında saf CH₄'e kıyasla arttığı gözlemlenmiştir.

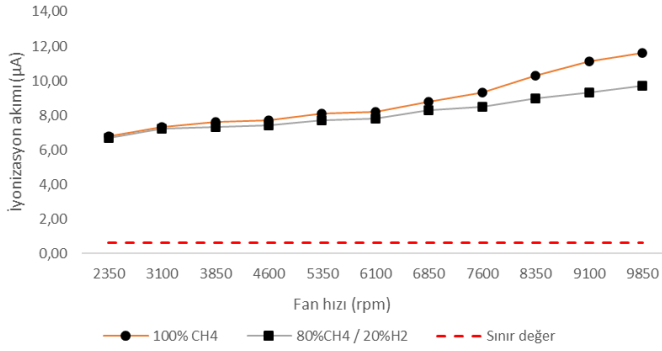


Şekil 10. Modülasyon aralığında hava fazlalık katsayılarındaki değişim

Teorik incelemede verilen örnekte yakıtta %20 oranında hidrojen takviyesi, hava fazlalık katsayısında yaklaşık %7'lik bir artışa sebep olmuştur. Deney sonuçlarına göre tüm modülasyon aralığında yapılan ölçümlerde %20 hidrojen takviyesinin modülasyon oranını %5,3 ila %7,1 oranında arttırdığı kaydedilmiştir. Buna göre yapılan teorik inceleme ile deneysel çalışmanın sonuçları örtüşmektedir.

3.1.4. İyonizasyon Akımı

Hem %100 CH₄ hem de karışım gazı ile tüm modülasyon aralığında yapılan iyonizasyon akımı ölçümleri Şekil 11'de gösterilmiştir. Buna göre hidrojen takviyeli gaz ile, en düşük ısıl güçte ölçülen, en düşük iyonizasyon akımı, cihazın çalışmasına izin verilen sınır iyonizasyon akımı değeri olan 0.6 µA değerinden çok daha yüksektir.



Şekil 11. Modülasyon aralığında iyonizasyon akımlarındaki değişim

Sonuç olarak %20 oranında H₂ takviyesi, bu gibi cihazların alev tespit mekanizmasını olumsuz etkilemeyecek ve bundan kaynaklı bir arızaya sebep vermeyecektir.

3.1.5. Alev Geri Tepmesi

Bu başlık altında yapılan deneysel çalışmada amaç, gerçekte oluşan alev hızının ya da alev sıcaklıklarının ölçülmesinden ziyade, bu iki parametrenin bir sonucu olarak oluşma ihtimali artan ve kaçınılması gereken alev geri tepmesinin, standartlara göre belirlenen sınır koşullarda oluşup oluşmadığını teyit etmektir.

EN15502'ye göre, standartta belirtilen deney şartları altında ve durgun havada, ateşleme ve yanma, doğru bir şekilde, hızlıca ve sessizce gerçekleştirilebilmelidir. Alevler kararlı olmalıdır. Ateşleme anında az bir alev kopma eğilimine müsaade edilebilir, ancak alevler bundan sonra kararlı olmalıdır. Kazanın ilk ayarı değiştirilmeden, referans gazlar, uygun olan alev tepmesi sınır gazı ile değiştirilir ve kazan girişindeki basınç en düşük basınca düşürülür. Bu deney verilen en düşük ısı ve en yüksek girdisinde tekrarlanır.

Sınır gazları için atıfta bulunulan standart olan EN437'ye göre [21], doğalgaz ile uyumlu olacak yani referans gazı CH₄ olan cihazlarda, alev geri tepme testlerinin yapılması gereken sınır gaz %23 oranında hidrojen içeren G222 olarak belirlenmiştir.

Referans gazın %80 CH₄ ve %20 H₂ içereceği ürünlerin uygunluk testlerini yapmak için, İtalya Gaz Komitesi (CIG) alev geri tepmesi testleri esnasında %65 CH₄ ve %35 H₂ içeren sınır gazlarının kullanılmasını şart koşmaktadır [22].

Deneysel çalışma kapsamında yapılan testlerde ise, daha da kötü bir koşulu canlandırmak ve çok daha yüksek hidrojen konsantrasyonlarında sınır şartı testlerinin gerekliliklerinin yerine

getirilebildiğini göstermek adına %50 CH₄ ve %50 H₂ içeren sınır gazı kullanılmıştır.

Alev geri tepmesi için sınır gazları ile farklı koşullarda yapılan testlerin sonuçları Tablo 7'de belirtilmiştir. "Geçti" sonucu belirtilen koşullarda ateşlemenin sorunsuz bir şekilde oluştuğunu ve yanmanın kararlı bir şekilde devam ettiğini simgelemektedir.

Tablo 7. Alev geri tepme testi sonuçları

Referans Gaz	Sınır Gazı	Isıl Yük	Ateşleme	Sonuç
% 100 CH ₄ (G20)	% 77 CH ₄ % 23 H ₂ (G222)	Maksimum	Sıcak	Geçti
			Soğuk	Geçti
	Minimum	Sıcak	Geçti	
		Soğuk	Geçti	
% 80 CH ₄ % 20 H ₂	% 50 CH ₄	Maksimum	Sıcak	Geçti
			Soğuk	Geçti
	Minimum	Sıcak	Geçti	
		Soğuk	Geçti	

3.1.6. Verim

EN15502, madde 9.2'ye uygun şekilde yapılan testler sonucu hesaplanan yanma verimleri saf doğalgaz ve karışım gazı için neredeyse aynıdır (Anma ısı girdisinde CH₄ için %101,91 olarak hesaplanan ısı verim, karışım gazı için %101,93 olarak hesaplanmıştır). Dolayısı ile öngörüldüğü üzere verimi artırıcı ve azaltıcı etkiler birbirini dengelemiştir ve yakıtta %20 oranında hidrojen eklenmesi cihazın yanma verimini verimi olumlu ya da olumsuz etkilememiştir.

4. DEĞERLENDİRME

Ürün Performansı: Testler ile teyit edildiği üzere doğalgaz içerisine hidrojen gazı eklenmesi, sabit yakıt gazı giriş basıncında çalışan cihazlar, ki temel olarak tüm ev tipi cihazlar böyle çalışmaktadır, ısı girdisini azaltacaktır. Bu durumun kullanıcı konforuna etkileri birkaç başlık altında incelenebilir.

Mahal ısıtması açısından konuyu ele alırsak, şu anda pazarda bulunan duvar tipi kazanların ısı kapasitelerini belirleyen temel unsur, ısıtılacak mahalin ısı kayıp miktarı değil, konforlu bir kullanım sıcak suyu elde etmek için gereken minimum enerji miktarıdır. Diğer bir yandan, ev tipi cihazların büyük bir çoğunluğu ani ısıtıcılık tiptedir. Yani kullanım sıcak suyu, şebekeden gelen kullanım suyunun ana eşanjörde ısınan ısıtma suyu kullanılarak cihaz içerisindeki bir plakalı eşanjörde ısıtılmasıyla elde edilmektedir.

Dolayısı ile cihazdan alınabilecek maksimum sıcak su debisi, cihazın kapasitesiyle doğru orantılıdır.

Bu iki konuyu özetleyip, bir örnekle daha detaylı açıklamak gerekirse: Örneğin Türkiye pazarında satılan duvar tipi kazanların büyük bir çoğunluğunun ısı gücü 24 kW civarındadır. Ortalama 100 m²'lik bir daireyi ele alırsak, 24 kW ısı gücü, bu dairenin ısı kayıplarından çok daha fazladır. Fakat ısı gücü ihtiyacını belirleyen asıl faktör, yukarıda da belirtildiği üzere kullanım sıcak suyu talebidir. Bir kişinin konforlu bir şekilde banyo yapabilmesi için temin edilmesi gereken sıcak su debisini elde etmek için ısı gücü 24 kW mertebelerinde olması gerekmektedir.

Doğalgaz içerisinde hidrojen takviyesi sebebiyle cihazın ısı gücünün düşmesinin, bu bağlamda mahal ısıtması açısından fark edilebilir bir konforsuzluk yaratmayacaktır. Kapasitenin düşmesinin kullanım sıcak suyu performansına olan etkisi, özellikle tesisat suyu sıcaklığının düşük olduğu kış aylarında daha gözlemlenebilir olsa da %5'lik bir kapasite düşüşün müşteri tarafında bir memnuniyetsizlik yaratmayacağı beklenmektedir.

Ürünün Devreye Alınması: Prensip GAR (Gas Appliance Regulation) [23] ve bundan önceki geçerli direktif olan GAD (Gas Appliance Directive) [24] gerekliliklerine uygun şekilde üretilen cihazlar, üretici firmaları tarafından, üretim esnasında, sahada çalışacağı gaz tipine uygun bir referans gaz kullanılmak suretiyle uygun bir hava fazlalık katsayısı ile çalışacak şekilde ayarlanır.

Pratikte bugün, sahada devreye alınan cihazlar devreye alma esnasında yetkili servis tarafından, gaz kalitesinin yerel olarak değişmesinden dolayı baca gazı ölçümü yapmak suretiyle, cihazın CO₂ ya da O₂ emisyonlarının üretici firmanın beyan ettiği uygun aralıkta yer alacağı şekilde, yani uygun hava fazlalık katsayısı ile çalışması için ayarlanmaktadır [25]. Şebekedeki gaz kalitesinin dalgalanması hali hazırda emisyonlar için sorun oluşturmakla birlikte, şebekedeki doğalgaza ilave edilen hidrojen miktarının dalgalanması da beraberinde cihazın uygun ayarının nasıl yapılacağı hususunda yeni soru işaretleri oluşturmaktadır. Devreye alma esnasında uygun şekilde ayarlanan cihazın hava fazlalık katsayısının, şebekedeki H₂ oranındaki değişime göre artabilir ya da azalabilir.

Örneğin cihazı devreye alma esnasında şebeke gazı hidrojen içermiyorsa, ayarlanan hava fazlalık

katsayısı şebekedeki hidrojen oranının artması durumunda, Tablo 8'de gösterildiği şekilde artacaktır. Bu durumun CO emisyonlarına olumlu yönde etki edeceği öngörülmüş ve teyit edilmiştir.

Tablo 8. Şebeke gazındaki değişimin hava fazlalık katsayısına etkisi (1)

Devreye Alma Esnasında		Devreye Alma Sonrasında	
Şebeke Gazı	Lambda	Şebeke Gazı	Lambda
%100 CH ₄	1.3	%80 CH ₄ %20 H ₂	1.39

Fakat devreye alma ve ayarlama esnasında şebeke gazı yüksek oranda hidrojen içeriyorsa, ayarlanan hava fazlalık katsayısı şebekedeki hidrojen oranının azalması ya da şebekeye saf doğalgaz verilmesi durumunda azalacaktır ve potansiyel olarak CO emisyonlarının artması ile sonuçlanacaktır.

Tablo 9. Şebeke gazındaki değişimin hava fazlalık katsayısına etkisi (2)

Devreye Alma Esnasında		Devreye Alma Sonrasında	
Şebeke Gazı	Lambda	Şebeke Gazı	Lambda
%80 CH ₄ %20 H ₂	1.3	%100 CH ₄	1.22

Güvenlik: Teorik inceleme sonucu, yakıtta hidrojen takviyesi ile oluşma ihtimali dile getirilen en önemli risk alev geri tepmesidir. Günümüzde EN15502 standardı gereğince, doğalgazla çalışacak cihazlar için EN437 standardında belirtildiği üzere %23 hidrojen içeren bir sınır gazı (G222) ile alev geri tepme testleri yapılmaktadır. Buradaki amaç, şebekeye verilen doğalgazın gaz kalitesi süreçli aynı olmayacağından dolayı, en kötü koşulda bile cihazın alev geri tepmesine yol açmadan, kararlı bir şekilde yanacağını teyit etmektir. Proje kapsamında, test edilen cihazın %50 oranında hidrojen içeren sınır gaz ile geri tepmesi açısından sorun teşkil etmediği tespit edilmiştir.

REFERANSLAR

- [1] U.S. Environmental Protection Agency : Carbon Dioxide Emissions Coefficients by Fuel : *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2021*.
- [2] Flayyih, M.; Schaffert, J.; Carpentier, S.; Burmeister, F.; Albus, R.; Görner, K. : THyGA project: Market segmentation of domestic and commercial natural gas appliances, Testing Hydrogen admixture for Gas Applications (THyGA); EU project, grant agreement no. 874983 (Project Report - Deliverable D2.1) : *Essen, Germany; Stains, France : Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. (GWI) : 2020*.
- [3] Citation: Xin, Y.; Wang, K.; Zhang, Y.; Zeng, F.; He, X.; Takyi, S.A.; Tontiwachwuthikul, P. : *Numerical Simulation of Combustion of Natural Gas Mixed with Hydrogen in Gas Boilers*. *Energies* 2021, 14
- [4] Schiro, F.; Stoppato, A.; Benato, A. : *Modelling and analyzing the impact of hydrogen enriched natural gas on domestic gas boilers in a decarbonization perspective*, University of Padova, Department of Industrial Engineering, Via Venezia n.1, Padova, Italy : 2020
- [5] Mayrhofer, M., Koller, M., Seemann, P. : *Assessment of Natural Gas/Hydrogen Blends as an Alternative Fuel for Boilers*, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 46, Issue 41, 15 June 2021
- [6] Lo Basso, G. ; Nastasi, B. ; Astiaso Garcia, D. ; Cumo, F. : *How to handle the Hydrogen enriched Natural Gas blends in combustion efficiency measurement procedure of conventional and condensing boilers*, *Energy*, Volume 123, 15 March 2017
- [7] Glanville, P.; Fridlyand, A.; Sutherland, B.; Liszka, M.; Zhao, Y.; Bingham, L.; Jorgensen : *Impact of Hydrogen/Natural Gas Blends on Partially Premixed Combustion Equipment: NOx Emission and Operational Performance*, *Energies*, 2022, 15
- [8] Sorgulu, F. ; Ozturk, M. ; Javani, N. ; Dincer, I. *Experimental investigation for combustion performance of hydrogen and natural gas fuel blends*, *International Journal of Hydrogen Energy* Volume 48, Issue 88, 30 October 2023
- [9] Boulahlib, M.S. ; Medaerts, F. ; Boukhalfa, M.A. : *Experimental study of a domestic boiler using hydrogen methane blend and fuel-rich staged combustion*, *International Journal of Hydrogen Energy* Volume 46, Issue 75, 29 October 2021
- [10] Akman, M.A.; Marancı, M.K.; Sarıkaya, M.Ş. : Doğal Gaz Sektörü Hidrojene Geçişte Yol Haritası Önerileri : *GAZBİR* : Mart 2021
- [11] HyDeploy Project: Project Close Down Report : June 2021.
- [12] Schaffert, J.; Fischer, P.; Leicher, J.; Burmeister, F.; Flayyih, M.; Cigarida, H.; Albus, R.; Görner, K. : Impact of hydrogen admixture on combustion processes – Part II: Practice: *Essen, Germany; Stains, France : Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. (GWI) December 2020*.
- [13] https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html, Erişim Tarihi: 20.05.2024
- [14] https://www.engineeringtoolbox.com/methane-density-specific-weight-temperature-pressure-d_2020.html , Erişim Tarihi: 20.05.2024
- [15] https://www.engineeringtoolbox.com/hydrogen-H2-density-specific-weight-temperature-pressure-d_2044.html, Erişim Tarihi: 20.05.2024
- [16] <https://neutrium.net/properties/wobbe-index/> , Erişim Tarihi: 20.05.2024
- [17] Leicher, J.; Schaffert, J.; Carpentier, S.; Albus, R.; Görner, K. : Impact of hydrogen admixture on combustion processes – Part I: Theory: *Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. (GWI) : 24th of November, 2021*.
- [18] Inoue, K.; Miyamoto, K.; Domen, S.; Tamura, I.; Kawakami, T.; Tanimura, S. : Development of Hydrogen and Natural Gas Co-firing Gas Turbine : *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 55 No. 2* : June 2018.

- [19] Jones, H.R.N. : The Application of Combustion Principles to Domestic Burner Design : Taylor & Francis : 1989.
- [20] Hermanns, R.T.E. : Laminar Burning Velocities of Methane-Hydrogen-Air Mixtures : *Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, The Netherlands* : 2007.
- [21] Comité Européen de Normalisation : EN 437 Test gases -Test pressures - Appliance categories : *Brussels, Belgium, European Norm EN 437:2003* : 2003.
- [22] UNI1609377 Requisiti specifici per caldaie che utilizzano gas combustibile del gruppo H e del gruppo E alle pressioni stabilite nella UNI EN 437 e in più utilizzano miscele di gas naturale e di idrogeno fino al 20% in volume: *Comitato Italiano Gas*: 2021.
- [23] Regulation (EU) 2016/426 of the European Parliament and of the Council of 9 March 2016 on appliances burning gaseous fuels and repealing Directive 2009/142/EC : *Brussels, Belgium, Regulation (EU) 2016/426* : 2016.
- [24] Directive 2009/142/EC of the European Parliament and the Council of 30 November 2009 relating to appliances burning gaseous fuels : *European Union, Brussels, Belgium, Directive 2009/142/EC* : 2009.
- [25] Leicher, J., Giese, A., Görner, K., Werschy, M., Krause, H., Dörr, H. : Statistical Surveys on the Sensitivities of Industrial End-Users to Gas Quality Fluctuations in Germany : *International Gas Union Research Conference (IGRC), Rio de Janeiro, Brasilien* : 2017.