

An Alternative Superior Combustion Mechanism that can Convert Domestic Production Marine Diesel Engines to 100% Natural Gas Fuels

Rafiq Mehdiyev¹, Ahmet Dursun Alkan^{2*}, Mustafa Ünar³, Ömür Karataş⁴

alkanad@yildiz.edu.tr

¹ Department of Mechanical Engineering , Gebze Technical University, Kocaeli, Turkey

²Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Naval Architecture and Maritime Faculty, Yıldız Technical University, Istanbul, Turkey

³Nurdeniz Denizcilik San. Ltd. Şti., Istanbul, Turkey

⁴ORTECH Marine A.Ş., Istanbul, Turkey

Abstract

In this article some industrial application results of a novel combustion mechanism so-called MR-Process developed by R. Mehdiyev have been reported. The MR-Process combustion mechanism realised in a twin turbulence swirl combustion environment gives the opportunity to combine advantages of both Diesel and Otto cycles in a single structure. In addition, the current status of the heavy duty diesel engine TLM16V185, a product of TÜLOMSAŞ A.Ş., in terms of efficiency and emission, the advantages of MR-Process combustion mechanism allowing to use CNG and LNG fuels as being primary fuel of the near future. A brief information on the development of innovative and competitive domestic brand engines with 6-8-12-16 cylinders ranging from 500 to 2800 kW for various possible applications from civil to defence ships, locomotives, work machines, generators and power plants being adoptable for local and global market.

Keywords: Heavy duty engine, "MR-Process" combustion mechanism, Diesel and Otto, NOx Emission, CNG / LNG fuel.

Yerli Üretim Gemi Dizel Motorlarının %100 Doğal Gaz Yakıtına Dönüşümünü Gerçekleştirebilen Alternatif Üstün Bir Yanma Mekanizması

Rafiq Mehdiyev¹, Ahmet Dursun Alkan^{2*}, Mustafa Ünar³, Ömer Karataş⁴
alkanad@yildiz.edu.tr

¹ Department of Mechanical Engineering , Gebze Technical University, Kocaeli, Turkey

²Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Naval Architecture and Maritime Faculty, Yıldız Technical University, Istanbul, Turkey

³Nurdeniz Denizcilik San. Ltd. Şti., Istanbul, Turkey

⁴ORTECH Marine A.Ş., Istanbul, Turkey

Özet

Makalede R. Mehdiyev tarafından geliştirilmiş ve Türkiye yerli motor üretici firmalarla yapılan ortak Ar-Ge projeleri ile kanıtlanmış Çift Türbülanslı Döngü ortamında gerçekleştirilen yeni MR-Process yanma mekanizmasının özellikleri, aynı konstrüksiyon yapıda Dizel ve Otto çevrimlerinin gerçekleştirilmesine imkan veren yeni tasarım MR-2 yanma odası hakkında bilgiler sunulmaktadır. Ayrıca, TÜLOMSAŞ A.Ş. üretimi TLM16V185 tipi ağır dizel motorunun verim ve emisyon açısından mevcut durumu, günümüz etkin alternatif teknoloji olarak daha verimli ve düşük emisyonlu, yakın geleceğin ana yakıtı olarak CNG ve LNG doğal gazlarla çalışma imkânı veren “MR-Process” yanma mekanizması kullanılarak, bu motor bazında ülkemizde ve dünyada kabul edilebilir, Sivil ve Askeri amaçlı gemiler, lokomotifler, iş makineleri, jeneratörler ve enerji santralleri için gücü 500 - 2800 kW arasında değişen, 6-8-12-16 silindirli Yenilikçi ve Rekabetçi Yerli Marka motorların geliştirilmesi hakkında özetle bilgiler de sunulmaktadır.

Anahtar kelimeler: Ağır Dizel motorları, “MR-Process” Yanma Mekanizması, Dizel ve Otto çevrimleri, NOx Emisyonu, CNG/LNG yakıtları.

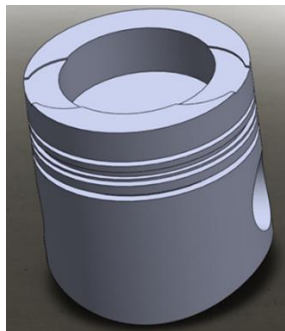
1. Giriş

Dünya ticaret taşımacılığının yaklaşık % 70'nı gerçekleştiren Gemilerde ürettiği güç başına daha az ve nispeten ucuz yakıt kullanıldığı için esasen Dizel motor kullanılmaktadır. Denizler ülkesi ve denizci ülke Türkiye'nin gemi sanayi sektörü, katma değeri ve istihdam sağlama açısından öncü konumdadır. Öncülüğü daha da ileri götürmek için yurtdışına bağımlılık oranını düşürmeye ihtiyaç vardır. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığımız, Türkiye'nin yıllık 3 milyar dolar dış ticaret açığına sebep olan Ağır Dizel Motorlarına ihtiyacının ve yerli üretimle onun karşılanmasının önemli olduğunu açıklamıştır (Dünya gazetesi, 11.03.2015). Bu bakımdan Eskişehir'deki TÜLOMSAŞ Lokomotif ve Motor A.Ş.'de yerli marka olarak üretilmekte olan TLM16V185 tipi ağır dizel motorların performans ve verim açısından, özel olarak ise kirletici egzoz gaz emisyonları açısından uluslararası

günümüz taleplerine uygun hale getirilerek Güncel İpek Yolu'nun kara ve deniz güzergâhlarında kullanılması önem arz etmektedir.

Son yıllarda İçten Yanmalı Motorlar (İYM) üzerinde yapılan çalışmaların büyük bir kısmı, mevcut motorları emisyon standartlarına uyacak şekilde elden geçirme ve yenilerini bu standartları sağlayacak şekilde üretme üzerinedir. Standartlar daha da sıkılaştıkça Partikül Filtreler ve AdBlue, ya da SCR gibi yeni teknolojiler motorlara eklenmeye başlanmıştır. Bütün bu teknolojik gelişmeler emisyon hedeflerini karşılama da, motor yapımını karmaşıklaştırmış, Enerji Verimini kötüleştirmiş ve gerek ilk yatırım, gerekse de işletme maliyetlerini fark edilecek derecede artırmıştır. Bu durum, dizel motorları ile donatılmış şehir içi ulaşım araçları gibi, Lokomotif, Gemi ve Jeneratör motorların da çevreci ve ucuz olan CNG ve LNG gibi %100 Doğal Gaz (NG) yakıtlarına dönüştürülmesini gündeme getirmiştir. IMO MEPC'nin son günlerde aldığı karara göre 2020 yılına dek Gemi motorların egzoz gazlarıyla sülfür - SO₂ salımı da %0.5'i aşmamalıdır. Bunun için ise en etkin yol olarak Gemi motorların %100 NG yakıtına dönüşümü öngörülmektedir.

Hâlihazırda bu amaçla yaygın olarak motorun Dizel çevriminden Otto çevrimine dönüştürülme (buji ile tutuşma) yöntemi kullanılmaktadır. Lakin yüksek sıkıştırma oranına sahip olan (>14:1) mevcut dizel motorun %100 NG yakıtına dönüştürüldüğünde vuruntu olayı meydana çıkmasın diye, motorun pistonu üzerindeki açık yanma odası hacmini artırarak sıkıştırma oranını 10,5:1 ve 11:1 seviyelerine dek düşürmek zorunluluğunu meydana getirmiştir. Silindirik geometriye sahip olan bu tip yanma odalı pistonların (Şekil 1.) sıfırdan üretilmesini gerektirmektedir. Bu ise mevcut dizellerin NG yakıtlarına dönüştürülme işlemlerini zorlaştırmakta, maliyetini ise önemli ölçüde artırmaktadır. Diğer taraftan, sıkıştırma oranının düşürülmesi bu motorların orijinal halindeki nispeten daha düşük performans ve verimlilikle çalışmasına neden olmaktadır. Bu yüzden motorun performansını fazla düşürmemek ve buji ile tutuşmanın istikrarlı bir şekilde gerçekleşmesini sağlamak için hava fazlalık katsayısını $\lambda=0,90-1,05$ değerlerinde tutmayı gerektirmektedir. Bu durumda, Dizel Çevriminde olduğu gibi, NO_x emisyonunun artışı kaçınılmaz olmuştur. Bu ise EGR ve AdBlue gibi ek emisyon düşürücü sistemler kullanmağı mecburi hale getirmiştir (Vesttergard, 2014). Bundan başka, %100 NG yakıtına dönüştürülen motorun dizel çevrimi ile mukayesede daha zengin karışımlarla çalıştırılma gereği ($\lambda>1.5$ 'e karşın $\lambda=0.90-1.05$), Küresel ısınma probleminin çözümüne ters olarak, sera etkili karbon dioksit - CO₂ emisyonun da ek olarak %8-%10 civarında artışına sebep olmuştur (Dinc ve diğerleri, 2009).



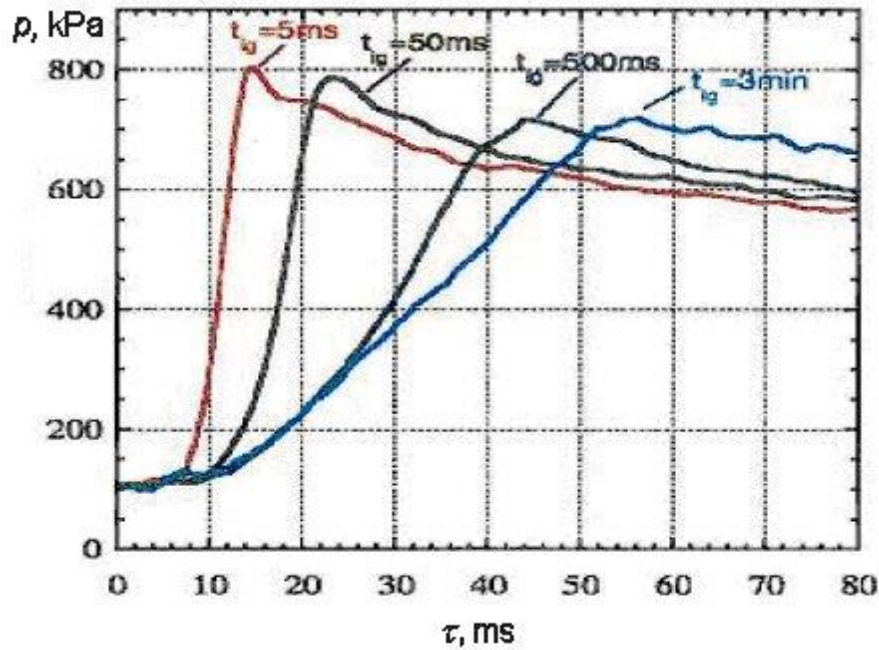
Şekil 1. Günümüz dizel motorların Otto çevrimi ile %100 NG yakıtına dönüştürmek için kullanılan konvansiyonel yanma odası.

Makalede Dizel ve Otto çevrimlerini aynı konstrüksiyon yapıda gerçekleştirebilmesini sağlayan, bununla da yapısal değişiklikler yapılmadan, dizelin mevcut sıkıştırma oranı ve yanma odasını koruyarak %100 NG yakıtına dönüşümüne imkan veren MR-Process Yeni Yanma Mekanizması ve bu mekanizmanın farklı motorlar üzerinde uygulama çalışmaları hakkında bilgiler sunulmaktadır. Ayrıca, TÜLOMSAŞ A.Ş. üretimi TLM16V185

tipi ağır dizel motorunun verim ve emisyon açısından mevcut durumu, günümüz en etkin alternatif teknoloji olarak daha verimli ve düşük emisyonlu, yakın geleceğin ana yakıtı olarak NG yakıtla çalışma imkânı veren MR-Process yanma mekanizması kullanılarak, bu motor bazında ülkemizde ve dünyada kabul edilebilir, Sivil ve Askeri amaçlı gemiler, lokomotifler, iş makineleri, jeneratörler ve enerji santralleri için gücü 500 - 2800 kW arasında değişen, 6-8-12-16 silindirli Yenilikçi ve Rekabetçi Yerli Marka motorların geliştirilmesi hakkında özetle bilgiler de sunulmaktadır.

2. MR-Process yanma mekanizmasının özellikleri

Azerbaycan Teknik Üniversitesinde (AzTÜ, Azerbaycan) Rusya Bilimsel Akademisinin N. Semyonov adına Kimyasal Fizik Enstitüsü (IXF, Moskova) ve Varşova Teknik Üniversitesi (WP, Polonya) ile işbirliği kapsamında kademeli dolgulu motorlarda yanma sürecinin özellikleri çeşitli fiziksel modeller ("bomba"), hassas basınç kaptörleri ve osiloskop, alev cephesini görüntüleyen Şileren hızlı fotoğraf cihazı vb. kullanılarak detaylı bir şekilde incelenmiştir (Mehdiyev ve diğerleri, 1978) & (Mehdiyev, 1983) & (Mehdiyev ve Wolanski, 2000). Bu çalışmalarla zengin karışımın YO'da kapsadığı hacim oranının, başka bir deyişle karışımın kademelenme derecesinin yanma hızı ve basınç artışına, kirletici emisyonların miktarına etkisini belirleyebilecek bir dizi deney yapılmıştır. Bir örnek olarak Şekil 2'de kademelenme derecesinin yanma hızı ve basınç artışına etkisini açıklayan



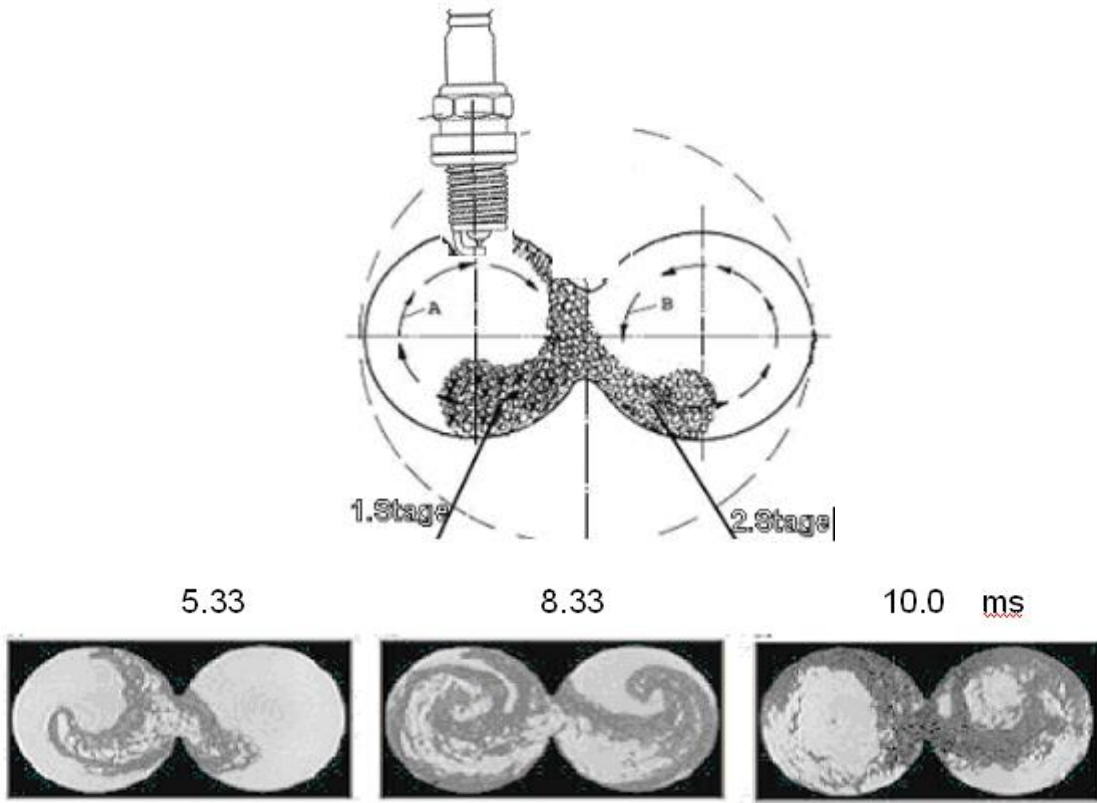
Şekil 2. C_3H_8 /hava karışımının kademelenme derecesinin yanma süresi ve basınç artışına etkisi.

grafikler gösterilmiştir. Bu deneylerde karışımın çeşitli kademelenme derecesi YO'nun fiziksel modeline önceden doldurulmuş hava içerisine zengin bileşimli ($\lambda_1=0,6$) propan (C_3H_8) + hava karışımını püskürttükten sonra bujiden ateşleme (kivılcımın verilme) zamanını değiştirmekle elde edilmiştir. Şekildeki yanma basıncının artış grafikleri $t_{ig}=5, 50, 500 \text{ ms}$ ve 3 min (dak) ile gösterilmiş ateşleme zamanlarıyla dört kademelenme derecesine sahip genel bileşimi $\lambda=1$ olan karışımın yakılmasıyla elde edilmiştir. Ateşleme geciktirildikçe (t_{ig} arttıkça) zengin karışımın hava ile karışma zamanı arttığından dolayı karışımın kademelenme derecesi azalarak homojen yapıya sahip olmaktadır. Şekilde $t_{ig}=5 \text{ ms}$ olduğunda en yüksek derecede kademelenmiş karışımın

yanması, $t_{ig}=3 \text{ min}$ olduğunda ise kademelenmesi sona ermiş homojen karışımın yanması ile elde olunan basınç artış grafikleri gösterilmiştir. t_{ig} 'nin ara değerlerinde basıncın değişme grafikleri kademelenme derecesinin de ara değerlerinde elde edilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, karışımın kademelenme derecesi arttıkça (t_{ig} küçüldükçe) yanma, hız kazanarak basıncın maksimum değerini artırmaktadır. Örneğin, homojen karışım ($t_{ig}=3 \text{ min}$) yandığında basınç, maksimum değerine (710 kPa) $\tau=55 \text{ ms}$ geçtikten sonra ulaşmasına rağmen, en yüksek derecede kademelenmiş karışım ($t_{ig}=5 \text{ ms}$) yandığında yanma süresi $\tau=14 \text{ ms}$ olmakta (yani yanma hızı 3,9 kat artmakta), yanma basıncı ise 800 kPa değerine ulaşmaktadır (%12 artmaktadır).

Fiziksel modelde elde edilmiş pozitif sonuçların sebebini açıklamak için özel matematik modeller kullanılarak incelemeler esasında tespit edilmiştir ki (Mehdiyev, 1983) & (Mehdiyev ve Wolanski, 2000), birinci aşamada zengin karışımın ($\lambda_1=0,6-0,8$) yanmasıyla oluşan eksik yanma ürünleri olan karbon monoksit (CO) ve serbest hidrojen (H_2), ikinci aşamada hava ile karışarak yanma işlemini hızla sona erdirmektedirler. Birinci aşamada hava yetersizliği yüzünden oluşabilen $2C+O_2=2CO$ stokiyometrik reaksiyonunda C'nin CO'ya dek oksitlenmesi için bir mol O_2 tüketilirken, iki mol CO oluşturulmaktadır. Böylece bu reaksiyonla karbon, içerdiği ısı enerjisini tam olarak açığa çıkaramamış olsa bile, sabit hacimde CO'nun mol sayısının aynı karbon (C) ile elde edilebilecek CO_2 mol sayısına kıyasla iki kat artması yanma basıncını yükseltmektedir. H_2 'nin etkisiyle aşırı hızla gerçekleşen yanma işleminin ikinci aşaması su buharının (H_2O) katkısı ile CO'nun da hızla yanıp bitmesine, böylece C'nin geriye kalmış enerjisinin de tam olarak açığa çıkmasına sebep olmaktadır. Bununla da aynı genel yakıt/hava oranında kademelenmiş karışımın iki aşamalı yanma mekanizması ile yakılmasının yanma hızı ve basıncın yükseltilmesi bakımından daha avantajlı olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, bu durumda NO_x emisyonu artmamakta, tam aksine, oluşan NO_x miktarı, aynı bileşimli homojen karışımın yanmasıyla oluşan NO_x miktarına göre iki-üç kat düşmektedir. Bunun sebebi, yanma sürecinin birinci aşamasında NO_x oluşumu için HC'ların yanma reaksiyonları bittikten sonra geriye oksijenin kalmaması, ikinci aşamasında ise yanma hızının yüksek olmasından dolayı NO_x oluşumu için yeterli zamanın olmamasıdır. Bu çalışmalarla kademelenmiş karışım kullanıldığında CO ve HC emisyonlarının da büyük bir miktarda düşmesi gözlenmiştir (Mehdiyev ve Wolanski, 2000).

Fiziksel modeller ve farklı boyutlu motorlar üzerinde yapılan bir dizi deneysel çalışmaların sonuçlarına dayanarak Prof. R. Mehdiyev tarafından, sembolik olarak "MR-Process" adlandırıldığı İki Aşamalı Yanma Mekanizmasını Çift Türbülanslı Döngü ortamında gerçekleştirebilen MR-2 Yanma Odası geometrisi teklif edilmiştir. Ayrıntılı bilgiler (Mehdiyev, 1983) & (Mehdiyev ve Wolanski, 2000)'de verilmiş bu Yanma Odasının seması ve yanma sürecinin fiziksel modelde gerçekleştirilen anlık fotoğrafları Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, Yanma Odasının özelliği, geometrisinin "8"e benzeyen iki eşit bölgeye ayrılmasıdır. Emme ve sıkıştırma süreçlerinde yanma odasının bu bölgelerinde farklı yöntemlerle birbirinin tersine aynı hızda dönen iki türbülanslı döngü hareketi oluşturulur. Yanma Odasının buji yerleşen bölgesinde bileşimi $\lambda=0,6...0,9$ arasında değişen zengin karışım, diğer bölgesinde ise sadece hava yer almaktadır. Her iki döngü aynı hız ve momentuma sahip olduğundan dolayı, iki bölgedeki dolgu ateşleme anına dek birbirleriyle karışmamakta ve böylece motorun tüm çalışma rejimlerinde yakıt-hava karışımı kademelenmiş şeklini korumaktadır. Döngüler emme zamanından itibaren gerçekleştirildiği için yakıt-hava karışımını da bu süreçte silindirin dışında (manifolttta) oluşturmak ve günümüzde seri üretimi yaygınlaşmış elektronik sıvı ve gaz yakıtları püskürtme sisteminden (hatta karbüratör veya gaz karıştırıcısından) yararlanmak mümkündür.



Şekil 3. Çift döngülü MR-2 Yanma Odasının şeması ve fiziksel modelde yanma sürecinin anlık fotoğrafları (Mehdiyev, 1983).

MR-2 YO'sunun diğer bir avantajı, sıkıştırma oranını vuruntu oluşturmadan optimum seviyelerine dek ($\epsilon=14-17$) yükseltme imkanının olmasıdır. Odanın bir bölgesinde zengin karışımın ($\lambda=0,6-0,9$) yakılması ile oluşan eksik yanma ürünlerin (CO ve H_2), ikinci bölgesinde ise hızla dönen türbülanslı ortamda yanabilmesi nedeniyle vuruntu olayı önlenmektedir. YO'nun diğer bir avantajı, konvansiyonel YO'larında soğuk cidarlarda kaçınılmaz olan alev cephesinin sönme olayının önlenmesidir. Bunun sebebi, Şekil 3'ten de görüldüğü gibi, yanma sürecinin birbirinin tersine dönen türbülanslı ortamda gerçekleştirilmesiyle alev cephesi YO'nun sağ ve sol cidarlarından yanmamış karışımı sıyırıp odanın merkezine – en sıcak bölgesine sürükleyerek oksitlenme reaksiyonların alev sönmesi olmadan devam edebilmesidir. Böylece, söz konusu YO bir taraftan motorun tüm yük rejimlerinde genel bileşimi fakir olan ($\lambda=1,3...2,0$) en yüksek derecede kademelenmiş yakıt-hava karışımının İki Aşamada Yanma Mekanizması ile yakılması, diğer taraftan yüksek sıkıştırma oranının ($\epsilon=14...17$) kullanılması ve alev cephesinin sönme olayının önlenmesi gibi temel şartların sağlanması sayesinde, farklı boyutlu motorlar üzerinde yapılan testlerle de kanıtlanmış, verimli ve düşük emisyonlu motor geliştirmenin mümkün olduğunu göstermektedir (Dinc ve diğerleri, 2009) & (Mehdiyev ve Wolanski, 2000) & (Mehdiyev ve diğerleri, 2009).

3. MR-Process yanma mekanizması ile çalışan dizel motoru

Çift Türbülanslı Döngü ortamında gerçekleşen MR-Process Yanma Mekanizması, sıkıştırma oranını yükseltmek imkanı verdiği için Kendinden Tutuşma Prensibi ile, başka bir deyişle, Dizel Prensibi ile çalışabilen motorun geliştirilmesine de vesile olmuştur. Dizel Çevrimi ile çalıştırılması öngörülen motorun Çift Döngülü MR-2 yanma odalı pistonu ve yanma sürecinin simülasyon resmi Şekil 4'de gösterilmiştir.

Göründüğü gibi, MR-2 YO piston üzerinde sekize benzer şekilde tasarlanmıştır. YO oyuğunda yanma işleminden önce birbiriyle aynı hızda ve ters yönde dönen çift hava döngüleri oluşturulmaktadır. Yakıt, iki delikli enjektörün yardımıyla düşük basınçta (<350 bar) çift hava döngüleri yönünde teğet olarak püskürtülerek, yaklaşık %95'e varan miktarı duvara sıvanmakta ve mikro kalınlıkta bir tabaka (film) oluşturmaktadır. Yakıt tabakasının duvarla doğrudan temasta olması ısı transfer katsayısının kat kat artışına sebep olmakta ve sıkıştırılmış hava sıcaklığına nispeten duvarın yaklaşık 2 kat düşük sıcaklıkta olmasına rağmen (< 400 °C), yakıtın yeterince çabuk buharlaşması gerçekleşmektedir.

Buharlaşma düşük sıcaklık ortamında gerçekleştiği için yakıt, tutuşmadan önce doğal hidrokarbon yapısını korumakta ve klasik homojen karıştırma yönteminden farklı olarak, piroliz prosesine (CH'nin C ve H'ya parçalanmasına) maruz kalmamaktadır. Sonuçta, eksik yanma ürünleri olan C veya PM- partikül madde emisyonu epey azalmaktadır. Yanma sürecinin ters yönlü türbülanslı hava döngüleri ortamında gerçekleşmesi ise, alev cephesinin nispeten soğuk cidarlarda sönmesini engelleyerek, CO ve HC'in de azalmasına, böylece yanma veriminin yükselmesine sebep olmaktadır. Ayrıca, yanma süreci yakıtın buharlaşma sürecini takip ettiği için yanma sırasındaki basınç artış hızı azalmaktadır. Bu durumda "Mach etkisi" ile yanmış ürünlerin sıcaklığının ilaveten artırılması önlenerek, NOx ve Gürültü emisyonları da azaltılmakta ve böylece optimum hızla gerçekleşen yanma süreci elde edilmektedir.

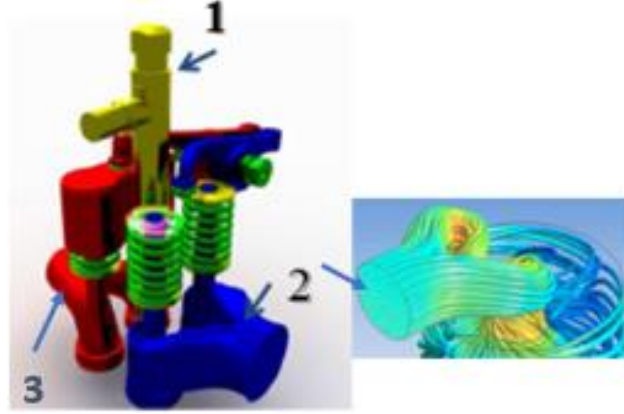


Şekil 4. Çift Döngülü MR-2 yanma odasında "MR-Process" Yanma Mekanizmasının Dizel Prensibi ile gerçekleştirilme şeması.

Teorik olarak öngörülen bu beklentileri deneysel olarak kanıtlamak için İstanbul Teknik Üniversitesi Motorlar ve Taşıtlar Laboratuvarında özel olarak tasarlanan tek silindri bir model dizel motor (S/D=95/85 mm) bazında deney düzeneği yapılandırılmıştır. Şekil 5'de dört supaplı model motorun çiftleştirilmiş emme ve egzoz portları ve yakıt püskürtme enjektörü ile bir arada üç boyutlu montaj resmi gösterilmiştir. Piston üzerindeki 8'e benzer yanma odasında emme sürecinden başlayarak oluşturulan çift hava döngüleri, birbirinin tersine helisel çıkışları olan çiftleştirilmiş emme portunun (2) araçlığı ile elde edilmektedir.

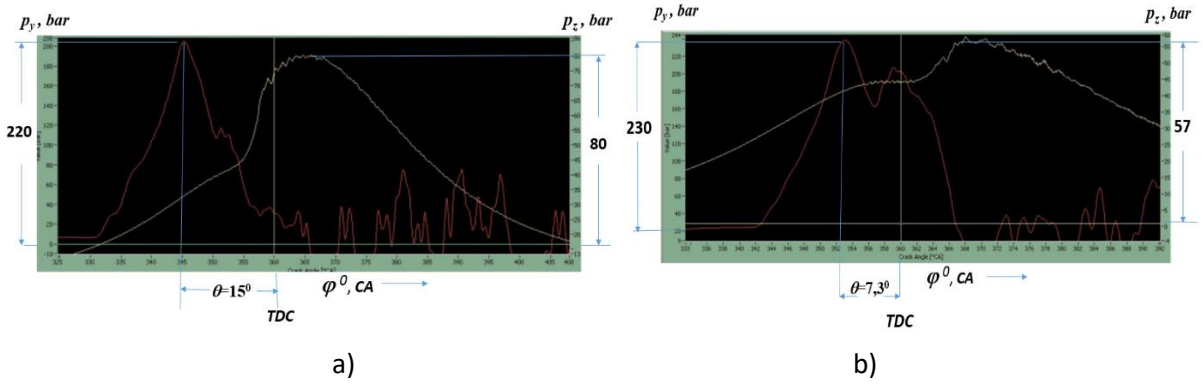
Farklı yük ve hız rejimlerinde deney motorun ayarlama, performans ve emisyon testleri esnasında indikatör diyagramları çıkarılmış ve yanma analizi yapılmıştır. Şekil 6'da motorun farklı yanma odaları ile çalıştığında yakıt püskürtme avansının (θ) optimum değerlerinde çıkarılmış indikatör diyagramları karşılaştırılmıştır. Buradan görüldüğü gibi, her iki halde yakıt püskürtme basıncının maksimum değeri yaklaşık aynı - $p_y= 220-230$ bar seviyesinde, yanma basınçlarının maksimum değeri (p_z) ve oluşma zamanları ise birbirinden farklıdır.

Konvansiyonel yanma odası kullanıldığında optimum yakıt püskürtme avansı $\theta = 15^\circ$ CA olduğu için tutuşma, ÜÖN (TDC)'den 5° önce $\varphi = 355^\circ$ de gerçekleşmiştir. Bu anda silindir içinde basınç $p_c=45$



Şekil 5. Tek silindirli model deney motorunun (S/D=95/85 mm) yakıt püskürtme enjektörü (1), çiftleştirilmiş emme (2) ve egzoz (3) portları ile bir arada üç boyutlu montaj resmi.

bar değerinde olmuştur. Yanma süreci, $\varphi = 12^\circ$ KMA'a eşit zaman içinde ($\varphi = 367-355=12^\circ$) gerçekleşerek, yanma basıncını maksimum değerine ($p_z=80$ bar) TDC'den $\varphi = 7^\circ$ geçtikten sonra ulaştırmıştır. Bu durumda ortalama basınç artış oranı $\Delta p/\Delta\varphi = (80-45)/12=2,91$ bar/ 1° φ değerinde olmakla, en yüksek performans ve verim elde edilmiş, lakin NO emisyonu da maksimum – NO=1100 ppm seviyesine ulaşmıştır.



a) Konvansiyonel YO: $\theta=15^\circ$ CA, $p_{me}=0,653$ MPa, $b_e=204$ g/BGh, $k=2,52$ 1/m, NO=1100 ppm

b) MR-2 YO: $\theta=7,3^\circ$ CA, $p_{me}=0,662$ MPa, $b_e=197$ g/BGh, $k=2,53$ 1/m, NO = 302 ppm

Şekil 6. Tek Silindirli model deney motorunun farklı yanma odaları ile çalıştığına çıkarılan indikatör diyagramları.

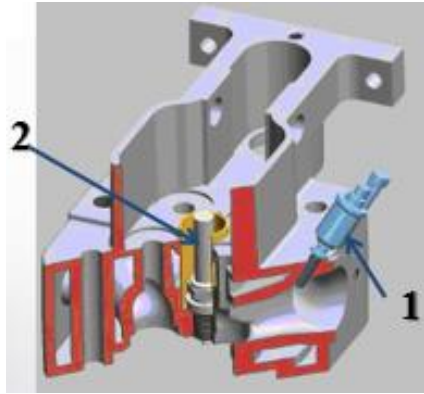
Motor, MR-2 YO ile çalıştığına yakıt püskürtme avansı düşük olduğu için ($\theta=15^\circ$ karşın $7,3^\circ$ CA) yanma süreci TDC'den sonra, $\varphi=362^\circ$ anından itibaren gerçekleşmiş ve $\varphi = 10^\circ$ süreci içinde ($\varphi = 372-362=10^\circ$) yanma basıncını $p_c=45$ bar değerinden maksimum değerine - $p_z=57$ bara dek yükseltmiştir. Bu durumda ortalama basınç artış oranı $\Delta p/\Delta\varphi = (57-45)/12=1,0$ bar/ 1° φ olarak konvansiyonel YO ile mukayesede ~3 kat düşük seviye ($\Delta p/\Delta\varphi = 2,91$ 'e karşın $1,0$ bar/ 1° φ) sergilemiştir. Bu ise "Mach etkisi" ile yanmış ürünlerin sıcaklığının ilaveten yükselmesini önleyerek, NO emisyonununun $1100/302=3,6$ kat düşmesine sebep olmuştur.

MR-2 YO'da yanma basıncının konvansiyonel YO ile mukayesede %30 civarında düşmesine rağmen ($p_z=80'$ ye karşın 57 bar), motorun performans verileri kötüleşmemiş, tam tersine, ortalama efektif basınç ($p_{me}=0,653'$ e karşın $0,662 \text{ MPa}$) ve duman koyuluğu ($k=2,52'$ ye karşın $2,53 \text{ 1/m}$) yaklaşık aynı seviyede kalmış, yakıt tüketimi ise %3,7 civarında azalmıştır ($b_e =204$ karşın 197 g/BGh). Bunun esas sebebi, MR-2 yanma odasında nispeten düşük hızda gerçekleşen yanma işlemi, maksimum basıncın TDC'nin $\varphi =10-12^\circ$ sonrasına sarkarak, piston-biyel mekanizmasında maksimum momentin oluşması için en uygun zamana denk gelmesidir. Ayrıca, bu zaman içinde piston-biyel mekanizması dikey basınç kuvvetinin düşük değerlerine maruz kaldığı için motorun Gürültü emisyonu ve Mekanik kayıpları da azalmaktadır. Mekanik kayıpların azalması ise motor ömrünün uzanması ile sonuçlanacağı şüphesizdir.

4. MR-Process Yanma Mekanizması ile çalışan Dizel Motorunun Yapısal Değişiklikler Yapılmadan %100 Doğal Gaz Yakıtına dönüştürülmesi

Paragraf 2'de anılan dört supaplı model deney motoru, yüksek Dizel sıkıştırma oranını koruyarak, %100 gaz yakıtlarına dönüştürmek için de kullanılmıştır. Dizel yakıtının kendinden tutuşması için yeterli olan yüksek sıkıştırma oranı ($\varepsilon =17,5$), gaz yakıtlarının (LPG ve CNG) kendinden tutuşması için yeterli olmadığı için Buji Ateşleme sistemini kullanmak ve motoru Otto Çevrimi talepleri ortamında çalıştırmak lüzumu ortaya çıkmıştır.

Şekil 7'de model motorun Otto Çevrimi kullanılmakla gaz yakıtları ile (veya benzinle) çalıştırmak için adapte edilen silindir kafasının 3 boyutlu resmi gösterilmiştir. Buradan görüldüğü gibi, enjektör, çiftleştirilmiş emme portunun sadece bir tarafına, buji ise merkezde yer alan dizel enjektörü yerine bağlanmıştır. Bununla da aynı konstrüksiyon yapıda motoru hem Dizel, hem de Otto çevrimleri ile çalıştırmak imkânı elde edilmiştir.

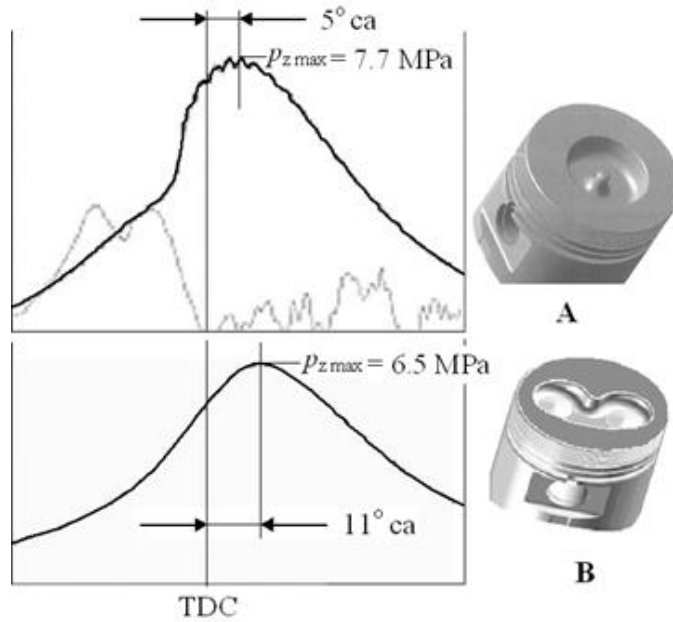


Şekil 7. Tek silindirli model dizel motorun Otto Çevrimi kullanılmakla gaz yakıtlarıyla çalıştırmak için adapte edilen silindir kafasının 3 boyutlu resmi
(1- Gaz veya benzin püskürtmek için enjektör, 2- Buji).

Çift Döngülü MR-2 YO tek silindirli deney motorunun Dizel Çevrimi ile çalışması durumunda yapılan deney sonuçları Paragraf 2'de sunulmuştur. Bu Paragrafta ise Otto Çevrimine dönüştürülen aynı motorun Gaz yakıtı kullanılmakla elde edilen bazı deney sonuçlarına yer verilmiştir.

Şekil 8'de motorun konvansiyonel YO ile Dizel Çevrimi ve MR-2 CC ile Otto Çevrimi kullanıldığında çıkarılmış indikatör diyagramları karşılaştırılmıştır. Deneylerde motorun çalışma rejimi olarak $n=3000 \text{ min}^{-1}$, sıkıştırma oranı $\varepsilon =17,5$, HFK $\lambda =1,42$ ve volumetrik verimi $\eta_v = 0,9$ değerlerinde sabit tutulmuştur. Yakıt olarak Dizel versiyonunda EuroDiesel, Otto versiyonunda ise Oktan sayısı 120 civarında olan CNG kullanılmıştır.

Şekilden görüldüğü gibi motor, Dizel Çevrimi ile çalıştığında yanma basıncı $p_z=7,7$ MPa eşit olan maksimum değerine TCD'den 5° ca geçtikten sonra ulaşmıştır. CNG ile çalıştığında ise alevin yayılması bir kadar düşük hızla gerçekleştiği için $p_z=6,5$ MPa eşit olan maksimum değerine TCD'den 11° ca geçtikten sonra ulaşarak, basıncın %15 civarında düşmesine sebep olmuştur. Sıkıştırma oranının yüksek olmasına ($\epsilon=17,5$) rağmen, CNG ile gerçekleşen yanma süreci, hiçbir vuruntu olayı oluşturmamıştır. Şekil 8'den de gözüktüğü gibi, motor, MR-2 YO ile çalıştığı zaman çıkarılan indikatör diyagramda vuruntu oluşumunun göstergesi olan çalkalanmalar görünmemektedir. Bellidir ki, bu çalkalanmalar, vuruntunun sert gürültü kopartmasına sebep olur. Deney zamanı böyle bir gürültünün fark edilmemesi, motorun vuruntu yapmadan çalıştığını bir daha kanıtlamıştır. Yanma basıncının %15 civarında azalması, motorun verilerini kötüleştirmemiş, tam tersine, yanma basıncının maksimum değerinin TCD'den 11° ca geçtikten sonra oluşması sayesinde biyelin krank miline maksimum teğet kuvvetle etkisinin en uygun zamana denk gelmesi ile performans ve emisyon verilerini iyileştirmiştir.



Şekil 8. Tek silindirli model deney motorunun (S/D=95/85) konvansiyonel YO (A) ve MR-2 YO (B) ile çalıştığında çıkarılan indikatör diyagramlarının karşılaştırılması.

Tablo 1'de model deney motorun konvansiyonel Dizel YO ve MR-2 YO Otto Çevrimi ile çalıştığında elde edilen test sonuçları karşılaştırılmıştır. Tablodan gözüktüğü gibi, çalışma rejimi parametrelerinin aynı olması durumunda ($n=3000 \text{ min}^{-1}$, $\epsilon=17,5$, $\lambda=1,42$, $\eta_v=0,9$), CNG ile çalışan motorda yanma basıncının %15 civarında azalmasına ($p_z=7,7$ karşın $6,5 \text{ MPa}$) rağmen, konvansiyonel dizelle mukayesede motorun ortalama efektif basıncı veya gücü %10 artmış ($p_{me}=0,653$ karşın $0,72 \text{ MPa}$), efektif verimi ise %8,4 civarında yükselmiştir ($\eta_e=0,306$ karşın $0,332$). Bunun yanı sıra, Duman koyuluğu $k=0$ olmuş, kirletici NO emisyonu ise 403 ppm seviyesini aşmayarak, dizelle mukayesede yaklaşık 2,75 kat daha düşük seviye sergilemiştir (NO=1100 karşın 403 ppm).

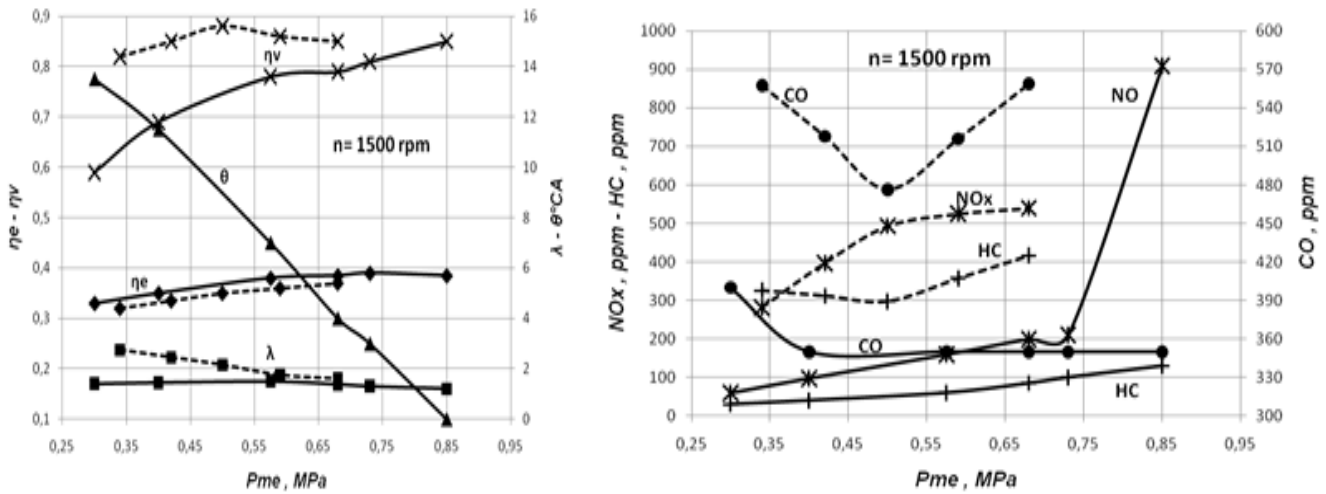
MR-Process Yanma Mekanizması kullanılarak, emisyon limit değerleri Stage IIIA Standardına cevap veren 4 silindirli bir traktör dizel motoru (S/D=110/104) Otto Çevrimi ile, dünyada bir ilk olarak, %100 LPG yakıtına dönüştürülmüş ve önemli sonuçlara varılmıştır (Mehdiyev ve diğerleri, 2009) & (Mehdiyev ve diğerleri, 2011). Şekil 9'da bu motorun maksimum tork ürettiği hız rejiminde ($n=1500 \text{ d/dak}$) ortalama efektif

basınca (p_{me}) bağlı olarak motor parametre ve emisyonlarının değişme grafikleri gösterilmiştir. Buradan görüldüğü gibi, motor LPG yakıtıyla çalıştığında ortalama efektif

Tablo 1. Deney motorun farklı yanma odaları ile çalıştığında elde edilen test sonuçlarının karşılaştırılması ($n=3000 \text{ min}^{-1}$, $\varepsilon =17,5$, $\lambda =1,42$, $\eta_v =0,9$).

Yanma Oda ve Çevrim tipleri	Kullanılan Yakıt	p_z , MPa	p_{me} , MPa	η_e	k , 1/m	NO, ppm
Konvansiyonel YO, Dizel Çevrimi	EuroDiesel	7,7	0,653	0,306	2,52	1100
MR-2 YO, Otto Çevrimi	CNG	6,5	0,72 (+%10)	0,332 (+%30)	0	403 (-2,75 kat)

basıncın (torkun) maksimum değeri $p_{me}=0,85 \text{ MPa}$, dizel motorunki ise $p_{me}=0,676 \text{ MPa}$ olmuştur, yani motorun torku veya gücü LPG ile çalıştığında %25 civarında daha fazladır. Fakat $p_{me}=0,85 \text{ MPa}$ değeri hava fazlalık katsayısının $\lambda=1,1$ değerinde elde edildiği için (dizel versiyonunda λ 'nin bu değerinde aşırı duman oluşturulduğundan dolayı kullanılmaz) NOx



Şekil 9. Motor parametreleri ve Egzoz gaz emisyon değerlerinin karşılaştırılması (MR-2 YO - LPG, Konvansiyonel Dizel YO) (Mehdiyev ve diğerleri, 2011).

emisyonu kabul edilemez seviyeye dek artmış olur. Bu yüzden gaz-hava karışımının maksimum zenginleştirilme oranı $\lambda =1,36$ değeri ile sınırlanması gerekmektedir. Bu halde ortalama efektif basıncın maksimum değeri $p_{me}=0,735 \text{ MPa}$ seviyesine düşse bile, yine de dizele göre güç %9 civarında daha yüksek kalmaktadır. Bu durumda tüm yük rejimlerinde Otto Çevrimi ile çalışan LPG'li motor, dizele göre daha verimli çalışarak (η_e yüksektir), çok daha az kirlenici maddeler (NO_x , HC ve CO) üretmektedir.

Şekil 9'dan görüldüğü gibi, Stage IIIA (Tier 3) Standardına cevap veren dizelle mukayesede LPG'li motorun emisyon değerleri, duman emisyonunun da sıfır olduğunu göz önüne aldığımızda (Tablo 1'e bak.), Stage IIIB (Tier 4- Interim), hatta Stage IV (Tier 4- Final) standardına uyacağı şüphe doğurmamaktadır.

Böylece, MR-Process yanma mekanizmasının uygulanması ile dizel motorunun %100 CNG veya LPG yakıtıyla yüksek performanslı ve verimli çalıştırılmasının yanı sıra, hiçbir ek emisyon düşürücü sistemleri kullanmaksızın, güncel emisyon standartlarına cevap vermek mümkün olacaktır.

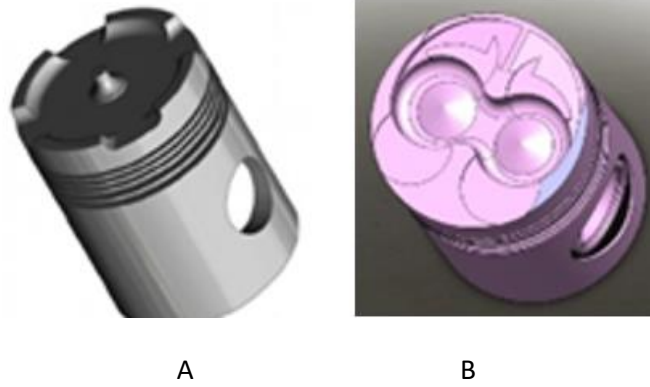
5. TÜLOMSAŞ motorların “MR-Process” yanma mekanizması kullanılarak modernizasyon ve doğal gaz yakıtına dönüştürme çalışmaları

Bilindiği üzere 1968 yıldan itibaren Eskişehir TÜLOMSAŞ fabrikasında Fransa S.E.M.T. (Socié'te' d' Etudes de Machines Terminus) Pielstick Firmasının artık süresi bitmiş lisansı ile yerli Lokomotifler için dizel motorları üretilmekte, eski motorların ise revizyonu yapılmaktadır. Türk LOYDU No:TO.DEB, 12-0132/12-2466, 10.04.2013 Sertifikası ile Marine tipi olarak 16 silindirli TLM16V185 motorları Van Gölü ulaşımında da kullanılmaya başlanmıştır. Sertifika bilgilerine göre bu motorların gücü katalog değerinden %5,3 daha az (2400 karşılık 2271 BG), yakıt tüketimi ise yaklaşık % 9 kadar fazladır. Bunun esas sebebi, motorun performans ve verimliliğini, egzoz gaz ve gürültü emisyonlarını belirleyen yanma mekanizması 1940-50'li yıllarında geliştirilen Ön Yanma Oda yöntemiyle gerçekleştirilmesidir (Şekil 10, A). Bundan dolayı revizyona alınan motorların gücü daha düşük, özgül yakıt tüketimi ≥ 210 g/BGh civarında, egzoz gaz emisyon değerleri ise Faz I (Tier I) Standardı seviyesindedir. Hâlbuki Avrupa Birliğinin (AB) yayınladığı direktiflerle önümüzdeki yıllarda Faz III A ve Faz III B standardına uymayan gemi motorlarının kullanımı engellenecektir.

Bellidir ki, hâlihazırda ileri teknoloji gibi değerlendirilen yüksek basınçlı Common Rail yakıt besleme sistemini kullanmakta olan bildiğimiz lider konumdaki Otomobil ve Ağır Dizel Üreten Firmalar (Volkswagen, Wartsila, MAN vb.) motorun optimum rejim kontrolü açısından avantaj kazanmış olsalar bile, Azot Oksit (NOx) Emisyonunun limit değerlerini aşırı derecede aşma sorunu ile karşı karşıya kalmış, diğer taraftan ekonomik ve pratiklik (servis, onarım, tamir) açısından hiçbir avantaja sahip olamamışlardır. Zaten bu sebepten de ünlü Japon Firması JFE PRIME MOVERS, 1964 yılından bu yana TÜLOMSAŞ motoru ile aynı olan S.E.M.T.-Pielstick motorlarında klasik - düşük basınçlı hidrolik pompa – enjektör kullanarak, hiçbir köklü değişiklik yapmaksızın, Japon ve Asya bölgelerinin gemi ve jeneratör pazarında önemli bir konum edinmiştir. Hâlihazırda TÜLOMSAŞ motorunun yurtdışı “kardeşleri” olarak ABD, İngiltere, G.Kore, Hindistan, İsveç, Çin ve Finlandiya’da da S.E.M.T. - Pielstick lisansı ile yerli markaya dönüştürülmüş askeri ve sivil gemi, lokomotif ve jeneratör uygulamaları için üretim yapılmakta ve Dünya pazarına sunulmaktadır.

Bu örnekler onu gösterir ki, Yakın ve Orta Doğu’nun geniş coğrafyasında tek Türkiye’nin sahip olduğu TÜLOMSAŞ Lokomotif ve Motor Fabrikasının ürettiği ağır dizel motorlarını da, daha fazla zaman kaybı yaşamadan, modernize ederek yenilikçi ve rekabetçi Milli Markaya dönüştürmemiz, ülkenin ekonomisi ve prestiji açısından önem arz etmektedir. Bu amaçla TÜLOMSAŞ motorunun “MR-Process” yanma mekanizması kullanılarak Modernizasyonu ve Doğal Gaz Yakıtına Dönüştürülmesi konusunda aşağıdaki Üç Dönemli proje çalışmalarının yürütülmesi öngörülmektedir:

I. Dönem Modernizasyon çalışmaları olarak TLM16V185 Dizel Motorunun sadece Pistonu üzerinde Çift Döngülü MR-2 Yanma Odalı yeni imalat pistonları uygulayarak güç ve yakıt tüketiminin %10-15 civarında iyileştirilmesi ve Egzoz Gaz Emisyonlarının Faz IIIA Standardı seviyesine düşürülmesi amaçlanmaktadır.



Şekil 10. TÜLOMSAŞ Motorunun mevcut (A) ve MR-2 (B) yanma odalı pistonları.

Şekil 10’da TÜLOMSAŞ motorunun mevcut (A) ve 8’e benzer MR-2 yanma odalarına sahip pistonları gösterilmiştir. “MR-Process” Yanma Mekanizması ile çalışması öngörülen motorda esas değişiklik sadece pistonu üzerinde Çift Döngülü MR-2 Yanma Odasının dizaynidir. Ön YO mevcut şeklinde kalmaktadır. Burada değişiklik, onun sadece lülesinde (nozulunda) yapılmıştır; mevcut 4 delikli lüle bazında, iki delikli olarak tasarlanmış ve sıkıştırma sürecinde oluşan Çift Hava Döngülerine teğet olarak yönlendirilmiştir. Bu durumda ön YO’da tutuşan yakıt, basıncı artırarak yanmış ürünleri, yanmamış yakıtı ve oluşmuş İS emisyonunu alev kümesi ile birlikte lülenin deliklerinden hava döngülerine teğet olarak püskürtüp yanma sürecini türbülanslı döngü ortamında gerçekleştirmektedir. Yanma sürecinin birbirinin tersine dönen türbülanslı ortamda gerçekleştirilmesiyle alev cephesi YO’nın sağ ve sol cidarlarından yanmamış karışımı, ön YO’da oluşan İsi sıyrıp odanın merkezine - en sıcak bölgesine sürükleyerek yanma reaksiyonlarının alev sönmesi olmadan devam edebilmesini sağlamaktadır.

Sadece piston üzerinde ana yanma odası olarak yer alan MR-2 YO kullanıldığında elde edilecek sonuçların ilkin değerlendirilmesi için teorik araştırmalar yapılmıştır. Teorik araştırmalar, dizel motorun gerçek çevriminin tarafımızdan geliştirilmiş matematik modeli kullanılarak yapılmıştır. Ayrıntıları (Mehdiyev ve diğerleri, 2009)’da verilmiş bu modelle yanma sürecini hesaplamak için “yanma kanununu” belirleyen Vibe denklemi kullanılmaktadır;

$$x = 1 - \exp\left[-6,908(\alpha / \alpha_z)^{m+1}\right],$$

Burada, m - yanma süresi için üs, α_z - krank mili açısı (KMA) olarak yanma süresidir.

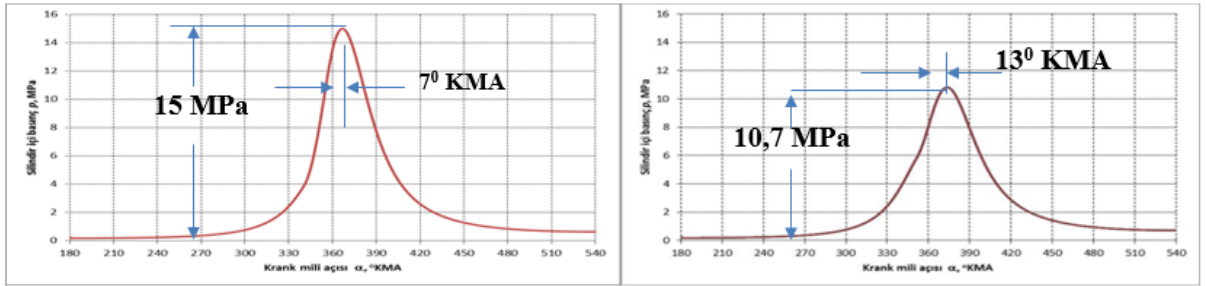
Modeldeki Vibe denklemi parametrelerini (m , α_z) mümkün olan değerler arasında değiştirerek motorda istenilen yanma kanununu teorik olarak elde etmek mümkündür. Bu ise yanma süreci ile ilgili deneysel olarak yapılması zor olan optimizasyon çalışmalarını bilgisayar kullanımı ile önemli derecede kolaylaştırarak, TÜLOMSAŞ motorlarının tasarım öncesi gerekli parametre değerlerinin elde edilmesine imkan sağlamaktadır.

Tablo 2’de söz konusu motorun mevcut (konvansiyonel) YO ve MR-2 YO ile çalışma rejimi parametrelerinin aynı olması durumunda ($n=1500 \text{ min}^{-1}$, $\varepsilon =13,5$, $\lambda =1,45$, $\eta_v =0,9$) elde edilen hesap sonuçları, Şekil 11’de ise teorik indikatör diyagramları karşılaştırılmıştır. Buradan görüldüğü gibi, mevcut YO kullanıldığında motorun güç ve özgül yakıt tüketiminin hesap değerleri katalog değerleri ile örtüşmektedir; $N_e =2400$ ’e

karşın 2350 BG, $b_e=170'$ e karşın 173 g/BGh, yani kullandığımız hesap yöntemi gerçekliği doğru yansıtmaktadır. İndikatör diyagramların karşılaştırılmasından anlaşıldığı gibi, söz konusu motor, mevcut YO ile çalıştığında yanma basıncı ÜÖN'den 70 geçtikten sonra $p_{max}=15$ MPa' ya eşit olan maksimum değerine, MR-2 YO ile çalıştığında ise 130 geçtikten sonra $p_{max}=10,7$ MPa değerine (%27

Tablo 2. TLM16V185 motorun farklı yanma odaları ile çalıştığında elde edilen termodinamik hesap sonuçlarının karşılaştırılması ($n=1500 \text{ min}^{-1}$, $\varepsilon=13,5$, $\lambda=1,45$, $\eta_v=0,9$).

YO tipi	p_{max} , MPa	η_e	N_e , BG	M_e , Nm	b_e , g/BGh	NO, ppm	Gürültü, dB(A)
Mevcut YO	15	0,367	2350	11007	173	875	93,5
MR-2 YO	10,7 (-%29)	0,415 (+%13)	2423 (+%3)	11348 (+%3)	150 (20 g/BGh)	441 (-2 kat)	90,3 (-3,2 dB)



Şekil 11. Motorun mevcut YO (solda) ve MR-2 YO ile çalıştığında teorik indikatör diyagramları.

daha düşük değere) ulaşmıştır, yani yanma süreci genişleme sürecine kayarak, Çift Türbülanslı Döngü ortamında optimum yanma sürecinin gerçekleşmesi mümkün olmuştur. Sonuçta, Tablo 2'den görüldüğü gibi, motorun performans ve emisyon verileri iyileşmiştir; güç %3 ve efektif verim %13 civarında yükselmiş ($N_e=2350'$ e karşın 2423 BG, $\eta_v=0,367$ karşın 0,415), özgül yakıt tüketimi 20 g/BGh azalmış ($b_e=170'$ e karşın 150 g/BGh), NOx emisyonu 2 kat kadar ($NO_x=875$ karşın 441 ppm), gürültü ise 3,2 dB (93,5' karşın 90,3 dB(A)) düşmüştür.

Bu karşılaştırmadan anlaşıldığı gibi, torik olarak elde edilen bu bilgiler, Paragraf 2 ve 3'te sunulan tek silindirli model deney düzeneği üzerinde yapılan test sonuçları ile yüksek seviyede örtüşmektedir. Bu ise MR-Process yanma mekanizmasının uygulanması ile fazla zaman ve yatırım harcamadan TLM16V185 motorunu en güncel seviyede modernizasyonunun mümkün olduğunu kanıtlamaktadır.

II. Dönem çalışmaları ile modernizasyonu yapılmış TLM16V185 motorun Çift Yakıt (Duel Fuel) Sistemi ile kısmen CNG yakıtına (%80 CNG ve %20 motorin) dönüştürülmesi öngörülmektedir.

Klasik Lokomotif, Gemi ve Jeneratör motorları Çift Yakıt ("Dual Fuel") Sistemi adlandırılan yöntemle kısmen CNG yakıtına dönüşümü çoktan beri gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemle motoru CNG yakıtına dönüştürmek basit konstrüksiyon değişiklikler içerdiği için daha az zaman ve maliyetle uygulanabilir. Gaz

yakıtı silindirlere mevcut emme manifoldun vasıtasıyla paylaşıldığı için ufak değişiklikler, sadece bu manifold üzerine gaz yakıt ekipmanlarını (gaz karıştırıcı veya enjektörleri) monte etmek için gerçekleştirilmektedir.

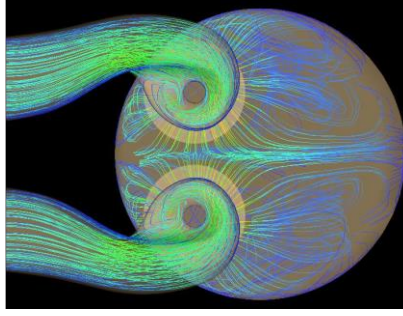
Bellidir ki, Çift Yakıt Sisteminin klasik yanma odasına sahip dizel motorlarında kullanımı vuruntu olayı, kontrol, bakım ve onarım bakımından birçok zorluklar oluşturmaktadır. Ayrıca, günümüzde limit değerleri düşük olan Egzoz Gaz Emisyon Standartlarının devreye girmesi, bu Sistemle CNG'in kullanım miktarının motorin yakıtı oranla %30-35'i aşmamasını talep etmektedir. Aksi halde vuruntu olayını önlemek, NOx ve HC emisyonlarını düşürmek gibi zorluklar meydana çıkmaktadır. Bahsedilen az miktarda CNG'in kullanımı ise ekonomik açıdan kazanımların yetersiz olduğunu göstermektedir.

Modernize olunmuş TLM16V185 motorunda Çift Döngülü MR-2 ana YO kullanıldığı için (Şekil 10, B) ön YO'dan çıkan alev kümesi ile tutuşturulan gaz-hava karışımının yanma süreci Çift Türbülanslı Döngü ortamında gerçekleşmesi sağlanmaktadır. Bu durumda, yukarıda anlatıldığı gibi, vuruntu olayı meydana çıkmamakta ve soğuk cidarlarda alev sönmeye önlenmesi için tam yanma gerçekleşmektedir. Bundan dolayı NOx ve HC emisyonlarını yükseltmeden silindirlere verilen CNG miktarını %70-80'e kadar artırmak mümkündür. Bu sebepten söz konusu yöntemle TÜLOMSAŞ motorunun kısmen Doğal Gaz yakıtına dönüşümü hem ekonomik (CNG'nin sadece fiyat farkından dolayı %25-%30 az maliyet), hem de kirletici gaz emisyonların (özel olarak İS – Partikül Madde ve kükürlü gaz - SO₂) düşürülmesi açısından faydalı olacağı şüphe doğurmamaktadır.

III. Dönem çalışmaları esnasında "MR-Process" Yanma Mekanizmasının Direkt Enjeksiyonlu Dizel sürümünün kullanımı ile TLM16V185 motorun karakteristiklerinin bir kadar da iyileştirilmesi ve aynı konstrüksiyon yapıda %100 NG (CNG veya LNG) gaz yakıtının kullanımı ile Ötto Çevrimine dönüştürülerek performans, verim ve emisyon açısından, hiçbir ek emisyon düşürücü sistem ve olanak kullanmaksızın, güncel Uluslararası Standartların karşılaması öngörülmektedir.

Bellidir ki, söz konusu motorda ön YO'nun kullanımı ile düşük basınçlı (<250 bar) yakıt püskürtme imkânı avantajın olmasının yanı sıra, bir taraftan motorun soğutma sisteminde kaybolan ısı enerjisinin yüksek olması, diğer taraftan hızlı gaz akışının önce silindirden ön YO'sına, sonra ise ters yönde gerçekleşmesi ile gaz-dinamik kayıpların kaçınılmaz olması motor veriminin en az %5÷%8 civarında düşmesine sebep olmaktadır.

Anılan dezavantajları göz önünde bulundurarak, motorda mevcut olan ön YO'sının kaldırılması ile "MR-Process" Yanma Mekanizmasının Şekil 4'te gösterilen şemaya uygun direkt enjeksiyonlu sürümü ile gerçekleştirilmesinin daha avantajlı olacağı şüphe doğurmamaktadır. Lakin bu sürümde, Şekil 4'de gösterildiği gibi, iki delikli enjektörden 125 ÷ 200 bar basınçla püskürtülen yakıt demetinin duvara sıvanarak buharlaşabilmesi için Çift Hava Döngülerinin açılma hızı $\omega \geq (5 \div 10) \cdot \pi \cdot n / 30$ 1/s (n, motorun dakikadaki devir sayısı) seviyelerinde olması gerekmektedir. Gerekli hız seviyesini elde etmek için, Şekil 12'de gösterildiği gibi, silindir kafasında birbirinin tersi yönünde yerleştirilmiş iki helisel emme portu dizaynı yapılmalıdır. Paragraf 2'de anlatıldığı gibi, bu durumda direkt enjeksiyonlu motorun performans ve verimini %5÷10 civarında iyileştirmenin yanı sıra, egzoz gaz emisyonların limit değerlerini Faz IIIB (Tier 3) Standardı seviyesine düşürmek mümkün olacaktır.



Şekil 12. Silindir başlığında birbirinin tersine yerleştirilmiş iki helisel emme portlarının yardımıyla silindirde çift hava döngülerinin oluşturulma şeması.

Paragraf 3'te sunulan örnekte olduğu gibi, birbirinin tersi yönünde Çift Helisel Emme Portlarına ve MR-2 YO'sına sahip dizel motorunu, hiçbir yapısal değişiklikler yapılmaksızın, %100 Doğal Gaz yakıtına dönüştürülmesi de mümkündür.

Doğal Gaz yakıtına dönüşümünde, yüksek dizel sıkıştırma oranını (>13,5:1) korumak şartıyla, sadece dizel enjektörünün yerine buji, gaz enjektörünü ise Çift Helisel Emme portlarının herhangi birisine bağlanması gerekmektedir. Bu durumda emme sürecinde 8'e benzer MR-2 YO'sının bir yarısına Gaz yakıtının %100'ü, havanın ise %50'si, diğer yarısına ise havanın %50'i dolacaktır. Yukarıda anıldığı gibi, emme ve sıkıştırma süreçlerinde YO'nun oyuklarında oluşan türbülanslı döngü hareketleri aynı hız ve momentuma sahip olduklarından dolayı birbirine karışmayarak buji ateşleme anına kadar YO'nun bir bölgesinde HFK $\lambda = 0,6...0,9$ arasında değişen zengin karışım, diğer bölgesinde ise sadece hava yer alacaktır. YO'nun merkezinde yer alan buji, zengin gaz-hava karışımı döngüsüyle hava döngüsünün birbirine temas ettiği yerde olduğu için genel HFK'sını geniş aralıkta değiştirerek ($\lambda = 1,2...2,5$) motorun esas yük rejimlerini elde etmek mümkündür. Genel HFK'nın değiştirilmesi emilen havayı sabit tutarak, sadece gönderilen Gaz yakıtı miktarını değiştirerek gerçekleştirilebildiği için klasik gaz yakıtına dönüştürülmüş motorlardaki gibi hava miktarını değiştiren gaz keleşine ihtiyaç kalmamaktadır. Bu durum %100 Gaz yakıtıyla çalışan motorun Elektronik Kontrol Ünitesinin (EKÜ) karmaşık yazılımla donatılmasını gerektirmediği için EKÜ'nün kalibrasyonu ile ilgili deneysel çalışmaları minimuma indirecektir. Böylece, söz konusu dizel motorların %100 Doğal Gaz yakıtına dönüştürülmesi ile Yüksek Verimli ($\eta_e \geq 0,46$) ve Çevreye Duyarlı Yeşil Motor teknolojisinin Sanayi Uygulaması neticesinde TÜLOMSAŞ'a Dünyada bir İlk olarak ulusal ve uluslararası pazarda rekabetçi ve yenilikçi bir ürün sağlanacaktır.

6. SONUÇLAR

1. TÜLOMSAŞ Motorunun mevcut yanma mekanizması 20. Yüzyılın 40-50'li yıllarında geliştirilmiş olan Ön Yanma Oda yöntemiyle gerçekleştirildiğinden dolayı günümüz ağır dizel motorların performans, verim, egzoz gaz ve gürültü emisyonları değerleri ile mukayesede çok geride kalmaktadır. Yapılan bir dizi teorik ve deneysel araştırmalarla tespit edilmiştir ki, başlangıç I. Dönem - fizibilite çalışması olarak 16 Silindirli TLM16V185 Motorunun sadece pistonu üzerinde MR-Process yanma mekanizmasını gerçekleştiren Çift Döngülü MR-2 Yanma Odasını uygulayarak motor gücünü %5÷10 kadar artırmak, egzoz gaz emisyonu limit değerlerini ise Faz 3 A (Tier III) Standardı seviyesine düşürmek mümkündür. Eğer bu teknoloji ile yılda 70 motor revize edilirse toplam yıllık tasarruf 25.200 ton dizel yakıtı veya yaklaşık 60-70 milyon TL seviyesinde olacaktır.

2. Tasarruf edilen miktarın sadece yarısından az bir kısmını harcayarak II. ve III. Dönem çalışmaları ile motorun daha kapsamlı modernizasyonunu gerçekleştirmek ve hiçbir yapısal değişiklik yapılmadan, Dünyada bir ilk olarak motor, %100 Doğal gaz yakıtına dönüştürülebilecektir. Bununla da geliştirilmiş TÜLOMSAŞ motorları yenilikçiliği ve rekabetçiliği ile Pielstick lisansı esasında hâlihazırda üretilmekte olan yurtdışı “kardeşlerinden” üstün bir farklılık sergilemiş olacaktır.
3. TÜLOMSAŞ A.Ş., süresi bitmiş Pielstick lisansı esasında 6, 8 ve 12 silindirli motor üretim olanakları ve kapasiteye de sahiptir. Bu durumda MR-Process yanma mekanizması temel alınarak, Sivil ve Askeri amaçlı gemiler, lokomotifler, iş makineleri, jeneratörler ve enerji santralleri için gücü 500 - 2800 kW arasında değişen, 6-8-12-16 silindirli Yenilikçi ve Rekabetçi Yerli Marka motorların seri üretimini gerçekleştirerek dışa bağımlılık ortadan kaldırılmış olacaktır.

KAYNAKLAR

Dinc, C., Arslan, H. and Mehdiyev, R. (2009). CO2 Emission Reduction Using Stratified Charge in Spark Ignition Engines, *Energy & Fuels*, 23 (4), 1781-1785.

<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ef800349x>

Mehdiyev, R.I. ve Wolanski, P. (2000). Bi-Modal Combustion Chamber for a Stratified Charge Engine *Advances in Combustion*, SAE-2000-01-0196, p.p.53-61.

Mehdiyev, R., Ogun, K., Derbentli, T., Arslan, H., Ozcan, E. (2009). Development of a Turbo Diesel Engine by a New Combustion Process for Heavy Duty Vehicles and Tractors 09ICE-0048 Copyright © SAE International, p.12. <http://mech-ing.com/journal/3-2011.html>

Mehdiyev, R. I., Karpov, V. P., Wolanski, P. (1978). Flame Spreading And Evaluation of Toxic Substances During the Stratified Charge Combustion, *Archives of Thermodynamics And Combustion*, vol. 9, No.4, Warszawa, p.p. 645-660.

Mehdiyev R.I. (1983). İYM’da NO ve CH emisyonları oluşumunun özellikleri ve düşürülme yöntemleri (Rus dilinde), SSCB Bilim Akademisinin «Yanma ve Patlamanın Fiziği» -“Fizika Goreniya i Vzriva” Dergisi No:5, sayfa 70-73.

Mehdiyev, R., Ogun, K., Babaoglu, O. Vb., (2011). “The Twin Swirl "MR-Process" Combustion Mechanism and Conversion of Diesel Engines to Operate with Gaseous Fuels”, 10th International Conference on Engines & Vehicles ICE2011, September 11-15, Capri-Napoli / ITALY, Proceedings DVD_2011-24-0066.pdf, Book of Abstracts pp. 90, SAE 2011-24-0066, doi:10.4271/2011-24-0066. <http://papers.sae.org/2011-24-0066>

Vestergård, J. (2014). Wärtsilä NOx Reducer, Wärtsilä NOx Reducer SCR solution from Wärtsilä, İstanbul.