



Journal of ETA Maritime Science

journal homepage: www.gemimo.org



LPG Dönüşümü Yapılmış Bir Dizel Motorunda Azotoksit Oluşumunun Teorik Ve Deneysel Olarak İncelenmesi

Hüseyin Emre DOĞAN ¹, Hikmet ARSLAN ¹, Rafiq MEHDİYEY ²

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği

² TŪMOSAN AŞ

ÖNEMLİ NOKTALAR

- In this study, nitrogen oxide emissions of an diesel engine running on with LPG fuel were investigated.
- MR-2 combustion chamber is used in this engine to create a stratified charge.
- Engine power is decreased, but a significant reduction of nitrogen oxide emissions are obtained.

MAKALE BİLGİSİ

Makalenin Tarihçesi

Alındı: 23 Eylül 2013

Düzeltilerek alındı: 10 Ekim 2013

Kabul edildi: 15 Ekim 2013

Anahtar Kelimeler

İçten yanmalı motor (İYM), Dizel-LPG dönüşümü, LPG yakıtı, Azotoksit emisyonları, 'MR-Process'.

ÖZET

İçten yanmalı motorların (İYM) icat edilmesinin üzerinden yaklaşık 150 yıl geçti. 1955 yılında; egzoz gazlarının hava kirliliğine sebep olduğunun anlaşılmasının ardından, motorlar üzerinde egzoz emisyonlarını düşürmeye yönelik çalışmalar başladı. Ayrıca 1970'li yıllarda ortaya çıkan petrol krizinin bir sonucu olarak, düşük yakıt tüketimine sahip motorların üretilmesi gündeme geldi. İYM'ler karbondioksit (CO₂) gazının üretiminde büyük bir paya sahiptir. CO₂ üretimi tamamen tüketilen yakıt miktarına bağlıdır. Benzin motorlarının özgül yakıt tüketiminin genellikle dizel motorlardan fazla olması sebebiyle, CO₂ emisyon değerlerini sağlamakta güçlükler yaşanmaktadır. Dizel motorlarda ise azotoksit (NOx) emisyonları sorun oluşturmaktadır. Bu iki sorunun çözümü, kademeli dolgu ile çalışan motorların ve alternatif yakıtların kullanılması ile daha kolay hale gelmektedir. Egzoz emisyonlarını sağlayan çevreci motorların geliştirilmesi için TŪMOSAN A.Ş. ve İTÜ işbirliği ile başlatılan bir çalışmada; dizel yakıtlı bir motorun, kademeli dolgu ve LPG yakıtı ile çalışması için motor üzerinde gerekli dönüşümler yapılmıştır. Bu motorda kademelenmeyi sağlamak ve 'MR-Process' yanma mekanizmasını gerçekleştirmek için MR-2 yanma odası kullanılmıştır. MR-2 yanma odası zengin ve fakir karışım bölgelerinden oluşmakta, yanma buji yardımı ile zengin bölgede başlamaktadır. Bilgisayar ortamında oluşturulan tek boyutlu bir hesaplama yazılımı ile teorik hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplama ve deneylerden elde edilen sonuçlar göstermektedir ki, motorun LPG yakıtı ile çalıştırılması durumunda, NOx emisyonları standartların istediği seviyeye düşerken güç ve yakıt tüketimi değerlerinde önemsiz değişiklikler olmaktadır.

© 2013 GEMİMO. Her hakkı saklıdır.

ARTICLE INFO

Article History

Received: 23 September 2013

Received in revised form: 10 October 2013

Accepted: 15 October 2013

Keywords

Internal combustion engine, Diesel-LPG conversion, LPG fuel, Nitrogen Dioxide emission, MR-Process.

İrtibat:

Hüseyin Emre DOĞAN / edogan@itu.edu.tr

Hikmet ARSLAN / arslanh@itu.edu.tr

Rafiq MEHDİYEV / mehdiyev@itu.edu.tr

ABSTRACT

Internal combustion engines (ICE) were invented about 150 years ago. In 1955, after the realization of that exhaust gases contribute to air pollution, scientists have began research to reduce exhaust emissions on the engines. In addition, as a result of the oil crisis in the 1970s, production of engines having low fuel consumption became significant. ICE have a large share of the production of carbon dioxide (CO₂) gas. Generally, gasoline engines have more specific fuel consumption than diesel engines. Therefore, CO₂ emissions are an important problem for gasoline engines. On the other hand, the primary problem for diesel engines are nitrogen oxides emissions. With the use of stratified charge engines and alternative fuels are becoming easier to solve these two problems. A project has been started for the development of environmentally friendly engines by ITU and TUMOSAN Inc. In this project, a diesel engine was converted to LPG fuel. MR-2 combustion chamber is used in this engine to create a stratified charge and perform 'MR-Process' combustion mechanism. MR-2 combustion chamber consist of different two regions where first region contains rich mixture and other region includes poor mixture. Then, the combustion is started in rich mixture zone. A one-dimensional software program on the basis of turbulent combustion model has used to theoretical calculations. Calculations and experimental results show that when the engine is operated with LPG fuel; NO_x emissions reduced to the desired levels, but not a important change in power and fuel consumption values.

© 2013 GEMİMO. All rights reserved.

1. Giriş

İçten yanmalı motorların icat edilmesinin üzerinden yaklaşık 150 yıl geçti. İlk yapılan motorlarda düşük verim sorunu bulunmaktaydı. Lenoir'in iki zamanlı motorunun verimi % 5 civarındaydı. Bu sebepten dolayı verimi artırma üzerine çalışmalar yapılmaktaydı. Otto'nun dört zamanlı motoru icat etmesi ile hızlı bir verim artışı sağlandı. 1894 yılında Otto motorları % 20 -25 efektif verime sahipti. Dizel motorlar ise; sıkıştırma oranının yüksek değerlerde olmasından dolayı mevcut motorlardan iki kat daha fazla verime sahipti. Motorlardaki güç ve verim değerleri gittikçe daha yüksek değerlere yükseldi. Fakat 1945'li yıllarda Los Angeles semalarında görülen hava kirliliği ilerleyen dönemlerde motorlar üzerindeki önemli değişikliklere yol açtı. Görülen hava kirliliğinin, araçların egzoz gazlarından çıkan NO_x ve HC bileşiklerinin güneş ışığı altında tepkimeye girerek kimyasal duman oluşturduğu araştırmacılar tarafından belirlendi. Bu gelişmenin ardından başta Amerika Birleşik Devletleri olmak üzere birçok ülkede egzoz emisyonlarını sınırlayan kanunlar yürürlüğe girdi. ⁽¹⁾ İlerleyen yıllarda hava kirliliğinin insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinin belirlenmesi ile bu değerler sürekli güncellenerek günümüze kadar gelmiştir.

Bu süreç içerisinde 1970 yılında patlak veren petrol krizi nedeniyle motorların yakıt tüketimi değerlerinin düşürülmesinin gerekliliği ortaya çıktı. Günümüzde, güç kaybına yol açmadan; düşük motor hacmine sahip, daha az yakıt tüketen ve gittikçe daha katı hale gelen egzoz emisyon standartlarını sağlayan motorları geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Fakat şu rahatlıkla söylenebilir ki egzoz emisyon değerlerini standartlara uygun hale getirmek üreticilerin birinci önceliğindedir. Eğer bu standartlar sağlanmaz ise üretilen motorun ve bu motoru kullanan taşıtların, emisyon standartlarını kabul etmiş ülkelere satışı mümkün olmamaktadır. Motor üreticileri bu durumu göz önünde bulundurarak, emisyon standartlarını sağlamak için daha fazla yakıt tüketmeyi veya verimde bir miktar düşmeyi göze almaktadırlar. ⁽²⁾

Yürürlükte olan egzoz emisyon standartları motorların yapısı ve çalışma şartlarını büyük ölçüde etkilemektedir. Emisyon değerlerini egzoz sisteminde azaltılmasını sağlayan ekipmanların kullanılması sebebiyle maliyetler artış göstermektedir. Ayrıca yakıt tüketimine bağlı olarak çevreye salınan CO₂ miktarının gittikçe artmasının bir sonucu olarak ortaya çıkan sera etkisi nedeniyle iklim değişiklikleri meydana gelmektedir. CO₂

miktarının azaltılması yakıt tüketimi değerlerindeki düşmeye bağlıdır. Benzin motorları genel anlamda dizel motorlara göre daha fazla yakıt tüketim değerlerine sahiptir. Bunun temel sebebi sıkıştırma oranını değerinin vuruşu sebebiyle 11 dolayında sınırlı kalmasıdır. Sıkıştırma oranı değerinin 14-15 civarına ulaşması halinde benzin motorlarının verimi artacak ve yakıt tüketim değerleri azalacaktır. Fakat vuruşta meydana gelmeden, sıkıştırma oranının artırılması yeni yöntemlerin uygulanması ile mümkündür. Kademeli dolgu motorlar bu noktada devreye girmektedir. Kademeli dolgu sistemlerde yanma odası içinde fakir ve zengin karışım bölgeleri oluşturularak vuruşu olayı engellenir ve bu yolla sıkıştırma oranı istenen değerlere getirilebilmektedir. Benzin motorlarında vuruşu olmaması için yüksek oktan sayılı yakıtlar da kullanılabilir. LPG ve CNG gibi yüksek oktan sayılı yakıtların uygun koşullar altında kullanılmasıyla CO₂ ve emisyon değerleri azaltılır. Ayrıca LPG ve CNG gibi yakıtlar içeriğinde daha az karbon bulundurması sebebiyle de daha az CO₂ üretilir.

Dizel motorların verim değerlerinin daha yüksek olması sebebiyle CO₂ salımı daha düşüktür. Biodizel gibi yapısında karbon içeriği çok az olan sentetik esaslı yakıtların ticari olarak kullanılabilir olması durumunda dizel motorların CO₂ emisyonları çok düşük seviyelere ulaşacaktır. Dizel motorlarında NO_x emisyonları büyük sorun teşkil etmektedir. Örneğin Euro 5 standartlarından Euro 6 geçişte NO_x emisyonlarında % 55, aynı şekilde yol dışı araçlarda Stage IIIA' dan Stage IV'e geçişte NO_x değerlerinde % 87 azalma istenmektedir. Bu sebeplerden dolayı uzun vadede daha çevreci ve ucuz yakıtların kullanılması kaçınılmaz olmaktadır. (2)

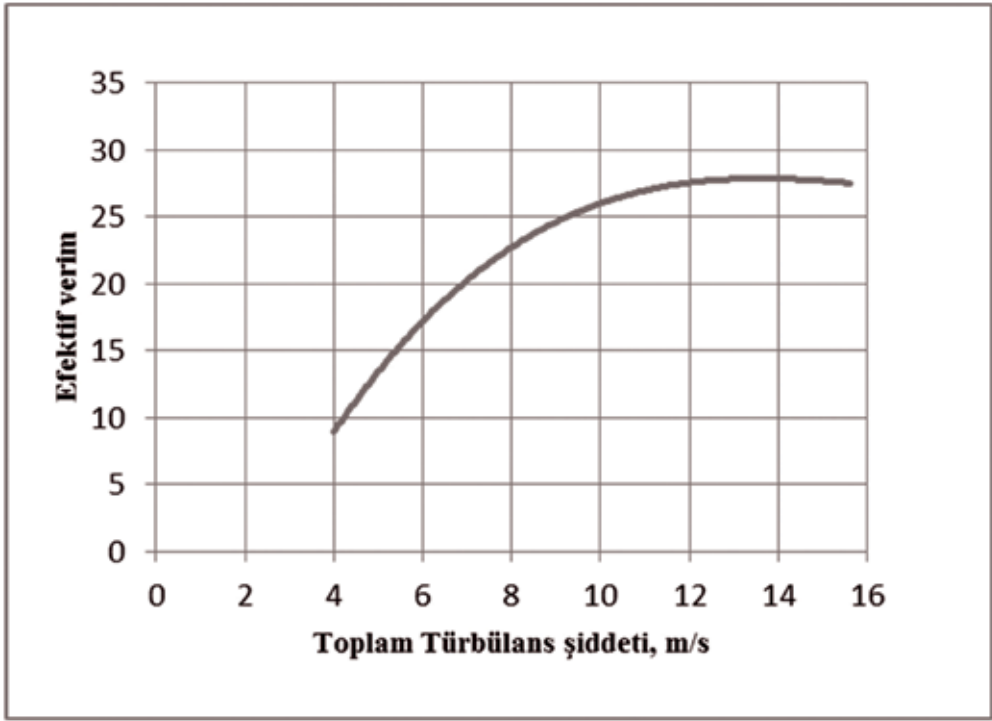
Bu noktada alternatif yakıtların önemi ortaya çıkmaktadır. Elektrik enerjisinin İYM'lerde kullanımını üzerine çok sayıda araştırma yapılmasına rağmen yakın süreçte karayolu taşıtlarında yaygın olarak kullanımı zor gözükmektedir. Bu sebepten dolayı LPG ve CNG yakıtlarının İYM'lerde kullanımı

gittikçe yaygınlaşmaktadır. LPG ve CNG yakıtları dizel ve benzin yakıtların göre daha çevreci ve daha fazla rezerve sahiptir. Dolayısıyla uzun vadede kullanımları mümkündür. OECD ülkeleri arasında iki yakıtın kullanım oranı düşük olmasına rağmen gelişmiş ülkelerde kullanım oranları fazladır. Örneğin Hollanda'da binek taşıtlarda LPG kullanım oranı %11' dir. (1-2) CNG ise İYM'lerde kullanımı için ilave işleme ihtiyaç duymayan tek yakıttır. Ayrıca benzin yakıtına göre %10 daha fazla termik verime sahiptir. Fakat depolama hacmi ve maliyetinin yüksek olmasından dolayı günümüzde şehir içi toplu taşıma araçlarında kullanımı daha yaygındır. Her iki yakıtta sahip oldukları rezerv miktarı, ısı değeri ve yüksek oktan sayısı nedeniyle gelecek için araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Bu çalışma, LPG yakıtına dönüştürülmüş bir dizel traktör motorunun teorik ve deneysel incelenmesi hakkında bilgiler içermektedir.

2. Türbülanslı Yanma Modeli ve Hesap Programı

2.1. Türbülanslı yanma modelinin incelenmesi

Bu çalışmada Rusya Bilimler Akademisi Kimyasal Fizik Enstitüsü (KFE) tarafından teklif edilen türbülanslı yanma olayına ilişkin yaklaşım İYM'ye uygulanmıştır. Buna göre emme süresince oluşan, izotropik olmayan türbülanslı gaz hareketinin kinetik enerjisi, piston ÜÖN'ye doğru giderken disipasyona uğrayıp yanma başlamadan önce izotropik hale dönüşmektedir. Dolayısıyla yanma odasının çeperlerinden 4-5 mm uzaklıktan itibaren başlayan bölgede karışımın türbülans şiddeti ve türbülans ölçeği birbirine eşit olmaktadır. Bu çalışmada kullanılan termodinamik model ile çevrim boyunca sıkıştırma, yanma ve genişleme zamanları boyunca silindir içi basınç ve sıcaklık değerleri Termodinamiğin I. Kanunu uygulanarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada ayrıca yakıtın oktan sayısı ve yanmanın gerçekleştiği koşullar dikkate alınarak vuruşu kontrolü de yapılmıştır. Sunulan türbülanslı yanma modeli, mevcut



Şekil 1 Türbülans şiddetinin motor verimine etkisi

modellerden farklı olarak, yanma prosesinin kimyasal ve fiziksel özelliklerine dayanarak yanma ürünlerinin hacminin genişleme hızının, dolayısıyla yanmış ürünlerin hacminin yanma odasında kaplayacağı hacim değişimini göz önüne almaktadır. Yanma ürünleri hacminin değişimi yanma odasında basıncın değişimi ile lineer orantılı olduğundan indike parametrelerin bu yöntemle hesaplanması daha kesin sonuçlara varmayı sağlamaktadır. Bu yöntemin bir başka önemli özelliği de yanma ürünleri hacmi hesaba katıldığı için, çok-boyutlu modellerde olduğu gibi, yanma odası geometrisi etkisinin de incelenebilmesidir. ⁽³⁾ Motor içerisindeki toplam türbülans şiddeti; emme sisteminin oluşturduğu teğetsel hava hareketi ve pistonun ÜÖN' ye doğru hareketi sebebiyle oluşan (tumble) hava hareketinin oluşturdukları türbülans şiddetlerinin toplamı olarak hesaplanmaktadır. MR-2 yanma odasındaki türbülansın asıl kaynağı emme sistemi olduğu için bu değer artırılması gereklidir. Emme sistemi tarafından oluştu-

ruş türbülans şiddetinin formülü denklem 1' de verilmiştir.

$$U'(U, \eta_v) = 0, \frac{0,8(2,60 + 5,4v_p)\eta}{\eta_{max}}$$

Fakat türbülanslı yanma modeli içerisinde türbülans şiddetinin sürekli artması aynı etkiyi yapmamaktadır. Rus bilim adamı KARPOV, V.P. tarafından önerilen ve alevin ilerleme hızının hesabında kullanılan formül denklem 2'de verilmiştir.

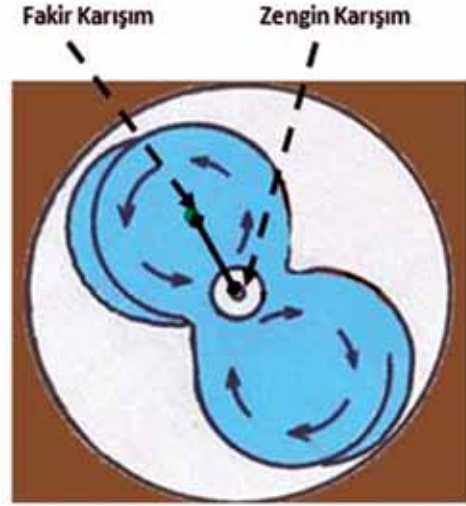
$$W = U_n + \frac{4}{3}K_p U_{\Sigma'} \square - \frac{0,17 \cdot 10^{-3} (U_{\Sigma'} \square)^2}{N\sqrt{\epsilon_t}}$$

Bu formülün ikinci ve üçüncü terimlerinde toplam türbülans şiddetinin (U_{Σ}) etkisi görülmektedir. Türbülans şiddeti değerinin birinci ve ikinci kuvvetlerini içeren terimler denklemin içerisinde bulunmaktadır. Bu et-

kiyi daha iyi anlamak için türbülans şiddetine bağlı olarak motor veriminin değişimi Şekil 1'de verilmiştir. Bu grafikten görüldüğü gibi türbülans şiddetinin sürekli artırılması motor parametrelerini her zaman olumlu yönde etkilememektedir. Karpov'a göre toplam türbülans şiddeti (U_{Σ}) 10 m/s değerini geçmesi durumunda alev sönmeleri başlamaktadır. Bu çalışmada (U_{Σ}) = 12 m/s değeri sınır değer olarak kabul edilmiştir. ⁽²⁾

2.2. MR-Process Yanma Mekanizması

LPG'li motorun yanma süreci MR-Process yanma mekanizmasına uygun olarak çalışmaktadır. "MR-Process" Yanma mekanizması, Çift Türbülanslı Döngü ortamına Prof. R.Mehdiyev tarafından verilen sembolik isimdir. ⁽³⁾ MR- Process yanma mekanizmasının gerçekleşmesi için iki aşamalı yanma gerçekleştirilebilen MR-2 Yanma Odası (YO) kullanılmıştır. MR-2 Yanma Odası iki adet oyuk içermektedir. Bu oyukların kesişme noktaları hizasında motor kafasına bir adet buji yerleştirilmiştir. Oyuklar içerisinde birbirine ters yönde dönen bir hava akımı oluşturulmaktadır. Hava akımı sebebiyle ortaya çıkan merkezkaç kuvvet, yoğunluğu havadan daha fazla olan LPG yakıtını oyukun dış kısmına doğru sürüklemektedir. Dolayısıyla buji etrafında yakıtça zengin bir bölge oluşturulmaktadır. Hava akımının merkezine doğru gidildikçe önce stokiyometrik daha sonra fakir karışım bölgeleri mevcuttur (Şekil 2). Yanma zengin karışım bölgesinde başlar ve fakir karışım bölgelerine doğru ilerler. Bu yolla kademeli bir yanma süreci ortaya çıkmış olur. NO_x oluşumunun, diğer yanma ürünlerinin denge noktasına ulaşmasının ardından başladığı bilinmektedir. Bu sebepten dolayı yanmanın başladığı ve alevin ilk geçtiği bölgelerde NO_x oluşumu daha fazladır. Fakat MR-Process yanma mekanizmasında ilk yanma bölgelerinde NO_x oluşması için yeterli miktarda O_2 olmadığı için NO_x oluşumu daha azdır. Ayrıca türbülanslı yanma gerçekleştiği için klasik yanma mekanizmalarındaki alev ilerleme sistemi yoktur. Yerel sıcaklıkların düşmesiyle NO_x oluşumu daha az olmaktadır.



Şekil 2 MR-2 Yanma Odasının şematik gösterimi ve kademelenme sistemi.

2.3. Hesaplama Programının İncelenmesi

Türbülanslı yanma modelini esas alan ve termodinamik bağıntılarla birlikte motorlara ait tek boyutlu bir hesaplama programı, 1980'li yıllarda Fortran 77 yazılımı kullanılarak Azerbaycan Teknik Üniversitesinde oluşturulmuştur. Program içerisinde motora ait birçok değer tanımlanmış olup, birçok sonuç çıktısı elde edilmektedir. Bu programı kullanmayı cazip hale getiren ise emisyon değerlerinin hesabını da yapmasıdır. Program 11 adet yanma ürününün denge konsantrasyonlarını hesaplamakta, Zeldovich mekanizmasına göre azotoksit emisyonlarını tespit etmektedir. Ayrıca azotoksit emisyonlarının oluşumunun daha detaylı görülebilmesi için yanma odası içerisinde 9 farklı hesap bölümü belirlenmiştir. Yakıtın % 11'i yandığı zaman 1. bölge işleme alınmakta ve yanma sonuna kadar bu bölümde hesaplama devam etmektedir. 9. Bölge ise yakıtın % 99' ı yanınca devreye girmektedir. Bu yolla NO_x emisyonlarının oluşum süreci daha ayrıntılı incelenmektedir. Program yaklaşık 2000 satırdan oluşmaktadır. Ana program yaklaşık 1200 satır, harici alt programlar ise 800 satır kod içermektedir. Alt programlar içerisinde denge konsantrasyonlarının hesabı, azotoksit emisyonlarının

hesabı, yanma sürecinde yanan yakıt kesrine göre hesaba dahil olan 9 farklı bölüm için kodları bulunmaktadır.

Bu hesap programının türbülanslı yanma modeline göre çalışması ile MR-Process yanma mekanizmasını gerçekleştirmek için kullanılan MR-Yanma odası üzerindeki oyuklarda oluşan türbülans hareketi benzerlik göstermektedir. Bu nokta programın teorik hesaplamalar için kullanılması tercihinde etkili olmuştur. Fakat model homojen yanma mekanizmasına göre çalışmaktadır. Bölüm 3.1'de kademeli yanma mekanizmasının program içerisine eklenmesi hakkında bilgi verilmiştir.

3. Teorik ve Deneysel Çalışmalar

3.1. Teorik Çalışmalar

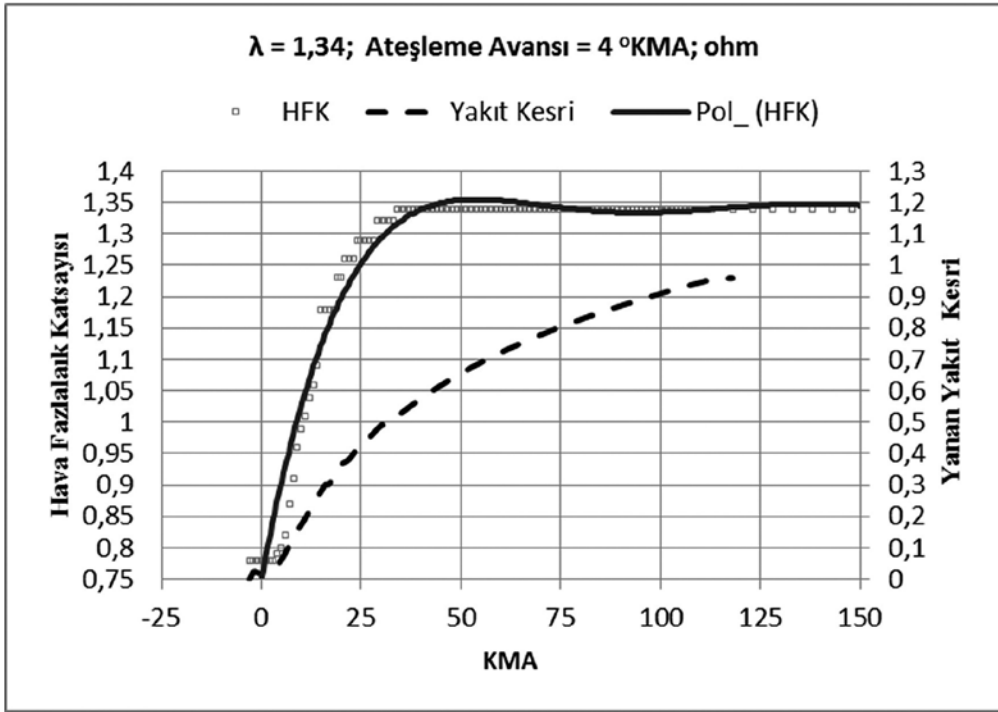
Bu çalışmada kısmen kademeli ve türbülans şiddeti normal bir motordan fazla olan

bir yanma modeli incelenmiştir. Çünkü LPG'li motorda kullanılan MR-2 yanma odası; türbülans şiddetini artırmakta ve kademeli bir yanma süreci sağlamaktadır. Bunun için öncelikle bölüm 2.3'te anlatılan ve Fortran 77 programı kullanılarak oluşturulan programın giriş değerleri LPG yakıtına ve dönüştürme işlemi yapılan dizel motorun konstrüksiyon değerlerine göre yeniden düzenlenmiştir. Bu bilgilerin bir kısmı LPG motoru için program içerisinde kullanılan değişken isimleri ile birlikte Tablo 1'de verilmiştir. Fakat yapılan bu değişiklikler doğru sonuç almak için yeterli değildir. Bölüm 2.1'de bahsedilen türbülans şiddetinin değerinin değiştirilmesi gereklidir. İlgili formül kullanılarak bu değişiklik program içerisine ilave edilmiştir.

Kademeli dolguyu sağlayan MR-Process yanma mekanizmasında hava fazlalık katsayısı (λ) değeri sabit değildir. Teorik olarak

Tablo 1 LPG Motoru için Fortran 77 Programı giriş değerleri.

Değişken	Değişken Açıklaması	Birimi	LPG Motoru
N	Motor devir sayısı	Devir/dakika	2000
ALO	Hava fazlalık katsayısı	-	1,34
EV	Volümetrik verim	-	0,85
TETA	Ateşleme avansı	KMA	4,0 - 10,0
C	Yakıt içerisindeki Karbonun kütleli oranı	kg Karbon / kg yakıt	0,8218
H	Yakıt içerisindeki Hidrojenin kütleli oranı	kg Hidrojen / kg yakıt	0,1782
OT	Yakıt içerisindeki Oksijenin kütleli oranı	kg oksijen / kg yakıt	0,0
MT	Yakıtın molekül ağırlığı	kg / kmol	51,11
HI	Yakıtın alt ısı değeri	kJ / kg	46050
CC	Sıkıştırma oranı	-	14:1
DEL	Silindir kafası conta kalınlığı	m	0,013
DALFG	Program hesaplama adımı	KMA	0,2
S	Strok	m	0,115
D	Piston çapı	m	0,104
RL	Krank yarıçapının biyel boyuna oranı	-	0,31
SC	Silindir sayısı	-	1
OKT	Yakıtın oktan sayısı	-	106
RT	Yakıtın yoğunluğu	kg / m ³	510
OPD	Yanma odası çapının piston çapına oranı	-	0,65
LPG yakıtı % 50 Propan ve % 50 Bütan karışımıdır.			



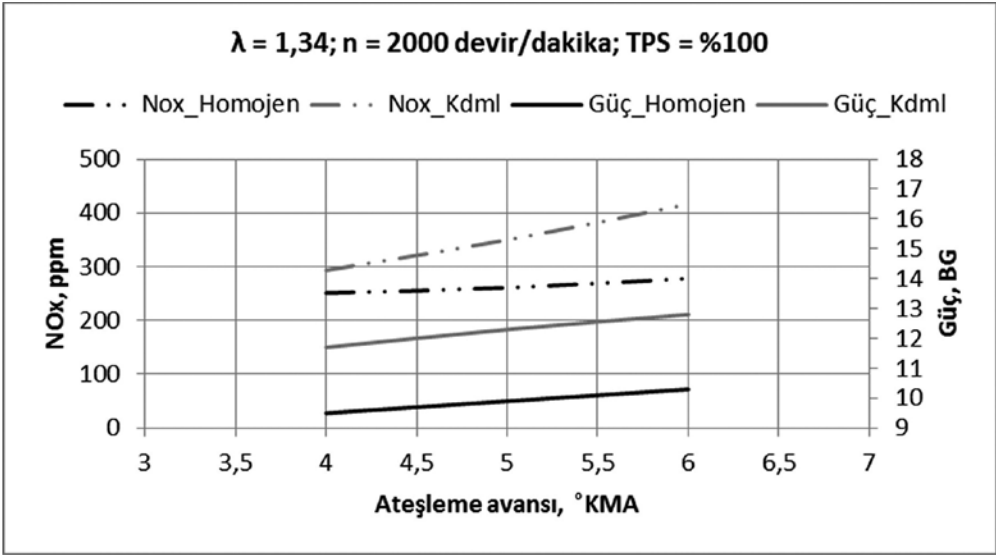
Şekil 3 MR-Process yanma mekanizmasını gerçekleştirmek için eklenen kodlara göre hava fazlalık katsayısının değişimi.

Tablo 2 LPG motoru için teorik hesap sonuçları ($\lambda = 1,34$; $n = 2000$ devir/dakika; tam yük).

A_{ates}	Güç		Özgül Yakıt Tüketimi		Efektif verim		NO_x	
	KMA	BG	g/BGh		-		ppm	
Yanma Mekanizması	Kademeli	Homojen	Kademeli	Homojen	Kademeli	Homojen	Kademeli	Homojen
4	11,7	9,5	238	293	0,26	0,2	293	251
5	12,3	9,9	226	280	0,27	0,21	340	261
6	12,8	10,3	216	270	0,28	0,21	410	278

yakıtın %50-60' ı yanıcaya kadar $\lambda = 0,6-0,9$ arasında bir değer almakta daha sonra ise genel hava fazlalık katsayısına göre yanma süreci ilerlemektedir. Programın içerisine bu mekanizma kısmen ilave edilmiştir. Çünkü yakıtın %50-60'lık kısmı yandıktan sonra HFK'nın 0,8 den 1,34'e çıkarılması halinde: Alev cephesinin sıkıştırdığı yanmamış karışım bölgesinin hacmindeki azalma, AÖN'ye doğru ilerleyen pistonun boşalttığı hacim artış değerinden daha az olabilmektedir. Bu durumda normal yanma hızı ani olarak azalmakta dolayısıyla yanan yakıt kesrini hesap-

layan denklem eksi değerlere gitmektedir. Tabi buna bağlı olarak yanan yakıt kesri yanma devam ederken azalmaya başlamaktadır. Program bu noktada çıkış vermektedir. Bu sorunu ortadan kaldırmak için HFK'nın 0,8 - 1,34 aralığında sürekli değişimi sağlanmış böylece HFK'daki artış aralıklarının çok daha az olması sebebiyle bu olumsuz etki ortadan kaldırılmıştır. Burada artış miktarları deney sonuçlarından elde edilen bilgiler doğrultusunda yeniden düzenlenmiştir. Yapılan değişikliğe göre hava fazlalık katsayısının değişimi Şekil 3'te verilmiştir. Grafikten görüldüğü



Şekil 4 Teorik hesaplamalara göre NO_x emisyonları ve güç değerleri.

gibi ÜÖN'den 27 oKMA sonra kademelenme bitmekte ve genel hava fazlalık katsayısı (1,34) değeri ile süreç tamamlanmaktadır. Bu oluşturulan teorik kademelenme modelinin geçerliliği deney sonuçlarından elde edilen NO_x emisyon değerlerinin benzer olması ile doğrulanmıştır. Zengin karışım ile çalışma süresi kısa tutulduğu zaman NO_x miktarında hızlı yükselişler olmaktadır. Tam tersi durumda, uzun sürelerde zengin karışım ile çalışıldığı zaman fakir karışım bölgesinin motor büyüklüklerine fazla bir etkisinin olmadığı teorik olarak anlaşılmıştır. Çünkü genişleme sürecinin sonuna doğru fakir karışımlarla çalışmaya başlamakta dolayısıyla sıcaklık değerlerinin düşük olması sebebiyle NO_x emisyon değerleri beklenenin çok altında olmaktadır.

Teorik hesaplama sonuçları Tablo 2'de

verilmiştir. Burada homojen yanma mekanizmasına ve kademeli yanma sürecine göre iki farklı durum incelenmiştir. Sonuçlara bakılırsa: NO_x emisyonlarının homojen yanmada daha az olduğu söylenebilir. Fakat güç değerleri de göz önünde bulundurulduğu zaman kademeli dolgunun gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Ateşleme avansının (AA) 4 oKMA olduğu kademeli yanmada NO_x emisyonları %16 daha fazla olmasına rağmen güç değerinde %24 artış sağlanmıştır (Şekil 4). Aynı çalışma şartları için NO_x emisyonları 300 ppm değerini geçmediğinden motorun bu noktada çalışması uygundur. Ayrıca özgül yakıt tüketimi değerleri kademeli motorda oldukça iyi seviyelerdedir.

3.2. Deneysel Çalışmalar

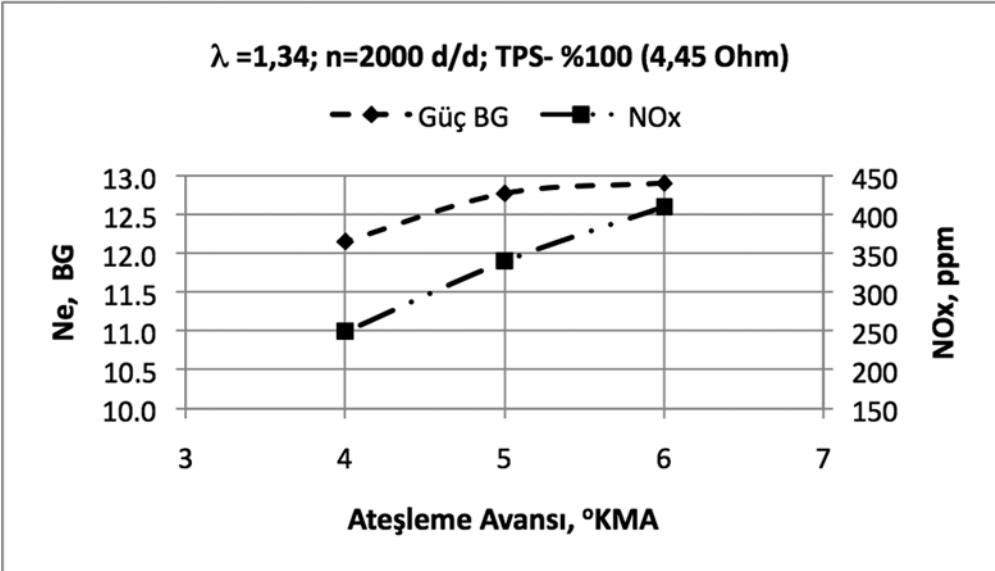
Deney motoru olarak TUMOSAN tarafından üretilen 4 silindirli (S/D, 104/110 mm)

Tablo 3 $\lambda = 1,34$ ve $n = 2000$ devir/dakika deney şartlarında elde edilen sonuçlar.

AA	P _{me}	η_c	be	NO _x	HC	CO
°KMA	[MPa]	-	g/BGsaat	ppm	ppm	%
6	0,58	0,29	208,16	410	1300	0,07
5	0,58	0,28	210,34	340	1300	0,06
4	0,55	0,27	221,02	250	1300	0,06

Tablo 4 $\lambda = 1,34$ ve $n = 2000$ devir/dakika çalışma şartlarında optimum değerler.

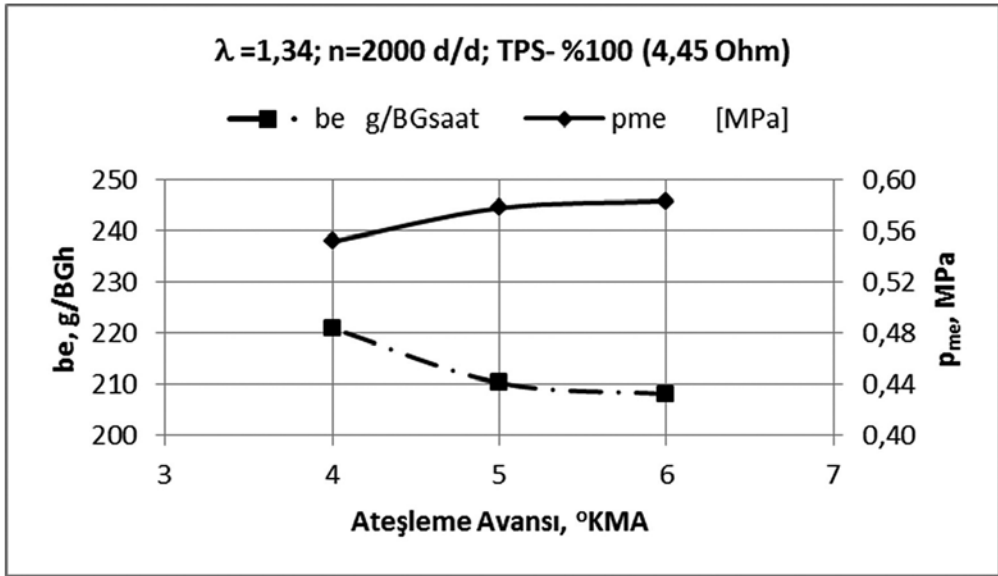
Sonuçlar	Birim	Maksimum güçte	Optimum	Fark, %
AA	°KMA	6	4	
p_{me}	MPa	0,58	0,55	-5,8
NO_x	ppm	410	250	-64,0
HC	ppm	1300	1300	0,0
CO	%	0,07	0,060	-16,7
b_c	g/BGh	208,16	221,02	5,8

**Şekil 5** Deney sonuçlarına göre güç ve NO_x emisyon değerlerinin ateşleme avansına bağlı değişimi.

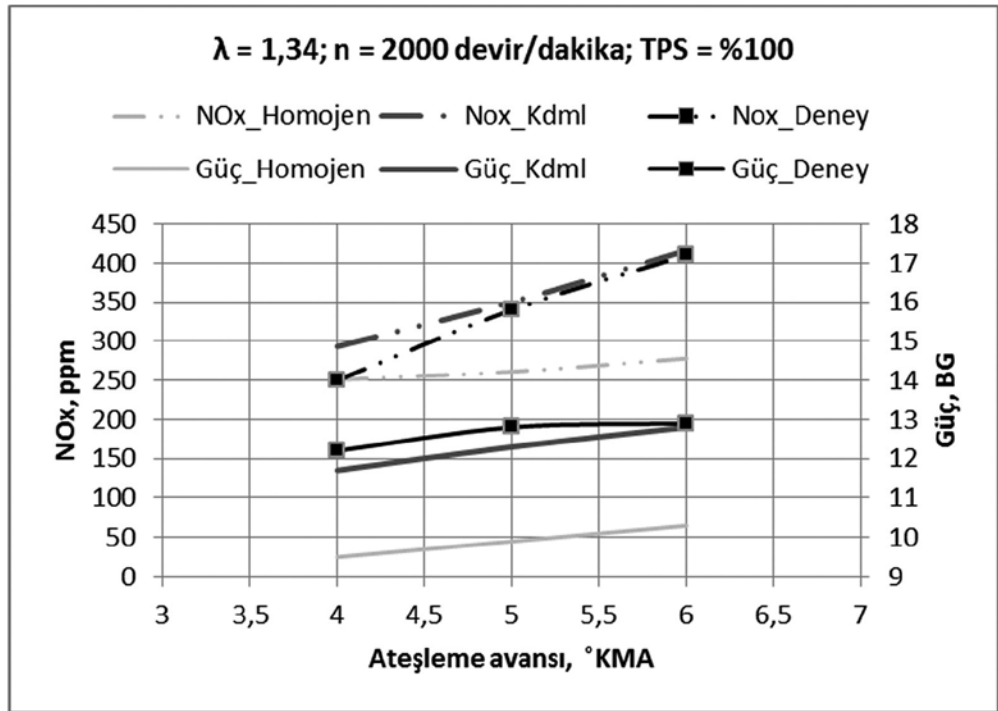
75 BG güce sahip dizel motor kullanılmıştır. Motor öncelikle LPG yakıtı ile çalışabilir hale getirilmiştir. Bu kapsamda sıkıştırma oranı 17'den 14'e düşürülmüş, dizel yakıt enjektörlerinin yerine ateşleme bujileri yerleştirilmiştir. LPG yakıtı her bir silindir için o silindirin emme portuna enjektörler vasıtasıyla püskürtülmektedir. Bu 4 silindirli motorun üç adet silindiri iptal edilip gerekli dengeleme değişiklikleri yapılarak tek silindirli deney motoruna dönüştürülmüştür.

Deneyler, İTÜ Motorlar ve Taşıtlar Laboratuvarı içerisinde; akademik araştırmalara, eğitime ve Ar-Ge çalışmalarına yönelik deney hassasiyeti yönünden daha sağlıklı ve daha uzun çalışma sürelerini karşılayabilecek

bir ortam oluşturmak için Yrd. Doç. Dr. O. Akın Kutlar'ın çabalarıyla oluşturulan motor deney laboratuvarında yapılmıştır. ⁽⁴⁾ 75 BG güce sahip dizel motor 2500 devir/dakika ile çalışmaktadır. Deney motorunun tek silindirli hale getirilmesinin ardından oluşan kuvvet düzgünsüzlüklerini dengeleme için ilave çalışmalar yapılmasına rağmen motor hala sarsıntılı çalışmaktadır. Bu nedenle motor hızı 2000 devir/dakika ile sınırlandırılmıştır. Kuvvet ölçümü için yük hücresi, emisyon değerlerinin tespiti için Horiba firmasına ait MEXA 7500 model cihaz kullanılmıştır. Deneylerde motor, gaz keleşinin tam açık (TPS = %100 veya 4,45 ohm) olduğu durumda farklı HFK ve bu HFK'larda farklı ateşleme



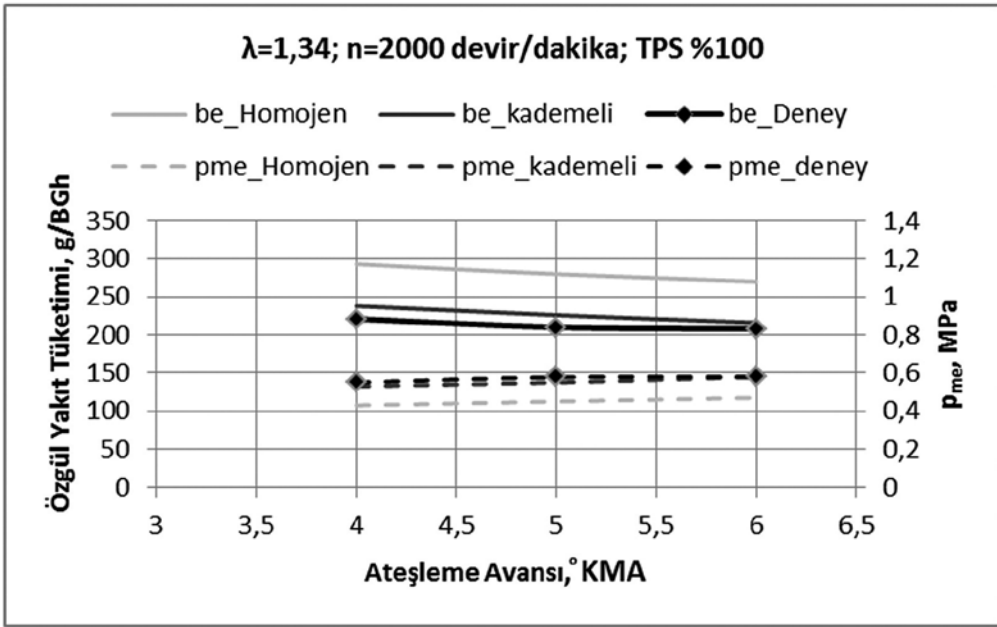
Şekil 6 Deney sonuçlarına göre pme ve be değerlerinin ateşleme avansına bağlı değişimi.



Şekil 7 Teorik hesap ile deney sonuçlarının karşılaştırılması.

avanslarında çalıştırılmıştır. Bu bilgilerden $\lambda = 1,34$ değeri için veriler bu çalışmada kullanılmıştır (Tablo 3'te). Elde edilen bilgilerden

yola çıkılarak optimum çalışma şartları belirlenmiştir. Optimum çalışma şartları belirlenirken ilk olarak NO_x emisyonlarının 300



Şekil 8 Teorik ve Deneysel çalışmalara göre özgül yakıt tüketimi ve ortalama efektif basınç değerleri.

ppm değerini geçmemesine dikkat edilmiştir. Daha sonra ise güç ve yakıt tüketimi değerleri göz önüne alınarak bir değerlendirme yapılmıştır (Tablo 4).

Şekil 5'te $\lambda=1,34$ değeri için ateşleme avansına bağlı olarak güç ve NO_x emisyonlarının değişimi gösterilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi bu çalışma koşullarında ateşleme avansının 5 oKMA'dan sonra artırılması efektif basınç üzerine bir etki yapmamaktadır. Fakat NO_x emisyonlarında artış devam etmektedir. Dolayısıyla AA'yı bu değerden sonra artırmak gereksizdir. Bu çalışma koşulları altında istenen NO_x emisyonu (300 ppm) değerini sadece 4 oKMA ateşleme avansı değeri sağlamaktadır. Ateşleme avansının bu değerinde NO_x emisyonu 250 ppm olarak tespit edilmiştir.

Şekil 6'da yine aynı çalışma şartları için özgül yakıt tüketimi ve ortalama efektif basınç değerinin değişimi gösterilmiştir. Ortalama efektif basınç değerleri tamamen istenen değerlerde olmamakla beraber kabul edilebilir seviyelerdedir. Yakıt tüketimi 220 g/BGh civarındadır. Sonuç olarak $\lambda = 1,34$; AA = 4 oKMA koşullarında motorun çalıştırılması uygun görülmüştür.

3.3. Teorik ve Deneysel Çalışmaların Karşılaştırılması

Teorik ve deneysel hesaplama sonuçları bu bölümde birleştirilerek kullanılan hesap programının verdiği sonuçların güvenilirliği araştırılmıştır. Şekil 7'de açık renkli çizgiler, türbülans şiddetinin normal olduğu (Homogen) koşulları temsil etmektedir. Sürekli çizgi; güç, noktalı çizgiler de NO_x emisyon değerlerine karşılık gelmektedir. Aynı şekilde gri renkli çizgiler MR-2 yanma odası kullanılmış kademeli koşulları, siyah çizgide deney sonuçlarını yansıtmaktadır. NO_x emisyonu açısından teorik ve deneysel sonuçlar arasında %16 civarında bir fark vardır. Güç büyüklükleri arasında ki fark daha da azalarak %6 seviyelerine inmiştir. Siyah ve gri çizgilerin benzerliğinden yola çıkılarak oluşturulan teorik modelin deneysel çalışmalar ile doğrulandığı söylenebilir. Ayrıca bölüm 3.1'de anlatıldığı gibi MR-2 yanma odasında meydana gelen kademelenmenin derecesi teorik olarak tespit edilmiştir. Buna göre yanma sürecinde ÜÖN'den 27-30 oKMA sonra hava fazlalık katsayısı sabit kalmaktadır. Deney sonuçları ile kademeli yanmayı esas alan teorik yanma

sürecinin hesap sonuçlarının, özellikle NO_x emisyonları açısından benzerlik göstermesi ile bu kademelenme derecesinin doğruluğu anlaşılmıştır. Çünkü zengin ve fakir karışım ile çalışma süreleri NO_x emisyonlarını hassas bir şekilde etkilemektedir.

Son olarak Özgül yakıt tüketimi (be) ve ortalama efektif basınç (pme) değerleri Şekil 8'de gösterilmiştir. Kademeli yanma sürecinin teorik hesabında optimum koşullar için 238 g/kWh değeri hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlarında aynı koşullarda 221 g/kWh değeri elde edilmiştir. Teorik değer deneysel sonuçlardan %7 daha fazla olup aradaki fark kabul edilebilir seviyededir. Motor efektif verimi deney sonuçlarına göre %28, hesap sonuçlarında ise %26 olarak elde edilmiştir. Burada ortaya çıkan farklılığın bir sebebi: Zengin karışım bölgesinde ortaya çıkan CO fakir bölgeye geçince O_2 ile birleşerek yanma işlemi sonucunda CO_2 ye dönüşür. Burada yanma esasında ortaya çıkan enerji program içerisinde hesaplanmamaktadır. Dolayısıyla verim ve güç değerleri deney sonuçlarından bir miktar az olmaktadır. Bu etki program kodları içerisinde bir takım değişiklikler yapılarak hesaba katılabilir. Tüm sonuçlardan yola çıkılarak oluşturulan hesap programının bu motor için kullanılabilirliği söylenebilir.

4. Sonuçlar

Benzin ve dizel yakıtlarının sebep oldukları hava kirliliği sorunu ve dünya üzerindeki rezervlerinin gittikçe azalması nedeniyle uzun vadede kullanımları güçleşmektedir. Günlük hayatın vazgeçilmez olan taşıtlarda bu yakıtları kullanan İYM'ler kullanılmaktadır. Fakat hala benzin ve dizel yakıtlarının yerine geçecek bir enerji kaynağı tam anlamıyla kullanıma sunulmamıştır. Elektrik motorlarının taşıtlarda kullanımı için son yıllarda önemli araştırmalar yapılmaktadır. Fakat mevcut batarya teknolojisi İYM'lerden Elektrik motorlarına geçişin kısa süre içerisinde gerçekleşmeyeceğini göstermektedir. Bu durumda alternatif yakıtlara yönelmek sağlıklı bir seçim olmaktadır.

LPG ve CNG yakıtları bu noktada öne çıkmaktadır. Çünkü gaz yakıtların rezervi daha fazla ve emisyon standartlarını sağlamaları daha kolaydır. Bu çalışmada LPG yakıtı ile çalışabilir hale getirilen bir dizel motor incelenmiştir. Teorik ve deneysel çalışmalar eş zamanlı yürütülmüştür. Teorik hesaplamalarda daha önce türbülanslı yanma mekanizmasının esas alan benzin yakıtlı motorlar için Fortran 77 programında oluşturulan hesap kodları LPG yakıtlı MR-Process yanma mekanizmasına uygun hale getirilmiştir. Teorik hesaplamalarda belirlenen çalışma koşullarında motor güç ve yakıt tüketimi değerlerinde büyük değişiklikler olmadan NO_x değerinin 300 ppm değerini geçmediği görülmüştür. Dönüşüm işlemi tamamlanan dizel motor İTÜ Otomotiv laboratuvarında teste tabii tutulmuştur. Deneysel sonuçlarının teorik hesaplamalar ile uyduğu görülmüştür. Deneysel sonuçlarından yola çıkılarak teorik hesap modeli üzerinde küçük değişiklikler yapılarak daha yakın sonuçlar elde edilmiştir. Teorik hesap sonucunda NO_x emisyonu değeri 290 ppm iken deneysel verilerde bu değer 250 ppm olmuştur. Sonuç olarak MR-Process yanma mekanizmasının kullanılması ile NO_x emisyonları standart bir dizel motora daha az olan LPG yakıtlı motorların kullanılabilir olduğu anlaşılmıştır.

5. Kaynakça

- (1) Heywood, J. B., "Internal Combustion Engine Fundamentals", Mc Graw-Hill Book Company", New York, 1988.
- (2) Doğan, H.E., "LPG Dönüşümü yapılmış bir dizel motorunda azotoksit oluşumunun teorik ve deneysel olarak incelenmesi", Yüksek lisans tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013.
- (3) Mehdiyev, R., Arslan, H., "İçten yanmalı motorların hesabı ve geliştirilmesi, Ders notları, İstanbul, 2009.
- (4) Mehdiyev, R., Arslan, H., Çalık, A., Keleş, G., Yıldız, E., Ögün, K., Babaoğlu, O., Özcan, Ö., Teker, H., Unan, B. "Yeni Nesil Kademeli Dolgulu Motor Geliştirilmesinin Alternatif Bir Yolu", Otomotiv Teknolojileri Kongresi, Bursa, 2012.
- (5) Keleş, G., "Dizel Motorların CNG ve LPG Yakıtlarına Dönüşümünde Gerçek Çevrimin Teorik ve Deneysel Çalışmalarla Optimizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012.