

İÇTEN YANMALI MOTORLARDA YAKIT OLARAK HİDROJEN KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

Doç. Dr. Selman AYDIN
Öğr. Gör. Metin KAYNAKLI

Editör: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ALBAYRAK



**İÇTEN YANMALI
MOTORLARDA YAKIT OLARAK
HİDROJEN KULLANIMININ
ARAŞTIRILMASI**

**Doç. Dr. Selman AYDIN¹
Öğr. Gör. Metin KAYNAKLI²**

Editör: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ALBAYRAK³

¹ Batman Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, selman.aydin@batman.edu.tr

² Bitlis Eren Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, mkaynakli@beu.edu.tr

³ Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, ahmetalbayrak@duzce.edu.tr



***İçten Yanmalı Motorlarda Yakıt Olarak
Hidrojen Kullanımının Araştırılması
Doç. Dr. Selman AYDIN, Öğr. Gör. Metin KAYNAKLI***

Genel Yayın Yönetmeni: Berkan Balpetek
Editör: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ALBAYRAK
Kapak ve Sayfa Tasarımı: Duvar Design
Yayın Tarihi: Şubat 2025
Yayıncı Sertifika No: 49837
ISBN: 978-625-5551-57-3

© Duvar Yayınları
853 Sokak No:13 P.10 Kemeraltı-Konak/İzmir
Tel: 0 232 484 88 68

www.duvar yayinlari.com
duvarkitabevi@gmail.com

Bu kitap akademik ve araştırma amaçlı olarak hazırlanmıştır.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	5
1. GİRİŞ	7
2. HİDROJENİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ	9
2.1. Buhar Metan Reformu	9
2.2. Kömürün Gazlaştırılması	10
2.3. Biyokütle Gazlaştırma	11
2.4. Mikrobiyal Biyokütle Dönüşümü	12
3. MOTORLARDA HİDROJEN KULLANMA YÖNTEMLERİ	13
3.1. Hidrojenin Doğrudan Yakıt Olarak Kullanımı	13
3.2. Hidrojenin İkincil Yakıt Olarak Kullanımı	13
4. İÇTEN YANMALI MOTORLARA	14
HİDROJEN SAĞLAMA YÖNTEMLERİ	14
4.1. Yakıt Karbürasyonu Tekniği	14
4.2. Giriş Manifoldu ve Giriş Portu Enjeksiyon Tekniği	15
4.3. Direkt Enjeksiyon Sistemleri	15
5. HİDROJEN YAKITLARININ İÇTEN YANMALI (IC) MOTORLARIN PERFORMANSINA ETKİSİ	17
5.1. Güç ve Tork	17
5.2. Fren Isıl Verimliliği	19
5.3. Frene Özel Yakıt Tüketimi	21
6. HİDROJEN YAKITLARININ İÇTEN YANMALI (IC) MOTORLARIN EMİSYONLARINA ETKİSİ	23
6.1. CO Emisyonları	23
6.2. CO ₂ Emisyonları	25
6.3. Egzoz Gazlarında Yanmamış Karbon Emisyonları	26
6.4. NO _x Emisyonları	28
6.5. Kurum Emisyonları	29
7. HİDROJEN YAKITI İÇİN TASARLANAN MOTORLARDA	31
DİKKAT EDİLMESİ GEREKEN ÖNEMLİ ÖZELLİKLER	31
7.1. Bujiler	31
7.2. Yüksek Sıcaklık Noktaları	31
7.3. Kayganlaştırıcı Yağ	31
7.4. Malzeme Yapısındaki Değişiklikler	31
7.5. Silindirlerde Türbülans Oluşumu	32

7.6. Güç Çıkışı.....	32
7.7. Yağ Karteri Havalandırması.....	32
7.8. Emisyon Oluşumu	32
8. İÇTEN YANMALI MOTORLARDA YAKIT OLARAK	33
HİDROJENİN KULLANIMINDA SON GELİŞMELER	33
8.1. Son Gelişmeler	35
8.1.1. Dünya çapında Ar-Ge projeleri	35
8.1.2. Araştırma Temaları.....	39
8.1.3. Direkt Enjeksiyon.....	40
8.1.4. Hidrojen Yakıtlı Motorlarda Karışım Oluşumunu Ve Yanmayı Ölçmek İçin Optik Teknikler.....	41
8.1.5. DI Enjektörleri.....	41
8.1.6. DI Motorlarda Karışım Oluşumunu Ve Yanmayı Anlamak.....	42
8.1.7. Yakma Stratejileri.....	45
8.2. Isı Transferi	48
8.3. Sayısal Çalışma	49
8.4. Araç Ve Motor Stratejileri.....	52
9. SONUÇLAR	56
10. KAYNAKLAR.....	60

ÖZET

Otomobiller, 1886 yılından bu yana toplumda büyük değişimlere neden olmuş, ancak artan sayıları ve petrol bağımlılıkları enerji arzı sorunları ve çevre kirliliği yaratmıştır. Son yıllarda, fosil yakıtların maliyeti ve çevreye olan olumsuz etkileri nedeniyle düşük emisyonlu güç sistemleri geliştirilmektedir. Paris (COP21) ve Glasgow (COP26) İklim Anlaşmaları, araçlardaki CO2 salınımının azaltılmasını hedeflemiştir. Elektrikli araçlar bu bağlamda önemli olsa da, fosil olmayan hidrokarbonlar ve hidrojenle çalışan içten yanmalı motorlar da değerlendirilmektedir. Hidrojen, enerji sektörlerinde potansiyel bir taşıyıcı olarak kabul edilmekte ve sürdürülebilir enerji sağlamak için önemli bir seçenek olarak görülmektedir. Hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanımı 1970'lerde başlamış olup, karbon emisyonlarını azaltma ve termal verimliliği artırma potansiyeline sahiptir. Bununla birlikte, motorlarda saf hidrojen kullanımı büyük modifikasyonlar gerektirdiğinden, hidrojen yardımcı yakıt olarak kullanılabilir. Hidrojenin motorlarda yenilenebilir ve temiz bir yakıt olarak önemi, buji ve sıkıştırma ile ateşlemeli motorlar üzerindeki etkilerinin incelenmesini gerektirmektedir. Hidrojen, fosil yakıtlara en kullanışlı alternatiflerden biri olarak öne çıkmaktadır. Hidrojen doğada saf halde bulunmaz, ancak fosil yakıtlar, hidrojen sülfür, biyokütle ve sudan üretilebilir. Hidrojen üretiminde yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında buhar metan reformu, elektroliz, kömürün gazlaştırılması, biyokütle gazlaştırma ve mikrobiyal biyokütle dönüşümü bulunmaktadır. Hidrojen içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılabilir. İki ana yöntem vardır: Hidrojenin doğrudan yakıt olarak kullanımı ve hidrojenin ikincil yakıt olarak kullanımı. Hidrojen motorlarının yapısı temel olarak içten yanmalı motorlarınkinden farklı değildir. Ancak, düşük güç çıkışı, yüksek NOx emisyonları ve düzensiz yanma gibi sorunları çözmek için yakıt dağıtım sistemi ve yanma sisteminde değişiklikler yapılması gerekmektedir. Hidrojenin tamamen yanabilmesi için hava/yakıt kütle oranının 1:34 olması gerekir. Hidrojenin içten yanmalı motorlardaki performansı, güç ve tork gibi temel parametreler üzerinde belirgin etkilere sahiptir. Hidrojenin kullanımı, motorun hacimsel verimliliğini azaltır, bu da güç ve torkun düşmesine neden olur. Ayrıca, hidrojenin eklenmesiyle yakıt freni termal verimliliği de azalır. Bununla birlikte, daha yüksek sıkıştırma oranlarına sahip motorlar, hidrojen kullanımından kaynaklanan güç kaybını azaltabilir ve termal verimliliği artırabilir. Ancak, hidrojenin yakıt tüketimine olan etkisi, hidrojenin hızlı yanma özelliği nedeniyle artış gösterir. Hidrojenin içten yanmalı motorlardaki performansı, hidrojenin kullanım oranına ve motorun çalışma koşullarına bağlı olarak değişir. Bu nedenle, hidrojenin etkin kullanımı için motorun tasarımı ve

işletme koşulları dikkatlice değerlendirilmelidir. İçten yanmalı motorlarda hidrojenin kullanımı, ulaştırma sektöründe fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltma potansiyeline sahip önemli bir gelişme olarak öne çıkıyor. Bu alanda yapılan son araştırmalar ve gelişmeler, hidrojenin enerji depolama ve taşıyıcısı olarak kullanımını vurguluyor. Hidrojen, yenilenebilir enerjiyi depolamanın ve taşımının bir yolu olarak dikkat çekiyor. Özellikle, yenilenebilir enerji üretimi fazla olduğunda hidrojen üretilerek depolanabilir ve enerji talebi arttığında tekrar enerjiye dönüştürülebilir. Bu, enerjiyi daha etkili bir şekilde yönetmeyi ve kullanmayı sağlar. Hidrojenin yakıt olarak kullanılması için iki ana seçenek mevcut: yakıt hücresiyle çalışan taşıtlar ve içten yanmalı motorlar. Yakıt hücreli araçlar, hidrojen kullanımının çevresel ve verimlilik avantajlarını sunarken, içten yanmalı motorlar daha esnek bir yaklaşım sunar. İçten yanmalı motorlar, mevcut altyapıya dayanarak hidrojeni hızla benimseyebilir ve farklı yakıtlarla uyumlu hale getirilebilir. Hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanılması, yerel kirliliği ve küresel karbondioksit emisyonlarını azaltmanın yanı sıra, mevcut fosil yakıtlı motorlara göre daha yüksek bir verimlilik sağlar. Ayrıca, hidrojenin saflığına yönelik gereksinimler daha düşüktür ve malzeme uyumluluğu daha kolay sağlanabilir. Bu özellikler, hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanımını çekici hale getirir. Sonuç olarak, içten yanmalı motorlarda hidrojenin kullanımı, yerel ve küresel çevresel etkileri azaltmanın yanı sıra enerji verimliliğini artırma potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, bu alandaki araştırma ve gelişmelere önem verilmelidir.

1. GİRİŞ

İlk otomobillerin ortaya çıkmaya başladığı 1886 yılından bu yana bir asırdan fazla bir süredir varlığını sürdüren otomobiller, insan toplumunda büyük değişimlere yol açmıştır. Otomobiller; birçok alanda kolaylık sağlamakla birlikte, artan sayıları ve petrol kaynaklarına bağımlılıkları sebebiyle enerji arzı sorunlarına ve çevre kirliliğine sebep olmaktadır.

Son yıllarda petrol kaynaklı fosil yakıtların artan maliyetleri ve bunların doğal çevre üzerindeki olumsuz etkilerine ilişkin endişelerin artması nedeniyle, araçlar için düşük emisyonlu güç kaynağı sistemlerinin geliştirilmesi gözlemlenmiştir [1].

Paris (COP21) ve Glasgow (COP26) İklim Anlaşmalarında ana hatlarıyla belirtildiği gibi iklim değişikliği sorununu ile başarılı bir şekilde mücadele edebilmek için, çok kısa zaman içerisinde araçlardaki CO₂ salınımının azaltılması gerekmektedir. Bu zorlu hedefe ulaşmak için yenilenebilir enerji kullanılarak şarj edilen bataryalarla çalışan elektrikli güç aktarma organları; yalnızca kamusal bir görev değil, aynı zamanda ilgili akademik ve endüstriyel toplulukların araştırma çabalarının da odağını temsil etmektedir. Ancak bu teknoloji kişisel hareketlilik, sürdürülebilirlik ve fizibilite ile ilgili çeşitli ihtiyaçların tümüne cevap verememektedir. Dolayısıyla buna paralel olarak fosil olmayan hidrokarbonlar ve hidrojen (H₂) ile beslenen içten yanmalı motorlar da önemli bir rol oynayacağı düşünülmektedir.

Mevcut enerji ortamında hidrojen, tüm enerji sektörlerinde potansiyel uygulamalara sahip bir enerji taşıyıcısı olarak algılanmaktadır [2].

Hidrojen bazlı bir enerji sistemi, sürdürülebilirlik hedeflerini karşılarken enerji hizmetini verimli, temiz ve güvenli bir şekilde sunmak için uygun bir seçenek olarak kabul edilmektedir [2]–[7]

Gelecekteki enerji ihtiyacının karşılanması için en umut verici olasılıklardan biri hidrojendir [8]. Hidrojen, sürdürülebilir ve verimli bir süreçte yenilenebilir kaynaklardan üretildiğinde çevre dostudur [9]. Doğal gaz, benzin ve dizel gibi hidrokarbon yakıtlarla karşılaştırıldığında, içten yanmalı motorlarda yakıt olarak hidrojenin kullanılması, karbon emisyonlarını azaltırken termal verimliliği de artırabilir. Ulaşım için hidrojen kullanmanın önemli bir faydası, yenilenebilir kaynaklara olan bağımlılığımızı arttırırken yenilenemeyen fosil yakıt kullanımımızı azaltmasıdır [10].

Hidrojenin içten yanmalı yakıt olarak kullanılması kavramı 1970’li yıllarda ortaya çıkmıştır [11]. Hidrojenin karbonsuz bir yakıt olarak dikkate değer özellikleri vardır. Hidrojen, içten yanmalı motorlarda ve yakıt hücrelerinde kullanıldığında daha az tehlikeli egzoz borusu emisyonu üretir; bu, fosil

yakıtların en büyük dezavantajlarından biridir[12]. Hidrojenin en büyük avantajlarından biri, bir yakıt hücresinde kullanıldığında yalnızca H₂O ürettiği için çevre dostu bir yakıt olmasıdır [13]. Hidrojen, kömür, benzin ve metandan sırasıyla 4, 2.8 ve 2.4 kat daha yüksek bir ısıl değere sahiptir. Fosil yakıtlarla karşılaştırıldığında en bol bulunan element olan hidrojen, en yüksek spesifik enerji içeriğine sahiptir [14], [15].

Motorlarda saf hidrojen kullanmak için büyük motor modifikasyonları gereklidir. Bunun yerine hidrojen, yakıt tüketimini ve emisyonları en aza indirmek için otomobillerde yardımcı yakıt olarak orta bir çözüm olarak kullanılabilir[16]. İçten yanmalı motorlarda yenilenebilir ve temiz yakıtlar olarak hidrojen yakıtlarının önemi göz önüne alındığında, buji ve sıkıştırma ile ateşlemeli motorlar üzerindeki etkilerinin incelenmesi önemlidir [15].

2. HİDROJENİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Hidrojen, günümüzde fosil yakıtlara en kullanışlı alternatiflerden biri haline gelmiştir. Hidrojen çevredeki birçok elementten biri olduğundan kolayca temin edilebilir. Hidrojen doğada (atmosferde) saf haliyle mevcut değildir. Ancak fosil yakıtlar, hidrojen sülfür, biyokütle ve su gibi hidrojen içeren bileşiklerden üretilir.

Hidrojen elde etmek için öncelikle diğer elementlerden ayrıştırılması gerekir. Hidrojen üretiminde yaygın olarak kullanılan bazı yöntemler aşağıda belirtilmiştir [17].

2.1. Buhar Metan Reformu

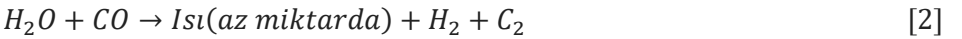
Dünyadaki hidrojenin %90'ından fazlası buhar metan reformasyon prosesi kullanılarak üretilmektedir. Bir katalizör ile 3-25 bar basınç altında tutulan metan gazı, buharla birleşerek hidrojen, karbon monoksit ve karbondioksit oluşturur. Metan buhar reformasyonu endotermik bir reaksiyondur, yani prosesi tamamlamak için ısıya ihtiyaç vardır. Bugün dünyada üretilen hidrojenin büyük bir kısmı doğal gazdan elde edilmektedir.

Hidrojen üretimi için buhar-metan reformasyonu süreci; etanol, propan ve hatta benzin gibi diğer yakıtların üretilmesine benzer. Bu süreçte ilk aşama, daha fazla hidrojen üretmek için daha sonra bir katalizörle birleştirilecek olan karbon monoksit ve buharın üretilmesidir. Son üretim aşamasında, karbon dioksit ve diğer safsızlıklar gaz akışından uzaklaştırılarak esasen saf hidrojen elde edilir [15].

Buhar-metan reformasyonunun reaksiyonu[15]:



Su ve gaz arasındaki reaksiyon [15]:



Elektroliz

Elektroliz, yenilenebilir ve nükleer enerjiden karbonsuz hidrojen üretmek için geçerli bir yöntemdir. Suyu elektrik kullanarak hidrojen ve oksijene ayırma işlemine hidrojen üretimi denir. Bir elektrolit, bir elektrolizörde anot ve katoda ayrılır. İlettikleri çeşitli elektrolit malzemesi ve iyonik türler nedeniyle, farklı elektrolizörler farklı şekillerde çalışırlar [15].

Son zamanlarda suyun rüzgar enerjisi ile elektrolizine dayalı hidrojen rüzgar sistemleri üzerine araştırmalar yapılarak bu yöntemin gerektirdiği elektriğin

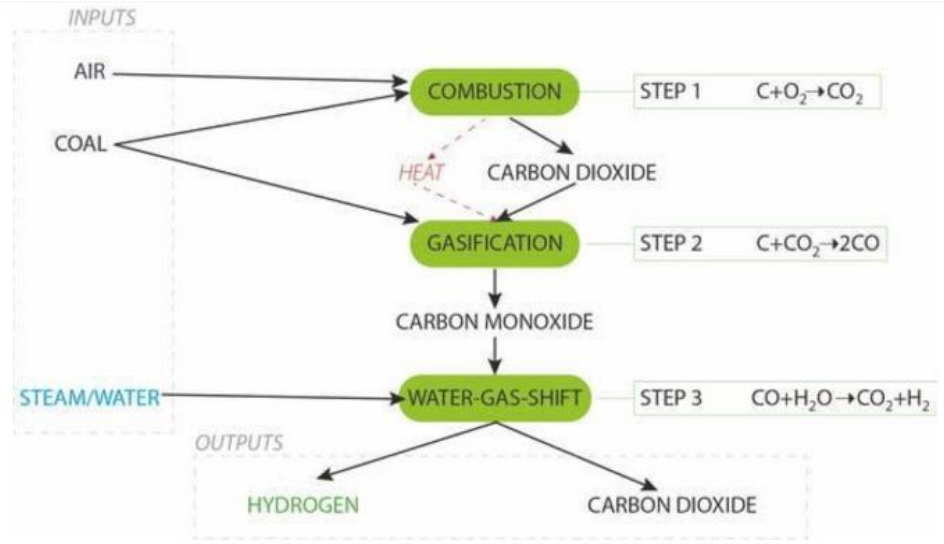
yenilenebilir bir rüzgar kaynağı kullanılarak üretilmesi üzerine araştırmalar yapılmaktadır. Bu bağlamda yenilenebilir enerji seçeneği olarak rüzgar enerjisi de dahil olmak üzere kaynaklar kullanılmaktadır. Bu teknolojiyi kullanarak yenilenebilir enerjiye dayalı elektrik, sera gazı yaymayan, karbon içermeyen bir enerji taşıyıcısı olan hidrojene dönüştürülebilir [18], [19].

2.2. Kömürün Gazlaştırılması

Kömür iki bölümden oluşur: karbon bazlı madde (tarih öncesi bitkilerin ayrılmış kalıntıları) ve mineral maddeler (kömürün çıkarıldığı topraktan gelen). Karbon bazlı madde beş ana bileşenden oluşur: karbon, hidrojen, oksijen, nitrojen ve kükürt [15].

Gazlaşma olayını anlayabilmek için öncelikle yanma kavramını bilmemiz gerekir. Kömür gibi ısı ve karbondioksit üreten bir yakıtın tamamen oksidasyonuna yanma denir. Karbon dioksit (CO_2) daha fazla oksitlenemediği için yanma sürecinin yanıcı olmayan bir son ürünüdür. Ancak gazlaştırma sırasında kömür tamamen oksitlenmez. Kömür bunun yerine gazlaştırma maddesi olarak bilinen bir maddeyle işlenir. Gazlaştırma endotermiktir, yani ısı üretmez fakat gerçekte, bir ısı girişine ihtiyaç vardır. Ortaya çıkan gaz tamamen oksitlenmediğinden yakıt olarak yakılabilir.

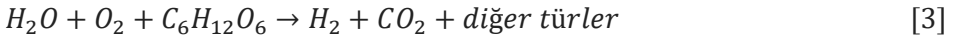
Kömürden hidrojen üretme yöntemi, geleneksel yanma yoluyla karbondioksit üreten kömüre bir miktar hava eklenmesini içeren kısmi oksidasyonla başlar. Ancak kömürü tamamen yakmaya yetecek kadar ısı sağlanmaz; yalnızca gazlaştırma reaksiyonunu ısıtmaya yetecek kadar ısı sağlar. Kısmi oksidasyon işlemi aynı zamanda gazlaştırıcı olarak kullanılan karbondioksiti de üretir. Karbon monoksit, karbondioksitin kömürdeki karbonun geri kalanıyla etkileşime girmesiyle oluşur (bu, ısı girdisine ihtiyaç duyan endotermik bir gazlaştırma reaksiyonudur). Bu aşamada henüz hidrojen üretilmemiştir. Gaz akışındaki karbon monoksitin buharla reaksiyona girmesiyle hidrojen ve karbon dioksit üretilmektedir.



Şekil 2.1. Kömür bazlı hidrojen üretimi [15]

2.3. Biyokütle Gazlaştırma

Gazlaştırma, organik veya fosil bazlı karbonlu malzemeleri yanma olmadan yüksek sıcaklıklarda karbon monoksit, hidrojen ve karbondioksit'e dönüştüren bir işlemdir. Biyokütle, özellikle oksijen kullanılmadığında, gazlaştırıcıya giren gaz karışımında ek hidrokarbon bileşikleri oluşturduğu için kömür kadar hızlı gazlaşmamaktadır. Sonuç olarak, temiz bir sentez gazı üretmek amacıyla bu hidrokarbonları bir katalizör kullanarak yeniden düzenlemek için ek bir işlem gereklidir. Basitleştirilmiş bir reaksiyonun örneği aşağıda verilmiştir [15].



Glikoz yukarıda bahsedilen işlemde selüloz yerine kullanılmıştır. Gerçek biyokütlenin içeriği ve karmaşıklığı nedeniyle selülozün önemli bir bileşenlerden biri olduğundan dolayı büyük ölçüde değişmektedir [51].

Süperkritik su gazlaştırma, atık biyokütleyi yüksek sıcaklıklarda ve yüksek basınçlarda hidrojen açısından zengin sentez gazına ve biyo-yağa dönüştürmek için umut verici bir hidrotermal teknolojidir [52]. Bu süreçte su süperkritik durumda bulunur ($T > 374 \text{ }^\circ\text{C}$, $p > 22,1 \text{ MPa}$). Kritik noktaya yakın süperkritik su koşulları çoğunlukla tavsiye edilir; su, selüloz, hemiselüloz ve lignin gibi biyokütlenin doğal polimerlerini kolayca hidrolize edebilir [15].

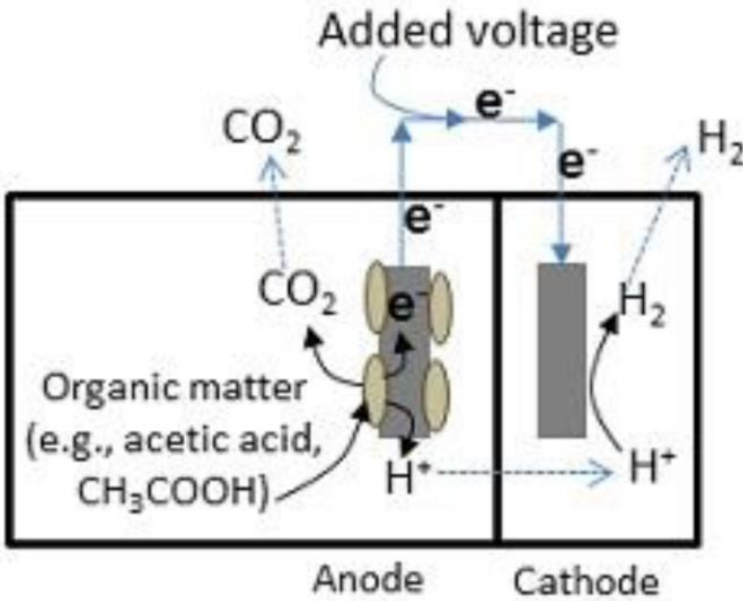
2.4. Mikrobiyal Biyokütle Dönüşümü

Mikrobiyal biyokütle dönüştürme yöntemleri, mikroorganizmaların biyokütleyi tüketme ve sindirme kapasitesinden yararlanırken aynı zamanda hidrojen açığa çıkarır. Bu çalışma, izlenecek yola bağlı olarak orta ve uzun vadede ticari ölçekli sistemlerin ortaya çıkmasına yol açabilir.

Rafine şekerler, mısır ocağı gibi ham biyokütle kaynakları ve hatta atık sular organik madde olarak kullanılabilir. Bu yöntemler, ışık kullanımına ihtiyaç duymadıklarından sıklıkla “karanlık fermantasyon” yaklaşımları olarak anılırlar.

Mikroplar hidrojen fermantasyonunda doğrudan hidrojen üretir. Bu bakteriler karmaşık bileşikleri çeşitli yollarla parçalayabilir ve enzimler, bu yolların bazılarında elde edilen yan ürünleri birleştirerek hidrojen oluşturabilir.

Mikrobiyal elektroliz hücreleri, organik maddeleri parçalayan mikroorganizmaların sağladığı enerji ve protonları mütevazı bir elektrik akımıyla birleştirerek hidrojen üreten cihazlardır. Bu teknoloji hâlâ başlangıç aşamasındadır ve araştırmacılar, daha düşük maliyetli malzemelerin araştırılması ve kullanılacak en iyi mikroorganizmaların belirlenmesi de dahil olmak üzere, bunun çeşitli unsurlarını geliştirmeye çalışmaktadır (Şekil 2.2) [15].



Şekil 2.2 Mikrobiyal elektroliz hücreleri [15].

3. MOTORLARDA HİDROJEN KULLANMA YÖNTEMLERİ

Hidrojen içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılabilir; ancak yakıtın yanma yapısı küçük motor değişiklikleriyle değiştirilebilir. İçten yanmalı bir motorda hidrojenin kullanımı diğer motor türlerindeki benzer. Otomobil endüstrisindeki içten yanmalı benzinli motorlarda hidrojenin kullanımına ilişkin farklı araştırmalarda, hidrojen, önceden karıştırılmış kompleksten enjeksiyon veya karbüratör çerçeveleri yoluyla motorun yanma odasına girmektedir [20].

3.1. Hidrojenin Doğrudan Yakıt Olarak Kullanımı

Geleneksel içten yanmalı motorlar genellikle benzin ve dizel gibi sıvı yakıtlarla çalışmaktadırlar. Doğal gaz gibi alternatif yakıtlarla çalışan birkaç içten yanmalı motorlar da vardır. Yanma ve yakıt sistemleri değiştirilmedikçe geleneksel içten yanmalı motorlar doğrudan hidrojen yakıtını kullanılamazlar.

3.2. Hidrojenin İkincil Yakıt Olarak Kullanımı

Hidrojen içten yanmalı motorlarda ana veya ikincil yakıt olarak kullanılabilir. Hidrojeni tek bir yakıt kaynağı olarak kullanmanın bazı dezavantajları olmasına rağmen, mevcut senaryoya daha uygundur. Bu teknik fosil yakıtlara olan bağımlılığı ortadan kaldırmaya bile, yakıt çerçevesindeki ekonomik değişimle birlikte hidrojen kullanılacak ve zararlı egzoz emisyonları en aza indirilecektir [15].

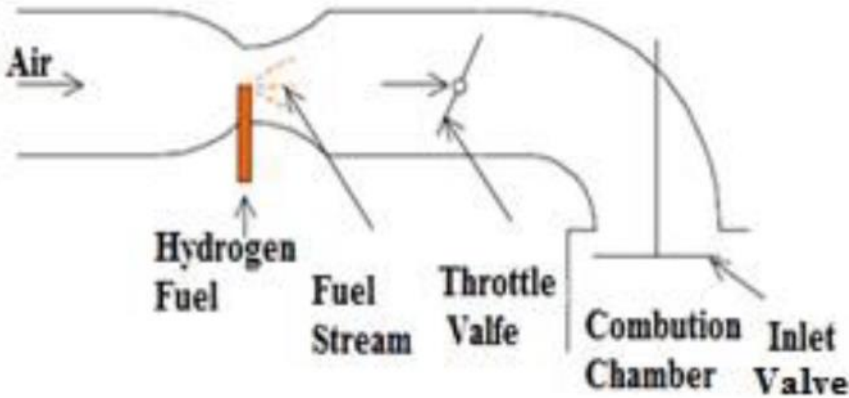
4. İÇTEN YANMALI MOTORLARA HİDROJEN SAĞLAMA YÖNTEMLERİ

Hidrojen motorlarının yapısı sıradan içten yanmalı motorlarinkine benzer. Bununla birlikte, düşük güç çıkışı, yüksek NOx emisyonları ve düzensiz yanma gibi çeşitli sorunları düzeltmek için yakıt dağıtım sistemi ve yanma sisteminde çeşitli değişiklikler yapılması gerekmektedir [16]. Hidrojeni tamamen yakmak için hava/yakıt kütle oranının 1:34 olması gerekir; yani 1 kısım hidrojen, silindirdeki 34 kısım hava ile birleştirilmelidir. Hidrojen, stokiyometrik koşullar altında yanma odasının yaklaşık %30'unu oluşturur [21].

4.1. Yakıt Karbürasyonu Tekniği

Hidrojen motorlarında en eski ve en verimli tekniklerden biri olan gaz karbüratörün kullanılması avantajlar sunmaktadır. Bir benzinli motorda sıklıkla bir karbüratör kullanıldığından, hidrojen yakıtını gazlaştırma işlemi, yaygın olarak kullanılan bir benzinli motoru bir hidrojen motoruna dönüştürmek için basitçe kullanılabilir.

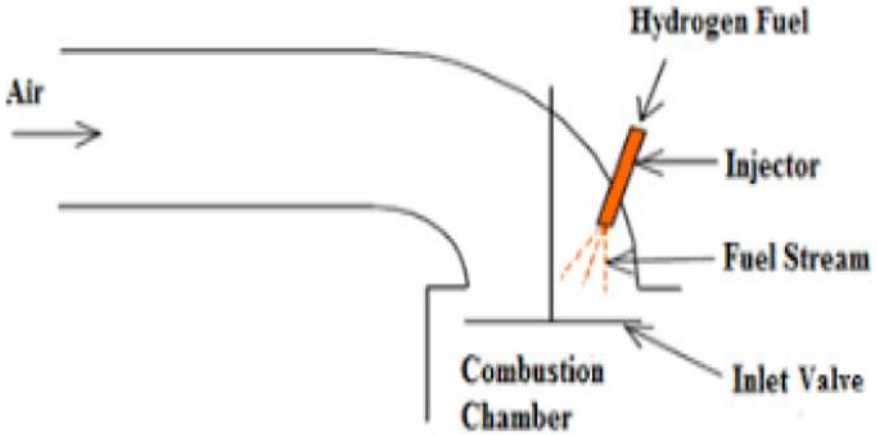
Hava-hidrojen karışımı düzenli olarak emme manifolduna girer. Bir valf, motora güç sağlayan, birleştirilecek hidrojenlenmiş havanın miktarını düzenler. Bazı motorların su ilavesine ihtiyacı vardır. Özellikle hız çok yüksek olduğunda, motor performansını artırmak için buhar ve hidrojenlenmiş hava birleştirilir. Bu, enjekte edilen yakıt miktarına göre belirlenir. Hacimsel verimin ve sistem kayıplarının düşük olması nedeniyle motor gücü %15 oranında azalır. Bu yöntem aynı zamanda oran sabit kaldığı için motorda erken ateşleme, geri tepme ve vuruntu olayına neden olabilir. Şekil 4.1, yakıt karbürleme prosesinin çalışma halindeki şematik bir tasviri verilmiştir [15], [22], [23].



Şekil 4.1. Uygulamadaki yakıt karbürasyon tekniği [23]

4.2. Giriş Manifoldu ve Giriş Portu Enjeksiyon Tekniği

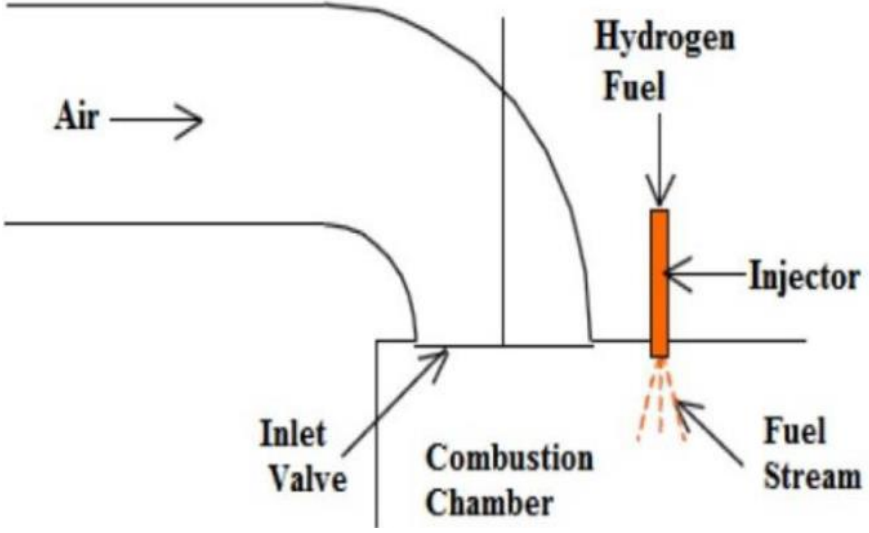
Giriş portu enjeksiyon prosedürü Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Hidrojen, değişen hızlarda çalışabilen mekanik veya elektrikli enjektörler aracılığıyla silindire iletilir ve emme manifoldundan gelen hava ile karışır. Emme manifoldu çok önemli bir rol oynar. Erken yaşlanma, büzülme ve şok oluşumu gibi karbürleme tekniğinin olumsuz etkileri ortadan kaldırılmıştır [15], [24].



Şekil 4.2 Giriş Manifoldu ve Giriş Portu Enjeksiyon Yöntemi [24]

4.3. Direkt Enjeksiyon Sistemleri

Emme valfi kapatıldıktan sonra yanma silindirinde teknik olarak daha karmaşık bir mekanizma olan hava-yakıt kombinasyonu oluşur. Sıkıştırmanın ardından hidrojen, çok sayıda enjeksiyonla elde edilene benzer şekilde doğrudan yanma odasına iletilir. Hızlı difüzyonu nedeniyle hidrojen hızla hava ile birleşecek ve buji için bir ateşleme kaynağı olarak kullanılabilir [25]. Doğrudan enjeksiyonlu hidrojen motoru, performans ve verimlilik açısından diğer iki teknolojidenden daha iyi performans göstermektedir. Ayrıca hidrojen direkt enjeksiyonlu motorlarda aşırı kendiliğinden ateşleme sıcaklığı, basınç artışı ve yanma gecikmesi meydana gelmektedir [15]. Şekil 5 doğrudan enjeksiyon modu gösterilmektedir.



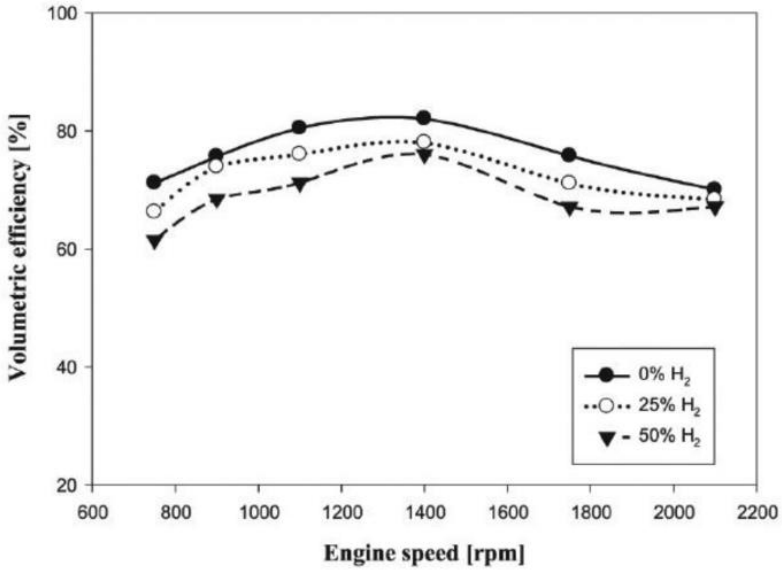
Şekil 4.3. Direkt Enjeksiyon Sistemi [26].

5. HİDROJEN YAKITLARININ İÇTEN YANMALI (IC) MOTORLARIN PERFORMANSINA ETKİSİ

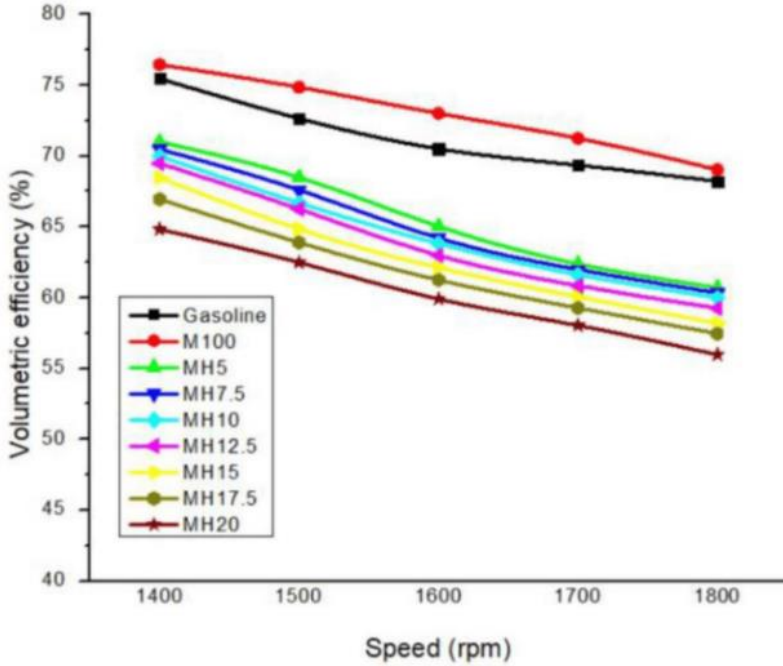
Benzinli motorlarda hidrojenin kullanımını kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır ve hidrojenin özelliklerinden dolayı bu motorlarda çeşitli modifikasyonlara ihtiyaç duyulmaktadır [15]. Hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanımına ilişkin önceki araştırmalar, hidrojenin benzin veya dizel yakıtla birleştirilmesi ve performans artışının değerlendirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır [27]–[29].

5.1. Güç ve Tork

Hidrojenin (120 MJ/kg) alt ısı değeri (LHV), bujiyle ateşlemeli (SI) ve sıkıştırılmalı ateşlemede ilave olarak kullanıldığında dizelden (43,6 MJ/kg) ve benzinden (43,4 MJ/kg) daha büyüktür. (CI) motorlarda hidrojen, motorun hacimsel verimliliğini azaltır [30]. Motorun içinde hidrojen, sıvı yakıtlara göre daha fazla genişir, dolayısıyla hidrojen motorlarının hacimsel verimliliği azalır. Bu öngörülebilir bir durumdur çünkü emme manifoldu genellikle sıvı yakıtların (dizel ve benzin) buharlaşmasına yardımcı olmak için ısınır. Araştırmacılara göre, hidrojen-hava yakıtının stokiyometrik bileşimi yaklaşık %30 hidrojen içerir ve benzin ve hava karışımlarındaki tamamen buharlaşmış benzinin hacim oranı %20'dir [31]. Enerji yüzdesine bağlı olarak hidrojen kullanan bir dizel motorda hacimsel verimdeki bu azalma Şekil 6'da gösterilmektedir [32]. Şekil 7 de, baz yakıt olarak metan kullanan bir SI motoru üzerinde yapılan bir çalışmada, benzin (50) ve hidrojeninkine yakın bir LHV değeri ile aynı miktarda azalmayı göstermektedir [33]. Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de göre yakıttaki hidrojen miktarının artmasıyla motorun hacimsel verim miktarı azalmakta, hidrojen miktarı arttıkça hacimsel verimdeki azalma da o kadar fazla olmaktadır.

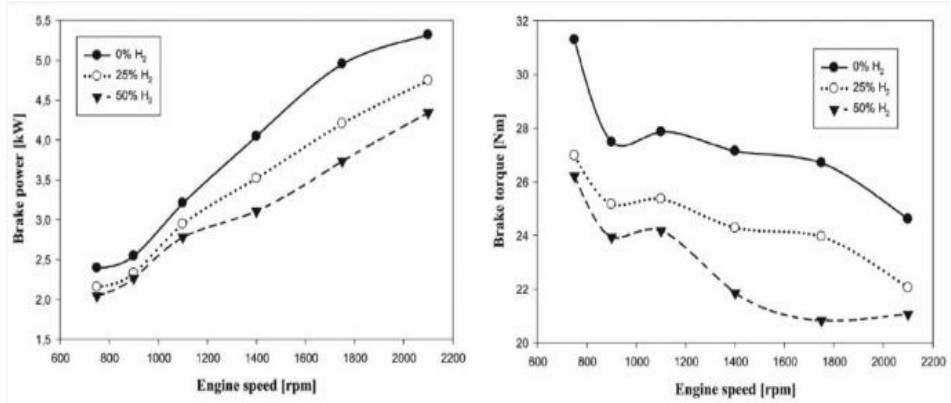


Şekil 5.1. CI motorunda farklı hidrojen yüzdeleriyle hacimsel verimlilik değışiklikleri [32]



Şekil 5.2. SI motorunda farklı hidrojen yüzdeleriyle hacimsel verim değışiklikleri [33]

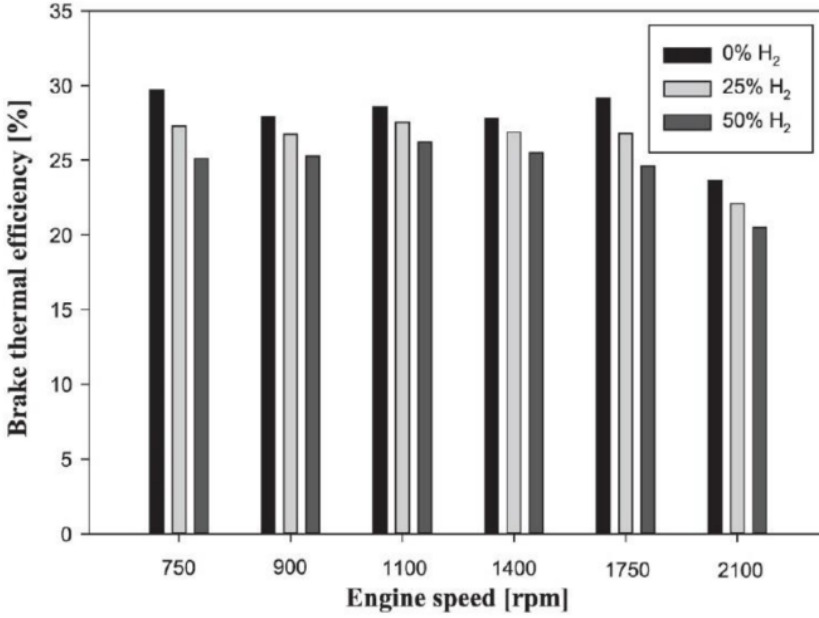
Hacimsel verimdeki bu azalma, motor gücünü ve torkunu azaltacaktır. Şekil 8, %25 ve %50 hidrojen kullanan bir CI motordaki güç ve tork azalma miktarını göstermektedir [32]. Diyagramlardan görülebileceği gibi hidrojen yüzdesi arttıkça motor gücü ve torku azalır. Bu güç ve tork azalması, hidrojen kullanan benzinli motorlar için de rapor edilmiştir [34].



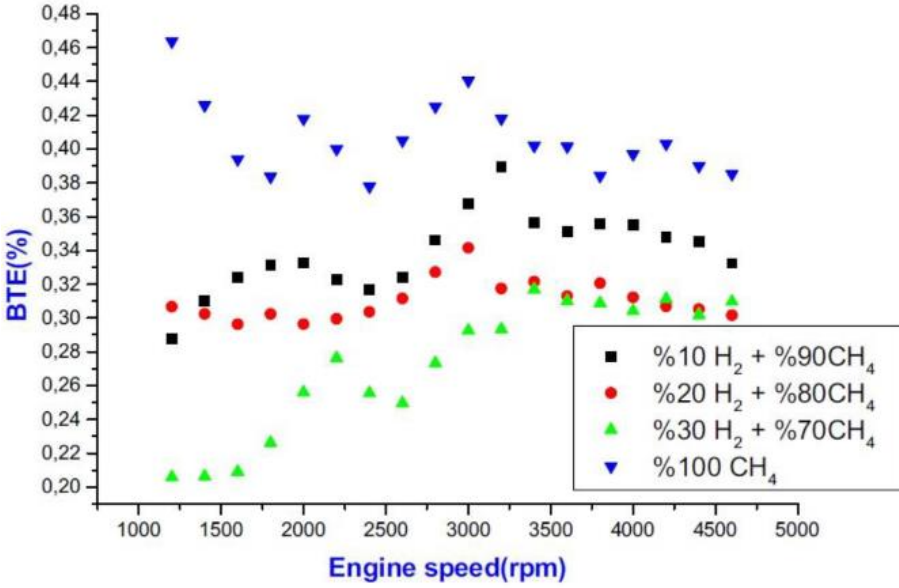
Şekil 5.3. CI motorunda farklı hidrojen yüzdeleriyle fren gücü ve fren torku değişiklikleri [28].

5.2. Fren Isıl Verimliliği

Hidrojenin büyük moleküler termal kapasitesi ve içten yanmalı motorlara hidrojen eklenmesinin yanma fazının kaymasına neden olması ve yanma verimliliğini düşürmesi nedeniyle [32], SI ve CI motorlara hidrojen eklendikçe yakıt freni termal verimliliği (BTE) düşer. Şekil 5.4'de, bir CIA motorunda baz yakıt olan dizele hidrojen eklenmesiyle BTA miktarının azaltılmasını göstermektedir. Bu motorlarda BTE'nin azaltılması için diğer araştırmacılar tarafından da benzer sonuçlar rapor edilmiştir [35], [36].



Şekil 5.4. CI motorunda farklı hidrojen yüzdeleriyle fren termal verimliliği [32].

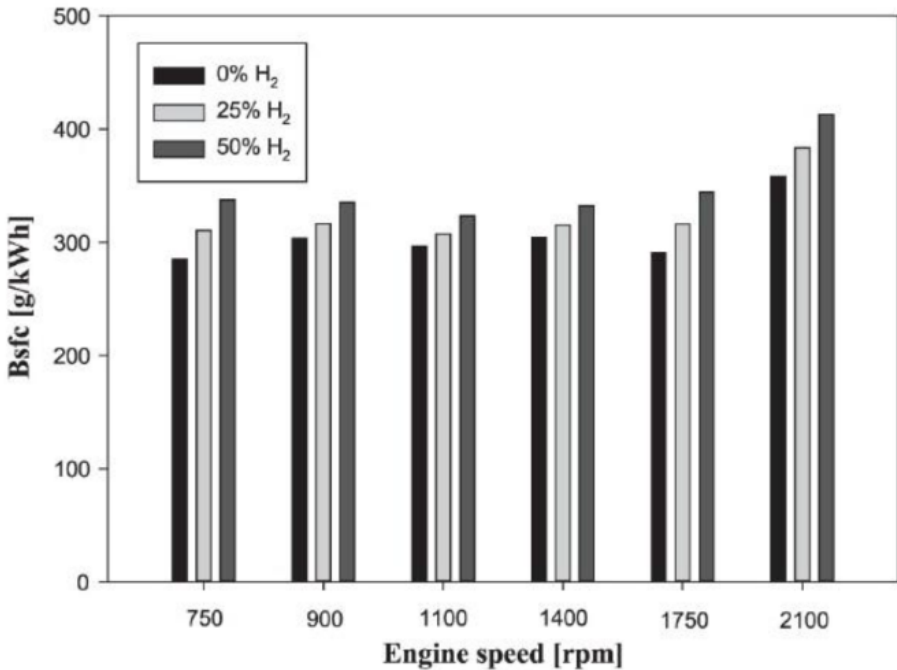


Şekil 5.5. SI motorunda farklı hidrojen yüzdeleriyle fren termal verimliliği [30].

Değişken çalışma özelliklerine sahip çeşitli yakıtlara hidrojen eklenmesi de dahil olmak üzere, hidrojen yakıtının çeşitli yönleri araştırılmaktadır. Ancak bir performans çalışmasında değerlendirilmesi gereken temel özelliklerden biri sıkıştırma oranındaki değişikliklerdir. Daha yüksek operasyonel sıkıştırma oranlarına sahip motorlar, önceki araştırmalara göre daha iyi termal verimlilik ve daha yüksek güç çıkışı sunarlar [27]–[29], [36]. Hidrojen motorunun güç kaybı, sıkıştırma oranının artırılmasıyla en aza indirilebilir [15]. Diğer araştırmacılar sıkıştırma oranı arttıkça BTE'de bir artış olduğunu bildirmişlerdir [34], [37].

5.3. Frene Özel Yakıt Tüketimi

Dizel çift yakıtlı motorda hidrojen daha hızlı yanar ve dokuz kat daha yüksek alev hızına sahiptir. Yük ve hidrojen ikamesi arttıkça ısı salınım hızı da artar [38]. Sonuç olarak, bir CI motorda hidrojenin dizel yakıtla karıştırılması, frene özgü yakıt tüketimini artırır. Şekil 11, dizel yakıtla hidrojen eklemenin, çeşitli hızlarda üretilen eşdeğer fren spesifik yakıt tüketimi (BSFC) miktarını nasıl artırdığını göstermektedir.



Şekil 5.6. SI motorunda farklı hidrojen yüzdeleriyle fren termal verimliliği [32].

Çeşitli hidrojen oranlarında hidrojen enjekte edildiğinde eşdeğer fren spesifik yakıt tüketimi (BSFC), motor gücündeki azalma nedeniyle (motor gücünü düşüren hidrojen enjeksiyon yöntemleri kullanıldığında) benzin kullanıldığında gözlemlenenle karşılaştırıldığında artar. Öte yandan su enjeksiyonu ve ateşleme sürelerinin değiştirilmesi, hidrojen enjeksiyonunun neden olduğu bozulmayı ortadan kaldırabilir ve BSFC'yi başarıyla azaltabilir [39]–[43].

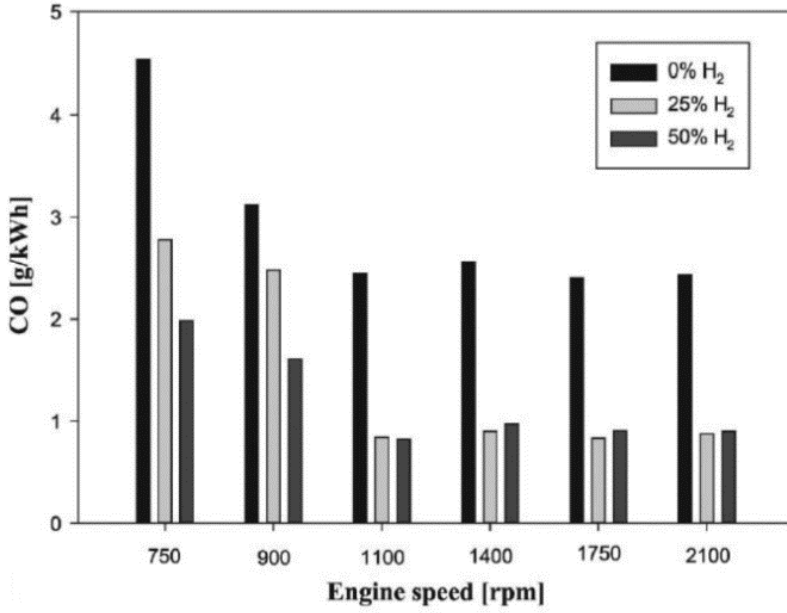
6. HİDROJEN YAKITLARININ İÇTEN YANMALI (İC) MOTORLARIN EMİSYONLARINA ETKİSİ

Benzinli motorların ürettiği en tehlikeli kirleticiler HC, CO ve NO_x'tir. Hidrojen, benzinin tamamen yanmasına yardımcı olan bir dizi benzersiz yanma özelliğine sahiptir. Dizel motorlar nitrojen oksitler (NO_x), yanmamış hidrokarbonlar (UHC), karbon monoksit (CO) ve kurum dahil olmak üzere daha tehlikeli emisyonlar üretir. Bu kirleticiler insan sağlığını ve çevreyi etkileme potansiyeline sahiptir. Dizel motorlar aynı zamanda dünyadaki diğer tüm motorlardan daha fazla kirletici madde yayar ve bu da onları önemli bir hava kirliliği kaynağı haline getirir [15].

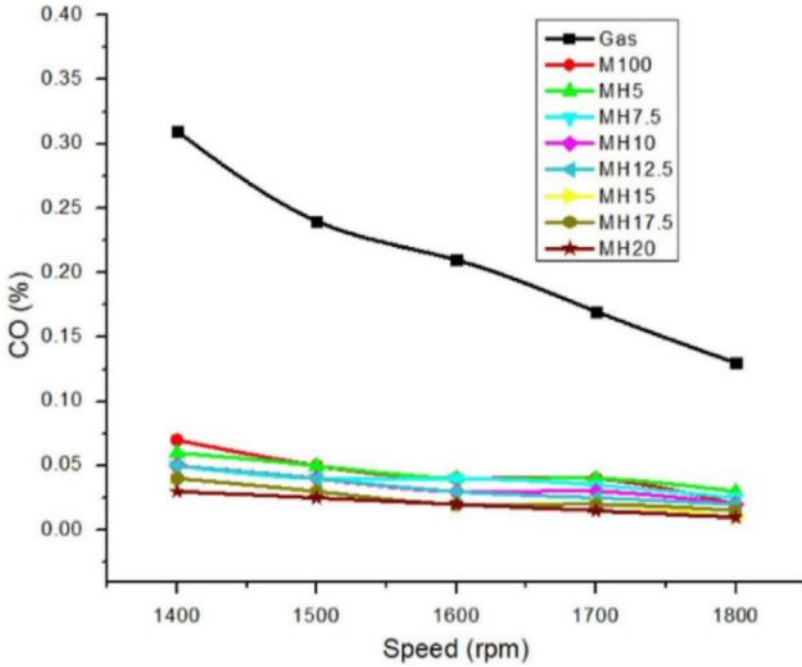
Hidrojen, kirleticileri azalttığı için motor yakıtı olarak kullanılır. Aslında hidrojenin yanması sonucu tehlikeli kimyasallar üretilmiyor. Son 30 yılda hidrojenin araçlarda yakıt olarak kullanılması üzerine çeşitli çalışmalar yoğunlaşmıştır[44], [45].

6.1. CO Emisyonları

Karbon monoksit (CO) emisyonu ozon tabakasında deliklere neden olur ve çevre için tehlikelidir. Motorda eksik yanma karbon monoksit oluşumuna yol açacaktır [46]. İçten yanmalı motorlara hidrojen eklenmesi, CI ve SI motorlardaki karbon monoksit emisyonlarının miktarını azaltır. Hidrojen, moleküllerinde karbon bulunmadığından dolayı bir hidrokarbon yakıt olmadığından, yakıttaki hidrojen kütle fraksiyonunu artırmak, hidrokarbon sentezi oranını düşürmektedir [47]. Ayrıca, yüksek hidrojen alevi silindir basıncını yükseltir ve yanma verimliliğini artırır. Ön yanma hidrojeni, yüksek difüzyon katsayısı nedeniyle daha homojen yanıcı bir karışım üretir ve oksijen kullanılabilirliğini artırır. Bu faktörlerin bir sonucu olarak içten yanmalı motorların ürettiği karbon monoksit miktarı azalır [48]. Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'de, sırasıyla dizel ve benzinli motorlarda yakıt olarak hidrojen kullanılarak karbon monoksit emisyonlarının azaltılmasını göstermektedir.



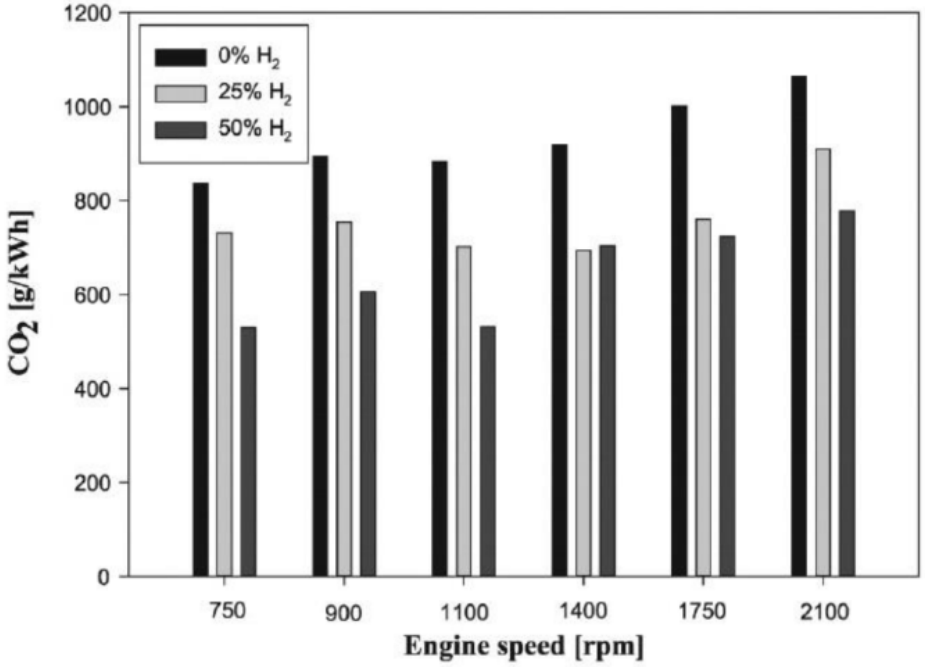
Şekil 6.1. Dizel motorlarda hidrojen yakıtı kullanılarak CO emisyonlarının azaltılması [32].



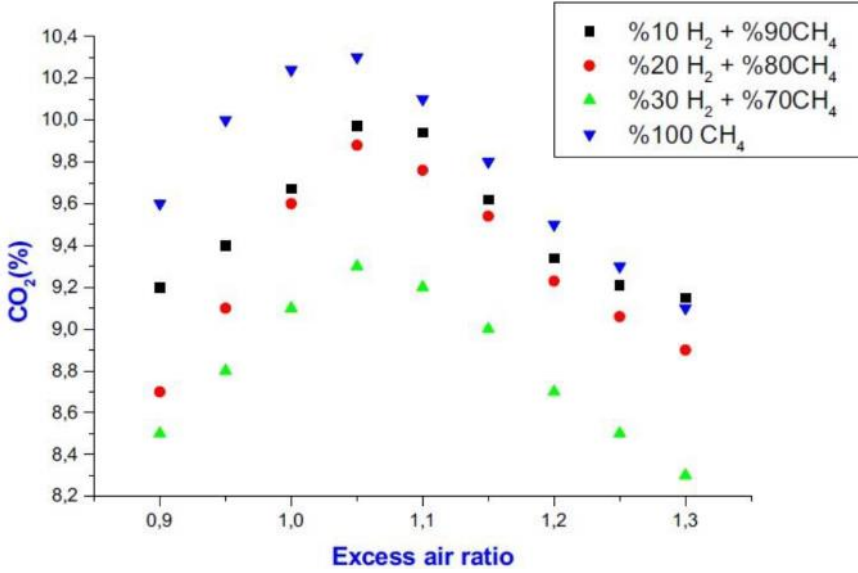
Şekil 6.2. Benzinli motorlarda hidrojen yakıtı kullanılarak CO emisyonlarının azaltılması [33].

6.2. CO₂ Emisyonları

Karbon dioksit (CO₂) üretimi, oksijen eksikliğinden ve yanma odasındaki düşük sıcaklıktan kaynaklanabilir. Bu, küresel ısınmaya etkisi nedeniyle çevreye zararlıdır [49]. İçten yanmalı motorlarda yakıt olarak hidrojen kullanıldığında H/C oranı artar, bu da yanma süresinin kısılmasına ve yanma veriminin artmasına neden olur [50]. Hidrojen ise CO₂ salmayan temiz bir yakıttır ve dolayısıyla CO₂ emisyonlarını azaltır [51]. Araştırmacılar, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'de gösterildiği gibi emisyon azaltım örnekleri verilmiştir.



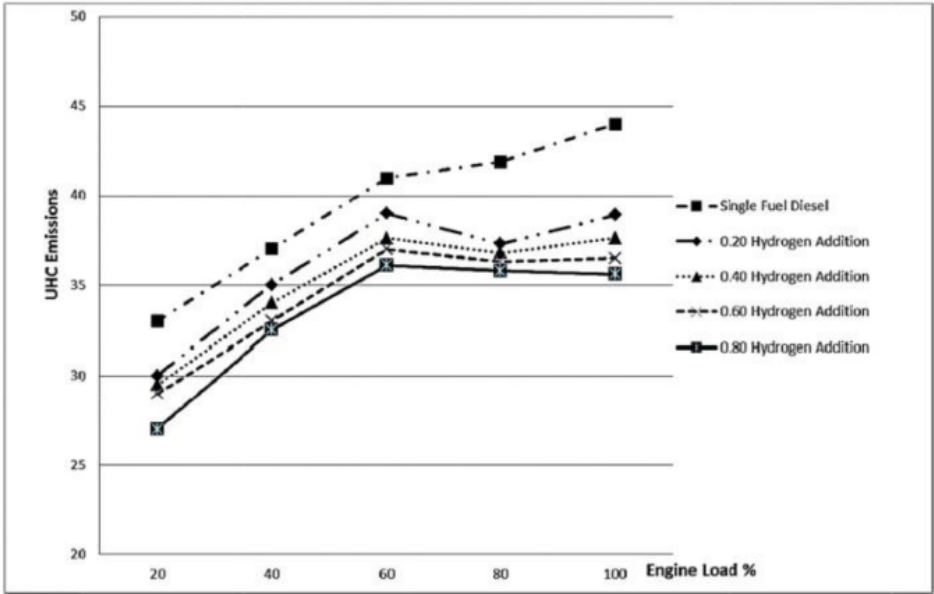
Şekil 6.3. Dizel motorlarda hidrojen yakıtı kullanılarak CO₂ emisyonunun azaltılması [32]



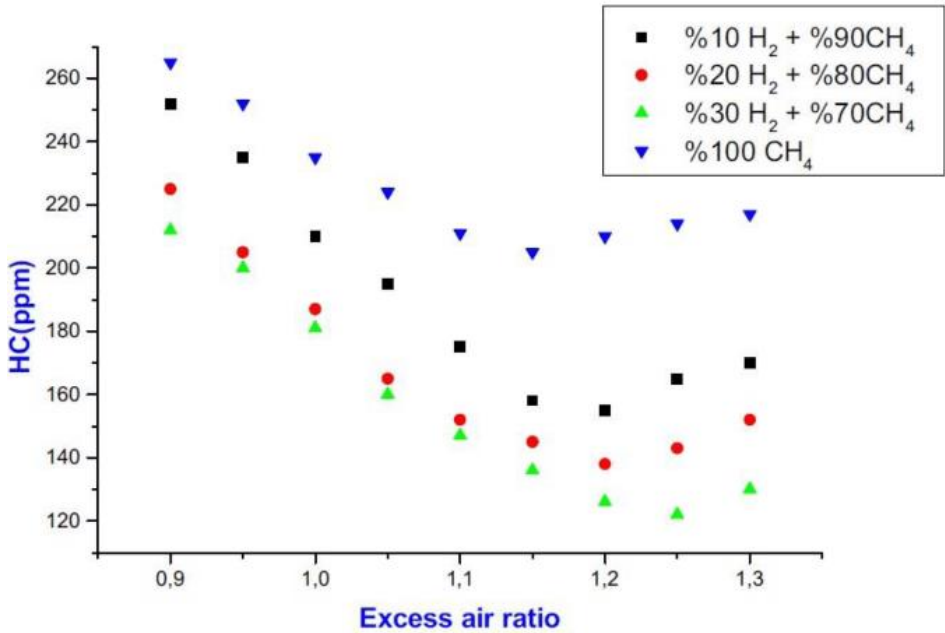
Şekil 6.4. Benzinli motorlarda hidrojen yakıtı kullanılarak CO₂ emisyonunun azaltılması [30].

6.3. Egzoz Gazlarında Yanmamış Karbon Emisyonları

Yanma odası içindeki yanma sürecinde tamamen yanmayan hidrokarbonlar, egzoz gazlarında yanmamış hidrokarbon (UHC) yayacaktır [15]. Belirtildiği gibi yakıtta hidrojen eklenmesi karışımı homojenleştirecek ve alev hızını artıracaktır. Ayrıca hidrojen yakıtında hidrokarbon bulunmadığından yanmalı motor yakıtlarına eklenmesi yanmamış hidrokarbon emisyonunu azaltacaktır. Dizel ve benzinli motorlar için yanmamış hidrokarbon emisyonlarının azalması Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da görülmektedir.



Şekil 6.5. Dizel motorlarda hidrojen yakıtı kullanılarak UHC emisyonlarının azaltılması [37].

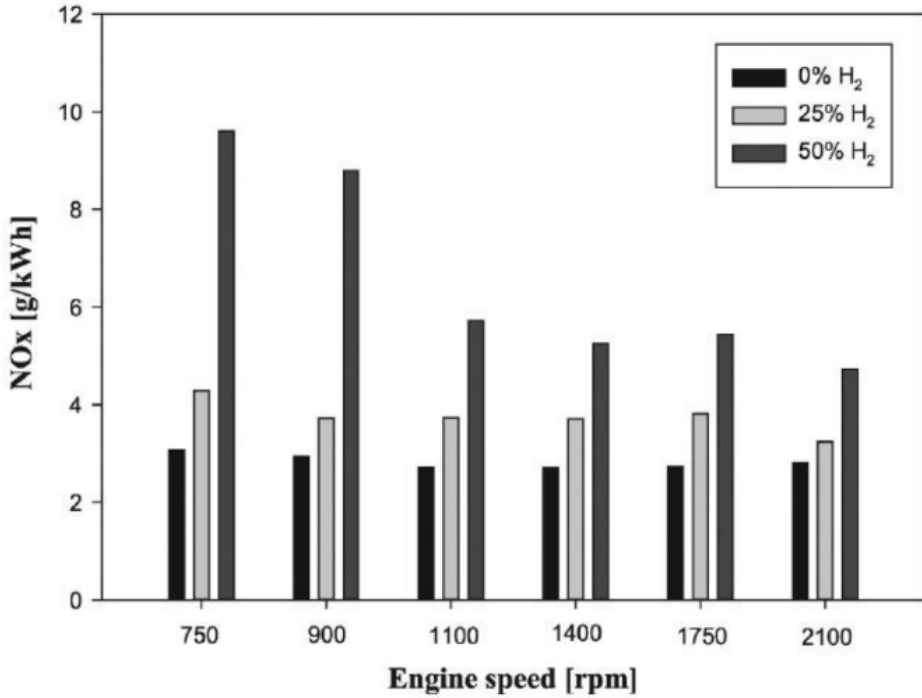


Şekil 6.6. Benzinli motorlarda hidrojen yakıtı kullanılarak UHC emisyonlarının azaltılması [30].

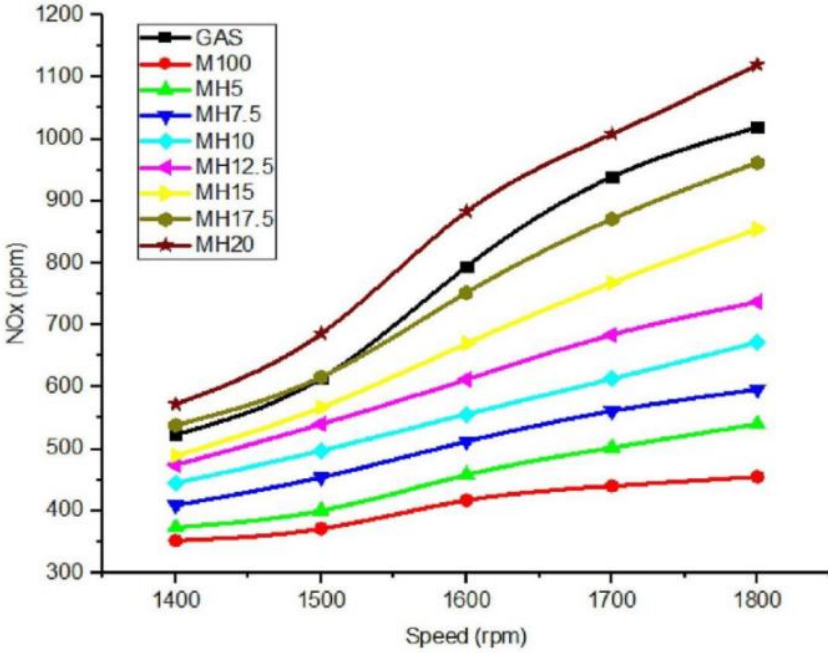
6.4. NOx Emisyonları

Azot oksitler, yanma odasındaki yanma işlemi sırasında elde edilen yüksek sıcaklıklar nedeniyle üretilir. Havadaki nitrojenin bir kısmı ısı varlığında oksijenle birleşir. Hava/yakıt oranı, sıkıştırma oranı, motor devri, ateşleme zamanlaması ve termal seyreltme, üretilen NOx miktarı üzerinde etkiye sahiptir [52].

Hızlı alev hızı, düşük tutuşma enerjisi gereksinimi ve yüksek adyabatik sıcaklık gibi özellikleri nedeniyle hidrojen yanmaya uygun bir yakıt olarak kabul edilmektedir. Bu özellikler silindir içindeki çalışma akışkan sıcaklığının artmasına ve aynı zamanda NOx'in artmasına neden olmaktadır. (Şekil 6.7 ve Şekil 6.8).



Şekil 6.7. Dizel motorlarda hidrojen yakıtı kullanıldığında NOx emisyonlarının artması [32].

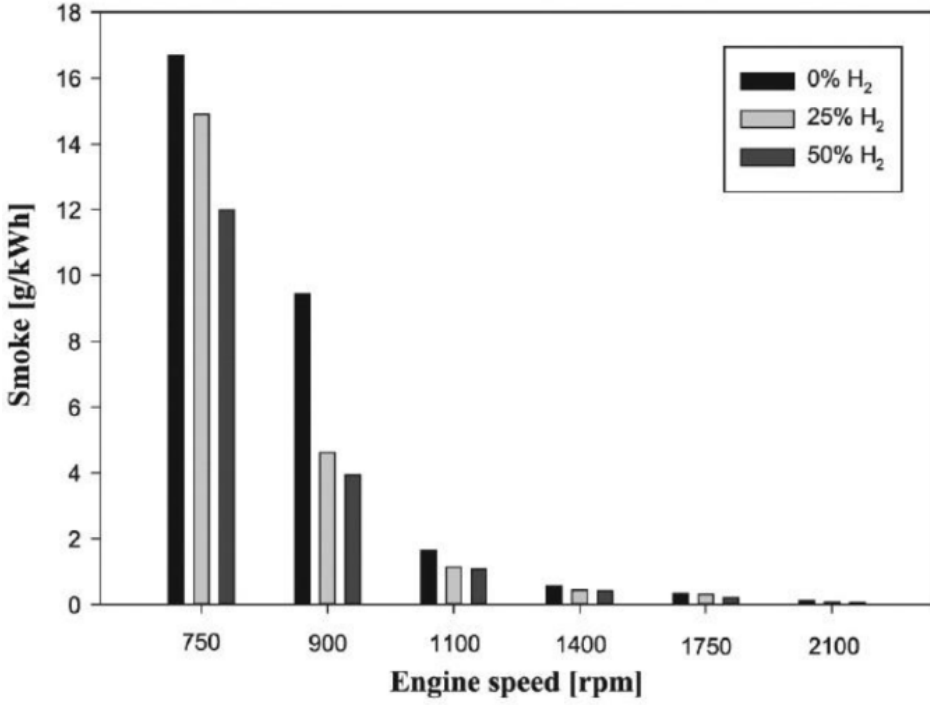


Şekil 6.8. Benzinli motorlarda hidrojen yakıtı kullanıldığında NOx emisyonlarının artması [37].

6.5. Kurum Emisyonları

Kurum emisyonu dizel motorlara özeldir. Dizel motorlarda kullanılan motorin yakıtının yanmasının heterojenin doğasından dolayı, silindir içinde yakıt/hava oranlarının geniş bir dağılımı vardır. Kurum oluşumu esas olarak yakıt açısından zengin bölgede yüksek sıcaklık ve yüksek basınçta meydana gelir. Kurum, kendiliğinden tutuşamayacak veya yayılan bir alevi destekleyemeyecek kadar zayıf olan yakıt-hava karışımlarının tipik bir örneğidir. Ayrıca tutuşamayacak kadar zengin yakıt-hava karışımlarından da kaynaklanabilir [15].

Yüksek hidrojen emisyon katsayısı ve yakıtın oksijene büyük erişimi, yanıcı karışımın homojenliğini ve toplam yakıttaki H/C miktarını artıracak ve bu da dizel motorlarda is oluşumunu azaltacaktır [53]. Şekil 6.9'da, dizel motorlarda hidrojen kullanılarak kurum azaltımının örneklerini göstermektedir.



Şekil 6.9. Dizel motorlarda hidrojen yakıtı kullanıldığında NO_x emisyonlarının artması [15].

7. HİDROJEN YAKITI İÇİN TASARLANAN MOTORLARDA DİKKAT EDİLMESİ GEREKEN ÖNEMLİ ÖZELLİKLER

Yakıt olarak hidrojenin kullanıldığı motorlarda veya dönüşüm amacıyla kullanılan motorlarda bazı bileşenlerin sisteme uyarlanması önemlidir. Hidrojenin kullanımına ve yöntemine bağlı olarak bu motorlarda bazı yapısal özellikler dikkate alınmazsa istenilen verim alınamayacaktır.

7.1. Bujiler

Hidrojen yakıtının yüksek alev hızı nedeniyle erken yanmayı ve geri tepmeyi önlemek için düşük elektrot sıcaklığına sahip soğuk bujiler kullanılmalıdır. Ayrıca bujinin elektrodu hidrojen oksidasyonuna neden olmayacak malzemeden yapılmış olmalıdır [54].

7.2. Yüksek Sıcaklık Noktaları

Hidrojen yakıtlı motorlarda yanma odasındaki yüksek sıcaklıktaki sıcak noktalar anormal yanmaya neden olur ve motorun gücü düşer. Bu olumsuz durumun yaşanmaması için yanma odasındaki sıcaklığın düşürülmesi gerekmektedir [55]. Yanma odasında sıcak bölgelerin oluşmasını önlemek için emme ve egzoz valflerinin sayısı artırılabilir. Silindir kafası ve valf bölgelerindeki termal yükleri azaltmak için ilave soğutma suyu kanalları açılabilir [55]. Bazı çalışmalarda içten yanmalı motorlarda benzin ve hidrojenin karşılaştırmalı yanma analizi yapılmıştır. Motorların verimliliği, farklı çalışma koşullarındaki test değerleri kullanılarak hesaplanabilir [56].

7.3. Kayganlaştırıcı Yağ

İçten yanmalı motorlarda yakıt ve yağlama sistemi hem motordan elde edilen karakteristik değerleri hem de motorun servis ömrünü etkilemektedir. Motorlarda kullanılan yakıtın yanması sonucu yağlama yağının bazı özellikleri bozularak sistemi olumsuz etkileyebilir. Hidrojen yakıtlı içten yanmalı motorların özelliklerine göre özel yağ kullanılması gerekli olmasına rağmen mevcut şartlarda böyle bir yağ geliştirilememiştir.

7.4. Malzeme Yapısındaki Değişiklikler

Hidrojen kullanan içten yanmalı motorlarda motor malzeme yapısının sünekliği azalır, kırılabilirliği artar. Bunun nedeni hidrojen yakıt karışımının motor yüzeyindeki kimyasal reaksiyonudur [55]. Hidrojenle çalışan motor parçalarının süneklik ve kırılabilirlik özelliklerine göre malzeme seçimi dikkate alınmalıdır.

7.5. Silindirlerde Türbülans Oluşumu

Silindir içerisinde yüksek türbülans oluşturabilen yanma odası yapıları hidrojenin daha hızlı yanmasına neden olabiliyor. Türbülans seviyesine bağlı olarak yanma uzunluğu ve basınç değerleri değişmektedir [57].

7.6. Güç Çıkışı

Hidrojen kullanan motorlarda hacimsel verim ve yakıt enerjisinin yoğunluğu, motordan elde edilecek gücü belirler. Stokiyometrik yakıt/hava oranı kullanıldığında hidrojen motorunun gücünün benzinli motora göre %15 daha yüksek veya %15 daha düşük olduğu görülmektedir. Stokiyometrik yakıt/hava oranıyla çalıştırılan motorlarda yanma sıcaklığının artmasına bağlı olarak egzoz emisyonlarındaki nitrojen oksit seviyeleri de artacaktır. Artan nitrojen oksit seviyeleri motorun gücünü olumsuz etkiler. Bu nedenle hidrojenli motorların güç çıkışının azalmasını önlemek amacıyla benzinli motorlara göre daha büyük hacimli ve turboşarj sistemi ile tasarlanabilir. Sıkıştırma aşamasında yanma odasına hidrojen enjeksiyonu vuruntuyu önler ve motorun gücünü artırır.

7.7. Yağ Karteri Havalandırması

İçten yanmalı benzinli motorlarda hidrojen kullanıldığında, yağ karteri havalandırma sistemi dikkate alınmalıdır. Bu sistemin yokluğunda motorun yağlama sisteminde hidrojen birikebilir [57].

7.8. Emisyon Oluşumu

İçten yanmalı motorlarda hidrojenle zenginleştirilmiş yanma ile egzoz emisyonlarında karbondioksit ve kurum (ppm) minimuma indirilir. Bu nedenle geleneksel petrol türevi yakıtlara alternatif bir yakıt olabileceği düşünülmektedir [58]. Ancak nitrojen oksit seviyesindeki artış, silindir içindeki yanma alevinde yüksek sıcaklık seviyelerine ulaşıldığında meydana gelir. Azot oksit seviyeleri motor hızına, ateşleme zamanlamasına, sıkıştırma oranına ve yakıt/hava oranına bağlı olarak değişir [59].

8. İÇTEN YANMALI MOTORLARDA YAKIT OLARAK HİDROJENİN KULLANIMINDA SON GELİŞMELER

Ulaştırma sektörünün başka enerji taşıyıcılarına ve/veya ana taşıyıcılara ihtiyaç duyduğu açıktır. Şu anda neredeyse tamamen fosil yakıtlara bağımlıdır ve bu da antropojenik karbondioksit ve kirletici emisyonlarına büyük katkı sağlamaktadır. Bu başlı başına alternatif aramak için yeterli bir neden, ancak buna ek olarak rezervler sınırlı olmasına rağmen fosil yakıtların kullanımı hala artıyor, bu nedenle fiyatlar artmaya devam ediyor ve birçok ülke enerji arzını güvence altına almanın yollarını arıyor. Bu durum yenilenebilir enerji ve konvansiyonel olmayan yakıtlara yatırım yapılmasına ve enerji verimliliğini artırmaya yönelik politikaların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Hidrojen, enerjiyi kimyasal olarak depolamanın bir yolu olarak, ilginç bir enerji depolama veya taşıyıcı olarak geliştirilmiştir. Hidrojen üretmenin çok çeşitli yolları ve hidrojenden hiç emisyon olmadan veya çok düşük emisyonla enerji üretme olasılığı göz önüne alındığında, hidrojenin yenilenebilir enerjiyi tamponlamak için kullanılma potansiyeli vardır. Bunun bir yolu, yenilenebilir enerji üretimi enerji talebini aştığında hidrojen üretmek ve talep üretimden (enerji depolama) fazla olduğunda onu tekrar (elektrik) enerjisine dönüştürmektir. Diğer bir yol ise hidrojen üreterek aşırı yenilenebilir enerjiyi telafi etmek ve bunu ulaşım gücü sağlamak için (enerji taşıyıcısı) yakıt olarak kullanmaktır.

Hidrojenin yakıt olarak mevcut olması nedeniyle, onu araçlara güç sağlamak için kullanmanın iki ana seçeneği vardır. Muhtemelen en çok araştırılanlardan biri yakıt hücresiyle çalışan taşıttır (FCV). Hidrojen kullanan yakıt hücreleri, özellikle kısmi yükte (binek otomobiller için önemli) potansiyel verimlilikleri, emisyonları (sadece su buharı), sessiz çalışmaları ve modülerlikleri nedeniyle caziptir. Öte yandan, maliyet ve dayanıklılık kaygıları nedeniyle şu anda taviz veriliyor. İkinci seçenek hidrojenin içten yanmalı bir motorda kullanılmasıdır.

Hidrojenden hareket gücü üretmek için her yerde bulunan içten yanmalı motorun (ICE) kullanılması birçok nedenden dolayı caziptir; belki de en bariz olanı, olgun bir endüstriye ve geniş bir üretim altyapısına güvenme olasılığıdır. İkinci bir avantaj ise içten yanmalı motorların yakıt esnekliğinde yatmaktadır. Motor kontrol ünitesinin uygun şekilde uyarlanması ve farklı yakıtlarla malzeme uyumluluğunun sağlanması koşuluyla bir İYM farklı yakıtlarla çalıştırılabilir. Bu, H₂ ICE'leri hidrojeni ulaşım yakıtı olarak kullanma konusunda öncelikli aday haline getiriyor : yakıt istasyonlarının bir gecede hidrojen pompasıyla genişletilemeyeceği açık; bu nedenle, hidrojenin büyük ölçekte konuşlandırılması durumunda "esnek yakıt" kapasitesine sahip araçlar aşağıdaki olanakları sunuyor: geçiş döneminde kullanıcıya çok daha fazla konfor (örneğin

hidrojen pompası olmadığına benzine geçebilme). Hidrojen altyapısının geliştirilmesine yardımcı olabilecek bu özellik , H2 ICE'nin Enerji Bakanlığı tarafından finanse edilen bir programın konusu olmasının ana nedeniydi (aşağıya bakın).

H2 ICE'nin diğer çekici özellikleri, yakıt hücrelerine kıyasla hidrojen saflığına yönelik gereksinimlerin daha düşük olması ve bu durumun daha ucuz yakıtta yol açmasıdır; ultra düşük emisyon potansiyeli (bu yazıda ölçülmüştür); ve en yaygın yakıtla çalışan içten yanmalı motorlara kıyasla artan tepe ve kısmi yük verimliliği (ayrıca aşağıda daha ayrıntılı olarak açıklanmaktadır). Son olarak, nadir malzemelere dayanmaması [1], potansiyel uygulamasını "boşluğu doldurma" teknolojisinin ötesine genişletebilir. Hem FCV'ler hem de BEV'ler (pili-elektrikli araçlar), ulaşım filosu üzerinde etki yaratmak için gereken büyük miktarlardaki tedarikin, bu alternatiflerin yaygın olarak benimsenmesini potansiyel olarak sınırlayabileceği veya engelleyebileceği malzemelere dayanır. Yakıt hücreleri için darboğaz platinin mevcudiyetidir. Bu malzeme aynı zamanda mevcut yakıt hücrelerinin yüksek maliyetinin de nedenidir; talep arttıkça fiyatların potansiyel olarak daha da artması mümkündür. BEV'ler için nadir toprak elementlerini büyük miktarlarda kullanılabilir hale getirmek zorlu bir iştir. Adlarının aksine, bu elementler o kadar da nadir değildir, ancak üretimlerini artırmanın potansiyel olarak çok yavaş olduğu rapor edilmiştir [2]. Özetlemek gerekirse, H₂ ICE'ler İYM aşağıdakiler için caziptir:

- Yerel kirliliğin azaltılması,
- Küresel karbondioksit emisyonlarının azaltılması,
- mevcut fosil yakıtlı içten yanmalı motorlara kıyasla artan verimlilik; Bunlar yakıt hücresi ile paylaşılan avantajlardır; ve ayrıca onlar gibi:
- yakıt açısından esnek hale getirilebilir,
- Nadir malzemelere güvenmemek, yani büyük miktarlarda ve uygun maliyetle üretilebilmek,
- Yakıttaki yabancı maddelere karşı toleranslıdır, pahalı arıtmaya ihtiyaç duymadan çoğu kaynaktan gelen hidrojeni kullanmalarına olanak tanır,
- motorların yenilenmesi olasılığı ile nispeten kolay bir şekilde takılabilir [60], [61].

Aşağıda yakın zamanda tamamlanan ana araştırma projelerinin kısa bir açıklamasından sonra bu konulardaki ilerlemeler incelenmiştir.

8.1. Son Gelişmeler

8.1.1. Dünya çapında Ar-Ge projeleri

H2ICE'lerle ilgili son çalışmaların ayrıntılarına dalmadan önce, birçok durumda önemli yeni bulguların yayınlanmasının doğrudan bu daha büyük koordineli çabalardan kaynaklandığı gibi, yakın zamanda tamamlanan veya devam eden büyük Ar-Ge projelerine kısa bir genel bakış sunuyoruz.

- Avrupa'da, HyICE adı verilen üç yıllık (2004–2007) Entegre Proje, 100 kW/l'lik spesifik güç çıkışını ve %42'lik tepe verimliliğini aşan motor konseptlerinin gösterilmesiyle sonuçlandı . Proje, Avrupa Komisyonu'nun 6. Çerçeve Programı kapsamında finanse edildi ve BMW tarafından koordine edildi. Endüstriyel ve akademik ortaklardan oluşan konsorsiyum, hidrojenin tek ve çok silindri motorlardaki potansiyelini DI ve kriyojenik PFI ile araştırdı; 1D ve CFD modelleme araçlarını geliştirdi; DI enjektörleri ve motorlardaki hidrojen yanmasının özelliklerini aydınlatmak için optik ölçüm tekniklerini inceledik. Proje, bu inceleme makalesinin başlangıç noktası olarak bahsettiğimiz noktadan önce gelse de, bir dizi araştırma yönünü başlattığı ve bu nedenle son çalışmaların çoğunun temellerini attığı için açıkça bahsedilmektedir.

Avrupa'daki diğer bölgesel faaliyetler, binek araçlarının [62], [63] (Şekil 1, dönüştürülmüş bir VW Polo'yu göstermektedir [62]) ve bir forkliftin H2 ICE çalışmasına dönüştürülmesiyle sonuçlanmıştır (bkz . Şekil 8.1), gösteri programları çerçevesinde.

- Japonya'daki çalışma , Arazi, Altyapı ve Ulaştırma Bakanlığı'nın (MLIT) Yeni Nesil Çevre Dostu Araç Geliştirme ve Ticarileştirme Projesi (EFV21) kapsamında desteklendi. Bu proje, Ulusal Trafik Güvenliği ve Çevre Laboratuvarı (NTSEL) tarafından koordine edildi ve 2005 ile 2010 yılları arasında iki dönemde yürütüldü. Ağır hizmet motorlarından kaynaklanan CO2 emisyonlarını azaltmayı amaçladı ve FCV veya BEV'lerin aksine H₂ ICE'lere odaklandı . Yüksek spesifik güç çıkışları elde etmek için. Bu, DI enjektörlerinin geliştirilmesi, tek silindri motorlarda (metal ve optik) yanma stratejilerinin haritalandırılması, çok silindri bir motorun proje hedef güç çıkışına göre değerlendirilmesi ve NOx emisyon standartlarına ulaşmanın farklı yollarına bakılmasıyla sonuçlandı [64]–[67].

- ABD'de, 2004 ve 2011 yılları arasında, Enerji Bakanlığı'nın FreedomCAR ve Araç Teknolojileri Programına bağlı Enerji Verimliliği ve Yenilenebilir Enerji Ofisi, Argonne ve Sandia Ulusal Laboratuvarlarında belirli zirve ve kısmi yük verimliliklerine ve NOx emisyonlarına ulaşmayı hedefleyen çalışmalara sponsor

oldu . Bu hedeflere ulaşmak için metal ve optik tek silindirli motorlar üzerinde sayısal çalışmalar (CFD simülasyonları) ile desteklenen deneysel çalışmalar yapılmıştır. [68]–[76].



Şekil 8.1. Hidrojen Bölgesi Flanders – Güney Hollanda projesi kapsamındaki gösteri faaliyetlerinin bir parçası olan H 2 ICE ile donatılmış forklift kamyonu.

Bu projelerin dışında, diğer bazı daha küçük araştırma çalışmaları (katılımcı ekip açısından) ve tanıtım faaliyetlerinden bahsetmeye değer:

- NTSEL projesi kapsamında gerçekleştirilen çalışmalara paralel olarak Tokyo Şehir Üniversitesi de 2 hidrojenli aracın gösterimini sağlayan araştırmalara dahil oldu. Iwasaki ve ark. [11] 2 motorun hidrojenle çalışan turboşarjlı PFI çalışmasına dönüştürüldüğünü bildirmektedir. Bunlar, hibrit güç aktarma organına sahip (düşük hız torkunu doldurmak için kullanılan elektrikli tahrikli) hafif hizmet tipi bir kamyonunda kullanıldı , bkz . Şekil 8.2 ve bir 'mikrobüs'te (19 yolcu, bkz. Şekil 8.3), ikincisi hizmet veriyordu. 2 yıldan fazla süredir hizmet veriyor ve yayınlandığı tarihte 15.000 km'den fazla yol kat ediyor

(Mart 2013'te hizmet dışı bırakıldı - kişisel iletişim). NOx oluşumunu önlemek için yalın çalışma kullanıldı , böylece son arıtmaya gerek kalmadı; ve turboşarj, daha önce bildirilen bir stratejiye göre, kullanılan fakir karışımlardan kaynaklanan güç kaybının çoğunu geri kazandı [55][77] . Her iki araç da JE05 test döngüsünde test edildi ve Japonya Yeni Uzun Vade Sonrası Yönetmeliğinin çok altında NOx emisyonları saldı. Yazarlar, öncelikle ateşleme sistemindeki değişiklikler yoluyla, anormal yanmanın (özellikle geri tepmenin) önlenmesine yönelik önlemlerin geliştirilmesine çok fazla çalışma adadılar. Makalelerinin son sonucu şu şekildedir: " Bu çalışma için hidrojen motorları ve hidrojen araçları, mevcut parça ve tekniklerin birleştirilmesiyle, dayanıklılık ve güvenilirlik açısından arzu edilen hiçbir şeyi bırakmadan üretildi. Düşük maliyetle üretilebildiklerinden, bunların alternatif bir motor olarak ticari bir araçla pratik kullanıma kolaylıkla konulabileceğine inanılmaktadır", bu da bölüm 1.1'deki son maddeyi onaylamaktadır.



Şekil 8.2. Tokyo Şehir Üniversitesi tarafından gösterilen, 4 L 91 kW hidrojen motorla donatılmış hibrit hafif hizmet kamyonu. Telif hakkı sahibi Tokyo Şehir Üniversitesi tarafından verilen çoğaltma izni.



Şekil 8.3. Tokyo Şehir Üniversitesi tarafından gösterilen 4,7 L 105 kW hidrojen motoruyla donatılmış Microbus. Telif hakkı sahibi Tokyo Şehir Üniversitesi tarafından verilen çoğaltma izni.

Dennis ve ark. [78], Melbourne Üniversitesi ve Avustralya Ford Motor Company tarafından hidrojen işletimine dönüştürülen bir PFI motoru üzerinde gerçekleştirilen çalışmanın bulgularını yayınladı. Temel strateji Iwasaki ve arkadaşlarının kullandığı stratejiyle aynıdır. Zayıf yanmalı turboşarjlıdır, ancak hem emme hem de egzozda tamamen değişken valf zamanlaması sayesinde hava akışı üzerinde ek kontrol sağlanır. Dolayısıyla bu çalışma, stratejiyi optimize etmek için değişken bir emme valfi zamanlamasının kullanımına odaklanan diğer çalışmalara kıyasla, gaz dinamikleri ve hava akışının fren termal verimliliği (%38'e kadar) ve geri tepme oluşumu üzerindeki etkilerine ilişkin yeni bilgiler sunmaktadır. Yüksek yükler talep edildiğinde zayıf yanmalı tamamen açık gaz kelebeği işleminden stokiometrik kısmalı çalışmaya geçilir [79].

• Hindistan'ın Delhi kentinde, 15 adet hidrojen yakıtlı üç tekerlekli araç (çekçek) piyasaya sürüldü [80]. Bu, Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Örgütü'nün (UNIDO) Uluslararası Hidrojen Enerjisi Teknolojileri Merkezi (UNIDO-ICHET) ve Hindistan Teknoloji Enstitüsü - Delhi, Hava Ürünleri, Hindistan Ticareti Teşvik Organizasyonu tarafından ortaklaşa finanse edilen bir pilot projesi kapsamında gerçekleştirildi.

(ITPO) ve Mahindra&Mahindra proje ortağı olarak yer alıyor. 15 aracın 10'u yolcu, 5'i ise yük taşımaya yönelik. Orijinal tek silindirli, hava soğutmalı, karbüratörlü çift yakıtlı benzinli/CNG motorlar, geri tepmeyi önlemek için nispeten zayıf karışımlar kullanılarak elektronik olarak kontrol edilen PFI hidrojen çalışmasına dönüştürüldü. Açıkçası, hidrojenle çalıştırma, orijinal karbüratörlü motorlarla (son arıtma olmadan) karşılaştırıldığında tüm kirletici emisyonları büyük ölçüde azalttı.

Bu çalışmalar PFI motorları konusunda da ilerleme kaydedildiğini göstermektedir. Yeterli güç çıkışı sağlarken NOx oluşumunu kısıtlamaya yönelik alternatifler de örneğin Younkins ve diğerleri tarafından rapor edilmiştir. Bir PFI motoruna doğrudan su enjeksiyonunun NOx azaltma potansiyelini araştıran [81], belirli bir NOx limitinde bmep'te % 20'lik bir artışın mümkün olduğunu bildirmiştir.

8.1.2. Araştırma Temaları

Aşağıdaki bölümlerde rapor edilen çalışmaların çoğu, yukarıda bahsedilen büyük projelerden biri çerçevesinde gerçekleştirildi. Son zamanlardaki ilerlemeler birkaç araştırma teması altında toplanabilir: doğrudan enjeksiyon, silindir içi ısı transferi, modelleme ve yanma stratejileri (hem motor hem de araç düzeyinde). Verhelst ve Wallner [55], tarafından öne sürülen ve yukarıda özetlenen, daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyan alanlar listesiyle karşılaştırıldığında, temel özelliklere ilişkin veri setinin artırılmasında çok az ilerleme kaydedilmiştir. Hidrojen karışımlarının laminer yanma hızını belirlemek için daha fazla çalışma yapıldı, ancak bu çoğunlukla kimyasal kinetik hesaplamalardan [82]–[84] korelasyonlar oluşturmayı, daha önce bildirilen koşullara [82] daha ayrıntılı bakmayı veya tekrarlamayı içeriyordu. Verileri daha motor benzeri koşullara genişletmek yerine diğer ölçüm teknikleri [85] ile koşullar. Bu koşullarda doğru ölçümlere yönelik zorlukların üstesinden gelmenin oldukça zor olduğu kanıtlanmıştır [55].

Son araştırmaların genel odak noktası öncelikle motor verimliliği ile NOx emisyonları arasındaki dengeyi geliştirmek olmuştur. Daha önce incelenen yük kontrol stratejilerine atıfta bulunarak [55], eğer homojen karışımlar kullanılıyorsa, NOx kontrolü ya yalın çalışmaya (çoğunlukla hava-yakıt eşdeğerlik oranının λ 2'nin üzerinde) ya da stokiyometrik karışımların kullanılmasına ve NOx'in azaltılmasına dayanır. emisyonları üç yollu bir katalizörde (veya daha kesin olarak: NOx'i azaltmak için iz H₂ kullanan iki yönlü bir katalizörde). Bununla birlikte, zayıf çalışma, nispeten yavaş yanmadan muzdarip olan belirtilen verimliliklerin yanı sıra, mekanik verim oldukça düşük olacağından verimliliği azaltan düşük bir özgül güç çıkışı anlamına gelir. Yine de verimlilikler benzine göre daha yüksek olabilir [78], [86]. $\lambda = 1$ 'de çalışmak ayrıca nispeten düşük verimliliğe yol açar veya her durumda benzinden [86] daha yüksek değildir; bu, ısı kayıplarına atfedilir ve aşağıda daha ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

Enjeksiyon zamanlaması aynı zamanda PFI motorlarının performansını da etkilerken [87], DI çalışması için açıkça daha büyük bir etkiye sahiptir. Doğrudan enjeksiyon, yanmayı az çok sınırlı tutma, yanma odası duvarlarından uzak tutma ve ısı kaybını azaltma teorik olanaklarını sunar; nispeten zengin karışımlar kullanıldığında daha düşük NOx için veya nispeten zayıf karışımlar için daha hızlı yanma için yakıt /hava karışımlarının katmanlaştırılması. Bir sonraki bölümde teoriyi uygulamaya koymak için yapılan çalışmaların bir incelemesi sunulacaktır.

(Çok) fakir karışımlar için yanmayı hızlandırmanın, NOx oluşumunu önlerken verimliliği artırmanın bir başka yolu da homojen şarj sıkıştırılmalı ateşlemedir (HCCI). H2 üzerinde HCCI işlemi, yüksek kendiliğinden tutuşma sıcaklığı nedeniyle basit olmaktan uzaktır. Lee ve ark. [88], HCCI koşulları altında H2 üzerinde bir motoru çalıştırmayı başardılar , ancak bu, son derece yüksek sıkıştırma oranları (42'ye kadar) gerektirdi ve yalnızca çok dar bir eşdeğerlik oranı penceresi dahilinde mümkün oldu. Bu pencere, vuruntulu yanma veya geri tepme nedeniyle zengin tarafta, başarılı ateşlemenin olmaması nedeniyle zayıf tarafta sınırlıdır. HCCI motorunu etkinleştirmek için gereken özel motor ve dar çalışma aralığı, H2 HCCI işleminin herhangi bir çalışma stratejisinin parçası olabilmesi için daha gidilecek uzun bir yol olduğu anlamına gelir . Aleiferis ve Rosati, hidrojenin kendiliğinden tutuşmasını sağlamak için negatif valf örtüşmesini (dahili EGR seviyelerini %42'ye kadar arttırarak) ve havanın ön ısıtmasını kullandı [89]. Yazarlar, bu koşullarda bile, ateşleme meydana geldikten sonra alev yayılımının hala mevcut olduğunu göstermek için OH LIF ölçümlerini kullandılar ve bu da onların HCCI'den daha iyi bir isim olarak kontrollü otomatik ateşleme (CAI) terimini tercih etmelerine yol açtı.

8.1.3. Direkt Enjeksiyon

Verhelst ve Wallner [55] tarafından ayrıntılı olarak açıklandığı gibi , doğrudan enjeksiyon, hidrojen motorlarının güç yoğunluğunu artırma ve anormal yanmanın (özellikle geri tepme) meydana gelmesini önleme olanağı sunmaktadır. Daha önceki inceleme yazılarında bu avantajların kanıtlandığı zaten bildirilmişti. Önceki bölümde bahsedildiği gibi, sonraki çalışmalar çoğunlukla verimlilik-NOx dengesinin iyileştirilmesine odaklandı. Bölüm 8'de listelenen projelerin başlangıcında bazı iddialı hedefler belirlendi:

- DOE programı %45'lik bir tepe fren termal verimliliği (BTE) göstermeyi amaçladı; Kısmi yük noktası 1500 rpm'de 2 bar fren ortalama etkin basıncına (bmep) ayarlanmış olarak %31'lik kısmi yük BTE'si; ve “Tier II Bin 5” emisyonları (NOx emisyonlarını 0,07 g/mil ile sınırlandırır).

- NTSEL projesi, JE05 geçici emisyon test döngüsünde 0,5 g/kWh'den daha az NOx ile seçilen 4 silindirli doğal emişli motordan 100 kW'lık bir tepe güç çıkışı hedefledi.

Bu hedeflerin karşılanması, çeşitli yanma stratejilerinin araştırılması, sabit hacimli yanma odalarındaki optik ölçümler ve optik olarak erişilebilir motorlar ve karışım oluşumunun CFD simülasyonları ile DI yanmasının derinlemesine bir çalışmasını gerektirdi. Bunun yanı sıra, maksimum akış hızlarını ve dayanıklılıklarını artırmak için hidrojen DI enjektörlerinin geliştirilmesine yönelik daha fazla çalışma yapıldı . Bu konular aşağıdaki bölümlerde tartışılacaktır.

8.1.4. Hidrojen Yakıtlı Motorlarda Karışım Oluşumunu Ve Yanmayı Ölçmek İçin Optik Teknikler

Hidrojen motorlarında karışım oluşumu ve yanmanın anlaşılmasını ilerletmeye yönelik son katkılar gözden geçirilmeden önce, öncelikle bu ilerlemeyi mümkün kılan bazı ölçüm tekniklerinin kısa bir tanımını vereceğiz.

Kısmen HyICE projesi kapsamında, hidrojenle çalışan DI motorlarında karışım oluşumunu incelemek için lazer kaynaklı floresans (LIF) teknikleri geliştirilmiştir [90], [91] . İzleyici olarak aseton [92]–[94] trietilamin ve trimetilamin [90] kullanılmıştır. Bu teknik, karışım tabakalaşmasının kapsamını belirlemek amacıyla yerel hidrojen konsantrasyonlarını ve dolayısıyla yerel eşdeğerlik oranını belirlemek için kullanılır. Salazar ve ark. [94], kesinliğini ve doğruluğunu artırmak için aseton izleyiciyi kullanarak kantitatif düzlemsel LIF yöntemini ayrıntılı olarak inceledi.

Shudo ve Oba [95], hidrojen konsantrasyonu dağılımını ölçmek için LIBS tekniğini, lazer kaynaklı arıza spektroskopisini geliştirdi. Yöntemin fizibilitesini test etmek için, ilk olarak DI enjektörle donatılmış, optik olarak erişilebilen sabit hacimli bir yanma kabında kullanıldı. Ölçülen spektrum daha sonra eşdeğerlik oranı atomik emisyon yoğunluk oranıyla ilişkilendirilerek kalibre edildi.

Roy ve diğerleri [96], LIBS tekniğinin daha da geliştirilmiş hali olan 'SIBS' veya kıvılcım kaynaklı arıza spektroskopisi kullanarak yerel eşdeğerlik oranlarını belirlediler. Burada ışık kaynağı olarak kıvılcımın kendisi kullanılır ve buji aralığındaki eşdeğerlik oranı tahmin edilebilir. Spektrum , bujinin merkez elektroduna yerleştirilmiş bir optik fiber yoluyla ölçülmüştür ; bu, prensip olarak bu tekniği , üretim motorlarında ateşleme zamanlamasında kıvılcım aralığındaki eşdeğerlik oranının ölçülmesi için uygun kılar . Tekniğin nispeten büyük deneysel belirsizliği olmasına rağmen, ölçülen yerel eşdeğerlik oranı ve varyasyon katsayısı, aşağıda bildirilen alev görüntüleri ve ısı salınımı analizinden elde edilen bulguları doğruladı.

8.1.5. DI Enjektörleri

Hidrojen için DI enjektörlerindeki gelişme başka bir yerde özetlenmiştir . NTSEL projesindeki hedeflerden biri , 200 bar'a kadar enjeksiyon basıncı sağlayabilen, elektrohidrolik olarak çalıştırılan bir enjektörün geliştirilmesiydi . Bu gelişme

Yamane ve ark. [64], aynı zamanda bir enjektör test standında yapılan ve bir motora monte edilen testler de dahil olmak üzere birkaç yüz saatlik başarılı dayanıklılık testlerini de bildirmektedir. Bir diğer önemli gelişme, önceki solenoidle çalıştırılan enjektörlerle karşılaştırıldığında daha hızlı çalıştırılması sayesinde ilave optimizasyon özgürlüğü sağlayan bir piezoelektrik enjektörün tanıtılması olmuştur (aşağıda daha ayrıntılı olarak ele alınmıştır).

8.1.6. DI Motorlarda Karışım Oluşumunu Ve Yanmayı Anlamak

Tek silindirli DI motorlarda değişen enjeksiyon başlangıcı (SOI) zamanlamasıyla yapılan ilk ölçümler, verimlilik ile NOx emisyonları arasındaki dengenin, ateşleme zamanlamasına (IT) göre SOI'nin dikkatli bir şekilde haritalanması yoluyla iyileştirilebileceğine işaret etti [63] karışım oluşum sürecinin ve ardından gelen yanmanın daha ayrıntılı olarak anlaşılması istendi. Bir dizi makale optik ölçümlere dayalı katkılar bildirdi.

Yukarıda bahsedilen DOE projesi kapsamında Sandia Ulusal Laboratuvarları, DI motorlarında karışım oluşumunu ve ardından gelen alev yayılma süreçlerini aydınlatmak için hidrojenle çalışan tek silindirli bir optik motor çalıştırdı. İlk olarak motordaki silindir içi akış alanı PIV [97] kullanılarak karakterize edildi . Bu ilk çalışma aynı zamanda hidrojenin doğrudan enjeksiyonunun bu akış alanı üzerindeki derin etkisini ve jet duvarı etkileşiminin önemini de gösterdi. Karışım oluşumuna odaklanan sonraki çalışma ve enjeksiyon zamanlamasının, farklı nozül tasarımlarının , enjektör konumunun (yan veya merkezi) ve tambur oranlarının etkisi hakkında ortaya çıkan eşdeğerlik oranı dağılım raporları [72], [74], [92], [93] çok detaylı. Bu çalışma, daha önce Argonne Ulusal Laboratuvarı'nda çalıştırılan, aynı geometriye sahip tamamen metal tek silindirli motorda elde edilen kararlı çalışmayla sonuçlanan enjeksiyon zamanlama aralığının açıklanmasına yardımcı oldu [98]. Geç DI boyunca tabakalaşmanın, bazı durumlarda bujinin bulunduğu yerde yetersiz yakıtı neden olarak dengesiz çalışmaya neden olduğu gösterilmiştir. Ayrıca doğrudan enjeksiyonun silindir içi akış alanı ve emme kaynaklı tambur akışıyla nasıl etkileşime girdiğini de gösterdi [74], [92]. Son olarak, hidrojen jeti ile tambur oranı arasındaki etkileşimin alev yayılımı üzerindeki etkisi anlatılmıştır [72]. Bu durum, benzinli motorlarda olduğu gibi, başlangıç alev hızının ana yanma fazı ve yanma stabilitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. İlginç bir şekilde, üst ölü nokta (TDC) çevresinde küçük ölçekli türbülans oluşması yoluyla yanmayı hızlandırdığı varsayılan herhangi bir takla arızasına ilişkin doğrudan bir kanıt bulunamadı.

Wimmer ve ark. [98] ve Shudo ve Oba [95], silindir duvarlarına ısı transferinin azaltılmasının verimliliğin artırılması için bir ön koşul olduğuna dikkat çekmişlerdir . Bu genel ve mantıklı bir ifade gibi görünse de, bir sonraki bölümde daha ayrıntılı

olarak açıklanacağı üzere, hidrojen durumunda özellikle önemlidir. Shudo ve Oba, bujiye yakın yüksek eşdeğerlik oranları (ortalama eşdeğerlik oranına göre) ve duvarlara yakın düşük eşdeğerlik oranları ile karışımı katmanlaştırmak için doğrudan enjeksiyonun nasıl kullanılabileceğini araştırdılar. Farklı enjeksiyon stratejileriyle elde edilen eşdeğerlik oranı dağılımına bakmak için LIBS tekniğini kullandılar. Hidrojen metandan daha hızlı yayılırken, bölünmüş enjeksiyonun (iki fazda hidrojen enjektöre edilmesi) difüzyonu yavaşlatmak için kullanılabilmesini ve tabakalaşmayı iyileştirmeye yönelik bir strateji olarak umut verici görüldüğünü buldular.

Wallner ve diğerleri tarafından açıklanan erken ve geç DI, kıvılcımdan önce veya sonra çoklu DI vb. dahil olmak üzere çeşitli DI enjeksiyon stratejileri [99] , bir dizi makalede deney konusu olmuştur. Farklı stratejileri ayırt etmek için çeşitli isimler kullanılmıştır. Oikawa ve ark. [100] bir enjeksiyon olayı sırasında veya hemen sonrasında zengin karışım dumanının tutuşmasını ifade eden bir "duman ateşlemeli yanma konsepti" (PCC) hakkında konuşuyorlar. Roy ve diğerleri [101] çeşitli olasılıklar için 'kuyruktan ateşleme', 'geç ateşleme', 'merkezden ateşleme' ve 'kafadan ateşleme' terminolojisini kullanır. Her iki durumda da, karbon eksikliği nedeniyle kurum alevi korkusu olmadığından, hidrojen DI ile benzersiz bir yetenek olan, çok zengin bir karışımı tutuşturma seçeneğine bakılır. Hala güvenilir tutuşma ve yanma kapasitesine sahip son derece zengin karışımlarla birlikte geniş yanıcılık sınırları [55], bu stratejinin başka bir kolaylaştırıcısıdır.

Shioji ve ark. SOI'ye göre değişen zamanlarda ve enjektöre göre değişen konumda ateşlenen hidrojen jetlerine ilişkin temel verileri sağlayan ilk kişiler arasındaydı [102]. Isı salınım oranlarını hesaplamak için anlık basıncı kaydetmenin yanı sıra, alev gelişimini gözlemlemek için yüksek hızlı gölge grafiğini kullandılar. Sonuçlar, verimliliği ve emisyonları optimize etmek için bir DI sisteminin sunduğu serbestlik derecelerini kullanma potansiyelini gösterdi.

Yukarıda adı geçen NTSEL projesi kapsamında, bu kavramın daha fazla araştırılması için büyük çaba harcandı. Oikawa ve ark.[100] , tek ve çok delikli olmak üzere farklı enjektör nozullarını kullanarak, optik olarak erişilebilen bir motordaki ölçümleri rapor etmektedir. Enjektör, jet bujiye doğru yönlendirilecek şekilde bujiye yakın monte edildi. Karışımın enjeksiyonun bitiminden kısa bir süre sonra ateşlenmesinin, SOI'ye göre ateşlemeyi ilerletme yoluyla daha fazla potansiyel ile verimlilik üzerinde minimum etkiyle NOx emisyonlarını önemli ölçüde azalttığı gösterilmiştir. Belki daha da önemlisi, deneyler bu teknikle yapılan dengelemelerin anlaşılmasına yardımcı oldu. Örneğin jetin ateşlenmesi, yüksek jet hızlarından dolayı alevin yanma odası duvarlarına çarpmasına neden olabilir . Bu, ısı kaybını artırır ve verimliliği azaltır. Öte yandan jet hızının çok düşük olması durumunda alev enjektör tarafına da yayılabilir ve alevin duvarlara yakınlığı nedeniyle yine ısı kaybını artırabilir. Ayrıca, yanmamış hidrojen aşırı zayıf bölgelerden kaynaklanabileceği ve

bu da verimliliği azaltacağından, yanma verimliliğini korumak için dikkatli olunmalıdır. Bu çalışmanın bulguları, aşağıda daha ayrıntılı olarak ele alındığı gibi, proje hedeflerine ulaşmak için motorun optimize edilmesine katkıda bulunmuştur.

Roy ve diğerleri. [101], her ikisi de optik olarak erişilebilen sabit hacimli bir yanma odası ve tek silindirli bir motor üzerinde jet nüfuzu, alev yayılımı, basınç ve ısı salınım hızı ölçümlerini rapor etmektedir. Yanma odasındaki ölçümler, yakıt enjeksiyon basıncı ve ortam basıncının bir fonksiyonu olarak jet özelliklerini (penetrasyon ve koni açısı) belirlemeyi hedefledi. Motorda yapılan müteakip ölçümler, ateşleme zamanlamasına göre değişen enjeksiyon zamanlaması için alev ve basınç gelişimini kaydetti. Alev gelişimi, farklı enjeksiyon modları arasındaki erken çekirdek büyümesindeki farklılıkların incelenmesine olanak tanıyan doğrudan yanma görüntülerinden elde edildi. Enjeksiyonun ÜÖN'de sona erdiği ve ateşlemenin ÜÖN'de meydana geldiği 'kuyruk ateşleme' durumu, en hızlı alev yayılmasına ve en kararlı yanmaya yol açtı.

Son olarak, Aleiferis ve Rosati, hidrojenin doğrudan enjeksiyonunun silindir içi akış alanı ve bunun sonucunda ortaya çıkan yanma üzerindeki etkisine ilişkin anlayışımızı ilerletmeye önemli bir katkıda bulundular [103]. Hidrojenin alev yayılımını incelemek ve benzinle karşılaştırmanın yanı sıra PFI ile DI işlemini karşılaştırmak için kemilüminesans ve lazer kaynaklı floresans (LIF) kullandılar. Alev görüntüleri, literatürde bildirilen değerlerle karşılaştırılan yanma hızlarını elde etmek için işlendi. Bildirilen vakaların çoğunda, DI vakaları için SOI, giriş valflerinin kapanmasından hemen sonraydı, yani ateşleme sırasında oldukça homojen bir karışım anlamına gelen erken enjeksiyon stratejisi.

Temel bulgulardan bazıları aşağıdaki gibidir. İlk olarak, benzine kıyasla hidrojen için alev yayılımının doğada çok daha küresel olduğunu ve bunun, hidrojenin daha yüksek yanma hızlarıyla açıklanabileceğini ve alevin silindir içi kütle akışından daha az etkilenmesine yol açtığını belirttiler. Bu aynı zamanda benzinle karşılaştırıldığında daha az döngüsel değişkenlik anlamına geliyor ve bu da ölçümlerle doğrulanıyor. İkinci olarak, en yüksek alev genleşme hızları, benzinle karşılaştırıldığında hidrojenle oldukça yüksekti: PFI durumu için, 10-20 m/s aralığında. (hidrojen) 8-12 m/s ile karşılaştırıldığında (benzin); DI durumunda bunlar daha da yüksekti; 35 m/s'yi aşıyordu.

. Alev genleşme hızları ayrıca işlenerek karşılık gelen yanma hızlarının tahminleri elde edildi. Hidrojenin PFI değerleri, sabit hacimli yanma odalarındaki yanma için bildirilen değerlere oldukça iyi karşılık gelirken, DI değerleri çok daha yüksekti. Bu, yazarların DI durumunda, yüksek hızlı gaz jetinin silindir içi akış ve türbülans üzerinde derin bir etkiye sahip olması ve yanmayı büyük ölçüde hızlandırması gerektiğini öne sürmesine yol açtı. SOI'nin geciktirilmesi üzerine alev büyümesinin daha da hızlı olduğu gözlemlendi.

PFI ve DI arasındaki farkın belki de en azından kısmen yazarlar tarafından kullanılan metodolojiye bağlı olduğu unutulmamalıdır. Motor devri ve emme basıncı sabitlendi. Benzin için bu yaklaşım haklı olsa da, hidrojen durumunda bu, PFI ve DI durumları arasında emilen hava miktarında büyük bir farklılığa yol açar [76] ve dolayısıyla ortaya çıkan karışım miktarında da büyük bir fark oluşur. ve dolayısıyla güç çıkışı. Ne yazık ki yazarlar bunu doğrulamaya olanak sağlayacak kayıtlı silindirik basıncı verilerini göstermemektedir.

8.1.7. Yakma Stratejileri

Liman yakıt enjeksiyonu, homojen yakıt/hava karışımlarıyla sonuçlanır. Motor ayarlarının etkisi (eşdeğerlik oranı, ateşleme zamanlaması...) önceki incelemelerde rapor edilmiştir. PFI halen gösteri araçları için kullanılmaktadır [104], çünkü bu, benzinli bir motoru hidrojen çalışmasına dönüştürmenin en basit yoludur, ancak sınırlı güç çıkışıyla sonuçlanır [55]. Doğrudan enjeksiyonla özgül güç çıkışı benzininkini aşar ve aynı zamanda enjeksiyonun başlatılması ve bölünmüş enjeksiyon yoluyla daha fazla serbestlik derecesi sunar. Yukarıda incelendiği gibi, CFD simülasyonları ve optik ölçümler bunun karışım oluşumunu ve alev gelişimini nasıl etkileyebileceğinin daha iyi anlaşılmasına yol açmıştır. Burada DI'nin sunduğu esneklikten tam anlamıyla yararlanmak için üstlenilen çalışmaları tartışıyoruz.

Başka bir yerde incelendiği gibi [55], BMW ve TU Graz [105], [106] tarafından yapılan ilk çalışma, daha yüksek yüklerde (geç SOI yoluyla) tabakalaşmanın kullanılmasının, eşdeğerlik oranlarının dağılımıyla sonuçlanarak, eşdeğerlik oranlarında nasıl önemli bir azalmaya yol açabileceğini gösterdi. Tüm karışımın tepe NOx eşdeğerlik oranı civarında olduğu homojen çalışmaya (erken SOI) kıyasla NOx emisyonları. Bu ilk çalışma aynı zamanda yanmamış hidrojen emisyonlarının arttığını da gösterdi; bu da düşük NOx emisyonları ile yüksek verimlilik arasında bir dengeye yol açtı; yazarlar bunun daha fazla optimizasyonla geliştirilebileceğini öne sürdüler. Son yıllarda bazı ekipler bu ödünleşimi iyileştirmeye yönelik istihbarat stratejilerinin potansiyelini araştırmak için büyük çaba harcadı.

NTSEL projesi kapsamında, farklı yanma stratejilerini keşfetmek için tek silindirik bir motor kullanıldı ve ardından bunlar, hedeflenen çok silindirik motorda uygulandı. Kawamura ve diğerleri. [67] ve Naganuma ve ark. [66] motor haritası boyunca enjeksiyon basıncı, enjeksiyon zamanlaması ve ateşleme zamanlamasını ve bunun sonucunda ortaya çıkan verimliliği ve NOx emisyonlarını rapor ediyor. PFI'dan DI'ye geçiş, maksimum güç çıkışını büyük oranda artırdı ancak aynı zamanda NOx emisyonlarını da artırdı. Bunlar farklı adımlarla hedef sınırlar içerisine getirildi. Ateşleme zamanlamasına göre değişen SOI ile yukarıda rapor edilen optik çalışmadan elde edilen bilgilerden yararlandı. Düşük yükte, düşük hız koşullarında, erken SOI'nin verimlilik ve emisyonlar arasında en iyi uzlaşmayı sağladığı

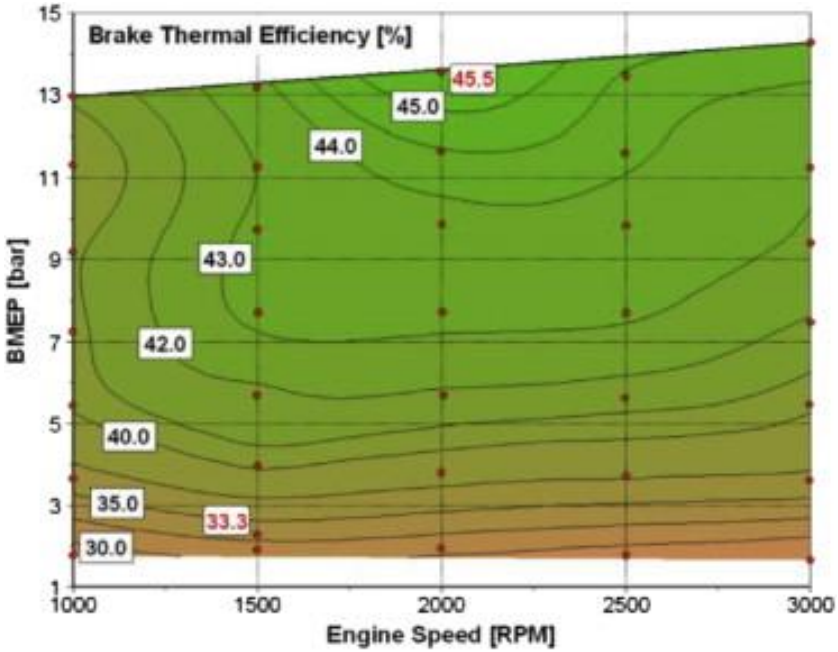
doğrulandı. Yüksek hız ve yüksek yük koşullarında, enjeksiyon periyodunun sonunda ateşleme ile yüksek enjeksiyon basınçları (200 bar) kullanan bir 'tüylü kuyruk ateşleme' stratejisi, dengede önemli bir iyileşme ile sonuçlandı. Bir kayıp analizi [66] bunun daha hızlı bir yanma hızına bağlı olduğunu, bu durumun daha izokorik bir yanmaya yol açtığını, duvar ısı kayıplarının ise aşağı yukarı sabit kaldığını gösterdi. Egzoz gazı devridaiminin (EGR) kullanılmasıyla NOx emisyonlarında yaklaşık %50 oranında daha fazla azalma sağlanırken (belirtilen) verimlilik %45 gibi yüksek bir oranda muhafaza edildi. Aşağıda açıklanacağı gibi, son arıtmanın kullanılmasıyla ilave NOx azaltımı sağlandı.

En umut verici stratejiler- ateşleme zamanlamasında homojen bir karışımla sonuçlanan erken enjeksiyon, duman kuyruğu ateşlemesi ve EGR ile duman kuyruğu ateşlemesi- daha sonra tüm motor hızı ve yük aralığı üzerinde daha ayrıntılı olarak araştırılarak NOx emisyonları ve verimlilik kaydedildi. Bu, çalışma koşuluna bağlı olarak en uygun stratejiyi kullanarak motor haritalamalarının kabaca tanımlanmasına olanak sağladı. Optimum enjeksiyon ve ateşleme zamanlamalarının belirlenmesine yönelik daha ileri çalışmalar Kawamura ve diğerleri tarafından rapor edilmiştir [65].

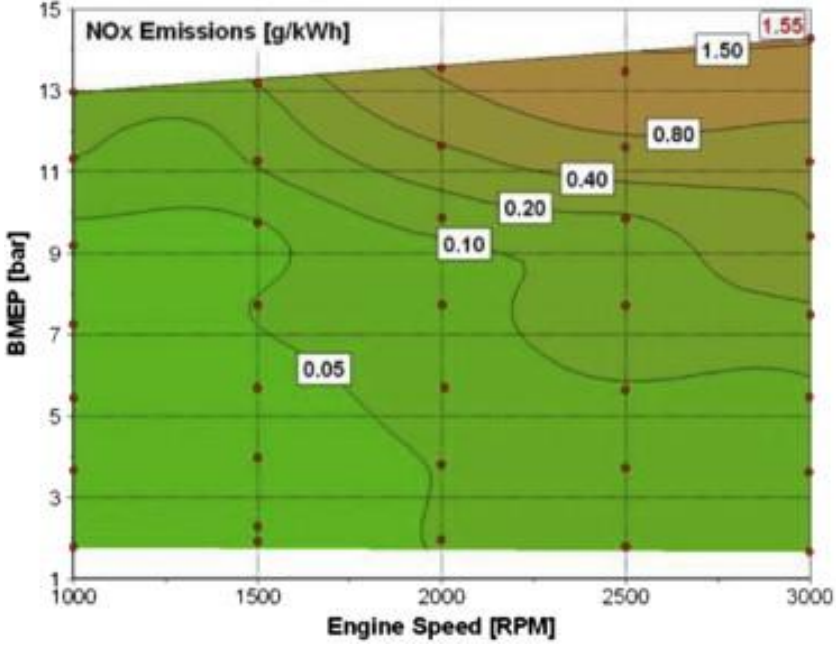
DOE projesi sırasında, DOE hedeflerini elde etmek için en iyi motor ve yanma odası geometrisini ve motor ayarlarını bulmak amacıyla iki nesil tek silindri motor araştırma motoru kullanıldı [76]. Önceki bölümde bahsedilen CFD ve optik çalışmaların çoğunun gerçekleştirildiği orijinal motor geometrisi, verimliliği artırmak amacıyla değiştirildi. Sıkıştırma oranı ve strok artırıldı (11,5-12,9), ikincisi, TDC çevresinde daha düşük bir yanma odası yüzey alanı /hacim oranı için daha uygun bir delik/strok oranıyla sonuçlandı. Karışım oluşumunun yeni CFD hesaplamalarıyla desteklenen ilk deneysel sonuçlar [76], SOI'nin ilk taramaları ve ateşleme zamanlaması ile %45,6'lık bir zirve belirtilen verimliliğe yol açan verimlilik artışını doğruladı. 1. nesil motordan 2. nesil motora giden bir diğer önemli değişiklik, solenoidle çalıştırılan bir enjektörden piezo çalıştırılan enjektöre geçiş oldu; daha hızlı çalışan piezo enjektör, IT'ye göre daha geniş bir SOI zamanlaması aralığına olanak tanıyor.

Kayıpların ayrıntılı bir analizi, enjeksiyon stratejisinin adım adım optimizasyonuna olanak sağlamıştır [70]. SOI'yi geciktirmenin, sıkıştırma çalışmasını azaltma avantajına sahip olduğu, ancak bu durumun, tutuşabilir bir karışım ve kararlı bir yanma ile sonuçlanacak karışım oluşumunun yeterli süreye izin verecek şekilde sınırlandırıldığı gösterilmiştir. Optimum SOI'nin motor hızıyla doğrusal olarak arttığı (ÜÖN'ye göre) bulundu ve motor haritasında yüksek verimlilik alanının genişletilmesinin yanı sıra en yüksek verimlilikte bir artışla sonuçlandı. Farklı enjektör memeleri kullanılarak yapılan ileri testler ve CFD analizleri sonunda %45,5'lik bir fren termal verimliliği ile DOE hedefini aştı. Belki daha da önemlisi, motor haritasının çoğunda yüksek verimlilik elde edildi; yazarlar,

motorun test edilen çalışma aralığının %80'inde %35 BTE'nin üzerinde çalıştığını bildirdi. DOE tarafından belirlenen %31'lik kısmi yük verimlilik hedefi de (%33,3 verimlilikle) aşıldı (1500 dev/dak ve 2 bar bmep'te). Şekil 8.4, optimum SOI ve enjektör memesini kullanan motor verimliliği haritasını gösterir; Şekil 8.5'de, karşılık gelen frene özgü NOx emisyonlarını gösterir. Çalışma, özellikle kayıp mekanizmalarının ve bunların motor haritası boyunca ve SOI'nin bir fonksiyonu olarak dengelerinin nasıl değiştiğinin ayrıntılı bir şekilde tanımlanması açısından faydalıdır.



Şekil 8.4. DOE projesinde 2. nesil tek silindirli motor için motor verimliliğinin son haritası [70]. Telif Hakkı © 2012 SAE Uluslararası. İzin alınarak yeniden basılmıştır.



Şekil 8.5. DOE projesinde 2. nesil tek silindirli motor için frene özgü NOx emisyonlarının nihai haritası [70]. Telif Hakkı © 2012 SAE Uluslararası. İzin alınarak yeniden basılmıştır.

Son olarak Younkings ve arkadaşlarının son çalışması [107], DI'nin sunduğu özgürlüğün tam olarak keşfedilmekten uzak olduğunu gösteriyor. Biri merkezi olarak yerleştirilmiş tek bir bujiye sahip, diğeri ise silindir gömleğine yakın, taban tabana zıt yerleştirilmiş iki bujiye sahip 2 silindir kafasını karşılaştırdılar ve Matthias ve diğeri tarafından da kullanılan iki meme geometrisi, bir adet 5 delikli enjektör [70] ve nozulun her iki yanında üç delik bulunan 6 delikli bir enjektör; ve bunların kombinasyonları. Her biri 3 delikli grup ile çift kıvılcım başlığının bujilerinden birine yönelik 6 delikli enjektör kullanarak, sadece 51 ppm NOx emisyonu ile %47,7'lik net belirtilen termal verimlilik kaydettiler. Bunun büyük bir kısmı, bu kurulumdan kaynaklanan yüksek düzeyde katmanlı operasyona ve yanma süresinin azalmasına bağlıdır.

8.2. Isı Transferi

Yukarıda bahsedildiği gibi Wimmer ve ark. [106] ve Shudo ve Oba [95], hidrojen yakıtlı motorların verimliliğinin artırılması için silindir duvarlarına ısı transferinin azaltılmasının bir ön koşul olduğuna dikkat çekmişlerdir. Hidrojen, benzin ve metan üzerinde stokiyometrik PFI işlemi için yanma odası duvarı boyunca anlık ısı akışının ölçümleri, hidrojen için kaydedilen ısı akışlarının

benzin veya metandan çok daha yüksek olduğunu göstermiştir [108],[109]. Bu, yanma çok daha hızlı olmasına rağmen, daha yüksek ısı kayıpları nedeniyle, hidrojen için benzin veya metana kıyasla neden aynı derecede yüksek veya hatta daha düşük olduğunu açıklar (ayrıca bkz. [82]). Hidrojenin geniş yanıcılık limitlerinden yararlanmak için yağsız karışımlar kullanıldığında denge çok daha iyi hale gelir. Orta derecede fakir karışımlar için alev hızları benzin veya metandan daha yüksek kalırken, ısı kayıpları önemli ölçüde azalarak verimliliğin artmasına yol açar. Kısmi yük noktaları daha sonra geniş açık gaz keleşi kullanan zayıf hidrojen ile kısılmış çalışma kullanan stokiyometrik benzin veya metan arasında karşılaştırılırsa, pompalama kayıplarındaki azalma aynı zamanda daha yüksek verime katkıda bulunduğundan hidrojen üzerindeki verimlilikler çok daha yüksektir [109].

DI kullanılarak yapılan katmanlı işlem, duvarlara ısı transferini azaltmanın başka bir yoludur. Obermair ve diğerleri tarafından analiz edildiği gibi [76] ve Matthias ve ark. [70], duvar kayıplarının azaltılması, DOE tarafından belirlenen verimlilik hedefine ulaşmaya yönelik ana katkılardan biriydi. Katmanlaşmanın yanı sıra, bu yazarlar tarafından kullanılan ve daha düşük yüzey/hacim oranına sahip 2. nesil motor, doğası gereği duvar ısı transferini azaltır. Younkens ve ark.'nın sonuçları [107] aynı zamanda ısı kaybının optimal karışım katmanlaşmasının belirlenmesinde önemli bir faktör olduğuna işaret etmektedir.

Duvar ısı transferinin önemi göz önüne alındığında, mevcut motor modelleme araçlarının hidrojen üzerindeki ısı transferini doğru şekilde tahmin etmekte başarısız olduğunu öğrenmek belki de şartıcı olabilir [110], [111] . Annand ve Woschni'nin ısı transferi modellerinin hidrojen için yetersiz olduğu gösterilmiştir [110], ancak yine de bazen kullanılmaktadır. Demuynek ve ark. [111]–[113], hidrojen kullanıldığında değişen gaz özelliklerinin doğru bir şekilde hesaba katılmasıyla tahminlerin iyileştirilebileceğini, ancak motorlardaki ısı transfer sürecinin fiziğini yakalamak için daha fazlasına ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Bu yaklaşımda ısı transferinde enerjinin elektriksel boyutu ve buna dayalı tahminleme süreçleri gibi durumlar dikkate alınmalıdır [114]–[120], Açıkçası bu daha fazla araştırma gerektiren bir alandır.

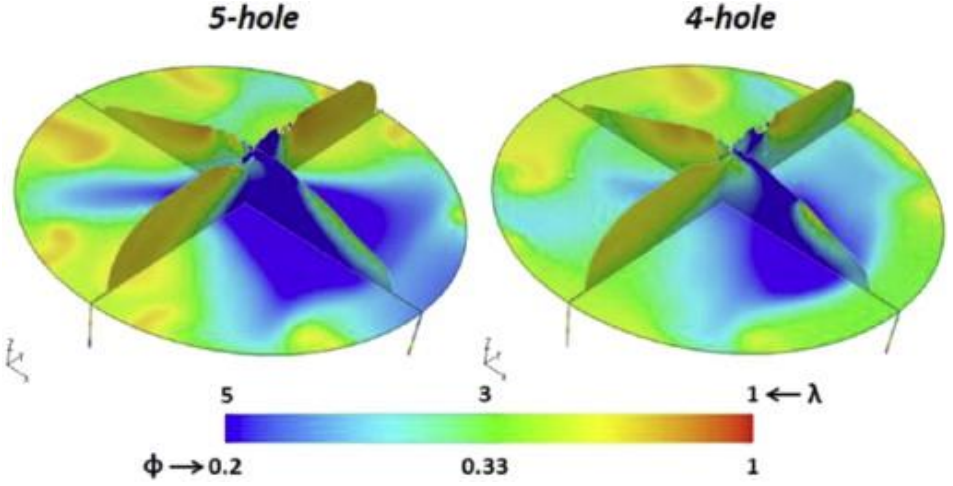
8.3. Sayısal Çalışma

Hidrojen motorlarında karışım oluşumunu ve yanmayı anlamaya yönelik hesaplama araçlarının geliştirilmesinde bazı ilerlemeler kaydedildi [121], [122],. Sukumaran ve Kong, hidrojen DI'nin sayısal simülasyonuna odaklandılar [123]. Hidrojen DI için karışım oluşumunun hesaplanmasının, şok dalgaları, Mach diski vb. gibi karmaşık bir yapıya yol açan yüksek hızlı gaz jeti nedeniyle çok zorlayıcı olduğuna dikkat çektiler. Yüksek hızlar, havayla karışımın çoğunlukla jetten

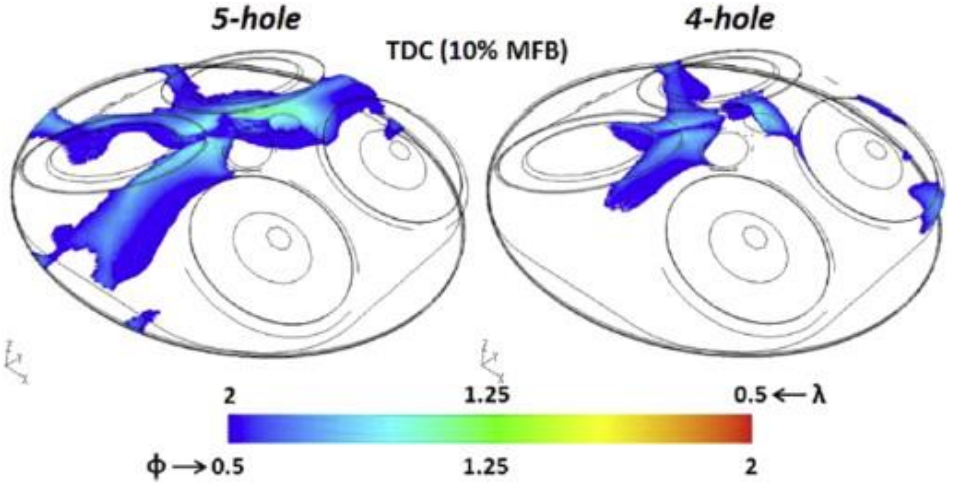
sonra meydana geldiğini gösterir. bir duvara çarpar. Bu, katmanlaştırmanın başarılmasının oldukça zor olduğu anlamına gelir, ancak yazarlar çoğunlukla erken SOI'ye (yani silindir içi yoğunluğun hala oldukça düşük olduğu zaman) odaklanarak karışım homojenliğini geliştirmeyi amaçladılar. Doğruluğu hesaplama verimliliğiyle uzlaştıran, uyarlanabilir ağ iyileştirmesine dayanan sayısal bir teknik geliştirdikten sonra , püskürtme açısını, SOI'yi ve enjektör konumunu araştırdılar . Sonuçları, erken SOI kullanılarak homojenliğin iyileştirilmesine yönelik daha önce bildirilen deneysel eğilimleri doğrulamaktadır. Yazarlar daha sonra belirli bir enjektör ve motor geometrisi için en uygun konumu, püskürtme açısını ve SOI'yi belirlemek için CFD modelini kullanıyor.

Whitesides ve ark. [124], motorlardaki yetersiz genleşmiş H_2 direkt enjeksiyonunun özelliklerini daha iyi yakalamak için 'gazlı küre enjeksiyon modelini' genişletti . Model, enjektör memesini çözmesi gerekmediğinden, Euler enjeksiyon simülasyonunda ihtiyaç duyulandan daha yuvarlak bir ızgaraya izin verir ve bu da çok daha hızlı hesaplama sağlar. Jet bölgesinde tanımlanacak bir hesaplama hücresinin kriterleri, motorlar gibi zorlanmış akışların mevcut olduğu durumlarda modelin daha iyi çalışacağı şekilde geliştirildi. Model sonuçları, Shudo ve Oba'nın daha yüksek rapor ettiği [95] ölçümlerle karşılaştırıldı ; bu, jet nüfuzu ve aksel hidrojen kütle fraksiyonu için makul bir benzerlik gösterdi, ancak aynı zamanda radyal kütle fraksiyonunu daha iyi yeniden üretmek için iyileştirmelere ihtiyaç duyulduğunu gösterdi.

Sandia National Lab [72], [74], [92], [93] tarafından ölçülen son derece ayrıntılı yerel akış hızı ve karışım eşdeğerlik oranı verileri, Scarcelli ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen sayısal simülasyonu değerlendirmek ve geliştirmek için kullanıldı. Argonne'da [68], [71], [73], [75], [125] CFD sonuçları, basit nozul geometrileri (tek delikli nozul veya etkileşime girmeyen jetlere sahip çok delikli nozul) için emme akışını ve karışım oluşum sürecini doğru bir şekilde tahmin etti [75], ancak güçlü jet-tohumlar kullanıldığında deneysel verilerle olan uyum daha da kötüleşti. Daha karmaşık geometrilerden dolayı jet etkileşiminin nozul çıkışının hemen aşağısında olması bekleniyordu [71]. Scarcelli ve ark. [68], karışım oluşumunun CFD tahminlerinin doğruluğunu artırmak için, yüksek basınçlı gaz jetlerinin özelliklerinin daha ayrıntılı olarak araştırılması gerektiğini, çünkü yetersiz genleşmiş bölgedeki basınç şoklarının yapısının gösterildiğini belirtmektedir. Jetlerin çevredeki gazla karışmasını ve sonuçta jet-jet etkileşimini önemli ölçüde etkiler. Yine de çalışma, Şekil 8.6'da görüldüğü gibi DOE hedeflerine ulaşmak için DI motorunu optimize etmeye yardımcı olacak yeterince doğru bir CFD aracıyla sonuçlandı.



Şekil 8.6. İki farklı nozul geometrisinden kaynaklanan TDC'deki karışım katmanlaşmasını gösteren CFD sonuçları. 2000 rpm ve 13,5 bar bmp motor durumu için 2 dikey düzlemde ve 1 yatay düzlemde gösterilen yerel eşdeğerlik oranları [70].
Telif Hakkı © 2012 SAE Uluslararası. İzin alınarak yeniden basılmıştır.



Şekil 8.7. İki farklı meme geometrisinden kaynaklanan ÜÖN'deki 'NOx potansiyelini' gösteren CFD sonuçları . 'NOx ' gücünün bir ölçüsü olarak , hacimler 0,5; λ ; 2 yerel eşdeğerlik oranlarına sahip olarak gösterilmektedir. 2000 devir/dakika ve 13,5 bar bmp motorun durumu [70]. Telif Hakkı © 2012 SAE Uluslararası. İzin alınarak yeniden basılmıştır.

Yukarıdakiler, CFD araçlarının artık hidrojen DI motorlarında karışım oluşumunu hesaplamak için nispeten düşük hesaplama maliyetiyle yeterli doğruluk sunduğunu göstermektedir; çözülmesi gereken nozul geometrisi,

silindir içi akış alanı ve yanma odası geometrisinin karmaşık etkileşimi göz önüne alındığında çok faydalı bir katkıdır. İstenilen yakıt katmanlaşmasını oluşturmak için. Ancak yanmanın doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi için hala çok fazla çalışmaya ihtiyaç vardır. Verhelst ve Wallner [55] termodinamik ve CFD modellerini incelediler ve her iki model tipinin özel örnekleri PFI veya DI homojen operasyon için tatmin edici bir uyum sağladı. Yukarıda incelenen yakıt katmanlaştırmayı amaçlayan DI stratejileri çok daha zorludur. Bir jetin bujiden yüksek hızda geçerken ateşlenmesi veya yanan bir karışıma enjekte edilmesi, kısmen önceden karıştırılmış veya önceden karıştırılmamış yanmaya veya her ikisine birden yol açar. Bu yanma modellerini simüle edebilen modeller henüz başlangıç aşamasındadır ve hesaplama açısından zorludur [126].

Ayrıca önceki bölümde de belirtildiği gibi ısı transfer modellerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu, ısı transferinin verimliliği nasıl etkilediğinin daha iyi tahmin edilmesine olanak sağlarken, sıcaklığa oldukça bağlı olan NOx emisyonlarının doğru hesaplanması için daha da önemlidir .

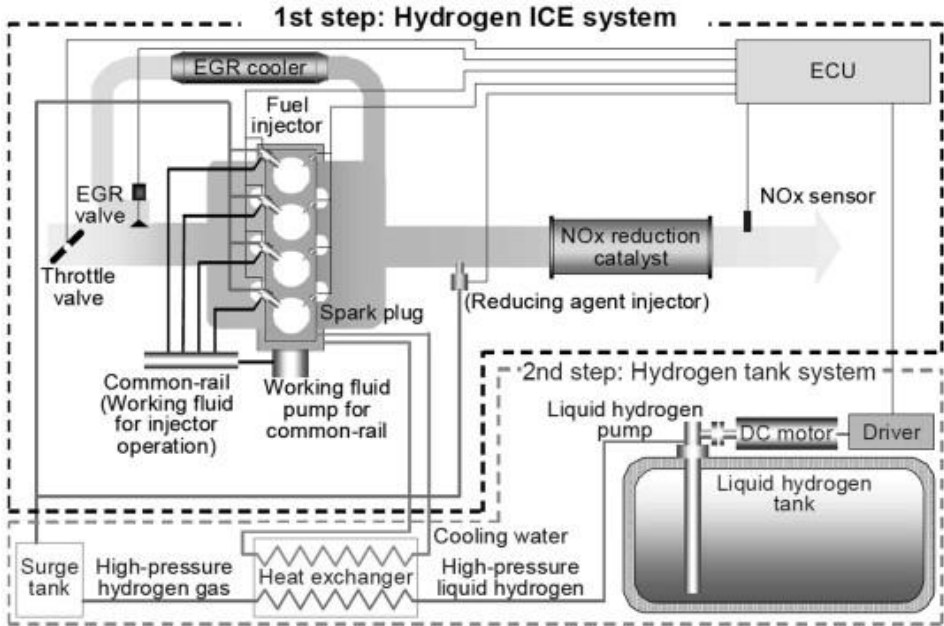
8.4. Araç Ve Motor Stratejileri

Yukarıda incelenen çalışmalarda incelenen yanma stratejileri, bir araçta kullanılacak motor için en uygun stratejiyi seçmek için kullanılmıştır. NTSEL projesi kapsamında elde edilen tek silindir test verileri , bir JE05 test döngüsünde yakıt tüketimini ve NOx emisyonlarını tahmin etmek için kullanıldı [66]. Motor verileri, ağır hizmet tipi bir araca güç sağlayan altı silindirli hidrojen motorunun veri haritalarına dönüştürüldü. NOx emisyonlarını emisyon sınırının altına indirmek için optimize edilmiş enjeksiyon zamanlamaları ile birlikte EGR uygulamasının gerekli olduğu gösterilmiştir .

Motor çıkış emisyonlarını azaltmak için EGR kullanımının yanı sıra, NOx son işlem olasılığı da araştırıldı. Kawamura ve diğerleri. [67] bir NOx depolama-indirgeme katalizörünün seçilmesine yönelik motivasyonu açıklamaktadır. Böyle bir katalizör kullanılarak, NOx emisyonları, katalizörün aşağı akışına yerleştirilen bir NOx sensörü, depolama kapasitesine ulaşıldığını tespit edene kadar depolanır; bu noktada, katalizörün yukarı akışına yerleştirilen bir hidrojen enjektörü, indirgeyici madde olarak görev yapan hidrojeni enjekte eder . Kawamura ve diğerleri. [67], katalizör sistemini test etmek için PFI hidrojen işlemine dönüştürülmüş altı silindirli bir motor kullandı. Kararlı durum testi , %0,5'ten daha az yakıt kaybıyla %98 NOx dönüşüm oranı potansiyelini gösterdi; bu, fren termal verimliliği üzerinde ihmal edilebilir bir etki anlamına geliyor . Geriye kalan hidrojeni oksitlemek için bir oksidasyon katalizörü kullanıldı. Yazarlar, aşırı miktarda indirgeyici madde (yani hidrojen) kullanıldığında amonyak emisyonunu bildirmektedir. Ayrıca N2O emisyonları da tespit edildi

ancak bu durumda enjekte edilen indirgeyici maddenin miktarı ile önemli bir korelasyon gözlenmedi.

Yalın NOx tuzağının test edilmesi, proje kapsamında seçilen son motor üzerinde devam etti; dört silindri 4,7 L ağır iş motoru, doğal emişli DI hidrojen çalışmasına dönüştürüldü [65]. Son işlem sistemiyle donatılmış motor, Şekil 8.8'de şematik olarak gösterilmiştir ve JE05 test döngüsünde çalıştırılmıştır. Son arıtma sistemi NOx emisyonlarında büyük azalmalara yol açtı . Bununla birlikte, geçici test aynı zamanda optimize edilmemiş kontrol sistemi nedeniyle NOx artışlarının nasıl oluştuğunu da gösterdi, dolayısıyla daha fazla NOx azaltım potansiyeli devam ediyor. Optimize edilmiş bir geçici kontrol sistemi aynı zamanda indirgeyici maddenin sağlanmasından sonra ölçülen N2O emisyonlarının salgınlığını da ele almalıdır .



Şekil 8.8. NTSEL projesinin son motor ve atık arıtma sisteminin şeması [65].

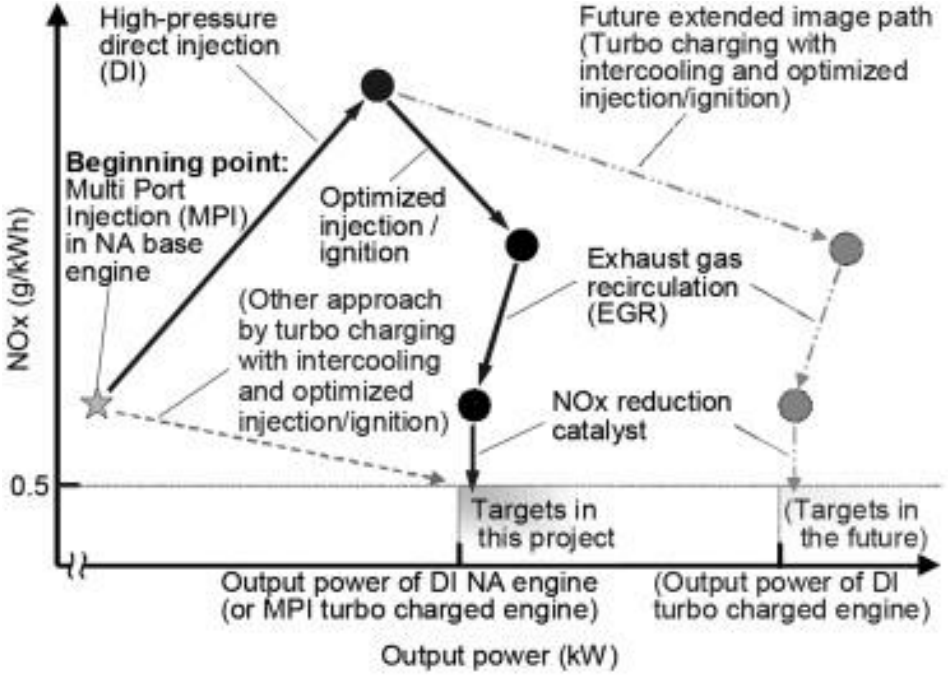
Telif Hakkı © 2010 SAE Uluslararası. İzin alınarak yeniden basılmıştır.

Yine ölçülen motor verilerine dayanarak, motorun tasarlandığı son orta hizmet kamyonunun JE05 test döngüsünde NOx emisyonlarını tahmin etmek için araç simülasyonları çalıştırıldı [126]-[128]. Sonuçlar, EGR dahil olmak üzere yanma stratejisinin daha fazla optimizasyonunun, son işleme gerek kalmadan NOx emisyon limitinin karşılanmasına imkan vermesi gerektiğini, aynı zamanda zayıf

NOx tutucu ve oksidasyon katalizörüne sahip son işlem sisteminin eklenmesinin, sınırın çok altında emisyon seviyeleri potansiyeline sahip olduğunu gösterdi.

DOE projesi kapsamında alternatif bir yaklaşım benimsendi [69]. Yukarıda tartışılan, elde edilen motor verilerine dayanarak (simüle edilmiş) bir turboşarjlı yalın motor çalıştırma stratejisi seçildi [129]. Eşdeğerlik oranı şu şekilde sabitlendi: ($\lambda = 3,3$), 4 bar bmep'nin altındaki motor yüklerinde kısma ve daha yüksek yüklerde turboşarj ile. Motor verileri, bir binek otomobile güç sağlayan 3 L'lik bir motora göre yeniden hesaplandı ve Kent Dinamometresi Sürüş Programında (FTP döngüsünün bir parçası) bir araç simülasyonunda kullanıldı . NOx emisyonlarının SULEV II aralığı dahilinde, yani herhangi bir son işlem olmaksızın DOE tarafından belirlenen hedefin oldukça altında olacağı hesaplanmıştır. Daha ileri hesaplamalar, motorun küçültülmesinin, daha küçük bir marjla da olsa, DOE'nin NOx emisyonları hedefini karşılamaya devam ederken verimliliğin artmasına yol açabileceğini gösterdi. Bu yine verimlilik ile NOx emisyonları arasındaki dengeyi göstermektedir. Yazarlar, yüksek verimlilik ve ultra düşük emisyon rejimlerinden tam olarak yararlanmak için gelecekte gelişmiş güç aktarma organı düzenlerine (hibridizasyon) bakılabileceğini öne sürüyor.

Şekil 8.9'da Kawamura ve ark.'dan alınmıştır [65], NTSEL ve DOE projeleri kapsamında izlenen farklı yolları göstermektedir. Liman yakıt enjeksiyonundan DI'ye geçiş, güç çıkış potansiyelini büyük ölçüde artırır ancak aynı zamanda NOx emisyonlarını da önemli ölçüde artırabilir. Yukarıda açıklandığı gibi SOI ve IT'nin optimize edilmesi NOx'i azaltabilir ancak NOx emisyonlarını hedef limitler dahilinde tutmak için çoğunlukla ek önlemlere ihtiyaç vardır. EGR emisyonları bu sınırlar içerisine getirebilir. Durum böyle değilse, zayıf bir NOx kaparı NOx emisyonlarını daha da azaltabilir. Alternatif olarak, motor çalışmasını yanma sıcaklıklarını sınırlamak için yeterince zayıf tutmak NOx oluşumunu tamamen önleyebilir, bu da daha sonra hedef güç çıkışını karşılamak için turboşarj gerektirir.



Şekil 8.9. NOx emisyonlarını sınırlandırırken hedef güç çıktısını elde etmeye yönelik kontrol stratejileri [65]. Telif Hakkı © 2010 SAE Uluslararası. İzin alınarak yeniden basılmıştır.

9. SONUÇLAR

Hidrojenin diğer alternatif yakıtlarla karşılaştırıldığında, içten yanmalı motorlardaki zararlı emisyonları gazlarının ve olumsuz çevresel etkilerinin azaltmasında veya ortadan kaldırılmasında etkili bir yakıt olarak görülmektedir. Atmosfer içerisinde bulunan çok miktardaki elementten biri olan hidrojen atmosferden kolaylıkla temin edilebilir olması ve günümüzde fosil yakıtlara karşı en kullanışlı alternatif yakıtlardan biri olduğu görülmüştür. Yapılan bilimsel araştırma ve çalışmalarda hidrojen yakıt üretimi için en çok kullanılan tekniklerden birinin buhar-metan reformasyonu olduğu görülmüştür.

Bu derlemede, yakıt olarak hidrojen ilavesinin buji ateşlemeli (SI) ve sıkıştırma ateşlemeli (CI) motorların performansına ve egzoz emisyonlarına etkisi araştırılmıştır. Literatür incelendikten sonra aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Buji ateşlemeli (SI) ve sıkıştırma ateşlemeli (CI) motorlarda hidrojenin katkı maddesi olarak kullanıldığında, hidrojenin alt ısı değeri (LHV) (120 MJ/kg), buji ateşlemeli (SI) ve sıkıştırma ateşlemeli (CI) motorlardan daha yüksek olduğundan motorun hacimsel verimini azaldığı görülmüştür. Dizel (43,6 MJ/kg) ve benzin (43,4 MJ/kg) yakıtlarının içten yanmalı motorlarda hacimsel verimdeki bu azalma, motor gücünü ve torkunu azaltacağı düşünülmektedir.

Moleküler ısı kapasitesi yüksek olan hidrojen yakıtının içten yanmalı motorlara ilave edilmesi ile yanma olayının ilerleyişinin değişmesi ve yanma veriminin azalması nedeniyle benzinli ve dizel motorlarda yakıt olarak hidrojen ilavesi azaldıkça fren termal verimliliğinin (BTE) azalacağı düşünülmektedir.

Hidrojen yanma hızının yüksek olması nedeniyle dizel çift yakıtlı motorda dokuz kat daha hızlı alev hızına sahip olduğu görülmektedir. Yük arttıkça ve silindir içerisine alınan hidrojen miktarının da artması ısı salınım hızını da artıracak şekilde düşünülmektedir. Bu nedenle dizel motorlarda dizel yakıtı hidrojen eklenmesi frene özgü yakıt tüketimini de (BSFC) artıracak şekilde düşünülmektedir. Hidrojenin değişik oranlarda silindir içerisine gönderilmesi ile eşdeğer fren spesifik yakıt tüketiminin (BSFC), motor gücünde meydana gelen azalma nedeniyle (motor gücünü düşüren hidrojen enjeksiyon yöntemleri kullanıldığında) benzin kullanımının arttığı görülmüştür.

İçten yanmalı motorlara hidrojen eklenmesi, benzin ve dizel motorlardan kaynaklanan karbon monoksit emisyonlarının miktarını azaltacağı düşünülmektedir. Hidrojen, molekülünde karbon atomu olmadığından dolayı bir hidrokarbon yakıtı değildir, yakıttaki hidrojen kütle fonksiyonunu artırmak, hidrokarbon sentez hızını düşürecek şekilde düşünülmekte ve ayrıca yüksek hidrojen alev sıcaklığı silindir basıncını arttırarak ve buna bağlı olarak yanma verimliliğini

artıracağı düşünülmektedir. Ön yanma esnasında hidrojen yakıtının, yüksek difüzyon katsayısına sahip olması nedeniyle daha homojen bir karışım üreteceği ve buna paralel olarak ve oksijenin kullanılabilirliğini artıracacağı düşünülmektedir. Bu faktörlerin bir sonucu olarak içten yanmalı motorların ürettiği karbon monoksit (CO) ve yanmamış hidrokarbon miktarları azalacaktır.

İçten yanmalı motorlarda hidrojenin yakıt olarak kullanıldığında H/C oranı artmakta, bu da yanma süresinin kısalmasına ve yanma veriminin artmasına neden olacağı tahmin edilmektedir. Öte yandan hidrojen temiz bir yakıt olduğundan yanma sonucu meydana gelen karbondioksit (CO₂) salınımı olmadığından karbondioksit (CO₂) emisyonunu azalacaktır.

Hidrojen yakıtının yüksek alev hızı, düşük tutuşma enerjisi gereksinimi ve yüksek adyabatik sıcaklık gibi özellikleri nedeniyle hidrojenin yanmaya uygun bir yakıt olarak kabul edildiği görülmektedir. Bu özellikleri nedeniyle silindir içerisindeki yanma sıcaklığının artmasına ve aynı zamanda azaotoksit (NO_x)'in artmasına katkıda bulunacağı görüldüğü düşünülmektedir.

Hidrojenin yakıtının yüksek emisyon katsayısı ve yakıtın oksijene daha fazla erişimi sayesinde, yakıt hava karışımının homojenliğini ve toplam yakıttaki H/C miktarını artıracığı ve bu da dizel motorlarda is oluşumunu azaltacağı düşünülmektedir.

İçten yanmalı motorların birçoğunda hidrojenin yakıt olarak kullanılmasıyla, zararlı egzoz gazlarının kirletici etkilerini azaltarak içten yanmalı motorların genel performans verimlerini artırarak çevresel ve ekonomik faydalar göz önüne alındığında hidrojen yakıtının temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olduğu düşünülmektedir.

Son yıllarda bildirilen araştırma sonuçlarına ve gösterimlere bakıldığında, hidrojen motorlarının olgunluğunun ilerletilmesinde çok fazla ilerleme kaydedildiği açıktır. PFI çalışması hakkında yeni veriler yayımlandı: ateşleme sisteminin geri tepme oluşumu üzerindeki etkileri ve güç verimliliği emisyon dengelerini iyileştirmek için değişken valf zamanlaması ve doğrudan su enjeksiyonunun potansiyeli hakkında. Üç tekerlekli araçlardan binek araçlara ve orta hizmet kamyonlarına kadar yeni tanıtım araçları yollara çıkarıldı.

Ancak çalışmaların çoğu, doğrudan enjeksiyonun araştırılmasını ilerletmeye adanmıştır. DI motorlarının teorik avantajlarının pratiğe dönüştürülebileceği, güç yoğunluğunun yanı sıra tepe ve kısmi yük verimlilikleri açısından da son derece umut verici sonuçlar elde edilebileceği ve bunun ultra düşük emisyonlarda gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir. Ayrıca, nozül geometrisindeki serbestlik dereceleri, enjeksiyon olaylarının zamanlaması ve sayısı, tekli veya ikili ateşleme, yanma odası geometrisi vb. göz önüne alındığında, daha da iyi sonuçlara ulaşmak oldukça mümkündür. Örneğin, tabakalaşmaya yardımcı

olmak için bölünmüş enjeksiyonlu stratejiler önerilmiştir [57] ancak yalnızca sınırlı motor koşulları aralığı için denenmiştir [28] .

Ancak bu bizi daha az ilerleme kaydedilen bir araştırma alanına, yani hidrojen motorları için hesaplamalı araçlara getiriyor. Bu büyük serbestlik derecesi aynı zamanda optimum geometrileri 'tahmin etmenin' veya olası tüm motor ayarlarını deneysel olarak taramanın çok daha zor hale geldiği anlamına da geliyor ; dolayısıyla bu tür araçlara güçlü bir ihtiyaç var. Pratik hesaplama süresi içinde DI motorlarında karışım oluşumunun hesaplanmasına olanak tanıyan modeller şeklinde çok faydalı katkılar olmuştur. Bunlar artık en umut verici nozül ve yanma odası geometrisini sayısal olarak 'tarama' için kullanılabilir ve enjeksiyon ve ateşleme olayları için en iyi zamanlamayı göstererek donanım maliyetinden ve test süresinden tasarruf sağlar. Buna karşılık, yanma ve emisyon oluşumunun doğru bir şekilde hesaplanmasına olanak tanıyan araçlar eksiktir. İyi haber şu ki, optik motorlarda karışım oluşumu ve alev yayılımı hakkında toplanan verilerin zenginliği, model tahminlerini doğrulamak için kullanılabilir.

Her ne kadar sadece PFI için olsa da, silindir içi ısı transferine ilişkin deneysel veriler de yayınlanmıştır. Hidrojenin ısı transfer modellerini geliştirmek için ilk adımlar atıldı . Isı akısı ölçümlerini DI'ye genişletmek, DI işlemine yönelik modellerin doğrulanmasına olanak tanıyacak ve ısı transferinin, optimum karışım katmanlaştırma tasarımının bir parçası olmasını sağlayacaktır (duvarlara ısı kaybını en aza indirecektir).

DI konusuna dönecek olursak, Verhelst ve Wallner [19] tarafından dile getirilen endişelerden biri enjektör dayanıklılığıydı. Elektrohidrolik olarak çalıştırılan bir enjektörün dayanıklılık testinin birkaç yüz saat boyunca aşınmayı kontrol ettiğini ve oldukça olumlu sonuçlar elde ettiğini bildiren yeni bir makale vardı. Piezoelektrik tahrikli enjektörler için bu tür testler (henüz) bildirilmemiştir . Tepki süreleri yeterince hızlı olduğundan, döngü başına birden fazla enjeksiyon olayı istendiğinde bu tür bir harekete geçirme gereklidir . Ne yazık ki enjektör ömrünün toplam enjeksiyon sayısı ile ters orantılı olması beklenebilir, dolayısıyla birden fazla enjeksiyon yapılması dayanıklılığı azaltacaktır.

Son olarak Shelef ve Kukkonen'in açıklamalarına tekrar dönüyoruz. Bu yazarlar, hidrojen yakıtlı motorların benzinli motorlara göre verimlilik avantajının kuyudan tekerleğe herhangi bir fayda sağlamak için çok düşük olduğunu, yakıt hücrelerinin verimlilik avantajının ise genel olarak pozitif bir denge ile sonuçlandığını iddia etti. Bu sonuçlara varmak için yapılan varsayımlara göz atmak bilgi vericidir. Hidrojen motorları için, benzinle çalışmaya göre verimlilikte %15-25 oranında göreceli bir iyileşme varsayıırken, yakıt hücresi verimliliği yükten bağımsız olarak %45 olarak alındı. Yukarıda incelenen hidrojen motorlarında gösterilen verimlilikler ve daha yüksek yüklerde

yakıt hücrelerinin verim düşüşleri de dikkate alındığında, başka bir tablo ortaya çıkabilir. Yani, tepe verimlilikler için benzine göre göreceli verimlilik varsayımı doğru çıkarken, sürüş çevrimleri için çok daha önemli olan kısmi yükte çok daha büyük göreceli kazançlara ulaşılabilir. Öte yandan, bu çalışmanın güncellenmesinde hidrojenin üretimi, dağıtımı ve gemide depolanmasından kaynaklanan kayıplara ilişkin daha yeni verilerin de kullanılması gerekmektedir. Ancak o zaman Shelef ve Kukkonen'in görüşlerinin karamsar mı yoksa gerçekçi mi olduğu konusunda daha iyi bir fikre sahip olacağız.

10. KAYNAKLAR

- [1] K. Wróbel, J. Wróbel, W. Tokarz, J. Lach, K. Podsadni, and A. Czerwiński, “Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles: A Review,” *Energies*, vol. 15, no. 23. 2022. doi: 10.3390/en15238937.
- [2] A. Onorati *et al.*, “The role of hydrogen for future internal combustion engines,” *International Journal of Engine Research*, vol. 23, no. 4. 2022. doi: 10.1177/14680874221081947.
- [3] H. Du, Z. Chen, B. Peng, F. Southworth, S. Ma, and Y. Wang, “What drives CO2 emissions from the transport sector? A linkage analysis,” *Energy*, vol. 175, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.03.052.
- [4] H. Gurbuz, “The Effect Of H2 Purity On The Combustion, Performance, Emissions, And Energy Costs In An Spark Ignition Engine,” *Therm. Sci.*, vol. 24, no. 1 Part A, 2020, doi: 10.2298/TSCI180705315G.
- [5] Z. Stępień, “A comprehensive overview of hydrogen-fueled internal combustion engines: Achievements and future challenges,” *Energies*, vol. 14, no. 20. 2021. doi: 10.3390/en14206504.
- [6] K. Turoń, “Hydrogen-powered vehicles in urban transport systems-current state and development,” in *Transportation Research Procedia*, 2020. doi: 10.1016/j.trpro.2020.02.086.
- [7] L. Wang, C. Hong, X. Li, Z. Yang, S. Guo, and Q. Li, “Review on blended hydrogen-fuel internal combustion engines: A case study for China,” *Energy Reports*, vol. 8. 2022. doi: 10.1016/j.egy.2022.04.079.
- [8] S. E. Hosseini, M. A. Wahid, and A. Ganjehkaviri, “An overview of renewable hydrogen production from thermochemical process of oil palm solid waste in Malaysia,” *Energy Conversion and Management*, vol. 94. 2015. doi: 10.1016/j.enconman.2015.02.012.
- [9] F. Safari and I. Dincer, “A review and comparative evaluation of thermochemical water splitting cycles for hydrogen production,” *Energy Conversion and Management*, vol. 205. 2020. doi: 10.1016/j.enconman.2019.112182.
- [10] Shivaprasad K.V., Dr. Kumar G.N, and Dr. Guruprasad K.R, “Performance, Emission and Fuel Induction System of Hydrogen Fuel Operated Spark Ignition Engine - A Review,” *Int. J. Mod. Eng. Res.*, vol. 2, no. 1, 2012.
- [11] H. Iwasaki, H. Shirakura, and A. Ito, “A study on suppressing abnormal combustion and improving the output of hydrogen fueled internal combustion engines for commercial vehicles,” in *SAE 2011 World Congress and Exhibition*, 2011. doi: 10.4271/2011-01-0674.

- [12] H. Fayaz, R. Saidur, N. Razali, F. S. Anuar, A. R. Saleman, and M. R. Islam, "An overview of hydrogen as a vehicle fuel," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 8. 2012. doi: 10.1016/j.rser.2012.06.012.
- [13] K. Zeng and D. Zhang, "Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 36, no. 3. 2010. doi: 10.1016/j.pecs.2009.11.002.
- [14] M. Balat and M. Balat, "Political, economic and environmental impacts of biomass-based hydrogen," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 9, 2009, doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.02.067.
- [15] B. Shadidi, G. Najafi, and T. Yusaf, "A review of hydrogen as a fuel in internal combustion engines," *Energies*, vol. 14, no. 19. 2021. doi: 10.3390/en14196209.
- [16] F. Salek, M. Zamen, S. V. Hosseini, and M. Babaie, "Novel hybrid system of pulsed HHO generator/TEG waste heat recovery for CO reduction of a gasoline engine," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 43, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.06.075.
- [17] M. Faizal, L. S. Chuah, C. Lee, A. Hameed, J. Lee, and M. Shankar, "Review of hydrogen fuel for internal combustion engines," *J. Mech. Eng. Res. Dev.*, vol. 42, no. 3, 2019, doi: 10.26480/jmerd.03.2019.35.46.
- [18] M. Ozturk and I. Dincer, "A comprehensive review on power-to-gas with hydrogen options for cleaner applications," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 62. 2021. doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.07.066.
- [19] F. Safari and I. Dincer, "Assessment and optimization of an integrated wind power system for hydrogen and methane production," *Energy Convers. Manag.*, vol. 177, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.09.071.
- [20] T. Tsujimura, S. Mikami, N. Achiha, Y. Tokunaga, J. Senda, and H. Fujimoto, "A study of direct injection diesel engine fueled with hydrogen," in *SAE Technical Papers*, 2003. doi: 10.4271/2003-01-0761.
- [21] D. Akal, S. Öztuna, and M. K. Büyükkakin, "A review of hydrogen usage in internal combustion engines (gasoline-Lpg-diesel) from combustion performance aspect," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 60, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.02.001.
- [22] T. Shudo, K. Omori, and O. Hiyama, "NO_x reduction and NO₂ emission characteristics in rich-lean combustion of hydrogen," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 17, 2008, doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.05.034.
- [23] A. H. Gadallah, E. A. Elshenawy, A. M. Elzahaby, H. A. El-Salmawy,

- and A. H. Bawady, "Effect of in cylinder water injection strategies on performance and emissions of a hydrogen fuelled direct injection engine," in *SAE Technical Papers*, 2009. doi: 10.4271/2009-01-1925.
- [24] N. Saravanan and G. Nagarajan, "Performance and emission studies on port injection of hydrogen with varied flow rates with Diesel as an ignition source," *Appl. Energy*, vol. 87, no. 7, 2010, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.01.014.
- [25] P. R. Chitragar, S. K. V, and K. G. N, "Use of Hydrogen in Internal Combustion Engines: A Comprehensive Study," *J. Mech. Eng. Biomech.*, vol. 1, no. 3, 2016.
- [26] M. Ciniviz and H. Köse, "Academic @ Paper HYDROGEN USE IN INTERNAL COMBUSTION ENGINE: A REVIEW," 2012.
- [27] X. Yu *et al.*, "A comparative study on effects of homogeneous or stratified hydrogen on combustion and emissions of a gasoline/hydrogen SI engine," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 47, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.08.029.
- [28] S. Wang, C. Ji, B. Zhang, and X. Liu, "Lean burn performance of a hydrogen-blended gasoline engine at the wide open throttle condition," *Appl. Energy*, vol. 136, 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.09.042.
- [29] I. M. M. Elsemary, A. A. A. Attia, K. H. Elnagar, and A. A. M. Elaraqy, "Experimental investigation on performance of single cylinder spark ignition engine fueled with hydrogen-gasoline mixture," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 106, 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.05.177.
- [30] B. Acikgoz and C. Celik, "An experimental study on performance and emission characteristics of a methane-hydrogen fuelled gasoline engine," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 23, 2012, doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.09.037.
- [31] A. Kak, N. Kumar, B. Singh, S. Singh, and D. Gupta, "Comparative Study of Emissions and Performance of Hydrogen Boosted SI Engine Powered by Gasoline Methanol Blend and Gasoline Ethanol Blend," in *SAE Technical Papers*, 2015. doi: 10.4271/2015-01-1677.
- [32] Y. Karagöz, T. Sandalçl, L. Yükses, A. S. Dalkılıç, and S. Wongwises, "Effect of hydrogen-diesel dual-fuel usage on performance, emissions and diesel combustion in diesel engines," *Adv. Mech. Eng.*, vol. 8, no. 8, 2016, doi: 10.1177/1687814016664458.
- [33] B. S. Nuthan Prasad, J. K. Pandey, and G. N. Kumar, "Effect of hydrogen enrichment on performance, combustion, and emission of a methanol fueled SI engine," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 49, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.05.039.

- [34] J. A. Yamin and M. A. Hamdan, "The performance of hydrogen-powered 4-stroke SI engine using locally designed fuel regulator," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 32, no. 3, 2010, doi: 10.1590/S1678-58782010000300001.
- [35] H. Pan *et al.*, "Effect of hydrogen addition on criteria and greenhouse gas emissions for a marine diesel engine," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 21, 2014, doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.05.010.
- [36] F. Christodoulou and A. Megaritis, "Experimental investigation of the effects of simultaneous hydrogen and nitrogen addition on the emissions and combustion of a diesel engine," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 6, 2014, doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.11.124.
- [37] H. Koten, "Hydrogen effects on the diesel engine performance and emissions," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 22, 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.04.146.
- [38] M. Masood, M. M. Ishrat, and A. S. Reddy, "Computational combustion and emission analysis of hydrogen-diesel blends with experimental verification," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 32, no. 13, 2007, doi: 10.1016/j.ijhydene.2006.11.008.
- [39] A. Li, Z. Zheng, and T. Peng, "Effect of water injection on the knock, combustion, and emissions of a direct injection gasoline engine," *Fuel*, vol. 268, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.117376.
- [40] P. Xu *et al.*, "Effects of direct water injection on engine performance in engine fueled with hydrogen at varied excess air ratios and spark timing," *Fuel*, vol. 269, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.117209.
- [41] J. Wang *et al.*, "Numerical investigation of water injection quantity and water injection timing on the thermodynamics, combustion and emissions in a hydrogen enriched lean-burn natural gas SI engine," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 35, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.04.146.
- [42] I. M. M. Elsemary, A. A. A. Attia, K. H. Elnagar, and M. S. Elsaleh, "Spark timing effect on performance of gasoline engine fueled with mixture of hydrogen-gasoline," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 52, 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.10.125.
- [43] B. Chen, L. Zhang, J. Han, and X. Chen, "Investigating the effect of increasing specific heat and the influence of charge cooling of water injection in a TGDI engine," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 149, 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.12.127.
- [44] H. M. Z. Rocha, R. da S. Pereira, M. F. M. Nogueira, C. R. P. Belchior, and M. E. de L. Tostes, "Experimental investigation of hydrogen addition in the intake air of compressed ignition engines running on biodiesel

- blend,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 7, 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.11.032.
- [45] M. A. Akar, E. Kekilli, O. Bas, S. Yildizhan, H. Serin, and M. Ozcanli, “Hydrogen enriched waste oil biodiesel usage in compression ignition engine,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 38, 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.02.045.
- [46] C. Deheri, S. K. Acharya, D. N. Thatoi, and A. P. Mohanty, “A review on performance of biogas and hydrogen on diesel engine in dual fuel mode,” *Fuel*, vol. 260. 2020. doi: 10.1016/j.fuel.2019.116337.
- [47] F. Salek, M. Babaie, S. V. Hosseini, and O. A. Bég, “Multi-objective optimization of the engine performance and emissions for a hydrogen/gasoline dual-fuel engine equipped with the port water injection system,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 17, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.12.139.
- [48] S. Bari and M. Mohammad Esmaeil, “Effect of H₂/O₂ addition in increasing the thermal efficiency of a diesel engine,” *Fuel*, vol. 89, no. 2, 2010, doi: 10.1016/j.fuel.2009.08.030.
- [49] A. Jamrozik, K. Grab-Rogaliński, and W. Tutak, “Hydrogen effects on combustion stability, performance and emission of diesel engine,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 38, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.05.049.
- [50] O. H. Ghazal, “Performance and combustion characteristic of CI engine fueled with hydrogen enriched diesel,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 35, 2013, doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.09.037.
- [51] İ. Yilmaz and M. Taştan, “Investigation of hydrogen addition to methanol-gasoline blends in an SI engine,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 44, 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.07.088.
- [52] K. V. Shivaprasad, S. Raviteja, P. Chitragar, and G. N. Kumar, “Experimental Investigation of the Effect of Hydrogen Addition on Combustion Performance and Emissions Characteristics of a Spark Ignition High Speed Gasoline Engine,” *Procedia Technol.*, vol. 14, 2014, doi: 10.1016/j.protcy.2014.08.019.
- [53] S. Szwaja and K. Grab-Rogalinski, “Hydrogen combustion in a compression ignition diesel engine,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 10, 2009, doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.03.020.
- [54] L. M. Das, “Near-term introduction of hydrogen engines for automotive and agricultural application,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 27, no. 5, 2002, doi: 10.1016/S0360-3199(01)00163.
- [55] S. Verhelst and T. Wallner, “Hydrogen-fueled internal combustion

- engines,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 35, no. 6, 2009. doi: 10.1016/j.pecs.2009.08.001.
- [56] V. S. Yadav, S. L. Soni, and D. Sharma, “Performance and emission studies of direct injection C.I. engine in duel fuel mode (hydrogen-diesel) with EGR,” in *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012. doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.04.163.
- [57] T. Echehki and K. G. Gupta, “Hydrogen autoignition in a turbulent jet with preheated co-flow air,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 19, 2009, doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.06.085.
- [58] M. Balat, “Potential importance of hydrogen as a future solution to environmental and transportation problems,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 15, 2008, doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.05.047.
- [59] J. W. Heffel, “NO_x emission and performance data for a hydrogen fueled internal combustion engine at 1500 rpm using exhaust gas recirculation,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 28, no. 8, 2003, doi: 10.1016/S0360-3199(02)00157-X.
- [60] M. A. Rosen, I. Dincer, and M. Kanoglu, “Role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact,” *Energy Policy*, vol. 36, no. 1, 2008.
- [61] A. Midilli and I. Dincer, “Hydrogen as a renewable and sustainable solution in reducing global fossil fuel consumption,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 16, 2008, doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.05.024.
- [62] D. Sáinz, P. M. Diéguez, C. Sopena, J. C. Urroz, and L. M. Gandía, “Conversion of a commercial gasoline vehicle to run bi-fuel (hydrogen-gasoline),” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 2, 2012, doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.10.046.
- [63] P. Huyskens, S. Van Oost, P. J. Goemaere, K. Bertels, and M. Pecqueur, “The technical implementation of a retrofit hydrogen PFI system on a passenger car,” in *SAE Technical Papers*, 2011. doi: 10.4271/2011-01-2004.
- [64] K. Yamane, M. Nogami, Y. Umemura, M. Oikawa, Y. Sato, and Y. Goto, “Development of high pressure H₂ gas injectors, capable of injection at large injection rate and high response using a common-rail type actuating system for a 4-cylinder, 4.7-liter total displacement, spark ignition hydrogen engine,” in *SAE Technical Papers*, 2011. doi: 10.4271/2011-01-2005.
- [65] A. Kawamura, Y. Sato, K. Naganuma, K. Yamane, and Y. Takagi, “Development project of a multi-cylinder DISI hydrogen ICE system for heavy duty vehicles,” in *SAE Technical Papers*, 2010. doi: 10.4271/2010-

01-2175.

- [66] K. Naganuma *et al.*, “Efficiency and emissions-optimized operating strategy of a high-pressure direct injection hydrogen engine for heavy-duty trucks,” *SAE Int. J. Engines*, vol. 2, no. 2, 2010, doi: 10.4271/2009-01-2683.
- [67] A. Kawamura, T. Yanai, Y. Sato, K. Naganuma, K. Yamane, and Y. Takagi, “Summary and progress of the hydrogen ice truck development project,” *SAE Int. J. Commer. Veh.*, vol. 2, no. 1, 2009, doi: 10.4271/2009-01-1922.
- [68] R. Scarcelli, A. L. Kastengren, C. F. Powell, T. Wallner, and N. S. Matthias, “High-pressure gaseous injection: A comprehensive analysis of gas dynamics and mixing effects,” in *ASME 2012 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference, ICEF 2012*, 2012. doi: 10.1115/ICEF2012-92137.
- [69] T. Wallner, N. S. Matthias, R. Scarcelli, and J. C. Kwon, “Evaluation of the efficiency and the drive cycle emissions for a hydrogen direct-injection engine,” in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2013. doi: 10.1177/0954407012461875.
- [70] N. S. Matthias, T. Wallner, and R. Scarcelli, “A Hydrogen Direct Injection Engine Concept that Exceeds U.S. DOE Light-Duty Efficiency Targets,” *SAE Int. J. Engines*, vol. 5, no. 2, 2012, doi: 10.4271/2012-01-0653.
- [71] R. Scarcelli, T. Wallner, N. Matthias, V. Salazar, and S. Kaiser, “Mixture formation in direct injection hydrogen engines: Cfd and optical analysis of single- and multi-hole nozzles,” *SAE Int. J. Engines*, vol. 4, no. 2, 2011, doi: 10.4271/2011-24-0096.
- [72] V. Salazar and S. Kaiser, “Influence of the flow field on flame propagation in a hydrogen-fueled internal combustion engine,” *SAE Int. J. Engines*, vol. 4, no. 2, 2011, doi: 10.4271/2011-24-0098.
- [73] R. Scarcelli, T. Wallner, N. Matthias, V. Salazar, and S. Kaiser, “Numerical and optical evolution of gaseous jets in direct injection hydrogen engines,” in *SAE 2011 World Congress and Exhibition*, 2011. doi: 10.4271/2011-01-0675.
- [74] V. Salazar and S. Kaiser, “Interaction of intake-induced flow and injection jet in a direct-injection hydrogen-fueled engine measured by PIV,” in *SAE 2011 World Congress and Exhibition*, 2011. doi: 10.4271/2011-01-0673.
- [75] R. Scarcelli, T. Wallner, H. Obermair, V. M. Salazar, and S. A. Kaiser, “CFD and optical investigations of fluid dynamics and mixture formation in a DI-H2ICE,” in *American Society of Mechanical Engineers, Internal*

- Combustion Engine Division (Publication) ICE*, 2010. doi: 10.1115/ICEF2010-35084.
- [76] H. Obermair, R. Scarcelli, and T. Wallner, "Efficiency improved combustion system for hydrogen direct injection operation," in *SAE Technical Papers*, 2010. doi: 10.4271/2010-01-2170.
- [77] S. Verhelst, P. Maesschalck, N. Rombaut, and R. Sierens, "Increasing the power output of hydrogen internal combustion engines by means of supercharging and exhaust gas recirculation," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 10, 2009, doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.03.037.
- [78] P. A. Dennis, R. J. Dingli, P. Abbasi Atibeh, H. C. Watson, M. J. Brear, and G. Voice, "Performance of a port fuel injected, spark ignition engine optimised for hydrogen fuel," in *SAE Technical Papers*, 2012. doi: 10.4271/2012-01-0654.
- [79] S. Verhelst, J. Demuyneck, R. Sierens, and P. Huyskens, "Impact of variable valve timing on power, emissions and backfire of a bi-fuel hydrogen/gasoline engine," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 9, 2010, doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.02.022.
- [80] S. Natarajan, M. Abraham, M. Rajesh, G. Subash, R. Kunal, and L. Das, "DelHy 3W - Hydrogen fuelled Hy-alfa three wheeler," in *SAE Technical Papers*, 2013. doi: 10.4271/2013-01-0224.
- [81] M. Younkins, M. Wooldridge, and B. Boyer, "Direct in-cylinder injection of water into a PI hydrogen engine," in *SAE Technical Papers*, 2013. doi: 10.4271/2013-01-0227.
- [82] J. Vancoillie, J. Demuyneck, L. Sileghem, M. Van De Ginste, and S. Verhelst, "Comparison of the renewable transportation fuels, hydrogen and methanol formed from hydrogen, with gasoline - Engine efficiency study," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 12, 2012.
- [83] J. Pareja, H. J. Burbano, and Y. Ogami, "Measurements of the laminar burning velocity of hydrogen-air premixed flames," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 4, 2010.
- [84] S. Ravi and E. L. Petersen, "Laminar flame speed correlations for pure-hydrogen and high-hydrogen content syngas blends with various diluents," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 24, 2012, doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.09.086.
- [85] S. Verhelst, C. TJoel, J. Vancoillie, and J. Demuyneck, "A correlation for the laminar burning velocity for use in hydrogen spark ignition engine simulation," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 1, 2011, doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.10.020.
- [86] E. Hu, Z. Huang, J. He, and H. Miao, "Experimental and numerical study

- on laminar burning velocities and flame instabilities of hydrogen-air mixtures at elevated pressures and temperatures,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 20, 2009.
- [87] R. Sierens and S. Verhelst, “Influence of the injection parameters on the efficiency and power output of a hydrogen fueled engine,” *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 125, no. 2, 2003.
- [88] P. G. Aleiferis and M. F. Rosati, “Controlled autoignition of hydrogen in a direct-injection optical engine,” *Combust. Flame*, vol. 159, no. 7, 2012, doi: 10.1016/j.combustflame.2012.02.021.
- [89] K. J. Lee, Y. R. Kim, C. H. Byun, and J. T. Lee, “Feasibility of compression ignition for hydrogen fueled engine with neat hydrogen-air pre-mixture by using high compression,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 1, 2013. doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.10.021.
- [90] W. Kirchweger, R. Haslacher, M. Hallmannsegger, and U. Gerke, “Applications of the LIF method for the diagnostics of the combustion process of gas-IC-engines,” *Exp. Fluids*, vol. 43, no. 2–3, 2007, doi: 10.1007/s00348-007-0287-1.
- [91] T. Blotevogel *et al.*, “Developing planar laser-induced fluorescence for the investigation of the mixture formation process in hydrogen engines,” in *SAE Technical Papers*, 2004. doi: 10.4271/2004-01-1408.
- [92] V. M. Salazar and S. A. Kaiser, “Influence of the in-cylinder flow field (Tumble) on the fuel distribution in a di hydrogen engine using a single-hole injector,” in *SAE Technical Papers*, 2010. doi: 10.4271/2010-01-0579.
- [93] V. M. Salazar and S. A. Kaiser, “An optical study of mixture preparation in a hydrogen-fueled engine with direct injection using different nozzle designs,” *SAE Int. J. Engines*, vol. 2, no. 2, 2010, doi: 10.4271/2009-01-2682.
- [94] V. M. Salazar, S. A. Kaiser, and F. Halter, “Optimizing precision and accuracy of quantitative PLIF of acetone as a tracer for hydrogen fuel,” *SAE Int. J. Fuels Lubr.*, vol. 2, no. 1, 2009, doi: 10.4271/2009-01-1534.
- [95] T. Shudo and S. Oba, “Mixture distribution measurement using laser induced breakdown spectroscopy in hydrogen direct injection stratified charge,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 5, 2009, doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.01.012.
- [96] M. K. Roy, N. Kawahara, E. Tomita, and T. Fujitani, “Jet-guided combustion characteristics and local fuel concentration measurements in a hydrogen direct-injection spark-ignition engine,” *Proc. Combust. Inst.*,

- vol. 34, no. 2, 2013, doi: 10.1016/j.proci.2012.06.103.
- [97] S. Kaiser and C. M. White, "PIV and PLIF to evaluate mixture formation in a direct-injection hydrogen-fuelled engine," *SAE Int. J. Engines*, vol. 1, no. 1, 2009, doi: 10.4271/2008-01-1034.
- [98] T. Wallner, A. M. Nande, and J. D. Naber, "Study of basic injection configurations using a direct-injection hydrogen research engine," in *SAE Technical Papers*, 2009. doi: 10.4271/2009-01-1418.
- [99] T. Wallner, R. Scarcelli, A. M. Nande, and J. D. Naber, "Assessment of multiple injection strategies in a direct-injection hydrogen research engine," in *SAE Technical Papers*, 2009. doi: 10.4271/2009-01-1920.
- [100] M. Oikawa, Y. Ogasawara, Y. Kondo, K. Sekine, Y. Takagi, and Y. Sato, "Optimization of Hydrogen Jet Configuration by Single Hole Nozzle and High Speed Laser Shadowgraphy in High Pressure Direct Injection Hydrogen Engines," *Int. J. Automot. Eng.*, vol. 3, no. 1, 2012, doi: 10.20485/jsaeijae.3.1_1.
- [101] M. K. Roy, N. Kawahara, E. Tomita, and T. Fujitani, "High-pressure hydrogen jet and combustion characteristics in a direct-injection hydrogen engine," in *SAE Technical Papers*, 2011. doi: 10.4271/2011-01-2003.
- [102] P. Rorimpandey, G. Zhai, S. Kook, E. R. Hawkes, and Q. N. Chan, "Effects of energy-share and ambient oxygen concentration on hydrogen-diesel dual-fuel direct-injection (H2DDI) combustion in compression-ignition conditions," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 49, 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.11.106.
- [103] P. G. Aleiferis and M. F. Rosati, "Flame chemiluminescence and OH LIF imaging in a hydrogen-fuelled spark-ignition engine," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 2, 2012, doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.10.010.
- [104] C. Sopena, P. M. Diéguez, D. Sáinz, J. C. Urroz, E. Guelbenzu, and L. M. Gandía, "Conversion of a commercial spark ignition engine to run on hydrogen: Performance comparison using hydrogen and gasoline," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 3, 2010, doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.11.090.
- [105] H. Eichlseder, T. Wallner, R. Freymann, and J. Ringler, "The potential of hydrogen internal combustion engines in a future mobility scenario," in *SAE Technical Papers*, 2003. doi: 10.4271/2003-01-2267.
- [106] A. Wimmer, T. Wallner, J. Ringler, and F. Gerbig, "H2-direct injection - A highly promising combustion concept," in *SAE Technical Papers*, 2005. doi: 10.4271/2005-01-0108.
- [107] M. Younkins, B. Boyer, and M. Wooldridge, "Hydrogen di dual zone combustion system," *SAE Int. J. Engines*, vol. 6, no. 1, 2013, doi:

10.4271/2013-01-0230.

- [108] T. Shudo and S. Nabetani, "Analysis of degree of constant volume and cooling loss in a hydrogen fuelled SI engine," in *SAE Technical Papers*, 2001. doi: 10.4271/2001-01-3561.
- [109] J. Demuynck, N. Raes, M. Zuliani, M. De Paepe, R. Sierens, and S. Verhelst, "Local heat flux measurements in a hydrogen and methane spark ignition engine with a thermopile sensor," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 24, 2009, doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.10.035.
- [110] J. Demuynck, M. De Paepe, H. Huisseune, R. Sierens, J. Vancoillie, and S. Verhelst, "On the applicability of empirical heat transfer models for hydrogen combustion engines," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 1, 2011, doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.10.059.
- [111] J. Demuynck, K. Chana, M. De Paepe, and S. Verhelst, "Evaluation of a flow-field-based heat transfer model for premixed spark-ignition engines on hydrogen," in *SAE Technical Papers*, 2013. doi: 10.4271/2013-01-0225.
- [112] J. Demuynck, K. Chana, M. De Paepe, L. Sileghem, J. Vancoillie, and S. Verhelst, "Applying design of experiments to develop a fuel independent heat transfer model for spark ignition engines," in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2013.
- [113] J. Demuynck, M. De Paepe, L. Sileghem, J. Vancoillie, S. Verhelst, and K. Chana, "Applying Design of Experiments to Determine the Effect of Gas Properties on In-Cylinder Heat Flux in a Motored SI Engine," *SAE Int. J. Engines*, vol. 5, no. 3, 2012, doi: 10.4271/2012-01-1209.
- [114] M. S. Cengiz and Ç. Cengiz, "Numerical Analysis Of Tunnel Led Lighting Maintenance Factor," *IJUMEJ*, vol. 19, no. 2, pp. 154–163, Dec. 2018. doi: 10.31436/ijumej.v19i2.1007.
- [115] S. Rüstemli and M. S. Cengiz, "Active Filter Solutions in Energy Systems," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 23, no. 6, pp. 1587–1607, Nov. 2015.
- [116] S. B. Efe and D. Varhan, "Interior Lighting Of A Historical Building By Using Led Luminaires: A Case Study Of Fatih Paşa Mosque," *Light & Engineering*, vol. 28, no. 4, pp. 77–83, 2020.
- [117] S. Rüstemli, F. Dinçer, M. Çelik, and M. S. Cengiz, "Fotovoltaik Paneller: Güneş Takip Sistemleri ve İklimlendirme Sistemleri," *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Cilt: 2, Sayı. 2, s. 141–147, 2013
- [118] M. S. Cengiz and S. Rüstemli, "Passive filter solutions and simulation performance in industrial plants," *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 39–43, Dec. 2016. doi:

10.17678/beujst.94574. <https://doi.org/10.3906/elk-1402-21>

- [119] M. Kaynaklı, O. Palta, and Ç. Cengiz, "Solar Radiation and Temperature Effects on Agricultural Irrigation Systems," *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 53–58, 2018.
- [120] S. B. Efe, "UPFC Based Real-Time Optimization of Power Systems for Dynamic Voltage Regulation," *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, vol. 116, no. 3, pp. 391–406, 2018.
- [121] Ç. Cengiz, "Relationship of Braking Distance and Rear Headlight on Highways," *Light and Engineering*, vol. 32, no. 2, pp. 29–36, 2024.
- [122] Ç. Cengiz, "The Relationship Between Electricity Consumption from Outdoor Lighting And Economic Growth," *Light and Engineering*, vol. 32, no. 4, 2024.
- [123] S. Sukumaran and S. C. Kong, "Numerical study on mixture formation characteristics in a direct-injection hydrogen engine," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 15, 2010, doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.05.090.
- [124] R. Whitesides, R. P. Hessel, D. L. Flowers, and S. M. Aceves, "Application of gaseous sphere injection method for modeling under-expanded H₂ injection," *Combust. Theory Model.*, vol. 15, no. 3, 2011, doi: 10.1080/13647830.2010.541286.
- [125] R. Scarcelli, T. Wallner, V. M. Salazar, and S. A. Kaiser, "Modeling and experiments on mixture formation in a hydrogen direct-injection research engine," *SAE Int. J. Engines*, vol. 2, no. 2, 2010, doi: 10.4271/2009-24-0083.
- [126] F. Zhang, R. Yu, and X. S. Bai, "Detailed numerical simulation of syngas combustion under partially premixed combustion engine conditions," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 22, 2012, doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.08.076.
- [127] Ç. Cengiz "Nonparametric estimation of a renewal function in the case of censored sample," *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology* 9(2) (2019) 54–57
- [128] K. Naganuma, Y. Takagi, A. Kawamura, and Y. Sato, "Study of NO_x emissions reduction strategy for a naturally aspirated 4-cylinder direct injection hydrogen ICE," in *SAE Technical Papers*, 2010. doi: 10.4271/2010-01-2163.
- [129] Yurci, Y., Kaynaklı, M., Palta, O., Efe, S. B., & Cengiz, Ç. (2016). The performance-cost effect of the scada system on distribution networks. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 11(6); 32–38.