

**T.C.  
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**BİR DİZEL MOTORUNDA LPG-DİZEL ÇİFT YAKIT  
KARIŞIMLARI+EGR'NİN PERFORMANS VE EMİSYON  
KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Semih ALİUSTAOĞLU**

**Enstitü Anabilim Dalı : OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Vezir AYHAN**

**Eylül 2019**

T.C.  
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

BİR DİZEL MOTORUNDA LPG-DİZEL ÇİFT YAKIT  
KARIŞIMLARI+EGR'NİN PERFORMANS VE EMİSYON  
KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

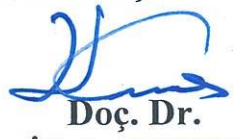
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Semih ALIUSTAOĞLU

Enstitü Anabilim Dalı : OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 13/09/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından  
oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

  
Doç. Dr.  
Vezir AYHAN  
Jüri Başkanı

  
Doç. Dr.  
İdris CESUR  
Üye

  
Dr. Öğr. Üyesi  
Gökhan COŞKUN  
Üye

## **BEYAN**

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Semih ALIUSTAOĞLU  
13/09/2019

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, özellikle deneysel çalışmalar esnasında deney düzeneğinin kurulumunda büyük emekleri geçen değerli danışman hocam Doç. Dr. Vezir AYHAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımnda, labaratuvar deneyleri ve yazım aşamasında yardımlarını esirgemeyen arkadaşım Gülden BOLATLI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, yine labaratuvar deneylerinin gerçekleşmesi esnasında yardımlarını esirgemeyen Adem TÜYLÜ ve Melih YILMAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Özellikle, eğitim-öğretim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, benim bu günlere gelmemde büyük emekleri geçen değerli aileme en içten teşekkürlerimi sunmayı borç bilirim.

# İÇİNDEKİLER

|                       |      |
|-----------------------|------|
| BEYAN.....            |      |
| TEŞEKKÜR .....        | i    |
| İÇİNDEKİLER .....     | ii   |
| KISALTMALAR .....     | v    |
| SİMGELER.....         | vi   |
| TABLolar LİSTESİ..... | viii |
| ŞEKİLLER LİSTESİ..... | ix   |
| ÖZET.....             | xii  |
| SUMMARY .....         | xiii |

## BÖLÜM 1.

|             |   |
|-------------|---|
| GİRİŞ ..... | 1 |
|-------------|---|

## BÖLÜM 2.

|   |    |
|---|----|
| DİZEL MOTORLARINDA YANMA VE ALTERNATİF YAKITLAR .....       | 20 |
| 2.1. Dizel Motorlar .....                                   | 20 |
| 2.1.1. Dizel motorlarında yanma.....                        | 22 |
| 2.1.2. Dizel motorlarında indike parametreler .....         | 24 |
| 2.1.3. Dizel motorlarında çift yakıt uygulamaları .....     | 28 |
| 2.2. Dizel Motorlarında Kullanılan Alternatif Yakıtlar..... | 31 |
| 2.2.1. Biyodizel .....                                      | 32 |
| 2.2.2. Alkoller .....                                       | 33 |
| 2.2.3. Doğalgaz .....                                       | 34 |
| 2.2.4. LPG .....  | 35 |
| 2.2.4.1. LPG'nin genel özellikleri .....                    | 35 |
| 2.2.4.2. LPG'nin taşıtlarda kullanımı .....                 | 37 |
| 2.2.4.3. LPG'nin avantaj ve dezavantajları.....             | 39 |

## BÖLÜM 3.

|   |    |
|---|----|
| KİRLETİCİ EMİSYONLAR VE KONTROL YÖNTEMLERİ.....         | 42 |
| 3.1. Dizel Motor Kaynaklı Kirletici Egzoz Gazları ..... | 42 |
| 3.1.1. Hidrokarbon (HC) .....                           | 42 |
| 3.1.2. Karbonmonoksit (CO).....                         | 43 |

|  |    |
|--|----|
| 3.1.3. Karbondioksit (CO <sub>2</sub> ) .....                    | 44 |
| 3.1.4. Azot oksitler (NO <sub>x</sub> ) .....                    | 44 |
| 3.1.5. Partikül madde (duman-is).....                            | 46 |
| 3.1.6. Dizel motorların çevre ve insan sağlığına zararları. .... | 47 |
| 3.2. Dizel Motorlarında Emisyon Kontrol Yöntemleri .....         | 48 |
| 3.2.1. EGR (egzoz gazı geri gönderim) sistemi .....              | 51 |
| 3.2.2. EGR sistemini oluşturan parçalar .....                    | 52 |
| 3.2.2.1. EGR valfi .....   | 52 |
| 3.2.2.2. EGR soğutucusu.....                                     | 53 |

## **BÖLÜM 4.**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>                   | <b>54</b> |
| 4.1. Materyal .....                              | 54        |
| 4.1.1. Deney yakıtları .....                     | 54        |
| 4.2. Deney Düzenliğinin Tanıtımı .....           | 55        |
| 4.2.1. Deney motoru.....                         | 57        |
| 4.2.2. Dinamometre.....                          | 58        |
| 4.2.3. LPG-dizel çift yakıt sistemi .....        | 58        |
| 4.2.4. EGR sistemi .....                         | 59        |
| 4.2.5. Ölçüm elemanları ve göstergeler .....     | 60        |
| 4.2.5.1. Dizel yakıt sarfiyatı ölçümü .....      | 60        |
| 4.2.5.2. LPG sarfiyatı ölçümü .....              | 60        |
| 4.2.5.3. Hava sarfiyatı ölçümü .....             | 61        |
| 4.2.5.4. Emisyon ölçümü .....                    | 61        |
| 4.2.5.5. Sıcaklık ölçümü ve göstergeler .....    | 62        |
| 4.2.5.6. Silindir içi indike basınç ölçümü ..... | 63        |
| 4.3. Deney Yöntemi .....                         | 64        |
| 4.4. Belirsizlik Analizi .....                   | 65        |
| 4.5. Hesaplamalarda Kullanılan Formüller .....   | 67        |
| 4.5.1. Standart motor deneyleri .....            | 67        |
| 4.5.1.1. Motor momenti ve efektif güç .....      | 67        |
| 4.5.1.2. Dizel yakıt debisi .....                | 68        |
| 4.5.1.3. Dizel yakıt sarfiyatı .....             | 68        |
| 4.5.1.4. Dizel yakıt maliyeti .....              | 69        |
| 4.5.1.5. Özgül yakıt tüketimi.....               | 69        |
| 4.5.1.6. Efektif verim .....                     | 69        |
| 4.5.2. LPG-dizel çift yakıt deneyleri.....       | 70        |
| 4.5.2.1. LPG-dizel yakıt debisi .....            | 70        |
| 4.5.2.2. LPG-dizel yakıt sarfiyatı .....         | 70        |
| 4.5.2.3. LPG-dizel yakıt maliyeti .....          | 71        |
| 4.5.2.4. Özgül yakıt tüketimi.....               | 71        |
| 4.5.2.5. Efektif verim .....                     | 71        |
| 4.5.3. LPG-dizel çift yakıt+EGR deneyleri.....   | 72        |
| 4.5.3.1. EGR oranı hesaplaması .....             | 72        |

## **BÖLÜM 5.**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>DENEY BULGULARI .....</b>                                 | <b>73</b> |
| 5.1. Standart Motor Deneyleri.....                           | 74        |
| 5.1.1. Motor momenti ve efektif güç .....                    | 74        |
| 5.1.2. Silindir içi indike basınç ve ısı yayılım oranı ..... | 74        |
| 5.2. LPG-Dizel Çift Yakıt Deneyleri .....                    | 75        |
| 5.2.1. Dizel yakıt tüketimi.....                             | 76        |
| 5.2.2. Özgül yakıt tüketimi (Ö.Y.T).....                     | 76        |
| 5.2.3. Efektif verim .....                                   | 78        |
| 5.2.4. Silindir içi indike basınç ve ısı yayılım oranı ..... | 79        |
| 5.2.5. Toplam yakıt maliyeti .....                           | 80        |
| 5.2.6. Hidrokarbon (HC) emisyonları .....                    | 81        |
| 5.2.7. Karbonmonoksit (CO) emisyonları.....                  | 82        |
| 5.2.8. Karbondioksit (CO <sub>2</sub> ) emisyonları .....    | 84        |
| 5.2.9. Azotoksit (NO <sub>x</sub> ) emisyonları .....        | 85        |
| 5.2.10. Duman koyuluğu.....                                  | 86        |
| 5.3. LPG-Dizel Çift Yakıt+EGR Deneyleri .....                | 87        |
| 5.3.1. Dizel yakıt tüketimi.....                             | 87        |
| 5.3.2. Özgül yakıt tüketimi (Ö.Y.T).....                     | 88        |
| 5.3.3. Efektif verim .....                                   | 89        |
| 5.3.4. Silindir içi indike basınç ve ısı yayılım oranı ..... | 91        |
| 5.3.5. Toplam yakıt maliyeti .....                           | 92        |
| 5.3.6. Hidrokarbon (HC) emisyonları .....                    | 94        |
| 5.3.7. Karbonmonoksit (CO) emisyonları.....                  | 95        |
| 5.3.8. Karbondioksit (CO <sub>2</sub> ) emisyonları .....    | 96        |
| 5.3.9. Azotoksit (NO <sub>x</sub> ) emisyonları .....        | 98        |
| 5.3.10. Duman koyuluğu.....                                  | 99        |

## **BÖLÜM 6.**

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| <b>SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b> | <b>102</b> |
|-------------------------------|------------|

|                        |            |
|------------------------|------------|
| <b>KAYNAKLAR .....</b> | <b>107</b> |
|------------------------|------------|

|                      |            |
|----------------------|------------|
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b> | <b>113</b> |
|----------------------|------------|

## KISALTMALAR

|      |   |
|------|---|
| AÖN  | : Alt ölü nokta                                     |
| AECA | : Avrupa Otomotiv Üreticileri Birliği               |
| bTDP | : Üst Ölü Noktadan Önce                             |
| CI   | : Dizel motor                                       |
| CNG  | : Sıkıştırılmış Nitrojen Gazı                       |
| EGR  | : Egzoz gazı geri gönderimi                         |
| DME  | : Dimetil eter                                      |
| DPF  | : Dizel Partikül Filtresi                           |
| HFK  | : Hava fazlalık katsayısı                           |
| IEA  | : Uluslararası Enerji Ajansı                        |
| KMA  | : Krank Mili Açısı                                  |
| Ktoe | : Bin ton eşdeğer petrol                            |
| LPG  | : Sıvılaştırılmış Petrol Gazı                       |
| MPS  | : Mevcut politikalar senaryosu                      |
| MTEP | : Milyon ton eşdeğer petrol                         |
| OSD  | : Otomotiv Sanayi Derneği                           |
| OECD | : Ekonomik İş Birliği Kalkınma Örgütü               |
| OICA | : Uluslararası Motorlu Taşıtlar İmalatçıları Örgütü |
| ÖYT  | : Özgül yakıt tüketimi                              |
| PM   | : Partikül madde                                    |
| PPM  | : Milyonda bir partikül madde                       |
| SBS  | : Sürdürülebilir büyüme senaryosu                   |
| SCR  | : Seçici Katalitik İndirgeme                        |
| SI   | : Benzinli motor                                    |
| TEP  | : Ton eşdeğer petrol                                |
| TG   | : Tutuşma gecikmesi                                 |
| TUİK | : Türkiye İstatistik Kurumu                         |
| THT  | : Tetra Hidra Teafan                                |
| ÜÖN  | : Üst Ölü Nokta                                     |



## SİMGELER

|                                |                                       |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| $A_x$                          | : Sistematik belirsizliklerin toplamı |
| $b_i$                          | : İndike özgül yakıt tüketimi         |
| $b_e$                          | : Efektif özgül yakıt tüketimi        |
| $B_x$                          | : Rastgele belirsizlik                |
| CO                             | : Karbonmonoksit                      |
| CO <sub>2</sub>                | : Karbondioksit                       |
| CH <sub>4</sub>                | : Metan                               |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>  | : Etan                                |
| C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | : Bütan                               |
| C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>  | : Propan                              |
| F                              | : Fren kuvveti                        |
| HNO <sub>3</sub>               | : Nitrik asit                         |
| HC                             | : Hidrokarbon                         |
| $Hu_{dizel}$                   | : Dizel yakıt alt ısı enerjisi        |
| $Hu_{LPG}$                     | : LPG alt ısı enerjisi                |
| L                              | : Moment kolu uzunluğu                |
| $M_d$                          | : Döndürme momenti                    |
| $\dot{m}_y_{dizel}$            | : Dizel yakıt debisi                  |
| $\dot{m}_y_{LPG}$              | : LPG debisi                          |
| $m_p_{dizel}$                  | : Dizel yakıt yoğunluğu               |
| $m_p_{LPG}$                    | : LPG yoğunluğu                       |
| NO                             | : Azot oksit                          |
| N                              | : Azot                                |
| NO <sub>2</sub>                | : Azotdioksit                         |
| N <sub>2</sub> O               | : Diazotoksit                         |
| N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | : Diazottetraoksit                    |
| N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | : Diazotpentaoksit                    |

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| $n$                           | : Motor devri  |
| $\eta_i$                      | : İndike verim   |
| $\eta_e$                      | : Efektif verim  |
| $N$                           | : Tekrarlı ölçümlerin sayısı                           |
| $P_e$                         | : Efektif güç  |
| $P_{mi}$                      | : Ortalama indike basınç                               |
| $P_i$                         | : İndike güç   |
| $R$                           | : Ölçümün ortalama değeri                              |
| $S_{\bar{x}}$                 | : Ölçüm yapılan büyüklüğün ortalamasındaki belirsizlik |
| $t$                           | : Zaman  |
| $t_{v,95}S_{\bar{x}}$         | : Ölçümün ortalamasındaki rastgele belirsizlik         |
| $u_R$                         | : Toplam belirsizlik                                   |
| $Y.M_{dizel}$                 | : Dizel yakıt maliyeti                                 |
| $Y.M_{LPG}$                   | : LPG maliyeti   |
| $Y.S_{dizel}$                 | : Dizel yakıt sarfiyatı                                |
| $Y.S_{LPG}$                   | : LPG sarfiyatı  |
| $\lambda$                     | : Hava fazlalık katsayısı                              |
| $\sigma$                      | : Ölçümün standart sapması                             |
| $\rho$                        | : Yoğunluk   |
| $\theta_i$                    | : Duyarlılık indeksi                                   |
| $\dot{\theta}_{giren\ dizel}$ | : Sisteme giren dizel enerjisi                         |
| $\$_{Dizel}$                  | : Dizel yakıt litre fiyatı                             |
| $\$_{LPG}$                    | : LPG litre fiyatı                                     |

## TABLolar LİSTESİ

|  |    |
|--|----|
| Tablo 2.1 : Doğalgaz bileşenlerinin kimyasal formülleri ve hacimsel yüzde oranları ..... | 34 |
| Tablo 2.2 : LPG'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri .....                               | 37 |
| Tablo 2.3 : LPG'nin taşıtlarda en yaygın kullanıldığı ülkeler.....                       | 39 |
| Tablo 3.1 : Avrupa binek araç egzoz emisyon standartları .....                           | 48 |
| Tablo 4.1 : Motorin ve LPG özellikleri.....  | 54 |
| Tablo 4.2 : Deney motoru teknik özellikleri .....  | 57 |
| Tablo 4.3 : Sistematik ve toplam belirsizlikler. ....                                    | 67 |



## ŞEKİLLER LİSTESİ

|   |    |
|---|----|
| Şekil 1.1 : Dünya toplam birincil enerji talebi -mevcut politikalar senaryosu (MPS) .....                         | 3  |
| Şekil 1.2 : Dünya toplam birincil enerji talebi-sürdürülebilir büyüme senaryosu (SBS) .....                       | 4  |
| Şekil 1.3 : Dünya petrol talebi-mevcut politikalar senaryosu .....  | 4  |
| Şekil 1.4 : Dünya petrol talebi-sürdürülebilir büyüme senaryosu.....  | 5  |
| Şekil 1.5 : Dünya petrol üretim miktarı-mevcut durum ve sürdürülebilir büyüme senaryosu .....                     | 6  |
| Şekil 1.6 : Farklı kaynaklardan tedarik edilen birincil enerji miktarı. ....                                      | 6  |
| Şekil 1.7 : Petrol ve petrol türevi ürünlerin nihai tüketim miktarı .....   | 7  |
| Şekil 1.8 : Ham petrol ve türevlerinin üretim miktarı .....   | 8  |
| Şekil 1.9 : İthal edilen petrol miktarı. ....   | 8  |
| Şekil 1.10 : 2016 yılı petrol ve petrol ürünlerinin sektörlere göre nihai tüketim oranları.....                   | 9  |
| Şekil 1.11 : Dünya çapında 2015 yılı itibari ile her bin kişiye düşen motorlu taşıt sayısı ve değişim oranı ..... | 10 |
| Şekil 1.12 : Dünyada kullanılan toplam motorlu taşıt adedi.....   | 11 |
| Şekil 1.13 : Dünyada toplam üretilen motorlu taşıt adedi.....   | 11 |
| Şekil 1.14 : Türkiye’de kullanılan toplam motorlu taşıt sayısı .....  | 12 |
| Şekil 1.15 : Türkiye’de kullanılan motorlu kara taşıtı sayısı .....   | 13 |
| Şekil 2.1 : Dört stroklu dizel motor çevrim aşamaları .....   | 21 |
| Şekil 2.2 : Dizel motor yanma diyagramı .....   | 23 |
| Şekil 2.3 : Teorik dizel çevrimi P-V ve T-S diyagramları .....  | 25 |
| Şekil 2.4 : Dizel motor gerçek ve teorik çevrim p-v diyagramları.....   | 25 |
| Şekil 2.5 : Dizel motor açık indikatör diyagramı .....  | 27 |
| Şekil 2.6 : Bütan ve propanın atomik yapıları.....  | 36 |
| Şekil 2.7 : Avrupa’daki binek taşıtların kullanılan yakıt türüne göre yüzdeleri.....                              | 38 |
| Şekil 3.1 : NOx oluşum reaksiyonu .....   | 44 |
| Şekil 3.2 : Dizel partikül madde kompozisyonları.....   | 46 |
| Şekil 3.3 : Karpit (solda) ve kordierit (sağda) DPF’leri.....   | 49 |
| Şekil 3.4 : Katalitik konvertör çalışması .....   | 50 |
| Şekil 3.5 : SCR çalışma mantığı .....   | 51 |
| Şekil 3.6 : EGR sistemi .....   | 52 |
| Şekil 4.1 : Deney düzeneği genel görünüm .....  | 56 |
| Şekil 4.2 : Deney düzeneği şematik görünüm.....   | 56 |
| Şekil 4.3 : Deney motoru .....  | 57 |
| Şekil 4.4 : Deneylerde kullanılan dinamometre.....  | 58 |
| Şekil 4.5 : Çift yakıt sistemi elemanları .....   | 59 |
| Şekil 4.6 : EGR sistemi elemanları .....  | 59 |
| Şekil 4.7 : Dizel yakıt sarfiyatı ölçüm sistemi .....   | 60 |
| Şekil 4.8 : LPG sarfiyatı ölçüm sistemi .....   | 61 |

|   |     |
|---|-----|
| Şekil 4.9 : Hava sarfiyatı ölçüm tertibatı .....        | 61  |
| Şekil 4.10 : Emisyon ölçüm cihazı.....                  | 62  |
| Şekil 4.11 : Sıcaklık ölçümü ve göstergeler.....        | 63  |
| Şekil 4.12 : Silindir içi basınç ölçüm elemanları ..... | 63  |
| Şekil 5.1 : Motor moment ve efektif güç .....           | 74  |
| Şekil 5.2 : Silindir içi indike basınç .....            | 75  |
| Şekil 5.3 : Isı yayılım oranı .....                     | 75  |
| Şekil 5.4 : Dizel yakıt tüketimi .....                  | 76  |
| Şekil 5.5 : Özgül yakıt tüketimi .....                  | 77  |
| Şekil 5.6 : Özgül yakıt tüketimi % değişim .....        | 77  |
| Şekil 5.7 : Efektif verim .....                         | 78  |
| Şekil 5.8 : Efektif verim % değişim .....               | 78  |
| Şekil 5.9 : Silindir içi indike basınç .....            | 79  |
| Şekil 5.10 : Isı yayılım oranı .....                    | 79  |
| Şekil 5.11 : Toplam yakıt maliyeti .....                | 80  |
| Şekil 5.12 : Toplam yakıt maliyeti % değişim.....       | 81  |
| Şekil 5.13 : Hidrokarbon emisyonları .....              | 82  |
| Şekil 5.14 : Karbonmonoksit emisyonları.....            | 83  |
| Şekil 5.15 : Karbonmonoksit emisyonları % değişim.....  | 83  |
| Şekil 5.16 : Karbondioksit emisyonları.....             | 84  |
| Şekil 5.17 : Karbondioksit emisyonları % değişim.....   | 84  |
| Şekil 5.18 : Azot oksit emisyonları .....               | 85  |
| Şekil 5.19 : Azot oksit emisyonları % değişim .....     | 85  |
| Şekil 5.20 : Duman koyuluğu .....                       | 86  |
| Şekil 5.21 : Duman koyuluğu % değişim .....             | 86  |
| Şekil 5.22 : Dizel yakıt tüketimi .....                 | 87  |
| Şekil 5.23 : Özgül yakıt tüketimi .....                 | 88  |
| Şekil 5.24 : Özgül yakıt tüketimi % değişim .....       | 88  |
| Şekil 5.25 : Özgül yakıt tüketimi % değişim .....       | 89  |
| Şekil 5.26 : Efektif verim .....                        | 90  |
| Şekil 5.27 : Efektif verim % değişim .....              | 90  |
| Şekil 5.28 : Efektif verim % değişim .....              | 90  |
| Şekil 5.29 : Silindir içi indike basınç .....           | 91  |
| Şekil 5.30 : Isı yayılım oranı .....                    | 91  |
| Şekil 5.31 : Toplam yakıt maliyeti.....                 | 92  |
| Şekil 5.32 : Toplam yakıt maliyeti % değişim.....       | 93  |
| Şekil 5.33 : Toplam yakıt maliyeti % değişim.....       | 93  |
| Şekil 5.34 : Hidrokarbon emisyonları .....              | 94  |
| Şekil 5.35 : Hidrokarbon emisyonları .....              | 94  |
| Şekil 5.36 : Karbonmonoksit emisyonları.....            | 95  |
| Şekil 5.37 : Karbonmonoksit emisyonları % değişim.....  | 95  |
| Şekil 5.38 : Karbonmonoksit emisyonları % değişim.....  | 96  |
| Şekil 5.39 : Karbondioksit emisyonları.....             | 96  |
| Şekil 5.40 : Karbondioksit emisyonları % değişim.....   | 97  |
| Şekil 5.41 : Karbondioksit emisyonları % değişim.....   | 97  |
| Şekil 5.42 : Azot oksit emisyonları .....               | 98  |
| Şekil 5.43 : Azot oksit emisyonları % değişim .....     | 98  |
| Şekil 5.44 : Azot oksit emisyonları % değişim .....     | 99  |
| Şekil 5.45 : Duman koyuluğu .....                       | 100 |
| Şekil 5.46 : Duman koyuluğu % değişim .....             | 100 |

Şekil 5.47 : Duman koyuluğu % değişim ..... 101



# BİR DİZEL MOTORUNDA LPG-DİZEL ÇİFT YAKIT KARIŞIMLARI + EGR'NİN PERFORMANS VE EMİSYON KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

## ÖZET

Günümüzde, dünya enerji talebinin büyük bir kısmı fosil kaynaklı yakıtlar tarafından karşılanmaktadır. Nüfus artışı ve gelişen teknoloji ile birlikte bu yakıtların tüketimi endişe verici boyutlara ulaşmıştır. Böylece, egzoz kaynaklı kirletici gazlar, çevre ve insan sağlığını her geçen gün daha fazla tehdit etmektedir.

Bu nedenle, gelecekteki enerji sistemlerimizin; yenilenebilir, sürdürülebilir, verimli, düşük maliyetli, rahat ve güvenilir olması gerekecektir. Avrupa Alternatif Yakıtlar Stratejisi Avrupa Komisyonu Tebliğinde, verilen alternatif yakıtlar listesinde elektrik enerjisi, hidrojen, bio yakıtlar ve LPG yer almaktadır. LPG; kolay taşınabilir, depolanabilir ve uzun yıllar yetecek rezervlere sahip olması bakımından otomotiv sektörü tarafından kabul gören en önemli alternatif yakıttır. LPG'nin içten yanmalı motorlarda kullanımı ile ilgili çeşitli yanma stratejileri geliştirilmiş ve birçok çalışma yapılmıştır. Fakat, LPG-dizel çift yakıt stratejisi bu husustaki en etkili yanma stratejilerinden birisidir.

Bu çalışmada, tek silindirli bir dizel motorda LPG-dizel çift yakıt karışımı ve EGR (Egzoz Gazı Geri Gönderim) sistemi kullanımının performans ve emisyon karakteristikleri üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. İlk olarak motor standart tam yük deneyleri yapılarak her bir devir için yük, özgül yakıt tüketimi ve emisyon değerleri elde edilmiştir. İkinci aşamada LPG-dizel çift yakıt deneyleri gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada elde ettiğimiz standart yük değeri gaz kolu yardımıyla %10, %20 ve %30 oranlarında düşürülerek dizel yakıt miktarı azaltılmıştır. Ardından, ikinci yakıt olarak LPG elektrikli yakıt enjektörü yardımı ile motor emme hattından kademeli olarak püskürtülmüştür. Daha sonra EGR sistemi deney düzeneğine adapte edilerek EGR'li deneyler gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen değerler karşılaştırıldığında LPG-dizel yakıt karışımının standart duruma göre, performansta herhangi bir kötüleşme olmaksızın özgül yakıt tüketiminde ve yakıt maliyetlerinde iyileşmeler sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca, is emisyonlarında kayda değer oranlarda iyileşme sağladığı görülmüştür. Fakat, LPG'nin is emisyonlarını düşürürken, hava-yakıt oranını ve silindir içi sıcaklıklarını arttırdığından dolayı NO<sub>x</sub> emisyonlarını kötüleştirdiği gözlemlenmiştir. Bu durumun önüne geçmek adına %10, %15 ve %20 oranlarında egzoz gazı motor emme hattından gönderilmiştir. EGR ile birlikte NO<sub>x</sub> değerlerinin LPG'li deneyler ile karşılaştırıldığında önemli oranda azaldığı gözlemlenmiş, bazı EGR oranları için ise standart deneylerdeki değerlerin altına düştüğü tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dizel motor, LPG, çift yakıt, EGR.

# **INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF LPG-DIESEL DUAL FUEL MIXTURES+EGR ON PERFORMANCE AND EMISSION CHARACTERISTICS IN A DIESEL ENGINE**

## **SUMMARY**

Nowadays, the most part of world's energy demand met by fossil fuels. The consumption of these fuels has reached to alarming levels with the increasing population and improving technology. Thus, amount of pollutant gases which are consist of burn of fossil fuels released to atmosphere from the exhaust more threat to environment and human health day to day.

For this reason, our energy sources in the future will be need renewable, sustainable, efficient, low cost, convenient and reliable. The alternative fuels that can replace to petroleum or reduce emission pollutant from vehicles are evaluated in European Alternative Fuels Strategy in the European Commission Communication. The given list of alternative fuels provided includes electricity, hydrogen, bio fuels and LPG. LPG has important advantages in terms of clean combustion, low price, has reserves can afford long years, easy stored and transport. LPG; can be used as pilot fuel as a result of modification or as a second fuel in diesel engines while use directly in gasoline engines. Several combustion strategies have been developed and many studies have been carried out. But, LPG-diesel dual fuel strategy is one of the most efficient strategy in this subject.

In this study, the effect of LPG-diesel dual fuel mixture and used of EGR on performance and emissions characteristics have been investigated as experimental in single cylinder diesel engine. First of all; load, specific fuel consumption and emissions were achieved by engine standart load test carried out. In second stage, LPG-diesel dual fuel experiments has been realised. The value of standart load obtained in the first stage was reduced by 10, 20 and 30% with the help of the throttle and the amount of diesel fuel was reduced. Then, LPG was sprayed as second fuel with the help of electrical fuel enjector from engine intake line. Then EGR was adapted to the experimental setup and EGR experiments has been carried out.

When compared to obtained values, it has been determined that LPG-diesel dual fuel mixture provides improvements in specific fuel consumption and fuel cost without any deterioration in performance according to standard situation. It has also been observed that significant improvement in smoke emissions. However, it has been seen that LPG deteriorated NO<sub>x</sub> emissions due to increased in cylinder tempartures and air-to-fuel ratio while reduced smoke emissions. Exhaust gases have been given by 10, 15 and 20% from the engine intake line to prevent this situation. It was observed that NO<sub>x</sub> values decreased significantly with EGR application compared to experiments with LPG, moreover in some EGR ratios were below the values in standard tests.

Keywords: Diesel engine, LPG, dual fuel, EGR.



## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Sanayi devrimi ile birlikte kentleşme ve buna bağlı olarak sanayileşme faaliyetleri artış göstermiş, insanların yaşam standartları iyileştirilmeye çalışılmıştır (Arslan ve Demirağ, 2017). Artan sanayileşme faaliyetleri ile birlikte hammadde ve buna bağlı olarak enerjiye duyulan ihtiyaç da artmıştır. Dolayısı ile enerji tüketiminde yaşanan artış, enerji ihtiyacının büyük bir kısmının karşılanmasında kullanılan fosil kaynaklı yakıtların tüketimini hızlandırmıştır. 2040 yılına kadar küresel enerji ihtiyacı OECD ülkeleri dışındaki ülkelerde %25 artacaktır. 2030'a kadar orta sınıf diye adlandırılan tabakanın nüfusunda %80'lik bir artış meydana gelecektir. Bu artışa gelişen ekonomilerin de eşlik etmesiyle hayat standartlarındaki iyileşme ile birlikte enerji tüketiminde hatırı sayılır bir artış olacağı ön görülmektedir (Uluslararası Enerji Ajansı, 2018).

Artan enerji talebinin karşılanabilmesi için mevcut enerji kaynaklarının tamamının kullanılması ya da mevcut kaynakları daha etkili kullanmanın yollarını bulmak gerekecektir. Bu aşamada doğalgaz ve LPG'nin tüm bu enerji ihtiyaçlarına çözüm olacağı düşünülmektedir (Dünya Enerji Konseyi Türk Komitesi, 2018). Ayrıca, fosil kaynaklı yakıtların tüketiminde önemli bir paya sahip olan motorlu taşıtların sayısında ki artış ile birlikte; çevre kirliliği, küresel ısınma ve rezervlerin tükenme tehlikesi gibi sorunlar ortaya çıkmıştır (Ashok ve diğ., 2015). Bu sorunların etkilerini bir miktar da olsa azaltmak veya artışını önlemek adına daha katı emisyon yönetmelikleri uygulanmaya başlanmış ve iklim değişikliği ile ilgili uluslararası protokoller imzalanmıştır (Avrupa Komisyonu, 2018; Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı, 2018; Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2017).

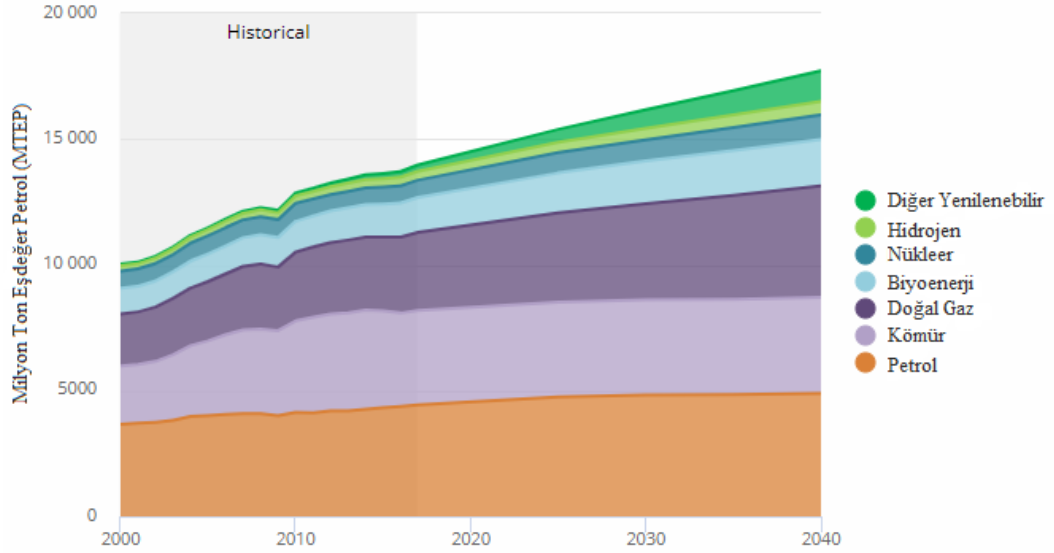
Günümüzde, ülkeler için enerji ihtiyacının karşılanması ve var olan enerjinin etkili bir biçimde kullanımı önemli bir konu haline gelmiştir. Fakat; artan nüfus, şehirleşme ve sanayileşme faaliyetleri, enerji ihraç eden ve ithal eden ülkeler arasında yaşanan anlaşmazlıklar, küresel ısınma ve çevresel sorunlar nedeni ile arz talep dengesi bozulmuştur. Bu durum ülkeleri, enerji tüketimi ve var olan enerjiyi koruma adına sıkı

politikalar izlemek zorunda bırakmıştır. Bunun yanı sıra enerjinin hayatımızda her alanda kullanımı da enerji ihtiyacının artmasına neden olmaktadır (Ergen, 2011).

Yapılan çalışmalarda, enerji ihtiyacının giderek artış gösterdiği ve bu ihtiyacın artarak devam edeceği öngörülmektedir. Yapılan araştırmalara göre 2040 yılına kadar küresel enerji ihtiyacı OECD (Ekonomik Kalkınma ve İş birliği Örgütü) ülkeleri dışındaki ülkelerin etkisiyle %25 oranında artacaktır. 2030 yılına kadar orta sınıf diye adlandırılan tabakanın nüfusunda %80'lik bir artış meydana geleceği ve 5 milyarlık bir nüfusa sahip olacağı düşünülmektedir. Artan bu enerji talebinin karşılanabilmesi için var olan tüm enerji kaynaklarının kullanılması gerekecektir (Dünya Enerji Konseyi, 2018).

2018 yılı sonu itibariyle yaklaşık 8 milyar olan dünya nüfusu hızla artmaya devam etmektedir (Worldometers, 2018). Artan dünya nüfusuna gelişen ekonomilerin de eşlik etmesiyle enerji tüketimi önemli miktarda artmıştır. Sınırlı kaynak rezervlerimiz olduğu düşünüldüğünde gelecek yıllar için enerji ihtiyacını karşılama da güçlükler yaşanacağı ön görülmektedir. Bu durumun önüne geçebilmek için ülkeler mevcut enerji kaynaklarını etkili kullanmanın yollarını aramaya başlamışlardır (Ergen, 2011).

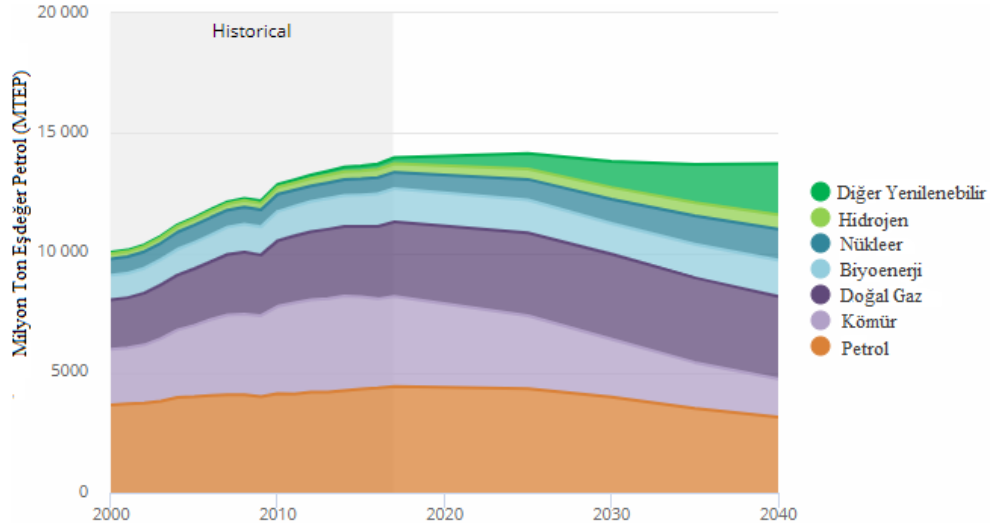
Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) (2018), "Outlook for Energy 2018" raporunda; günümüzle 2040 yılı arasında ki enerji arz ve talep beklentilerini değerlendirmiştir. Raporda; yeni bir anlayış kazanan enerji ve enerji ihtiyacını etkileyen parametreler ele alınmıştır. Raporun merkezinde, Paris İklim anlaşmasında alınan kararlar ve sera gazlarını azaltıcı maddeler yer almıştır. Şekil 1.1 ve Şekil 1.2'de hükümetler tarafından duyurulan politika niyetlerinin uygulanmasından sapması muhtemel sonuçlarının değerlendirilmesinin yanı sıra mevcut enerji politikalarını da içeren mevcut politikalar seneryosu (MPS) ve iklim değişikliği, hava kalitesi ve modern enerjiye evrensel erişim konularında uluslararası kabul görmüş hedeflere ulaşmak için entegre bir yaklaşımı özetleyen sürdürülebilir büyüme seneryosu (SBS) için 2000-2040 yılları arasında dünya toplam birincil enerji talebindeki değişim verilmektedir (IEA, 2018).



Şekil 1.1 : Dünya toplam birincil enerji talebi -mevcut politikalar senaryosu (MPS).

Raporda mevcut politikalar senaryosuna göre 2017 yılı itibari ile yaklaşık 14 milyar ton eşdeğer petrol (MTEP) olan dünya birincil enerji talebi 2040 yılı itibari ile yaklaşık %21'lik bir artış ile 17,7 milyar ton eşdeğer civarında olacağı öngörülmektedir (IEA, 2018).

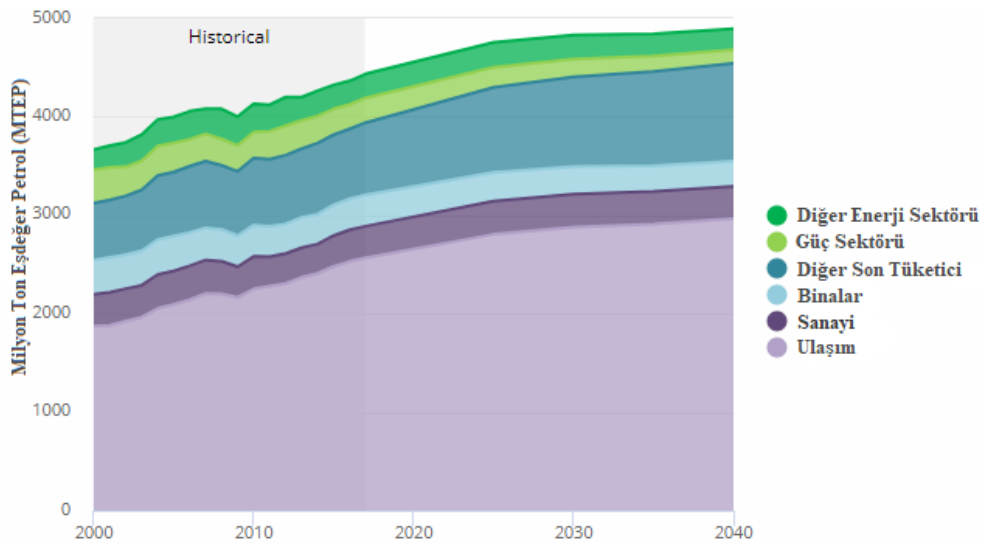
Grafiğe göre; 2040 yılına kadar olan dönemde fosil kaynaklı yakıtların tüketiminin kısmen azalacağı beklenmekle birlikte, enerji talebinin karşılanmasında en büyük paya sahip olacağı ön görülmektedir (IEA, 2018). Diğer taraftan yenilenebilir, biyoenerji ve doğalgaz kaynaklı enerji taleplerinin artacağı öngörülmektedir. Mevcut seneryoya göre doğalgazın; enerji talebinin karşılanmasında büyük katkısı olacağı düşünülmektedir. Geniş kullanım alanlarına ve rezervlere sahip olması sebebiyle doğalgaz; 2040 yılına kadar olan süreçte daha fazla alanda kullanılırken düşük karbon emisyonlarına sahip olması sebebiyle kömür kullanımının yerini alarak karbon salınımını önemli oranlarda düşürmesi beklenmektedir. Doğalgaz talebinde %40'lık bir artış ön görülürken, tüm enerji kaynakları arasında en fazla büyüyen kaynak olması ve tüm enerji kaynakları arasındaki payını %3 artırarak 2040 yılına kadar enerji ihtiyacının %26'sını karşılayacağı beklenmektedir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2017).



Şekil 1.2 : Dünya toplam birincil enerji talebi-sürdürülebilir büyüme seneryosu (SBS).

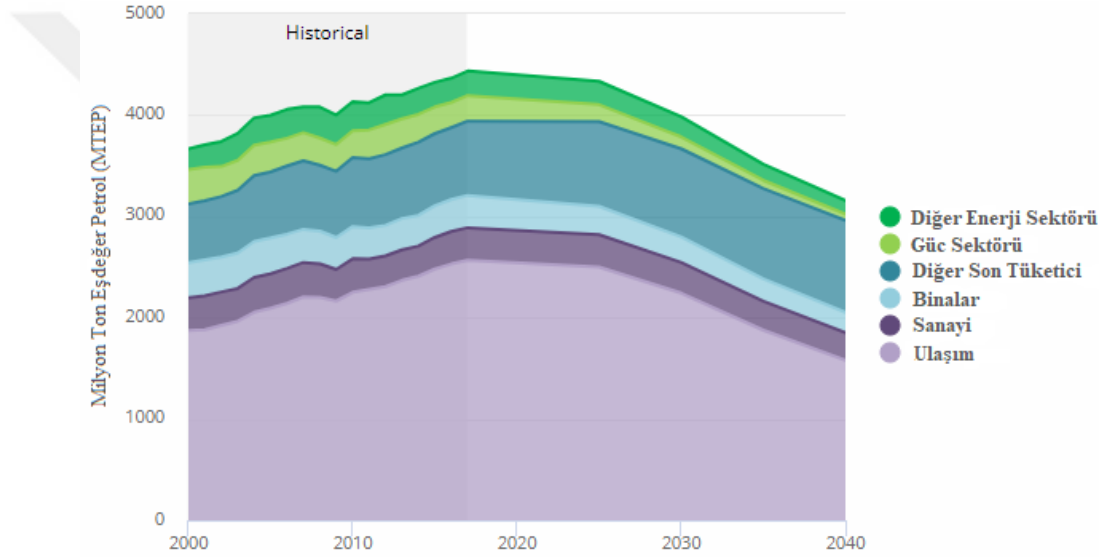
Diğer taraftan sürdürülebilir büyüme seneryosuna göre 2017 yılı itibari ile yaklaşık 14 milyar ton eşdeğer petrol (MTEP) olan dünya birincil enerji talebinin, alınan önlemler ve iklim değişikliği konusunda varılan uluslararası anlaşmalar sayesinde 2040 yılında %1,8'lik bir azalış ile yaklaşık 13,7 milyar ton eşdeğer petrol (MTEP) olacağı öngörülmektedir (IEA, 2018).

Raporda ayrıca halihazırda dünya enerji talebinin karşılanmasında en büyük paya sahip olan petrolün geleceği de ele alınmıştır. Şekil 1.3 ve Şekil 1.4'de mevcut durum seneryosu ve sürdürülebilir büyüme seneryosu için sektörel bazda petrol talebinde meydana gelecek değişim verilmektedir (IEA, 2018).



Şekil 1.3 : Dünya petrol talebi-mevcut politikalar seneryosu (MPS).

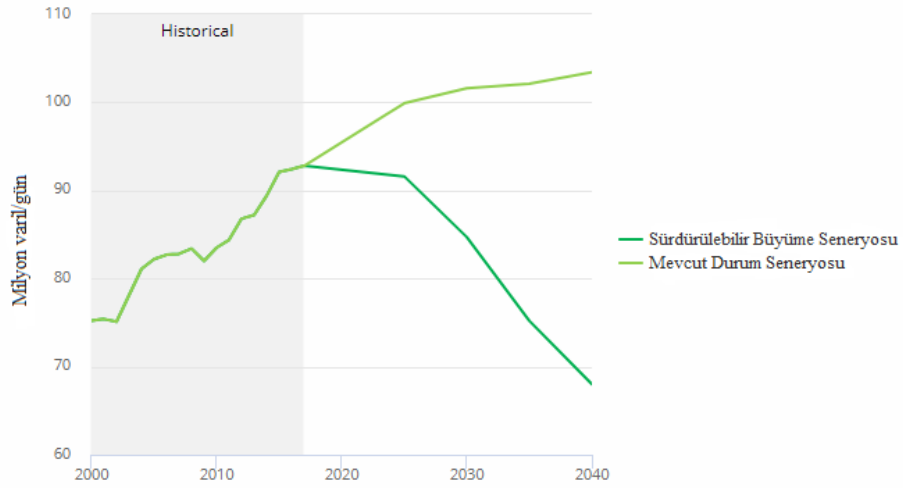
Raporda yer alan mevcut durum seneryosuna göre 2017 yılı itibari ile yaklaşık 4,4 milyar ton eşdeğer petrol (MTEP) olan dünya petrol talebinin tüm sektörlerde artış göstererek %9'luk bir artış ile 2040 yılında yaklaşık 4,9 milyar ton eşdeğer petrol (MTEP) olması öngörülmektedir. Mevcut enerji politikaları ve iklim değişikliği yönetmelikleri için sıkı politikalar uygulanmadığı takdirde mevcut dünya petrol rezervlerinin mevcut durum seneryolarına göre artan talebi karşılamasının zor olduğu görülmektedir. Ayrıca raporda, petrol talebindeki en büyük payı yaklaşık %58'lik bir oran ile ulaşımın aldığı dikkati çekmektedir. Buradan anlaşılacağı gibi, ulaşım ve taşımacılıkta tüketilen petrolün verimli ve etkili kullanmanın yollarını bulmanın gerekliliği gözler önüne serilmektedir. (IEA, 2018).



Şekil 1.4 : Dünya petrol talebi-sürdürülebilir büyüme seneryosu (SBS).

Sürdürülebilir büyüme politikaları izlendiği takdirde ise 2017 yılı itibari ile 4,4 milyar eşdeğer petrol (MTEP) olan dünya petrol talebi 2040 yılı itibari ile tüm sektörlerde azalarak %29'luk bir düşüş ile 3,1 milyar ton eşdeğer petrol (MTEP) olması öngörülmektedir (IEA, 2018).

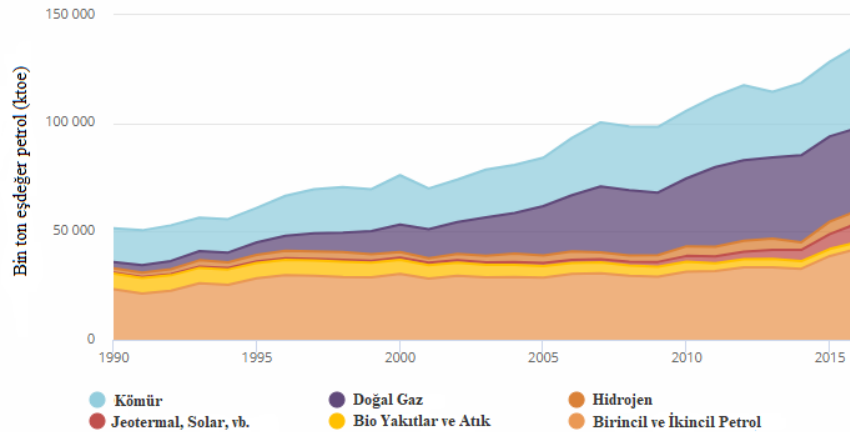
Ayrıca, şekil 1.5'de mevcut durum seneryosu ve sürdürülebilir büyüme seneryolarına göre dünya petrol üretim miktarları verilmektedir.



Şekil 1.5 : Dünya petrol üretim miktarı-mevcut durum ve sürdürülebilir büyüme seneryosu.

2017 yılı itibari ile günlük 92,8 milyon varil olan petrol üretimi herhangi bir önlem alınmadığı takdirde artan talebi karşılayabilmek adına yaklaşık %11’lik bir artış ile günlük 103,4 milyon varil olması öngörülmektedir. Fakat sürdürülebilir politikalar seneryosuna göre, alınan tedbirler ve verimli kullanmanın yollarını bulduğumuz takdirde petrol üretiminin %36,5’luk bir düşüş ile günlük 68 milyon varil olması beklenmektedir (IEA, 2018).

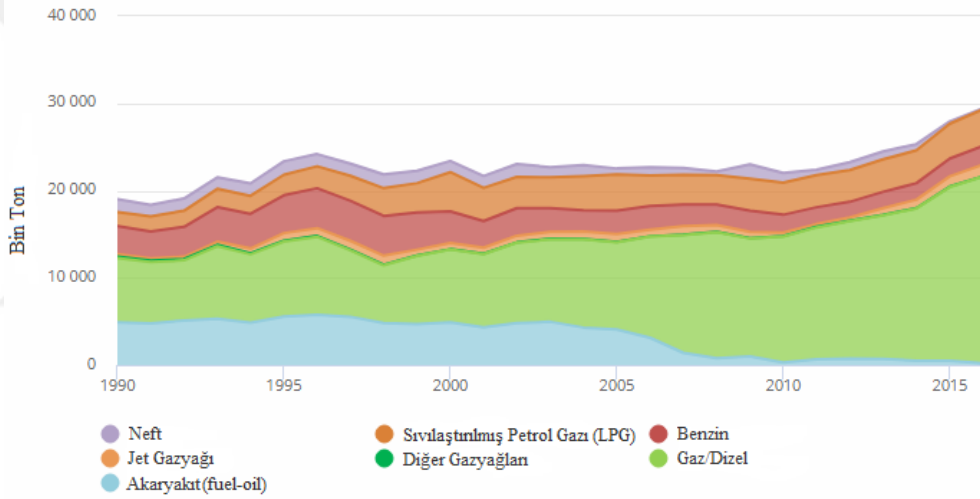
Dünyada olduğu gibi Türkiye’de de artan bir eğilim gösteren nüfus 2017 yılı itibari ile 80 milyonu aşmış bulunmaktadır (Dünya Nüfusu, 2018). Artan nüfusa gelişen ekonominin ve hayat standartlarında yaşanan iyileşmenin de eklenmesi ile enerji tüketimi önemli miktarda artmıştır. Ulusal Enerji Ajansı (IEA), (2018) Türkiye değerlendirmesine göre Şekil 1.6.’da, 1990-2016 yılları arasında farklı kaynaklardan tedarik edilen birincil enerji miktarları verilmiştir (IEA, 2018).



Şekil 1.6 : Farklı kaynaklardan tedarik edilen birincil enerji miktarı.

Değerlendirmeye göre 2015 yılı için Türkiye de tüm kaynaklardan sağlanan birincil enerji miktarı 136 milyon ton eşdeğer petrol (MTEP) olarak gerçekleşmiştir. Toplam enerji miktarı içindeki kömür, doğal gaz ve petrolün sırasıyla %28, %28 ve %31 ile en büyük paya sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, 1990 yılında yaklaşık 3 milyon ton eşdeğer petrol (MTEP) olan doğal gaz kaynaklı sağlanan birincil enerjinin 2015 yılı için yaklaşık 12 kat artarak 38 milyon ton eşdeğer petrol (MTEP) olduğu dikkat çekmektedir. Petrol ve kömür gibi kaynaklardan sağlanan birincil enerjide yaklaşık %50'lik bir artış yaşanırken, doğal gaz kaynaklı tedarik edilen birincil enerjinin bu denli artış göstermesi üzerine düşünülmesi gereken bir konudur.

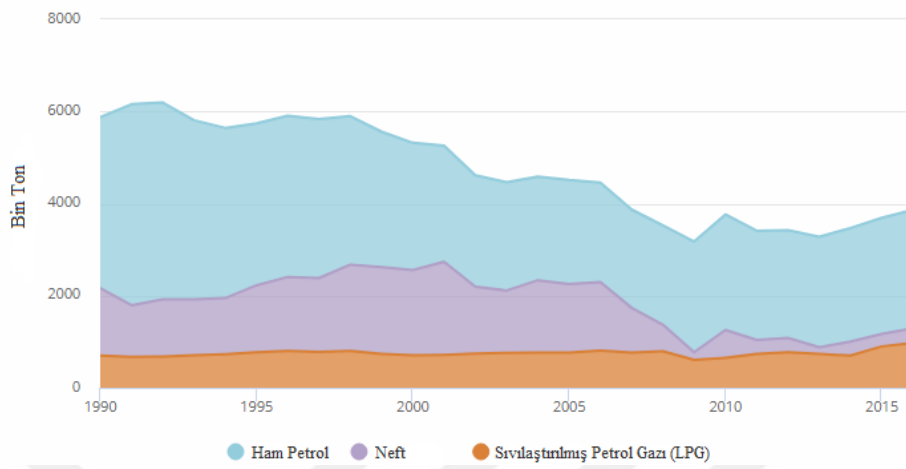
IEA (2018), verilerine göre 1990-2016 yılları arasında Türkiye'de petrol ve petrol türevi ürünlerin nihai tüketim miktarı Şekil 1.7'de verilmektedir.



Şekil 1.7 : Petrol ve petrol türevi ürünlerin nihai tüketim miktarı.

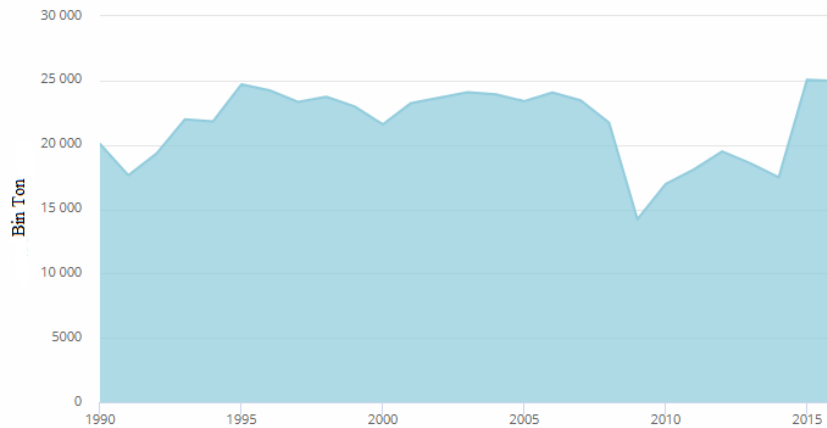
Grafikte 1990 yılında Türkiye'de tüketilen toplam petrol ve petrol türevi yakıtların miktarı 19 milyon ton iken bu oran 2015 yılı itibari ile yaklaşık %50'lik bir artış göstererek 30 milyon ton civarına ulaşmıştır. Ayrıca, 1990-2016 yılları arasında Türkiye'de en çok tercih edilen petrol türevi yakıtın gaz/dizel yakıt olduğu görülmektedir. 1990 yılında yaklaşık 7 milyon ton olan gaz/dizel yakıt miktarı 2015 yılı itibari ile yaklaşık 3 kat artarak 21 milyon ton olmuştur. Ayrıca grafikte bir diğer dikkat çekici nokta ise LPG'nin en çok tercih edilen ikinci yakıt olmasıdır. 1990 yılında yaklaşık 1,5 milyon ton olan LPG tüketimi, 2015 yılına gelindiğinde %161 artarak yaklaşık 4 milyon ton olarak gerçekleşmiştir (Uluslararası Enerji Ajansı, 2018).

Ayrıca, Türkiye’de 1990-2016 yılları arasında ham petrol ve türevlerinin üretim miktarları Şekil 1.8’de verilmiştir (IEA, 2018).



Şekil 1.8 : Ham petrol ve türevlerinin üretim miktarı.

Grafikte görüldüğü gibi ham petrol ve türevlerinin tümünü tüketirken, bunlardan sadece ham petrol, neft ve sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) üretebilmekteyiz. 1990 yılında yaklaşık 6 milyon ton olan toplam üretimimiz 2015 yılına gelindiğinde yaklaşık yarı yarıya azalarak 4 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. 2015 yılı itibari ile toplam petrol ve petrol türevi yakıt miktarı tüketimimiz 21 milyon ton iken bu talebi karşılayabilme oranımız ise 4 milyon ton ile %20 civarında olmuştur. Bunun anlamı ise, 2015 yılında ihtiyacımız olan petrol ve türevi yakıtların %80’ine yakın miktarını ithal etmek zorunda kaldığımızdır. Bu verileri destekleyebilmek adına 1990-2016 yılları arasında ithal edilen ham petrol miktarı Şekil 1.9’da verilmiştir (Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), 2018).

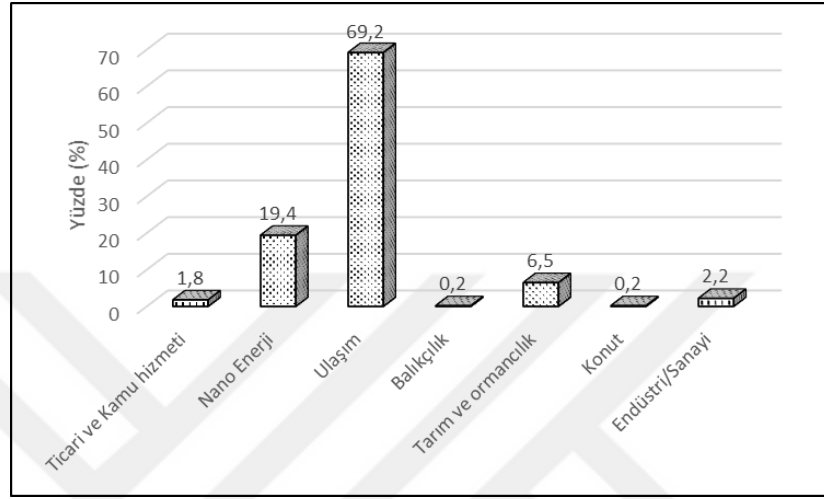


Şekil 1.9 : İthal edilen petrol miktarı.



Şekilde görüldüğü gibi 2015 yılında yaklaşık 25 milyon ton ham petrol ithalatı gerçekleştirilmiştir.

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) (2018), Türkiye değerlendirmesine göre 2016 yılında gerçekleşen petrol ve petrol türevi ürünlerin sektörel bazda nihai tüketim oranları Şekil 1.10'da verilmektedir.



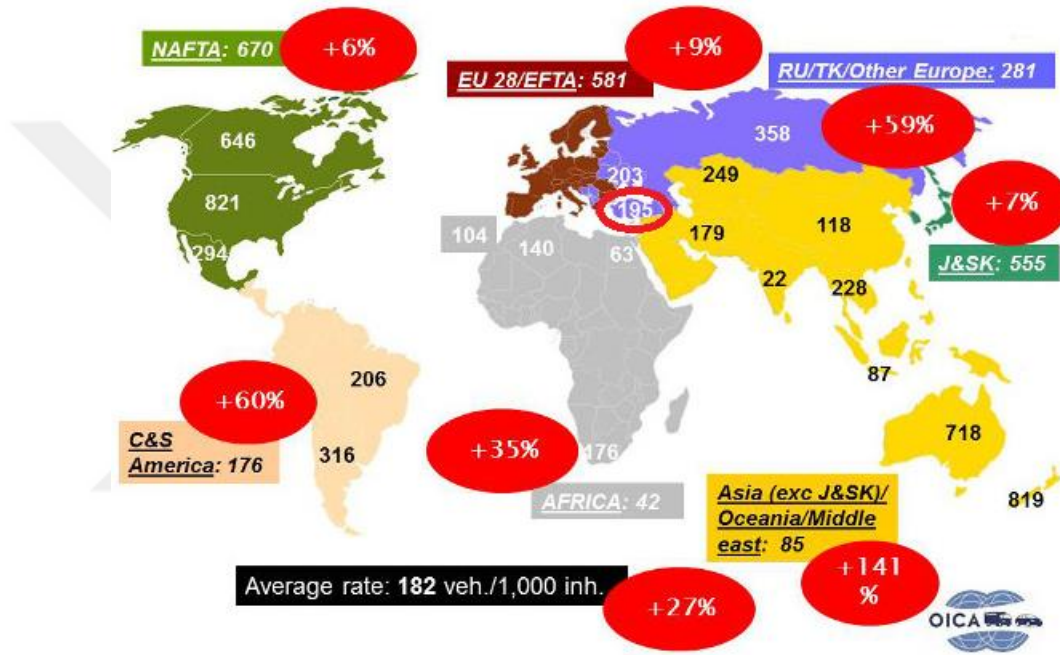
Şekil 1.10 : 2016 yılı petrol ve petrol ürünlerinin sektörlere göre nihai tüketim oranları.

Grafiğe göre en büyük payın %69,2 ile ulaşım sektörüne ait olduğu görülmektedir. Artan nüfus ve hayat standartlarında yaşanan iyileşmeyle birlikte taşıt sayısında meydana gelen artışın bu tüketimi arttırdığı anlaşılmaktadır. Bu durumda petrol ve türevi yakıtlara olan talep bu denli fazla iken üretimin az olması çoğunlukla taşımacılıkta kullanılan bu yakıtların daha verimli kullanmanın yollarını bulmanın ülke ekonomisi açısından faydalı olacağını göstermektedir (IEA, 2018).

Diğer taraftan, ulaşımın vazgeçilmezi haline gelen motorlu taşıtların sayısı, nüfus artışı ve teknolojiye bağlı olarak her geçen gün artmaktadır. Uluslararası Motorlu Taşıt İmalatçıları Örgütü (OICA)'nın raporuna göre 2015 yılı itibariyle dünyada 947 milyonu binek ve 335 milyon ticari olmak üzere toplam kullanılan 1 milyar 282 milyon motorlu taşıt bulunmaktadır. 2015 yılı verilerine göre ilk üç sırada bulunan bölgelerin sırasıyla yaklaşık, 436 milyon adet taşıt ile Asya/Okyanusya/Orta Doğu, 413 milyon adet taşıt ile Amerika ve 387 milyon adet taşıt ile Avrupa olduğu görülmektedir (Uluslararası Motorlu Taşıt Üreticileri Organizasyonu (OICA), 2018).

Ayrıca, raporda her bin kişiye düşen motorlu taşıt adetleri de verilmektedir. Buna göre 2015 yılı itibariyle dünya üzerindeki her 1000 kişiye düşen motorlu taşıt sayısı 182'dir.

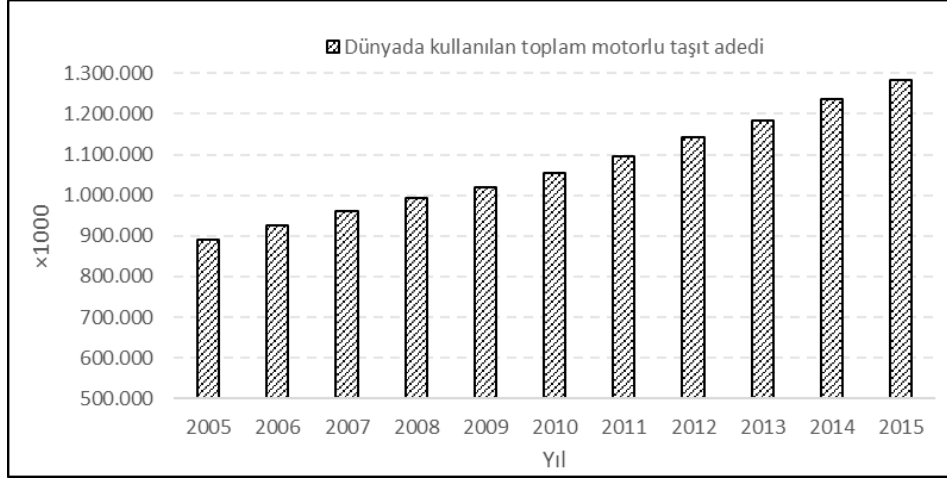
Bu sayı Amerika için 418, Avrupa için 471 ve Asya/Okyanusya/Orta Doğu ülkeleri için ise 105 adettir. Ülkeler bazında incelendiğinde en yüksek sayının 901 adet taşıt ile Porto Riko'ya ait olduğu görülmektedir. Avrupa ülkelerinde ise 796 adet taşıt ile İzlanda'nın en yüksek sayıya sahip olduğu görülmektedir. Bu sayının, Amerika Birleşik Devletleri için 821, Rusya için 358, Japonya için 609 ve Çin için 118 olduğu araştırmada belirtilmiştir. Şekil 1.11'de 2015 yılı itibariyle dünya üzerinde her 1000 kişiye düşen toplam motorlu taşıt sayısı ve 2005-2015 yılları arasında ki artış oranı verilmektedir (Uluslararası Motorlu Taşıt Üreticileri Organizasyonu (OICA), 2018).



Şekil 1.11 : Dünya çapında 2015 yılı itibari ile her bin kişiye düşen motorlu taşıt sayısı ve değişim oranı.

Şekilde görüldüğü gibi dünya genelinde her bin kişiye düşen araç sayısında artış yaşanmıştır. Fakat en büyük artışın %141 ile Asya/Okyanusya/Orta Doğu bölgelerinde gerçekleştiği dikkat çekmektedir. Bu artışın gelişen ekonomilere ve buna bağlı olarak artan gelir düzeyine bağlı olduğu söylenebilir.

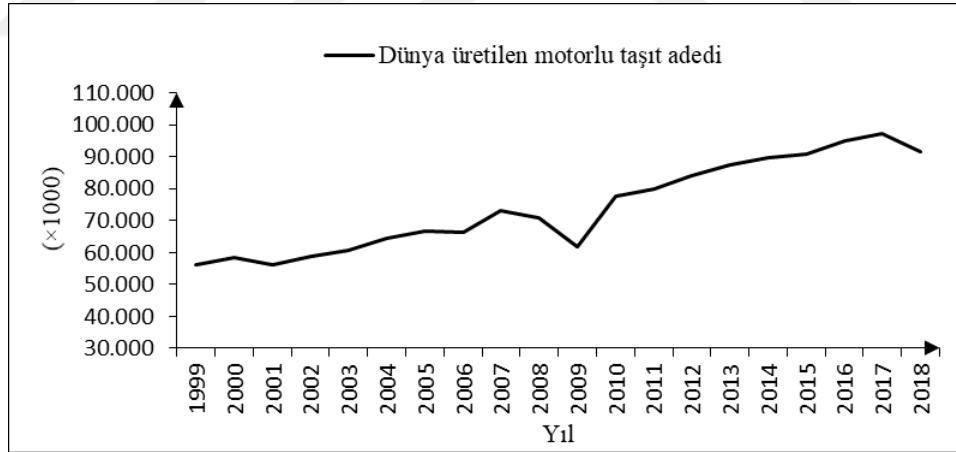
Şekil 1.12'de 2005-2015 yılları arasında dünya üzerindeki toplam kullanılan motorlu taşıt adetleri görülmektedir (Uluslararası Motorlu Taşıt Üreticileri Organizasyonu (OICA), 2018).



Şekil 1.12 : Dünyada kullanılan toplam motorlu taşıt adedi.

Rapora göre; 2015 yılında dünya üzerinde kullanılan toplam motorlu taşıt adedi 892 milyon iken, 10 yıl içerisinde yaklaşık %30'luk bir artış ile 1 milyar 282 milyona yükselmiştir (Uluslararası Motorlu Taşıt Üreticileri Organizasyonu (OICA), 2018).

OICD (2018), verilerine göre 1999-2018 yılları arasında üretilen toplam taşıt adetleri Şekil 1.13'de görülmektedir.



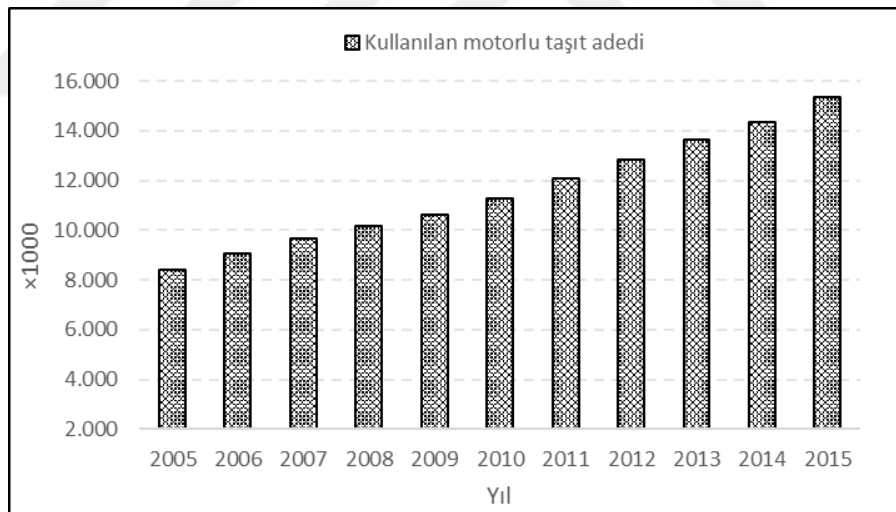
Şekil 1.13 : Dünya toplam üretilen motorlu taşıt adedi.

Grafığe göre, 1999 yılında dünyada üretilen toplam motorlu taşıt adedi yaklaşık 56 milyon iken, 2018 yılına gelindiğinde bu sayının yaklaşık %38,5'luk bir artış ile 91 milyon adedi aştığı görülmektedir (Uluslararası Motorlu Taşıt Üreticileri Organizasyonu (OICA), 2018).

Ayrıca, Avrupa Otomotiv Üreticileri Birliği (ACEA) (2018), raporuna göre; 2015 yılında Avrupa'da yaklaşık 326 milyonu binek, 42 milyonu hafif ticari, 12 milyonu

orta-ağır taşıtlar ve 1,5 milyonu otobüsler olmak üzere toplam 375 milyon motorlu taşıt bulunmaktadır. Bu sayı 2016 yılı için ise %2’lik bir artış ile yaklaşık 382 milyon olmuştur. Yine aynı rapora göre 2016 yılı itibari ile Avrupa genelinde her bin kişeye düşen binek taşıt sayısı 516 ve ticari taşıt sayısı ise 53 olarak verilmektedir. Aynı raporda, Avrupa genelindeki taşıtların kullanılan yakıt türüne göre dağılımı yer almaktadır. Buna göre binek taşıtların %53,9’unda benzin, %42’sinde dizel ve %2,8’inde LPG/doğal gaz yakıt kullanılmaktadır. Hafif ticari taşıtlarda ise bu oran; benzin, dizel ve LPG/doğal gaz için sırasıyla %7,7, %89,9 ve %1,2’dir. Ayrıca, orta ve ağır ticari taşıtların %96,1’inde dizel yakıt kullanıldığı görülmektedir.

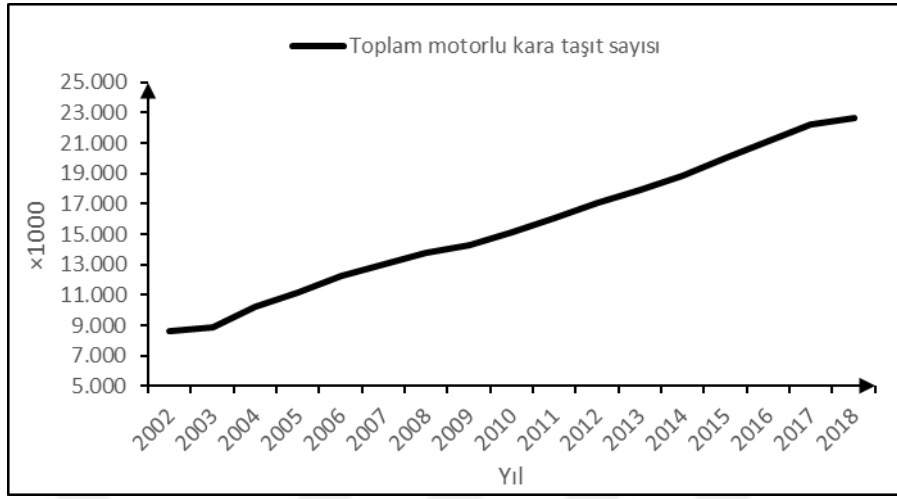
Dünyadaki gelişmelere paralel olarak Türkiye otomotiv pazarı, nüfus artışı ve gelişen ekonomiyle birlikte büyümesini sürdürmektedir. Nitekim, Uluslararası Motorlu Taşıt İmalatçıları Örgütü (OICA)’nın hazırlamış olduğu veriler de bu büyümeyi doğrulamaktadır. Buna göre; 2005-2015 yılları arasında Türkiye’de kullanılan toplam motorlu taşıt sayısı Şekil 1.14’de görülmektedir (Uluslararası Motorlu Taşıt Üreticileri Organizasyonu (OICA), 2018).



Şekil 1.14 : Türkiye’de kullanılan toplam motorlu taşıt sayısı.

Grafiğe göre; 2005 yılında yaklaşık 8 milyon olan motorlu taşıt adedi, 2015 yılına gelindiğinde yaklaşık %45’lik bir artış ile 15 milyon adedi geçmiştir. Diğer taraftan, 2014 yılında her bin kişeye düşen motorlu taşıt sayısı 185 iken, 2015 yılında ise bu sayı 10 adet artarak 195 adet olmuştur. Ayrıca, Otomotiv Sanayii Derneği (OSD)’nin paylaştığı Türkiye İstatistik Kurumu (TUIK), (Mayıs 2018) değerlendirmesinde;

yıllara göre motorlu kara taşıtları sayısında yaşanan değişim şekil 1.15’de verilmektedir (Otomotiv Sanayii Derneği (OSD), 2018).



Şekil 1.15 : Türkiye’de kullanılan motorlu kara taşıtı sayısı.

Grafiğe göre; 2002 yılında yaklaşık 8,5 milyon olan motorlu kara taşıtı sayısı, 2018 yılında yaklaşık %62’lik bir artış ile 22,5 milyonu aşmış bulunmaktadır (Otomotiv Sanayii Derneği (OSD), 2018).

Dizel motorları, benzin motorlarından ayıran en önemli özelliklerden bazıları; özgül yakıt sarfiyatlarının az olması, düşük yakıt-hava karışımları ile çalışabilmeleri ve sıkıştırma oranlarının fazla olmalarıdır. Bu özellikler, orta ve ağır hizmet tipi taşıtlar için dizel motorları avantajlı hale getirmektedir (Haşimoğlu, 2005). Fakat, dizel motorlarının benzinli motorlara göre daha fakir karışımla ve yüksek sıkıştırma oranıyla çalışmaları için çevreye yaydığı NOx emisyonları bakımından daha dezavantajlı durumda olduğu bilinen bir gerçektir (T.C. Milli Eğitim Bakanlığı (MEB), 2011). Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Konvansiyonel dizel motorlarda silindir içi sıcaklıkların çok yüksek değerlere çıkması NOx emisyonlarını kötüleştirir. Sadece EGR (Egzoz Gazı Geri Gönderim) sistemi yöntemi kullanılarak NOx emisyonlarını %75 oranında düşürmek mümkündür (Ankara Milli Eğitim Bakanlığı (MEB), 2011). Diğer taraftan, İçten yanmalı motorlar için en büyük enerji kaynağı olarak kullanılan petrol fiyatlarında yaşanan artıştan dolayı özellikle Japonya, Almanya ve Türkiye gibi petrol ithal eden ülkelerde bulunan otomobil üreticileri için yakıt ekonomisi önemli bir parametre haline gelmiştir (Birleşik Devletler Enerji Bilgi Yönetimi (EIA), 2019; Güler, 2006). Böylece,

taşıtlarda fosil bir yakıt olan petrole kıyasla daha çevreci ve ekonomik alternatif bir yakıt kullanımı bir ihtiyaç haline gelmiştir (Ashok ve diğ, 2015). CNG (Sıkıştırılmış Doğalgaz), biyodizel ve LPG (Sıvılaştırılmış Petrol Gazı) içten yanmalı motorlarda sıklıkla kullanılan alternatif yakıtlara örnek olarak verilebilir. Fakat bunların içinde LPG; kolay taşınabilir, nakledilebilir, depolanabilir ve dünyanın hemen hemen her yerinde kullanılabilir ve uzun yıllar yetecek yeterli rezervlere sahip olduğu için otomotiv sektörü tarafından en çok kabul gören alternatif yakıttır (Dünya LPG Derneği (WLPGA), 2018; Türkiye LPG Derneği (TLPGD), 2018).

LPG'nin iki kaynağı vardır: LPG'nin %60'ı doğal gazdan oluşmaktadır. Geri kalan %40'ı ise ham petrol rafine edilirken üretilir. Bu nedenle LPG doğal olarak oluşan bir yan üründür (WLPGA, 2018). Ülkemizde LPG ticari olarak %30 propan ve %70 bütan gazlarından oluşan renksiz ve kokusuz bir gazdır (Makine Mühendisleri Odası (MMO), 2015). LPG, benzin (4-12) ve dizel (8-21) ile karşılaştırıldığında birim molekül başına düşük karbon içeriği (propan için 3 ve bütan için 4) nedeniyle temiz bir yakıt olarak kabul edilmiştir (Kim ve diğ, 2016). Bu durum LPG'yi gelecekteki emisyon düzenlemeleri için ilgi çekici hale getirmiştir. Fiyat rekabet gücü LPG'nin bir başka avantajı olarak gösterilmektedir. Günümüzde LPG fosil yakıtlara alternatif bir yakıt olarak benzinli motorlarda direkt olarak kullanılabilirken, dizel motorlarda ikincil bir yakıt olarak ya da motordaki modifikasyonlar sonucunda birincil yakıt olarak kullanılabilir. Bu konuda çeşitli yanma stratejileri mevcuttur. LPG-dizel çift yakıt yanma stratejisi bu konudaki en etkili yöntemlerden birisidir (Aliustaoğlu ve Ayhan, 2018).

Dhole ve diğ. (2014), dört silindirli, turboşarjlı bir dizel motorunda motorine ilave olarak ikinci yakıt olarak hidrojen, pirinç kabuğundan üretilen gaz ve hidrojen+üretilen gaz karışımlarıyla çalışmanın performans ve emisyonlara etkilerini incelemiştir. Tam yük şartlarında; %20 hidrojen ilavesinin efektif verimi %7 oranında arttırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca, %30 oranında üretilen gaz ile çalışıldığında efektif verim %8 oranında azalmıştır. Diğer taraftan; %40 üretilen gaz+%60 hidrojen, ikinci yakıt olarak kullanıldığında efektif verimi %3 oranında düşürdüğü tespit edilmiştir. Konvansiyonel dizel çalışma ile kıyaslandığında tüm durumlar için HC ve CO emisyonlarının arttığı, NO<sub>x</sub> emisyonlarının ise azaldığı görülmüştür. İkinci yakıt olarak hidrojen kullanımının tam yük şartlarında efektif verimi arttırdığı tespit edilirken kısmi yük şartlarında düşürdüğü görülmüştür. İkinci

yakıt olarak hidrojen kullanımının tüm yük şartlarında tüm dizel-üretilen gaz kombinasyonları için efektif verimi düşürdüğü tespit edilmiştir. Motor en iyi performansını %20 oranında hidrojen ilavesinde gerçekleştirmiştir.

Rimkus ve diğ. (2017), sıkıştırma ile ateşlemeli dizel yakıtla çalışan bir dizel motorunda LPG ilavesinin yanma prosesine ve motor performansına etkilerini incelemiştir. Deneyler sabit motor momenti (60 Nm), 2000 d/d, değişken avans (2-5° bTDP) ve sabit avansta (16° bTDP) gerçekleştirilmiştir. Değişken avans durumunda; %75 LPG ilavesinin efektif verimi standart dizel yakıtla kıyasla 0,328'den 0,292'ye %11 oranında düşürdüğü görülmüştür. Ayrıca, karışımın içerisindeki LPG oranının artmasının HC, CO ve duman yoğunluğu gibi egzoz gazı içerisindeki yanma sonu ürünlerinin miktarını arttırdığını, NO<sub>x</sub> ve CO<sub>2</sub> emisyonlarını iyileştirdiğini tespit etmişlerdir. Diğer taraftan, avans açısı 16° olarak ayarlandığında; %75 LPG ilavesi durumunda; özgül yakıt sarfiyatı %3,5 azalırken, efektif verimde herhangi bir kötüleşme olmamıştır. NO<sub>x</sub> emisyonları ise %80 oranında artış göstermiştir.

SinghYadav ve diğ. (2012), direk enjeksiyonlu, tek silindirli, dört zamanlı, hava soğutmalı bir elektrikli dinamometreye bağlı dizel motorunda; %10 ve %20 EGR ile birlikte hidrojen ile zenginleştirilmiş hava, karbüratör tekniği ile emme hattından verilerek performans ve emisyonlara etkilerini araştırmışlardır. Elde edilen veriler konvansiyonel dizel yakıt çalışma ile kıyaslandığında; %80 yükte, 40 g/s sabit debide hidrojen ilavesi sonucunda efektif verim %1,8 oranında artarken, özgül yakıt sarfiyatı %2,2 oranında azalmıştır. Aynı zamanda hidrojene ilave olarak %20 EGR uygulaması ile efektif verimin %6,2 oranında azaldığını, özgül yakıt sarfiyatında ise konvansiyonel çalışmaya kıyasla herhangi bir değişim olmadığını tespit etmişlerdir. Emisyonlar açısından; %80 yükte hidrojen ilavesi durumunda HC, CO ve CO<sub>2</sub> emisyonları sırasıyla %5,13, %21,7 ve %10 azalırken, NO<sub>x</sub> emisyonları artış göstermiştir. EGR uygulaması ile HC, CO ve CO<sub>2</sub> emisyonları artarken, NO<sub>x</sub> emisyonlarının ise %6,2 azaldığını tespit etmişlerdir.

Lata ve diğ. (2011), 4 silindirli (turboşarjlı ve soğutmalı) 62,5 kW güç üreten çift yakıtla çalışan (LPG+hidrojen) dizel motorunda yanma parametreleri hakkında detaylı deneysel çalışmalar elde etmişlerdir. %80 yükte, hidrojen ilavesinin silindir içi basıncı kısmen düşürdüğünü saptamışlardır. %40 ve %10 yük şartlarında, hidrojen ilavesi durumunda silindir içi basınç nispeten artmıştır. %80 yükte, %10 LPG ilavesi durumunda silindir içi basınç kısmen azalırken, LPG yüzdesi arttığında silindir içi

basınç artış göstermiştir. Her iki yakıt ilavesi durumunda, ilk yanma fazındaki ısı yayılım oranının saf dizel yakıt çalışmaya kıyasla tüm yük koşullarında düştüğünü saptamışlardır. Dizel yakıtı ilave olarak %40 oranında LPG-hidrojen (LPG+H<sub>2</sub>=%70+%30) çift yakıt karışımı ikinci yakıt olarak kullanıldığında çift yakıtlı motorun performansında önemli derecede iyileşme olduğunu tespit etmişlerdir.

Rimkus ve diğ. (2016), bir dizel motorunda dizel yakıtı ek olarak LPG (%50 propan+%50 bütan) ilavesinin motor performansı, emisyonlar ve motor indike parametrelerine etkilerini araştırmışlardır. Deneyler; sabit 2000 d/d motor hızı ve 60 Nm motor torkunda gerçekleştirilmiştir. %40 ve üzeri LPG ilavesinde; yanma prosesi kötüleşirken, LPG alt ısı değerinin dizelden düşük olmasından dolayı özgül yakıt sarfiyatı azalmıştır. Ayrıca, yanma prosesinde bozulma olduğu için motor verimi artmamıştır. Ancak, düşük LPG fiyatı düşünüldüğünde ve daha yüksek bir LPG konsantrasyonu kullanıldığında, daha yüksek ekonomik verimlilik elde edilmiştir. LPG ilavesi ile silindir içi maksimum sıcaklıklar kaydadeğer oranda, silindir içi basınç ise kısmen azalmıştır. Ayrıca, LPG ilavesi durumunda; hidrokarbon, karbon monoksit ve is emisyonları gibi tamamlanmamış yanma ürünlerinin arttığını, karbondioksit ve azot oksit emisyonlarının ise azaldığını tespit etmişlerdir.

Kumaraswamy ve Prasad (2012), birinci yakıt olarak dizel ve ikinci yakıt olarak LPG enjeksiyonu yaparak EGR ile birlikte LPG-dizel çift yakıt çalışmanın emisyon gazları ve performans üzerindeki etkilerinin araştırılmasını amaçlamışlardır. Dört zamanlı, tek silindirli dizel bir motor, ufak modifikasyonlarla çift yakıt çalışabilecek şekilde modifiye edilmiş ve EGR sistemi adapte edilmiştir. Deneyler; 1500 d/d sabit motor hızı ve değişken yük şartlarında gerçekleştirilmiştir. LPG ilavesi durumunda; saf dizel yakıt ile kıyaslandığında %60'dan %80'e kadar olan yük şartları için efektif verim %8 artmıştır. Çift yakıt çalışmaya kıyasla EGR uygulaması ile efektif verim azalmıştır. Fakat, tüm yakıt kombinasyonları için tam yükte çalışıldığında efektif verimde önemli bir değişiklik olmamıştır. Tam yük şartlarında EGR ile birlikte LPG-dizel çift yakıt çalışmanın NO<sub>x</sub> emisyonlarını azalttığını tespit etmişlerdir. Ancak geleneksel dizel motorla kıyaslandığında kısmi yük şartlarında CO, HC ve özgül yakıt sarfiyatında kötüleşme olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca LPG-dizel çift yakıt çalışmanın konvansiyonel dizel motorla karşılaştırıldığında is emisyonlarını önemli ölçüde iyileştirdiğini belirlemişlerdir.



Ayhan ve diğ. (2011), tek silindirli dizel bir motorunda emme hattından LPG'yi ikinci bir yakıt olarak ilave ederek motor performans ve emisyon karakteristiklerine etkilerini incelemişlerdir. Deneysel veriler göstermektedir ki; emme hattına emme periyodu boyunca LPG ilavesi sonucunda; sadece dizel yakıtla çalışan motorla kıyaslandığında fren gücü, özgül yakıt tüketimi, fren verimliliği ve fren torkunun önemli ölçüde arttığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca %5 LPG ilavesinin tüm yük şartlarında is emisyonlarını önemli oranda düşürdüğü görülmüştür. Fakat %10 ve daha yüksek LPG oranları için is emisyonlarının standart dizel yakıtla kıyaslandığında arttığı sonucuna varmışlardır.

Ashok ve diğ. (2015), LPG-dizel çift yakıtlı motorların performans, yanma ve emisyon parametrelerini iyileştirmek amacıyla araştırmacıların yaptığı araştırma çalışmalarını incelemişlerdir. Yapılan çalışmalardan; dizel motorda ikinci yakıt olarak LPG kullanımının, duman yoğunluğu ve azot oksit emisyonlarını azaltmada başarılı metodlardan biri olduğu, ancak aynı zamanda kısmi yük koşullarında, dizel çalışmaya göre verimlilik ve güç çıkışında azalmaya neden olduğu tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalarda; LPG ilavesi ile özellikle düşük yüklerde düşük efektif verim ve yüksek HC emisyonları elde edilmiştir. Yüksek yük şartlarında ise LPG ilavesi ile efektif verimin arttığı görülmüştür. Düşük yüklerde; gaz yakıtın uygun şekilde yanması için dizel yakıt miktarı artırılmalıdır. İkinci yakıt olarak lpg ve hidrojen kullanımı yüksek yüklerde efektif verimi artırırken düşük yüklerde bunun tersi yönde etki etmektedir. Yüksek yük koşullarında ikinci yakıt olarak LPG-hidrojen karışımı ilavesinin; yanmamış hidrokarbon, azot oksit ve is emisyonlarını iyileştirdiği görülmüştür.

Kim, Park, Oh ve Cho, (2016) direk enjeksiyonlu benzinli (DSI) bir motorda ikinci bir yakıt olarak yanma odasına bir enjektör yardımıyla belli oranlarda LPG püskürterek performans ve emisyon karakteristiklerine etkilerini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar göstermiştir ki; LPG'nin kademeli olarak yanma odasına direk olarak püskürtülmesiyle fren özgül yakıt tüketiminde kayda değer oranda iyileşme sağlanırken, NO<sub>x</sub> emisyonları da önemli oranda azalmıştır. Kısmi yük şartlarında NO<sub>x</sub> emisyonlarını daha da iyileştirmek için soğutulmuş egzoz gazı geri gönderimi (EGR) uygulanmıştır. %15 EGR ilavesi durumunda NO<sub>x</sub> emisyonlarında %34,4-%46,5 arasında azalma sağlanmıştır. Ancak, soğutulmuş egzoz gazı geri gönderimi (EGR) uygulanmasının, özgül yakıt tüketimini %1,6 ila %2,5 oranında nispeten arttırdığını belirlemişlerdir.

Saleh (2008), İki silindirli, doğal emişli, dört zamanlı, direk enjeksiyonlu bir dizel motorunu, pilot dizel yakıtı ilave olarak LPG enjeksiyonu yapacak şekilde LPG-dizel çift yakıt olarak dönüştürmüştür. Çift yakıtlı çalışma için en iyi LPG bileşimini geleneksel dizel motora kıyasla yüksek termal verimliliği korurken, aynı zamanda egzoz emisyon kalitesini iyileştirecek LPG içeriğindeki varyasyonların performans ve emisyon üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Motor testleri ve veri toplama işlemleri değişken yük şartlarında ve 1500 d/d sabit motor devrinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlardan; %40'a kadar olan LPG ilavesi için efektif verim artarken, %40 ve üzeri LPG ilavesi durumunda efektif verim azalmıştır. Motor; dizel yakıtı ek %40 LPG ile çalıştırıldığında maksimum motor verimi elde edilmiştir. Tam yükte; LPG ilavesinin efektif verimi dizel yakıtı kıyasla yaklaşık %2,3 arttırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca, dizel çalışmaya kıyasla çift yakıt çalışma durumunda özgül yakıt tüketimi yaklaşık %4,2 azalmıştır. %25 yükte; LPG ilavesi ile efektif verim %2 azalmıştır. Bileşimdeki propan oranının artmasıyla egzoz gazındaki CO oranının düştüğünü fakat NO<sub>x</sub> emisyonlarının arttığını, bütan oranının artmasıyla da NO<sub>x</sub> emisyonlarının azaldığını tespit etmiştir. Tam yük şartlarında, dizel yakıtla çalışma durumunda; 575 ppm olan NO<sub>x</sub> emisyonları çift yakıt (%40 saf propan+%60 dizel) ile çalışma durumunda yaklaşık %21 azalarak 450 ppm olarak ölçülmüştür. Kısmi yükte (%25) ise; dizel yakıt ve çift yakıt çalışma için sırasıyla 243 ppm ve 200 ppm olarak ölçülmüştür. Tam yük şartlarında %40 LPG (%70 bütan ve %30 propan) ile çalışmanın NO<sub>x</sub> ve SO<sub>2</sub> emisyonlarını sırasıyla %27 ve %69 oranında azalttığı fakat CO emisyonlarını %15,7 arttırdığını tespit etmiştir.

Aktaş ve Doğan (2009), tek silindirli dizel motorunda LPG-dizel çift yakıt çalışmanın performans ve emisyon karakteristiklerine etkilerini araştırmışlardır. Deneyler; maksimum tork değerinin elde edildiği sabit 2600 d/d motor devri ve değişken yük şartlarında gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda; çift yakıtlı çalışmada, %40 LPG ilavesine kadar her yükte özgül yakıt tüketimi standart dizel çalışmaya göre daha düşük olmuştur. Ancak, %40 üzeri LPG ilavelerinde çift yakıt içerisindeki LPG oranının artmasıyla özgül yakıt tüketiminin arttığı görülmüştür. Tam yük şartlarında, %40 LPG ilavesi durumunda; efektif verim standart dizel çalışmaya kıyasla %2,3 artış göstermiştir. Ayrıca, LPG ilavesi ile NO<sub>x</sub> ve is emisyonlarının azaldığını, HC ve CO emisyonlarının ise arttığını tespit etmişlerdir.

Haşimoğlu ve diğ. (2002), tek silindirli dizel motorunda; yüksek silindir içi sıcaklıklarından kaynaklanan azot oksit emisyonlarının azaltılmasını amaçlamışlardır. Bu bağlamda silindir içerisine %10 %20 ve %30 oranlarında egzoz gazı gönderimi (EGR) yaparak motor performansı ve egzoz emisyonlarındaki değişimi gözlemlemişlerdir. Tam yük ve değişken devir şartlarında, EGR uygulaması durumunda; motor gücünün, azot oksit emisyonlarının ve silindir içi basıncın azaldığını, özgül yakıt tüketiminin ise arttığını tespit etmişlerdir. 1500-2000 d/d aralığında; is emisyonları EGR uygulaması ile azalırken, daha yüksek motor devirlerinde artış göstermiştir.

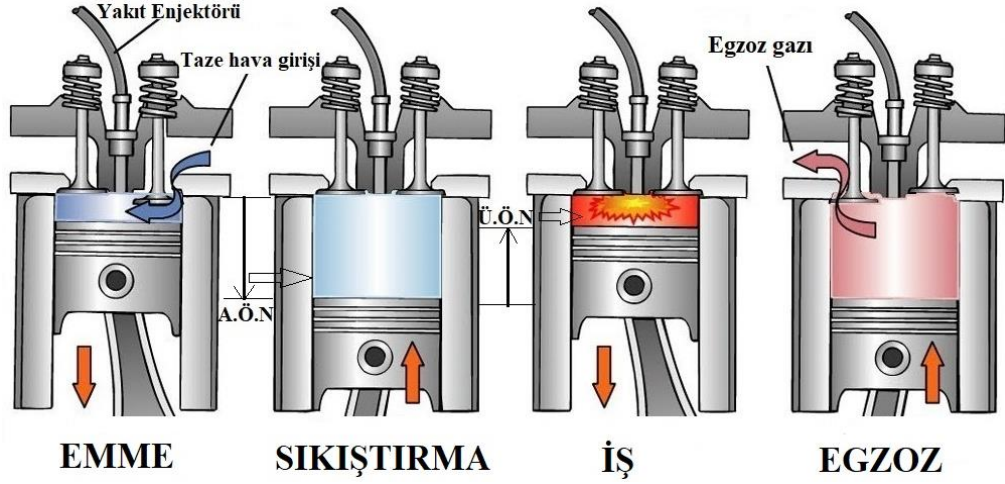
Bu çalışmada, tek silindirli dizel motorda LPG-Dizel çift yakıt ve EGR sistemi ile çalışmanın motor performansı ve egzoz emisyonları üzerine etkileri incelenmiştir. İlk olarak motor standart deneyleri yapılarak her bir devir için moment, güç, özgül yakıt sarfiyatı, indike parametreler ve is emisyon değerleri belirlenmiştir. İkinci aşamada LPG-dizel çift yakıt deneyleri gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada elde ettiğimiz yük değeri gaz kolu ve dinamometre yardımıyla %10, %20 ve %30 oranında düşürülerek dizel yakıt miktarı azaltılmıştır. Daha sonra, ikinci yakıt olarak LPG bir elektronik enjektör yardımıyla motor emme hattından kademeli olarak püskürtülmüştür. Püskürtülen LPG'nin debisi ve enjektör püskürtme zamanı uygun yük değeri elde edilecek şekilde elektronik enjektör kontrol cihazı yardımıyla manuel olarak ayarlanmıştır. Daha sonra elde edilen değerler incelendiğinde emme hattından kademeli olarak LPG ilavesinin standart duruma göre efektif verimi arttırdığı, özgül yakıt tüketimini iyileştirdiği ve CO<sub>2</sub> emisyonlarını düşürdüğü görülmüştür. Fakat, LPG ilavesiyle silindir içi sıcaklıklar yükseldiği için NO<sub>x</sub> emisyonlarının kötüleştiği tespit edilmiştir. NO<sub>x</sub> emisyonlarında yaşanan bu artışı önlemek adına EGR sistemi deney düzeneğine adapte edilmiştir. Ardından, %20 ve %30 LPG oranları için %10, %15 ve %20 oranlarında egzoz gazı emme hattından silindir içerisine geri gönderilmiştir. Son olarak, elde edilen veriler konvansiyonel dizel yakıtlı çalışma ile elde edilen veriler ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

## **BÖLÜM 2. DİZEL MOTORLARINDA YANMA VE ALTERNATİF YAKITLAR**

### **2.1. Dizel Motorlar**

Bir diğer adı sıkıştırma ile ateşlemeli motorlar olan dizel motorlar; 200-5000 devir aralığını kapsayan uygulamalar için yüksek enerji gücü, dayanıklılık ve düşük CO emisyonlarına sahip olduğundan en popüler motorlar olarak bilinmektedir (Elnajjar ve diğ., 2013). Ayrıca, benzin motorlarına kıyasla özgül yakıt tüketiminin düşük olması, daha fakir karışımla çalışabilmeleri ve yüksek sıkıştırma oranına sahip olmaları sebebiyle bütün yüklerde daha verimli çalışması, orta ve ağır hizmet tipi araçlar için dizel motorlarını cazip kılmaktadır (Haşimoğlu, 2005).

Dizel motorlarında, benzin motorlarından farklı olarak emme esnasında silindir içerisine sadece hava alınır. Silindir içerisine alınan hava pistonun üst ölü noktaya doğru hareketi ile sıkıştırılır. Emme periyodu esnasında emme supabının pistonun üst ölü noktaya 10-30° KMA (Krank Mili Açısı) kala açılması ve alt ölü noktayı 40-60° KMA geçiş kapanması ile silindir içerisinin tamamen hava ile doldurularak volümetrik verimin artırılması amaçlanmaktadır. Dizel motorlarda çevrim benzinli motorlarda olduğu gibi emme, sıkıştırma, iş ve egzoz olmak üzere dört aşamadan oluşmaktadır. Şekil 2.1'de dört stroklu dizel motoruna ait çevrim aşamaları verilmektedir (Sekiz Silindir, 2018).



Şekil 2.1 : Dört stroklu dizel motor çevrim aşamaları.

**Emme zamanı:** Bu aşamada; emme supabının açılmasıyla pistonun yukarı yönlü hareketiyle oluşan basınç farkından dolayı silindir içerisine hava dolmaktadır. Piston alt ölü noktayı bir miktar geçene kadar silindir içerisine hava girişi devam etmektedir. Silindir içerisine hava girişinin olduğu bu aşamaya emme zamanı denilmektedir.

**Sıkıştırma zamanı:** Bu aşamada; piston yukarı yönlü hareket ederek silindir içerisine alınan havayı sıkıştırmaya başlar. Bu esnada emme ve egzoz subapları kapalı konumdadır. Bu yüzden silindir içerisinde hem yüksek sıcaklık hem de yüksek basınç değerlerine ulaşılır. Bu aşama, sıkıştırma zamanı olarak adlandırılmaktadır.

**İş (yanma) zamanı:** Bu aşamada, sıkıştırılarak aşırı ısınan havanın üzerine yüksek basınçlı bir yakıt enjektörü yardımıyla yakıt (motorin) püskürtülmektedir. Yaklaşık 170-250 bar arasında püskürtülen bu yakıtın hava ile tepkimeye girmesi sonucunda yanma gerçekleşmektedir. Püskürtme işlemi piston üst ölü noktaya birkaç derece kala gerçekleşmektedir. Yakıt gecikmeli olarak yandığı için yanma işlemi piston üst ölü noktayı birkaç derece geçene kadar devam etmektedir. Silindir içerisindeki gazların yanmasıyla oluşan yüksek basınç, pistonun yüzeyine etki ederek pistonu alt ölü noktaya doğru hareket ettirir ve güç bu aşamada elde edilir. Bu yüzden bu aşamaya iş zamanı denilmektedir.

**Egzoz zamanı:** Bu aşamada artık iş zamanı bitmiş ve piston yukarı yönlü hareketine başlamıştır. Bu esnada egzoz supabı açılarak silindir içerisindeki yüksek basıncın ve atmosfer basıncının oluşturduğu basınç farkından dolayı yanan gazlar dışarıya doğru

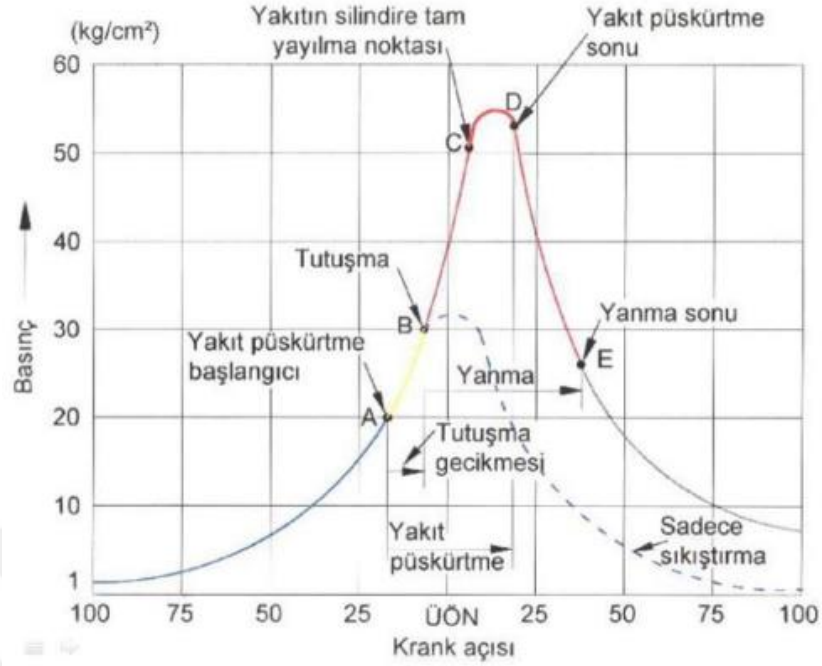
atılır. Bu süreç piston üst ölü noktaya varana kadar devam eder. Daha sonra çevrim tamamlanarak bir sonraki çevrim için silindirin içi hazır hale getirilmiş olur. Bu aşamaya egzoz zamanı denir.

### **2.1.1. Dizel motorlarında yanma**

Yanma olayı, yakıt içerisindeki karbon ve hidrojenin su ve diğer egzoz ürünlerini oluşturmak için hava içerisindeki oksijen ile girmiş olduğu kimyasal reaksiyon olarak tanımlanabilir (Acaroğlu ve diğ. 2009). Bu tepkime sırasında ısı ve enerji açığa çıkar. İçten yanmalı motorlar kimyasal reaksiyonla açığa çıkan enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürmektedir.

Dizel motorlarında yanma benzin motorlarından oldukça farklıdır. Benzin motorlarında yanma esasen alev cephesinin bölgesel olarak homojen bir karışım içerisinde ilerlemesi ile gerçekleşir. Dizel motorlarında yanma olayı ise heterojen bir karışım içerisinde çok noktada eş zamanlı olarak gerçekleşen kararsız bir işlemdir. Dizel motorlarında silindir içerisine hava emişi kısılmaz. Motor gücü ve torku püskürtülen yakıt miktarıyla kontrol edilir. Hava emişi kısılmadığından dolayı emme sırasında silindir içerisindeki basınç atmosfer basıncına yakındır. Böylece; pompalama kayıpları çok azdır. Bu durum; dizel motorların benzinli motorlara kıyasla daha yüksek verimle çalışmalarını sağlar. Dizel motorlarında yanma; sıkıştırma zamanı sonuna doğru silindire alınan havanın sıcaklığı yaklaşık olarak 600–900 C° yükseltilmesiyle, sıcaklığı ve basıncı yükselen havanın üzerine enjektör tarafından yakıtın basınçlı olarak püskürtülmesi sonucu gerçekleşir (Polat, 2011).

Silindir içerisine alınan havanın kütlece %23,1'nin oksijen (O<sub>2</sub>), %76,9'nun ise azottan (N<sub>2</sub>) oluştuğu kabul edilerek diğer elementler ihmal edilir. Bu sebeple yanma reaksiyonlarında havanın 1 molekül oksijen ve 3,76 molekül azottan oluştuğu kabul edilir (Acaroğlu ve diğ, 2009). Dizel motorlarında yakıt ile hava karışarak yanması sonucunda yanma ürünleri oluşurlar. Bunlar; CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub>'dir. Eğer, yakıtın tam yanması için silindir içerisine yeteri kadar hava alınamamış ve buna bağlı olarak yakıtın tamamı çevrim sonucu tam olarak yanmamış ise bu bileşenlere ek olarak CO, H<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> emisyonları oluşur. Şekil 2.2'de dizel motoruna ait yanma safhaları verilmiştir (Dizel motorlarının çalışma prensibi, 2019)



Şekil 2.2 : Dizel motor yanma diyagramı.

1. aşama; Tutuşma gecikmesi (A-B): Sıkıştırma sonunda silindire püskürtülen yakıt hemen tutuşmaz. Tutuşabilmesi için oksijenle karışması ve sıcaklığının yükselmesi gerekir bu nedenle, enjektörün yakıtı silindire püskürtmesinden, ilk alev çekirdeğinin meydana geldiği zamana kadar geçen süreye tutuşma gecikmesi denir. Şekilde A-B arasında gösterilen bu süre 2000d/d ile çalışan bir motorda 0,0009 saniyedir (Polat, 2011). Tutuşma gecikmesini etkileyen en önemli etkenler; yakıt kalitesi, buhar fazındaki yakıt tabakasını çevreleyen havanın oksijen konsantrasyonu, basınç ve sıcaklıktır. Yakıt içerisinde bulunan hidrokarbonlar tek veya gruplar halinde yanma olayını etkiler. Özellikle yakıtta bulunan parafinik hidrokarbon miktarı arttıkça yakıtın setan sayısı artar, dolayısı ile TG (Tutuşma Gecikmesi) azalır ve motor yumuşak çalışır (Ayhan, 2009).

Dizel motorlarda püskürtme avansı, motor performans ve egzoz emisyonlarını etkileyen temel parametrelerden birisidir. Püskürtme avansı, tutuşma gecikmesini, maksimum basıncın oluşma yeri ve basınç artma hızını dolayısıyla yanma periyodunu doğrudan etkilemektedir. Püskürtme avansının belirli noktaya kadar artması ile tutuşma gecikmesi kısalmışken daha da artırılması tutuşma gecikmesi periyodunun uzamasına neden olmaktadır. Püskürtme avansının optimum değeri motor hızına, sıkıştırma oranına, püskürtme karakteristiğine ve motor yapısına bağlıdır (Ayhan, 2009).

2. aşama; Kontrolsüz yanma (B-C): Tutuşma gecikmesi süresi içinde silindire püskürtülen yakıt ısınır oksijenle karışır ve buharlaşır. İlk alev çekirdeği meydana geldiği anda, yakıtın hepsi birden yanmaya katılır ve hızlı bir yanma oluşur. Hızlı yanma, basıncın aniden yükselmesine neden olacağından motor vurunutulu ve sert çalışır. Bu vurunutuya dizel vurunutusu denir. Günümüzde bu vurunutuyu azaltmak nedeniyle başlangıçta püskürtülen yakıtın miktarının düşürülmesi için kademeli püskürtme yöntemi geliştirilmektedir (Polat, 2011). Yanma hızı silindir içerisindeki basınç artma hızını da belirler. Basınç artma miktarı esas olarak püskürtülen yakıt miktarına bağlıdır. Yanmanın bu safhası tutuşma gecikmesine oranla çok daha kısa olduğundan yakıtın büyük bir kısmı tutuşma gecikmesi süresince püskürtülmektedir. Dolayısıyla maksimum basıncı tutuşma gecikmesi tayin etmektedir (Ayhan, 2009).

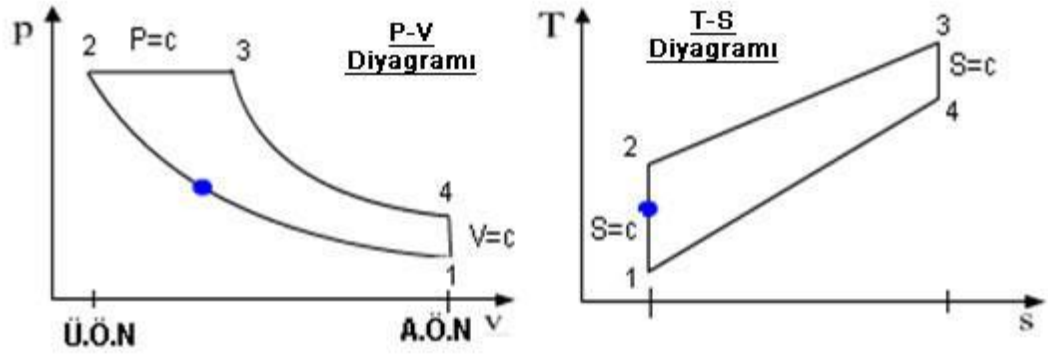
3. aşama; Kontrollü yanma (C-D): Tutuşma gecikmesinde püskürtülen yakıtın tamamen yanması ile bu safhaya geçilir. Ani yanma süresi sonundaki basınç ve sıcaklık çok yüksek olduğundan bu safhayı takiben püskürtülen yakıt oksijen bulunca hemen yanar (Ayhan, 2009). Kontrolsüz yanmanın sonunda silindir içindeki basınç ve sıcaklık enjektörden püskürtülen yakıtı doğrudan yakabilecek bir değere ulaşır bu nedenle püskürmeye devam eden yakıt hiçbir gecikme olmadan yanar. Basınç en yüksek noktaya erişinceye kadar yükselir. Geri kalan püskürme ve yanma sırasında basınç sabit kalır (Polat, 2011).

4. aşama; Gecikmiş yanma (D-E): Kontrollü yanma ile egzoz supabının açılmasına kadar geçen süre, yakıtın küçük bir kısmı henüz yanmadığından, art yanma olarak kabul edilebilir. Yakıtça zengin yanma ürünleri ve is içindeki enerji hala açığa çıkabilir. Bu safhada yanma tamamlanmakta, silindir hacminin artması sebebiyle de basınç ve sıcaklık düşmektedir. Yakıtın püskürtülmesi D noktasında sona erer, fakat yakıtın yanması devam etmektedir. Eğer bu safha çok uzun olursa egzoz sıcaklığı artar ve verim düşer.

### **2.1.2. Dizel motorlarında indike parametreler**

Dizel motorlarında yanma prosesi sabit basınç altında gerçekleşir. Şekil 2.3’de teorik dizel çevriminin P-V (basınç-hacim) ve T-S (sıcaklık-entropi) diyagramları verilmiştir (MEB., Motorlu Araçlar Teknolojisi, 2013).

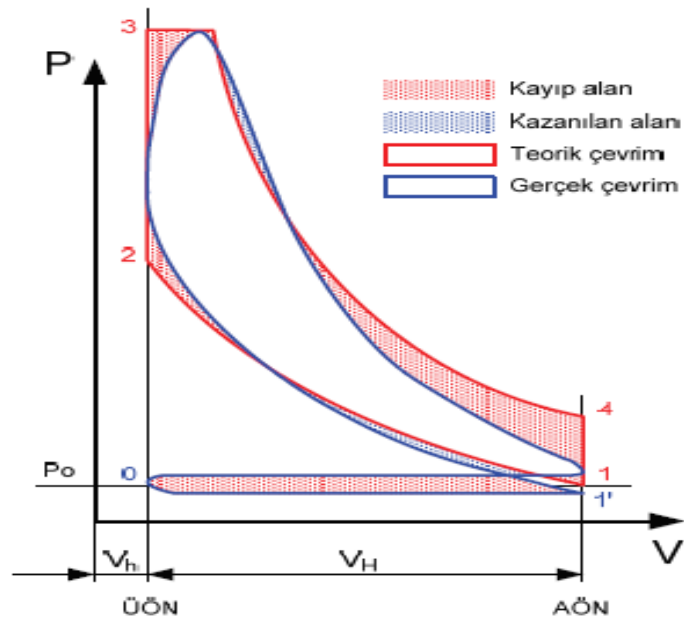




Şekil 2.3 : Teorik dizel çevrimi P-V ve T-S diyagramları.

1-2 aralığında; yanıcı gaz olarak kabul edilen hava (ideal gaz) izantropik olarak sıkıştırılır. Sıkıştırma sonunda havanın basıncı ve sıcaklığı artar. 2-3 aralığında; sıkıştırılan havaya sabit basınçta dışarıdan ısı verilir ve sıcaklığı arttırılır. 2-3 noktaları arasında sabit basınçta genişleme meydana geldiğinden piston aşağı doğru itilir. 3 noktasında sıcaklık maksimum değerine ulaşır. 3-4 aralığında; basıncın etkisi ile piston aşağıya doğru itilir. Bu genişleme izantropik bir genişlemedir. 4-1 aralığında; yanmış hava-yakıt karışımı dışarıya atılarak çevrim tamamlanmış olur.

Ayrıca, Şekil 2.4'de dizel motor gerçek ve teorik çevrim kapalı p-v diyagramı verilmektedir (Deniz, 2008).



Şekil 2.4 : Dizel motor gerçek ve teorik çevrim p-v diyagramları.

Şekilde görüldüğü gibi; atmosfer basıncının üstünde kalan üst büklüm içerisindeki alan çıkış gücünün üretildiği sıkıştırma ve iş zamanlarını içermektedir. Bu alan üretilen brüt indike işe tekabül etmektedir. Atmosfer basıncı çizgisinin altında kalan büklüm içerisindeki alan ise pompalama kaybı, diğer adıyla negatif iş olarak bilinmektedir. Benzin motorlarında negatif iş olarak bilinen pompalama kayıplarının dizel motorlara kıyasla daha fazla olduğu bilinmektedir. Bu durumun, dizel motorların bir başka önemli avantajı olduğu söylenebilir.

Gerçek motor çevrimi standart hava (teorik) çevriminden farklı olarak emme, sıkıştırma, tutuşma, yanma, genişleme ve egzoz aşamalarından oluşan açık bir çevrimdir. Dolayısı ile, gerçek motor çevrimi iş alanı ile standart hava (teorik) çevrimi iş alanı arasında bir fark oluşmaktadır. Oluşan bu fark şu şekilde açıklanabilir; Teorik çevrimden farklı olarak piston ÜÖN'dan AÖN'ya giderken, silindir içerisinde oluşan alt basıncın etkisi ile dış ortamdan silindire taze dolgu emilir. Piston hızının yüksek ve emme subabı dolgu geçiş alanının dar olması nedeniyle silindir içerisinde oluşan basınç kayıpları, emme basıncının atmosfer (dış ortam) basıncının altına düşmesine neden olur. (Denklem 2.1 ve Denklem 2.2)'de emme ve egzoz zamanında oluşan silindir içi basınç deklemleri verilmektedir (Deniz, 2008).

$$P_{1'} = (0,85 - 0,95) * P_0 \quad (2.1)$$

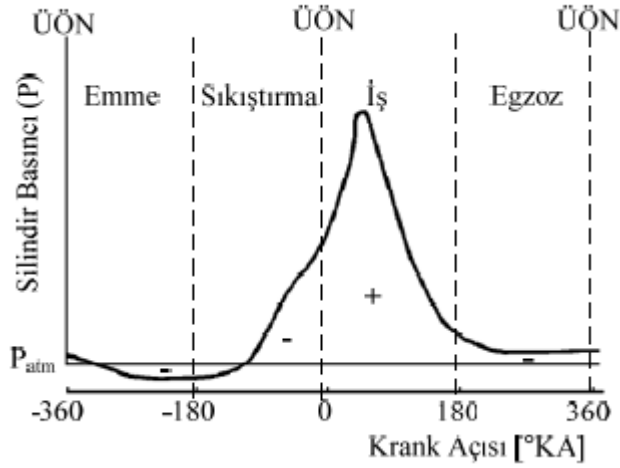
$$P_r = (1,03 - 1,15) * P_0 \quad (2.2)$$

Burada;

$P_{1'}$  = Emme sonu basıncı,  $P_0$ =Atmosfer (dış ortam) basıncı,

$P_r$  = Egzoz (yanmış) gaz basıncı'dır.

Yüksek basınç ve sıcaklıktaki yanmış gazların bir kısmı silindir içerisinde kalır ve silindir içerisine emilen taze dolguyla karışarak emilen havanın ısınmasına sebep olurlar. Böylece, kütleli olarak silindir içerisine alınan taze hava dolgusu miktarı azalır. Şekil 2.5'de dizel motoruna ait açık indikatör diyagramı ve iş safhaları verilmektedir (Can, 2012).



Şekil 2.5 : Dizel motor açık indikatör diyagramı.

Motorun indike parametreleri; ortalama indike basıncı ( $P_{mi}$ ), indike gücü ( $P_i$ ), indike verimi ( $\eta_i$ ) ve indike özgül yakıt tüketimi ( $b_i$ )'dir.

Dizel motorlarda ortalama indike basıncın teorik değeri (Denklem 2.3) aşağıdaki gibi hesaplanır (Ayhan, 2009):

$$P'_{m_i} = \frac{P_2}{(\epsilon-1)} \left[ \alpha(\beta-1) + \frac{\alpha\beta}{n_2-1} \left( 1 - \frac{1}{\epsilon^{n_2-1}} \right) - \frac{1}{n_1-1} \left( 1 - \frac{1}{\epsilon^{n_1-1}} \right) \right] \quad (\text{kpa}) \quad (2.3)$$

Emme ve egzoz süresince pompalama kayıplarının ortalama basıncı ( $p_i$ ):

$$\Delta P_i = P_r - P_1 \quad (\text{kpa}) \quad (2.4)$$

Gerçek çevrimin ortalama indike basıncı ise (Denklem 2.5) aşağıdaki gibidir:

$$P_{m_i} = v * P'_{m_i} - \Delta P_i \quad (\text{kpa}) \quad (2.5)$$

Burada,  $v$  teorik çevrimin 1, 2, 3, 4 ve 5 geçiş noktalarında yuvarlatarak gerçek çevrime yaklaştırmak için kullanılan yuvarlatma katsayısıdır ve 0,92–0,95 arasında değişmektedir.

İndike Güç;

$$P_i = \frac{P_{m_i} * V_h * z * n * i}{60} \quad (\text{kW}) \quad (2.6)$$

Burada; toplam silindir hacmi, z silindir sayısı, n devir sayısı ve i devirdeki çevrim sayısıdır (4 stroklu motorlar için  $i=0,5$ , 2 stroklu motorlar için  $i=1$ ). İndike verim ve indike özgül yakıt tüketimi (Denklem 2.7 ve Denklem 2.8) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$n_i = \frac{n_e}{n_m} \quad (2.7)$$

$$b_i = \frac{36 \cdot 10^5}{H_u \cdot n_i} \quad (\text{g/kWh}) \quad (2.8)$$

### 2.1.3. Dizel motorlarında çift yakıt uygulamaları

Dizel motorlarının benzinli motorlara kıyasla birçok avantaja sahip olmasına karşın  $\text{NO}_x$  emisyonları ve partikül madde bakımından dezavantajlı olduğu bilinmektedir. Son yıllarda emisyon düzenlemelerinde değişikliğe gidilmesiyle dizel motorlarının neden olduğu kirliliği en aza indirmek adına çeşitli yanma stratejileri geliştirilmiştir. Çift yakıt yanma stratejisi bunlardan en etkili yanma stratejilerinden birisidir. Burada; Hem geleneksel dizel yakıtı hem de ilave alternatif yakıt kullanan motor, ‘‘çift yakıtlı motorlar’’ olarak adlandırılır. Çift yakıtlı motorlar, birincil yakıt olarak dizel yakıt ve ikincil yakıt olarak alternatif yakıt kullanan dizel motorlardır (Ashok ve diğ, 2015). Burada; Dizel motorlarında ikinci yakıt ilavesi için ufak modifikasyonlar yapılarak konvansiyonel dizel motor çift yakıt motor olarak dönüştürülebilmektedir.

LPG,  $\text{H}_2$ , CNG, bio yakıtlar, bio gazlar ve sıvılaştırılmış nitrojen gazı (LNG) petrol bazlı yakıtların yerine geçmeyi amaçlayan başlıca alternatif yakıtlardır. Bu alternatif yakıtların avantajlarından birisi de petrol kaynaklı yakıtlardan daha temiz yanmalarıdır. Bu gazlardan hidrojen, uzun süreli olarak sürdürülebilir ve daha az kirletici bir yakıttır. Hidrojen hem benzinli (SI) hem de dizel (CI) motorlara adapte edilebilir. Hidrojen yandığında hidrokarbonlar, karbonmonoksit, karbondioksit gibi toksik ürünler yerine ürün olarak su oluşmaktadır (SinghYadav ve diğ, 2012). Hidrojen benzinli motorlarda tek yakıt olarak kullanılabilir. Fakat, dizel motorlarda çift yakıt tekniğiyle kullanılabilir. Hidrojenin kendiliğinden tutuşma sıcaklığı 858K'dir. Dizel yakıtından 453K fazladır. Hidrojen sıkıştırma ile tutuşturulamaz. Bu nedenle hidrojenin dizel motorlarda kullanımı buji veya kızdırma bujisi gibi ilave ateşleme sistemi gerektirir (SinghYadav ve diğ, 2012). Hidrojenin yapısında hiç karbon atomu bulundurmadığı için oldukça çevreci bir yakıt olduğu bilinmektedir. Hidrojen, benzin motorlarında birinci yakıt olarak

kullanılabilmektedir. Fakat, hidrojenin özellikle tam yük şartlarında; düşük ateşleme enerjisi, düşük yanma sıcaklığı, daha geniş yanma aralığı ve kısa sönme mesafesi gibi özelliklerinden dolayı dizel motorlarında birincil yakıt olarak kullanımı vurutu olarak adlandırılan erken ateşleme problemine sebep olmaktadır (Dhole ve diğ., 2014). Bu yüzden; hidrojenin dizel motorlarında ikincil yakıt olarak kullanımı uygun görülmektedir.

Dhole ve diğ. (2014), yapmış oldukları çalışmada dört silindirli, dört zamanlı, turboşarjlı bir dizel motorunda ilave yakıt olarak hidrojen kullanımının motor performansı ve emisyonlarına etkilerini araştırmışlardır. Bunun için konvansiyonel dizel motora emme hattından hidrojen ilave edilecek şekilde ufak modifikasyonlar uygulamışlardır. Motora gönderilecek hidrojen önce bir alev kapanından daha sonra ise debi ölçer ve geri dönüşsüz valfden geçerek ilave bir enjektör yardımı ile motor emme hattından verilmiştir.

SinghYadav ve diğ. (2012), yaptıkları çalışmada; direk enjeksiyonlu, tek silindirli, dört zamanlı, hava soğutmalı bir elektrikli dinamometreye bağlı bir dizel motorunda ikinci yakıt olarak hidrojen kullanımı ve EGR uygulamasının motor performans ve emisyonlarına etkilerini incelemiştir. Deneysel çalışmalara başlamadan önce konvansiyonel dizel motor, hidrojen-dizel çift yakıt çalışacak şekilde modifiye edilmiştir. Hidrojenin kontrolsüz yanmasına ve sisteme geri tepmesi ihtimaline karşı alev kapanı ve geri dönüşsüz valfden geçerek hidrojen basınç regülatörü kullanılarak 0,25 bar basınçta yüksek basınç silindirinden (150 bar) motor emme hattına ilave edilmiştir. İlave edilen hidrojenin debisi, gravimetrik yöntemle 40g/s olarak ölçülmüştür. Konvansiyonel dizel çalışmayla kıyaslandığında hidrojen endüksiyonlu EGR bağlı çift yakıt modunda çalışmanın performansı iyileştirdiği ve emisyon seviyesini azalttığı sonucuna varmışlardır.

Ayhan (2016), yapmış olduğu çalışmada; dört stroklu, doğal emişli, tek silindirli, direkt püskürtmeli, su soğutmalı ve çanak pistonlu Süper Star marka bir dizel motoruna metanol fumigasyonunun performans ve emisyonlara etkisini deneysel olarak incelemiştir. Metanol elektronik kontrollü püskürtme sistemi yardımıyla motor emme manifolduna, emme periyodunda farklı yakıt tüketim oranlarında (%4, %8 ve %12) püskürtülmüştür. Çalışmalar sonucunda, motora farklı oranlarda metanol ilavesinin motor performansını ve özgül yakıt tüketimini arttırdığını, NO<sub>x</sub> emisyonlarını ise önemli oranda düşürdüğünü tespit etmiştir.

Birçok araştırmacı, emisyonları kontrol edebilmek adına dizel motorlarda pilot yakıt olarak dizel yakıt ile birlikte ikinci yakıt olarak LPG, Natural gas (NG), Dimetil eter (DME) gibi alternatif gaz yakıtların uygulanabilirliğini araştırmaktadır. LPG'nin, birçok ülkede çok miktarda rezervlere sahip olması ve kolay taşınabilir olmasından dolayı en önemli alternatif gaz yakıt olduğu düşünölmektedir (Elnajjar ve diğ, 2013).

LPG'nin dizel motorlarda kullanımını ile ilgili olarak; LPG'nin, kendi kendine tutuşma kabiliyeti olarak bilinen setan sayısı yüksek olduğu için konvansiyonel dizel motorlarda direkt olarak kullanımını mümkün değildir. Bu yüzden; konvansiyonel dizel motorlarında motorine alternatif olarak LPG kullanılacak ise setan sayısı; çeşitli katkı maddeleri ya da diğer pozitif yanma yöntemleri ile geliştirilmelidir (Ayhan ve diğ, 2011). Yüksek oktan sayısı LPG'yi buji ateşlemeli motorlar için uygun hale getirir. Bunun aksine düşük setan sayısı; LPG'yi, yüksek devir varyasyonlarından dolayı geniş oranlarda sıkıştırma ateşlemeli motorlar için kullanılmasını güçleştirir. Bundan dolayı; dizel motorlarda LPG sadece çift yakıt modunda kullanılabilir (Ashok ve diğ, 2015).

Rimkus ve diğ. (2017), yapmış oldukları çalışmada; dört silindirli, turboşarjlı bir dizel motorunda, LPG ilavesinin, motor performansı ve emisyonlarına etkilerini incelemişlerdir. Deneylere başlamadan önce LPG ilavesi için motorda ufak modifikasyonlar yapmışlardır. LPG, sırasıyla; gaz basınç düşürücü ve gaz debi ölçerden geçerek turboşarjın öncesinde bir noktadan motor emme hattına 36 mbar basınç ve 4 kg/h debide ilave edilmiştir. Deneyler sonucunda, LPG oranının artmasının HC, CO ve duman koyuluğu gibi egzoz gazı içerisindeki yanma sonu ürünlerinin miktarını arttırdığı saptanmıştır. Ancak NOx ve CO<sub>2</sub> emisyonlarının azaldığı görölmüştür.

Elnajjar ve diğ. (2013), tek silindirli, doğal emişli, dört zamanlı, indirek enjeksiyonlu, su soğutmalı Ricardo marka dizel motorunu pilot yakıt olarak dizel, ana yakıt olarak LPG ile çalışacak şekilde modifiye etmişlerdir. Yapılan çalışmada, farklı kompozisyonlardaki LPG gazının motor performansına etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; LPG kompozisyonlarındaki değişimin motor performansına çok büyük etkisi olmadığı saptanmıştır. Diğer taraftan, LPG gazı içerisindeki propan oranı arttıkça motor gürültü seviyesinin arttığı tespit edilmiştir.

Kumaraswamy ve Prasad (2012), çalışmalarında; 4 zamanlı, tek silindirli bir dizel motorunda ana yakıt olarak LPG, pilot yakıt olarak dizel yakıt kullanımının motor

performansı ve emisyonlara etkilerini incelemeyi amaçlamışlardır. Konvansiyonel dizel motor, ufak modifikasyonlar sonucunda LPG-dizel çift yakıt modda çalışacak şekilde modifiye edilmiştir. LPG sırasıyla; basınç regülatörü, geri dönüşsüz çekvalf, alev kapanı ve debi ölçerden geçerek motor emme hattı üzerinden ilave edilmiştir. Yapılan deneyler neticesinde; LPG-dizel çift yakıt çalışmanın motor verimine önemli bir etkisi olmamakla birlikte yüksek HC ve CO emisyonları ve daha fazla özgül yakıt tüketimine neden olduğunu tespit etmişlerdir.

Saleh (2008), 5 farklı LPG kompozisyonu ve dizel yakıt ile çalışan çift yakıtlı dizel motorunda LPG bileşimindeki değişimin, motor performansı ve emisyon karakteristiklerine etkilerini incelemiştir. Bunun için öncelikle iki silindri, doğal emişli, dört stroklu, direkt enjeksiyonlu bir dizel motoru, ufak modifikasyonlar sonucunda pilot enjeksiyonlu olarak çalışan bir çift yakıt motoruna dönüştürmüştür. Farklı kompozisyonlardaki LPG gazı motor emme hattı üzerinden ilave edilmiştir. Sonuçlardan; çift yakıtlı motorun egzoz emisyonlarının ve yakıt dönüşüm verimliliğinin etkilendiğini, farklı LPG bileşimi kullanıldığında yüksek bütan bileşeninin NO<sub>x</sub> seviyelerini düşürdüğünü, yüksek propan bileşeninin ise CO seviyelerini iyileştirdiğini gözlemlemiştir.

## **2.2. Dizel Motorlarında Kullanılan Alternatif Yakıtlar**

İçten yanmalı motorlarda 20. yy.'dan itibaren petrol ve petrol kaynaklı yakıtlar kullanılmaya başlanmıştır. Bunun sonucunda; motor teknolojisi bu yönde gelişim göstermiştir. Bu duruma; petrolün yakıt olarak kullanımının kolay ve avantajlı oluşu etkili olmuştur. Fakat son yıllarda; nüfus artışına bağlı olarak sınırlı petrol kaynaklarını daha verimli kullanmak ve fosil yakıt kaynaklı kirliliği azaltmak amacı ile içten yanmalı motorlarda ufak modifikasyonlar sonucunda kullanılacak alternatif yakıt arayışları ihtiyaç haline gelmiştir.

Günümüzde içten yanmalı motorların sebep olduğu çevre kirliliğini azaltmak için çok yönlü aktiviteler gerçekleştirilmektedir. Sıradan hidrokarbon yakıtların neden olduğu başlıca kirleticiler; yanmamış ve kısmi yanmış hidrokarbonlar, karbondioksit, azot oksitler ve insan sağlığı için zararlı katı partikül parçacıklardır (Rimkus ve diğ, 2017). Avrupa Alternatif Yakıtlar Stratejisi Avrupa Komisyonu Tebliğinde, petrolün yerini

alabilecek veya araçların neden olduğu emisyonları azaltabilecek temel alternatif yakıtlar değerlendirilmektedir. Verilen alternatif yakıtlar listesinde elektrik enerjisi, hidrojen, bio yakıtlar ve LPG yer almaktadır (Rimkus ve diğ, 2017).

Ayrıca, 1974 yılından itibaren ortaya çıkan petrol krizinden bugüne petrol ve petrol türevli yakıtların fiyatlarında yaşanan iniş çıkışlardan dolayı daha öncesinde çok öncelik verilmeyen yakıt ekonomisi otomotiv üreticileri ve kullanıcılar tarafından önemli bir parametre haline gelmiştir (Güler, 2006). Günümüzde, çevresel kaygılar ve petrol kaynaklarının tükenmesi gibi tehlikeler, araştırmacıları konvansiyonel petrol yakıtlarına alternatif yakıt kaynakları bulmaya konsantre olmaya zorlamıştır. Fosil bazlı yakıtların aşırı kullanımı rezervleri boşaltmakta, hava kirliliğini arttırmaktadır. Bu durum, mevcut rezervlerin etkili kullanımını ve çevre dostu alternatif yakıtlara geçme bilincini geliştirmektedir (Ashok ve diğ, 2015).

Dizel motorlar; motor gücü, dayanıklılık, yakıt ekonomisi ve çok düşük CO emisyonları yönünden kayda değer bazı avantajlara sahiptir. Büyükten küçüğe tüm taşıtlarda yaygın olarak uygulanmaktadır. Ancak, dizel motor kaynaklı egzoz emisyonları hala ciddi bir problemdir. Bundan dolayı, çevresel mevzuatları karşılamak adına egzoz emisyonları içerisindeki NO<sub>x</sub> miktarını düşürmek son derece arzu edilen bir istektir. Bu yüzden, motor sistemlerinin geliştirilmesi için yüksek verimlilik ve düşük emisyonlar ile birlikte enerji korunumu önemli araştırma konularıdır. Son zamanlarda; Doğal gaz, LPG, dimetil eter ve hidrojen gibi alternatif yakıtların dizel motorda kullanımı bu sorunları çözmek için aktif olarak geliştirilmiştir (Saleh, 2008).

### **2.2.1. Biyodizel**

Basit bir açıklama ile biyodizel; çeşitli bitkilerden elde edilen yağların veya hayvansal yağların alkol ile kimyasal tepkimesi sonucunda elde edilen alternatif yakıttır. Biyodizel petrol içermez, fakat saf olarak veya her oranda petrol kökenli dizelle karıştırılarak yakıt olarak kullanılabilir. Saf biyodizel ve dizel-biyodizel karışımları herhangi bir dizel motoruna, motor üzerinde herhangi bir modifikasyona gerek kalmadan veya küçük değişiklikler yapılarak kullanılabilir (Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, 2018).

Biyodizel; bitkilerden elde edildiğinden dolayı karbon döngüsünü hızlandırdığı için sera gazı salınımını arttırmaz. Tükettiğimiz biyodizelden atmosfere verilen CO<sub>2</sub>, biyodizel



üretiminde kullanılacak olan yağ bitkisi tarafından en fazla bir yıl içinde geri alınacaktır. Böylece, fosil kaynaklı yakıtların yanması sonucu atmosfere atılan ve geri alınamayan karbon dioksit emisyonlarının neden olduğu sera etkisinden dolayı oluşan küresel ısınmanın etkilerini azaltmada biyodizel kullanımının etkili olacağı düşünülmektedir.

Biyodizel, dizel motorlarda; dizel yakıtlar ile belirli oranlarda karıştırılarak kullanılmaktadır. Yerel kaynaklardan üretilebilmesinin yanısıra, yenilenebilir ve çevreci bir yakıt olması biyodizeli öne çıkaran özelliklerdir. Aynı zamanda, motor için doğal yağlayıcı bir yakıt olmaları nedeni ile motordaki sürtünmeyi indirgeyerek motor ömrünü uzatıcı etki sağlamaktadır (Ergen, 2011). Yapılan araştırmalara göre; motorda dizel-biyodizel karışımları kullanılmasıyla; duman koyuluğu, partikül madde, yanmamış karbonmonoksit, hidrokarbon ve karbondioksit emisyonları azalırken; azot oksit emisyonlarının arttığı tespit edilmiştir (Haşimoğlu, 2005).

### **2.2.2. Alkoller**

Etanol ve metanol dizel motorlarında kullanılabilen alkol yakıtlar arasında yer almaktadır. Alkol yakıtlar motorine göre daha düşük viskoziteye sahiptir ve bu özellikleri ile daha iyi atomize olarak havayla daha kolay karışabilmektedirler (Ergen, 2011). Etanol, hava kirliliğini azaltmak ya da petrol ürünlerinin tüketimini azaltmak amacıyla, benzinle değişik oranlarda karıştırılarak kullanılabilir. E10 ya da E85 diye bilinen sırasıyla %10 ve %85 etanol içeren karışımlar en yaygın kullanılan türleridir (Kılıç ve diğ, 2015). Alkol yakıtlar, dizel motorlarında; fumigasyon yöntemiyle motora uygulanması, çift yakıt yöntemiyle motora uygulanması ve dizel yakıt yerine enjekte edilen alkol yakıtın buji ile tutuşturulması gibi üç farklı yöntem ile kullanılabilir. Bunun yanı sıra, alkol yakıtların hacimsel karışım yöntemiyle dizel yakıtına belirli oranlarda karıştırılarak kullanımı da mümkündür (Ergen, 2011). Alkol yakıtların; yakıt ekonomisi sağlamaları ve egzoz emisyonlarını iyileştirmelerinin yanında, yakıt sistemlerini aşındırmaları ve motor verimini düşürmeleri gibi olumsuz etkileri bulunmaktadır (MEB., Motorlu Araçlar Teknolojisi, 2013).

### 2.2.3. Doğalgaz

Doğalgaz; ev ve işyerlerinde ısınma amaçlı kullanılmasının yanı sıra son yıllarda içten yanmalı motorlarda benzin ve motorine alternatif yakıt olarak kullanılmaya başlanmıştır. Dizel motorlarında özellikle çift yakıt olarak kullanımı tercih edilmektedir. Yeterli rezervlere sahip olması, kolay uygulanabilirliği ve benzin ve motorine kıyasla ekonomik avantajlara sahip olması doğalgazı alternatif yakıtlar arasında ilgi odağı haline getirmiştir.

Doğalgaz; büyük kısmı metan ( $\text{CH}_4$ ) ve etan ( $\text{C}_2\text{H}_6$ )'dan oluşan yanıcı doğal bir gazdır. Doğalgaz birincil enerji kaynağı olarak içten yanmalı motorlarda kullanılabilir. Doğalgaz renksiz ve kokusuz bir gazdır. Bu sebeple, kullanıcının herhangi bir gaz kaçağını kolaylıkla fark edebilmesi için gaza koku verici bir madde eklenir. Çürük sarımsak kokusu veren THT (Tetra Hidro Teafon) maddesi katılmaktadır (Aytaş, 2012).

Tablo 2.1.'de doğalgazın içeriğinde bulunan bileşenler ve hacimsel yüzdeleri verilmektedir (Karabektaş ve Ergen, 2009).

Tablo 2.1 : Doğalgaz bileşenlerinin kimyasal formülleri ve hacimsel yüzde oranları.

| Bileşenler    | Kimyasal Formül           | Hacimsel (%) |
|---------------|---------------------------|--------------|
| Metan         | $\text{CH}_4$             | Min. 92,98   |
| Etan          | $\text{C}_2\text{H}_6$    | Maks. 4,04   |
| Propan        | $\text{C}_3\text{H}_8$    | Maks. 1,17   |
| Bütan         | $\text{C}_4\text{H}_{10}$ | Maks. 0,59   |
| Azot          | $\text{N}_2$              | Maks. 1,62   |
| Karbondioksit | $\text{CO}_2$             | Maks. 1,19   |

Doğalgazın yoğunluğu oldukça düşüktür ve havadan hafif bir gazdır. Bunun yanı sıra, difüzyon katsayısı oldukça yüksektir. Doğalgazın difüzyon katsayısı 0.08 olan benzinin yaklaşık iki katı kadardır. Bu durum doğalgazın havaya kolay ve hızlı bir şekilde karışmasını ve yayılmasını sağlamaktadır. Doğalgaz yüksek hava fazlalığında yanabilmektedir. Kütleli hava/yakıt oranı benzinde 14.7 ve motorinde 14.5'ken, doğalgazın sahip olduğu kütleli hava/yakıt oranı 17.2'dir. Doğalgaz bu özelliği ile fakir karışımlarda yanabilme yeteneğine sahiptir. Bu durum, yakıt ekonomisi açısından doğalgaz kullanımına önemli bir avantaj sağlamaktadır (Ergen, 2011).

Doğalgazın; dizel motorlarında özellikle düşük motor devirlerinde kullanımı; NOx ve HC emisyonlarında azalmalar sağlarken, benzin motorlarında CO ve HC emisyonlarında iyileşmeler sağlamaktadır. Ayrıca, doğalgazın karbon oranının petrol bazlı diğer yakıtlara göre düşük olmasından dolayı doğalgazın içten yanmalı motorlarda kullanımı; egzoz gazı içerisindeki karbondioksit miktarını azaltacaktır.

Diğer taraftan, CO emisyonları yanma sonu sıcaklığı, yanma verimi, su buharı miktarı ve NOx emisyonlarının oluşumu hava fazlalık katsayısı ( $\lambda$ ) ile değişim göstermektedir. Zengin karışımlarda, CO emisyonlarında kötüleşme gözlenebilir. Hava fazlalık katsayısının belirli değerleri arasında sıcaklıkla beraber NOx emisyonlarında artış gözlenirken, CO emisyonlarında azalmalar görülür. Ayrıca, eksiksiz iyi bir yanma sonucunda; HC ve CO emisyonlarında azalma olurken, sıcaklığın artması ile NOx emisyonlarında artış meydana gelebilmektedir (Kılıç ve diğ., 2015).

## **2.2.4. LPG**

### **2.2.4.1. LPG'nin genel özellikleri**

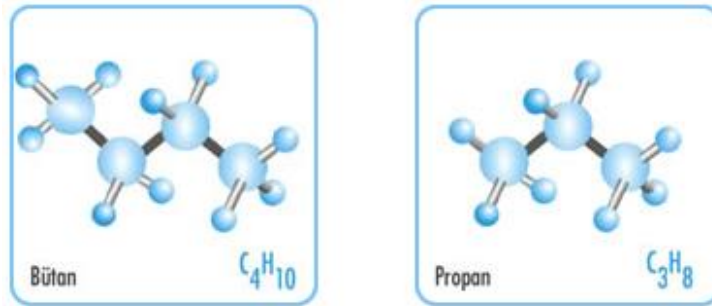
LPG; doğalgaz rafinasyonundan elde edildiği gibi petrolün damıtılması ve parçalanması esnasında elde edilen ve sonradan basınç altında sıvılaştırılan, başlıca; propan, bütan ve izomerleri gibi hidrokarbonların karışımından oluşan petrol türevi bir yakıttır (Acaroğlu, 2012). LPG, ilk olarak tüp gaz adı ile evlerimizde kullanılmaya başlanmıştır. LPG'nin sahip olduğu avantajlarından dolayı, sanayide ve taşıtlarda kullanımı yaygınlaşmıştır. Günümüzde, LPG; hemen hemen her sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Halk arasında tüp gaz olarak bilinen LPG, %70 bütan ( $C_4H_{10}$ ) ve %30 propan ( $C_3H_8$ ) gazlarından oluşmaktadır (MEB., Kimya Teknolojisi, 2012). Ticari olarak LPG ülkemizde; Miks LPG (%30 propan ve %70 bütan), propan (%95 ve üzeri saflıkta) ve otagaz olarak piyasaya sürülmektedir (İpragaz, 2019). LPG'nin, birçok ülkede çok miktarda rezervi mevcut olduğundan dolayı en önemli alternatif gaz yakıt olduğu düşünülmektedir (Elnajjar ve diğ., 2013).

LPG'nin genel özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir (MEB, 2012);

- Parlayıcı ve patlayıcı bir gazdır.
- Zehirli ve korozif değildir.

- Normal şartlar altında gaz haldedir. Yüksek basınç altında sıvılaştırılarak depolanır.
- Renksiz ve doğal halde kokusuzdur. Fakat güvenlik açısından fark edilebilmesi için karakteristik bir şekilde metilmerkaptan, tiyosen (137 g/ton), anilmerkaptan (30 g/ton) ile kokulandırılır.
- LPG, havadan ağır ( $d=2,6$  g/lt) olmasından dolayı zemine çökerek ortama yayılır ve boğulmalara neden olur.
- Deriye döküldükten sonra buharlaşırken deriden aldığı ısı donmalara ve yanık etkisine neden olur.
- Bileşiminde az miktarda kükürt ihtiva eder. (20–100 mg/m<sup>3</sup>).
- İçten yanmalı motorlarda silindir içinde daha homojen bir yakıt/hava karışımı sağlar.
- LPG için yanabilirlik sınırları %2,4 ile %9,5 arasındadır. Yanma %9,5 LPG ile %90,3 hava karışımı ile gerçekleşiyorsa buna yanabilirliğin üst sınırı denir. Alt sınırı ise %2,4 LPG ile %97,6 hava karışımından oluşmaktadır.

Şekil 2.6'da LPG'yi oluşturan bütan ve propan gazının atomik yapıları verilmiştir.



Şekil 2.6 : Bütan ve propanın atomik yapıları.

Ayrıca, Tablo 2.2'de LPG'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri verilmektedir (İpragaz, 2019).

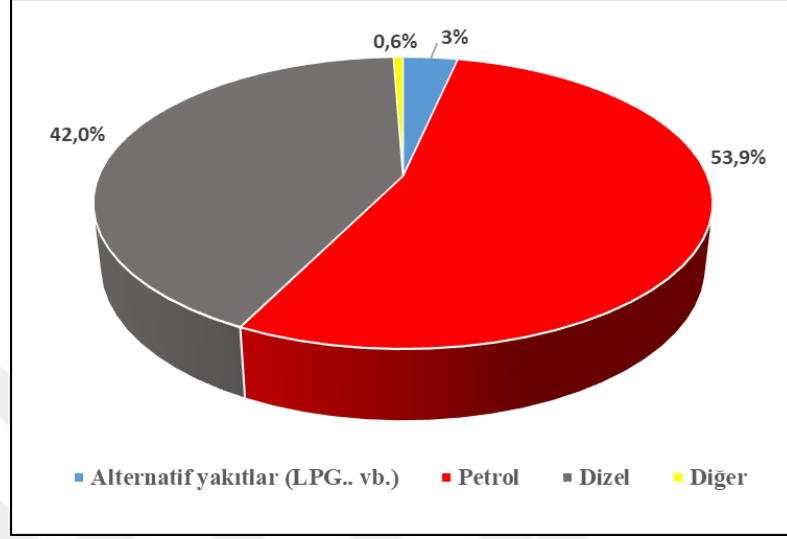
Tablo 2.2 : LPG'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri.

| Özellikler                   | Birim                | Propan                        | Bütan                          | Miks LPG  |
|------------------------------|----------------------|-------------------------------|--------------------------------|---|
| Kapalı kimyasal formülü      |                      | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | %30C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> +%70C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> |
| Molekül ağırlığı             | gr/mol               | 44,9                          | 58,12                          | 53,91   |
| Sıvı halde                   |                      |                               |                                |   |
| Özgül kütle (15°C'de)        | kg/lt                | 0,508                         | 0,584                          | 0,560   |
| Özgül hacim (15°C'de)        | lt/kg                | 1,969                         | 1,712                          | 1,786   |
| Buharlaştırma gizli ısı      | kcal/kg              | 90,50                         | 92,00                          | 91,55   |
| Üst ısı değeri               | kcal/kg              | 11945                         | 11735                          | 11798   |
| Alt ısı değeri               | kcal/kg              | 11070                         | 10920                          | 10965   |
| Gaz halde                    |                      |                               |                                |   |
| Özgül kütle (15°C'de)        | kg/Nm <sup>3</sup>   | 2,019                         | 2,703                          | 2,28  |
| Özgül hacim (15°C'de)        | lt/kg                | 0,538                         | 0,407                          | 0,439   |
| Alev sıcaklığı (havada)      | °C                   | 1980                          | 2008                           | 2000  |
| Üst ısı değeri               | kcal/Nm <sup>3</sup> | 22218                         | 28868                          | 26899   |
| Alt ısı değeri               | kcal/Nm <sup>3</sup> | 20590                         | 26863                          | 25000   |
| Gaz / sıvı hacim oranı       | -                    | 272                           | 238                            | 248   |
| Buharlaştırma basıncı (15°C) | kg/cm <sup>2</sup>   | 6,51                          | 0,82                           | 2,53  |

#### 2.2.4.2. LPG'nin taşıtlarda kullanımı

LPG'nin motorlarda yakıt olarak tercih edilmesindeki en önemli etken; benzin ve motorine kıyasla önemli bir fiyat avantajına sahip olması ve düşük egzoz emisyonlarına sahip olmasıdır (Güler 2006). LPG fiyatlarının benzin ve motorine göre daha düşük olması, dönüşüm sisteminin getirdiği ek maliyetlere rağmen, LPG kullanımının daha avantajlı olduğu bilinmektedir. İçten yanmalı motorlarda motor yakıtı olarak otomobil, kamyon, otobüs, traktör, forklift ve trende kullanılmaktadır. LPG'nin yakıt ve otogaz olarak kullanımının kabul görmesinde en önemli etken çevre (emisyonlar) yönünden sağladığı avantajlardır. LPG'nin verdiği yüksek ısı değeri, çevre dostu ve ekonomik olması, basınçlı kaplarda tutulup kolaylıkla taşınabilmesi sanayi ve taşıtlarda kullanımını arttırmıştır (TMMOB Kimya Mühendisleri Odası, 2015).

Avrupa Otomobil Üreticileri Topluluğu (AECA), (2016) verilerine göre Avrupa’da kullanılan binek taşıtların kullanılan yakıt türlerine göre dağılımı Şekil 2.7’de verilmektedir.



Şekil 2.7 : Avrupa’daki binek taşıtların kullanılan yakıt türüne göre yüzdeleri.

Şekilde görüldüğü gibi LPG’nin sağladığı emisyon avantajlarına rağmen taşıtlarda kullanım oranı oldukça düşük seviyelerdedir. Bu oran İngilterede %1 seviyelerindedir. Bunun sebebi olarak hükümetlerin LPG ve benzeri çevreci yakıtların kullanımını yeteri kadar teşvik etmemesi ve farkındalık eksikliği olarak gösterilmektedir (Petro Industry News, 2018).

Bir başka dezavantaj ise LPG dönüşüm maliyetleri olarak gösterilmektedir. Benzinli ya da dizel aracınızı LPG dönüşümü yaptırmanın maliyeti oldukça yüksek olabilir. Fakat daha sonrasında elde edeceğiniz yakıt tasarrufu ile dönüşüm maliyetini çıkarmanız ve tasarruf etmeniz mümkündür.

Fiyat rekabet gücü LPG’nin bir başka avantajıdır. Bu nedenle, LPG otomotiv uygulamaları pazarı sürekli olarak gelişmektedir. Özellikle Polonya, Türkiye, Almanya gibi birkaç Avrupa ülkesinde ve aynı şekilde Japonya ve Güney Kore gibi asya ülkelerinde LPG ile çalışan taksi ve kiralık araçların sayısı artmaktadır (Kim ve diğ, 2016). Dünya LPG ajansı verilerine göre dünya genelinde 25 milyondan fazla LPG’li araç bulunmaktadır (WLPGA, 2018). Tablo 2.3’te LPG’nin taşıtlarda en yaygın olarak

kullanıldığı ülkeler ve taşıt sayıları, dolun istasyon sayıları verilmektedir (ClimateTechWiki, 2011).

Tablo 2.3 : LPG'nin taşıtlarda en yaygın kullanıldığı ülkeler.

| Ülke                | Tüketim (bin ton) | Taşıt adedi (×1000) | Dolum istasyon adedi |
|---------------------|-------------------|---------------------|----------------------|
| Kore                | 4.450             | 2.300               | 1.611                |
| Türkiye             | 2.490             | 2.394               | 8.700                |
| Rusya               | 2.300             | 1.282               | 2000                 |
| Polonya             | 1.660             | 2.325               | 5.900                |
| İtalya              | 1.227             | 1.700               | 2.773                |
| Japonya             | 1.202             | 288                 | 1.900                |
| Avustralya          | 1.147             | 655                 | 3.200                |
| Tayland             | 927               | 473                 | 561                  |
| Çin                 | 909               | 143                 | 310                  |
| Meksika             | 837               | 535                 | 2.100                |
| Dünya geneli toplam | 22.866            | 17.473              | 57.150               |

2000-2010 yılları arasında LPG talebi %60 oranında artmıştır. Dünya LPG tüketiminin %53'ünün oluşturan ilk 5 ülke ile birlikte küçük pazarlarda bu talep artmaya devam etmektedir.

#### 2.2.4.3. LPG'nin avantaj ve dezavantajları

LPG; yaklaşık 50 yıldır motorlu taşıtlarda alternatif yakıt olarak kullanılmaktadır. 8,2 bar (820 kPa) basınç altında sıkıştırıldığında yoğunlaşarak sıvı haline geçebilmektedir. LPG'nin gaz halindeyken sahip olduğu hacim sıvı haldeki hacminden 250 kat daha fazla olduğu için sıvı halde depolanabilmektedir. Bu özelliği LPG'ye önemli bir avantaj sağlamaktadır (Acaroğlu, 2012).

LPG'nin ısı kapasitesi yüksek olduğu için düşük yakıt tüketiminde yüksek motor gücü elde edilmesini sağlar. LPG yapısında neredeyse kükürt içermediği için motordaki kükürt dioksitin azaltılmasında önemli avantaja sahiptir. Böylece motorun kullanım ömrünü

uzatır. Ayrıca LPG'deki C/H oranı benzin ve motorine kıyasla daha düşüktür. Dolayısı ile CO<sub>2</sub> emisyonu bakımından daha avantajlı bir yakıttır (Rimkus ve diğ., 2017).

LPG'nin dizel motorlarda alternatif yakıt olarak kullanımı; özellikle dizel motorlar için önemli bir sorun olan NO<sub>x</sub>, is ve PM emisyonlarını azaltmaktadır. Ancak, CO ve HC emisyonlarını kötüleştirdiği bilinmektedir (Ergen G., 2011). Ayrıca, konvansiyonel LPG dönüşüm sistemleri; Yakıt tankı ve diğer elemanlarından dolayı araca ek ağırlık getirmektedir. Böylece, yakıt deposu bagaj hacminde daralmaya sebep olmaktadır. LPG'nin benzinli motorlarda pilot yakıt olarak kullanımı sonucunda motor çıkış gücünde %2 ila %3'lük bir kayıp oluşabilir (MEB., Motorlu Araçlar Teknolojisi, 2013).

LPG, neredeyse yapısında hiç sülfür molekülü barındırmaz. Böylece; motorda, benzin ya da motorin yerine LPG'nin kullanılması motordaki sülfür dioksitin azalmasında önemli bir avantaj sağlamaktadır. Çünkü, sülfür oksitler motorda aşınmaya sebep olur. Bu görünümde; dizel ile birlikte LPG kullanmak motor ömrünü uzatacaktır (Saleh, 2008). LPG'nin yanması sonucu karbon molekülleri oluşmayacağı için motor yağının ömrü uzayacaktır. LPG'nin yüksek oktan sayısına sahip olmasından dolayı sıkıştırma oranının yükseltilmesine, dolayısıyla motor veriminin yükseltilebilmesine imkân vermektedir (MEB., Motorlu Araçlar Teknolojisi, 2013).

LPG 0,7-0,8 Mpa basınç ve atmosfer sıcaklığı altında sıvılaştırılabilir. Dolayısı ile diğer gaz yakıtlara kıyasla depolanması ve taşınabilmesi daha kolaydır. LPG, diğer gaz yakıtlarla karşılaştırıldığında; yüksek kalorifik değere, ayrıca yüksek oktan sayısına fakat düşük setan sayısına sahiptir. Bu durum, LPG'nin dizel motorlarda pilot yakıt olarak kullanılmasını imkansız kılmaktadır (Ashok ve diğ., 2015).

LPG, benzin (4-12) ve dizel (8-21) ile karşılaştırıldığında birim molekül başına düşük karbon içeriği (propan için üç ve bütan için dört) nedeniyle temiz bir yakıt olarak kabul edilmektedir. Bu durum LPG'yi gelecekteki emisyon düzenlemeleri için ilgi çekici hale getirmiştir. Fiyat rekabet gücü ise LPG'nin bir başka avantajıdır (Kim ve diğ., 2016).

LPG, yapısında neredeyse hiç sülfür kirleticilerine sahip değildir. Motordaki sülfür dioksitin azalması önemli bir avantajdır. Çünkü, sülfür oksitler motorda aşınmaya sebep olur. Bu görünümde; dizel ile birlikte LPG kullanmak motor ömrünü uzatacaktır. Ayrıca LPG, kullanışlı bir alternatif yakıt olarak dikkat çekmektedir. LPG'nin; yenilenebilir kaynaklardan elde edilebilmesi ve doğası gereği temiz bir yanma sağlaması nedeniyle



geleceğin ana enerji kaynağı olacağı düşünülmektedir. LPG, temiz ve yenilenebilir olduğu için yaygın olarak umut vadeden bir ulaşım yakıtı olarak kabul edilmektedir. Ek olarak, LPG kusursuz performans ve düşük emisyonlar sağladığı için LPG'li araçlar düşük kirliliğe sahip ve ekonomik araçlar olarak hızlı bir şekilde gelişmeye başlamıştır. Benzinli ve dizel motorlarda bazı yeni yakıtların ve LPG karışımlarının kullanımı üzerine yayınlanmış birçok araştırma mevcuttur (Saleh, 2008).



## **BÖLÜM 3. KİRLETİCİ EMİSYONLAR VE KONTROL YÖNTEMLERİ**

Gezegeneimizin ekosistemi, kirletici emisyon kaynaklarından güçlü şekilde etkilenmektedir. Özellikle taşıt kaynaklı emisyonlar günümüzün en büyük çevre kirliliği kaynağıdır (Kumaraswamy ve Prasad, 2012). Sıradan hidrokarbon yakıtların neden olduğu başlıca kirleticiler; yanmamış ve kısmi yanmış hidrokarbonlar, karbonmonoksit, azot oksitler, karbondioksit ve insan sağlığı için zararlı katı partikül maddelerdir (Rimkus ve diğ., 2017). Taşıtlardaki kirletici emisyonun en büyük kaynağı motor içinde, yanma sonucu oluşan egzoz gazlarıdır. Hidrokarbon emisyonunun yaklaşık % 60' ı, karbonmonoksit, azot oksitler, kükürtdioksit, partiküller (is) ve kurşun bileşiklerinin tümü yanma sonucu oluşmakta ve egzoz gazları ile atmosfere atılmaktadır (Ayhan, 2009).

### **3.1. Dizel Motor Kaynaklı Kirletici Egzoz Gazları**

Konvensiyonel dizel motorların, yakıt maliyeti ve verim gibi sağladığı avantajlara rağmen yüksek silindir içi sıcaklıklarından dolayı yüksek oranda NO<sub>x</sub> ve motorinin yapısında büyük oranda karbon atomu barındırması dolayısı ile partikül madde oluşturduğu bilinmektedir. Bu durum, dizel motorları çevre ve emisyon normları bakımında elverişsiz duruma düşürmektedir.

#### **3.1.1. Hidrokarbonlar (HC)**

Dizel motorlarında silindir içerisine gönderilen yakıtın eksik yanması ya da yakıt sisteminde meydana gelen buharlaşmalar sonucunda hidrokarbon emisyonları oluşmaktadır. Hidrokarbon emisyonları yaklaşık olarak motora giren yakıt miktarının % 1–1.5' ini oluştururlar (Ayhan, 2009). En önemli HC oluşum mekanizmaları olarak; yanma odası içinde bulunan boşlukların hava-yakıt karışımı ile dolması, yakıtın yağ

tabakası içerisine soğurulması, silindir içerisinde kalan sıvı yakıtın film etkisi göstermesi, supap yatak boşluklarındaki sızıntılar ve soğuk çalışma şartlarıdır. Yanma odasında ilerleyen alev soğuk silindir cidarlarına temas ettiğinde sönebilmektedir. Bu esnada silindir cidarlarında oksidasyon reaksiyonları kötüleşmekte, yanma tamamlanamamakta hidrokarbon açığa çıkmaktadır (Uyumaz ve diğ, 2017).

Özellikle yüksek motor devirlerinde tam yanmanın gerçekleşebilmesi için silindir içerisinde yeterli hava bulunamadığından yani zengin karışımla çalışma durumunda ( $\lambda < 1$ ) HC emisyonları artacaktır. Diğer taraftan özellikle düşük devirlerde, karışım fakirleştiğçe ( $\lambda > 1$ ) belirli noktadan sonra düşük alev yayılma hızından dolayı yakıtın tamamı yanmadan dışarı atılacak ve HC emisyonları yine artacaktır.

### 3.1.2. Karbonmonoksit (CO)

Yeryüzünde üretilen karbonmonoksitin yaklaşık olarak %70' den fazlası taşıt kaynaklıdır (Çavgun, 2019). Yanma ürünleri arasında karbonmonoksit bulunmasının ana nedeni oksijen ile yakıtın buluşmamasıdır. Karbonmonoksit, motorun silindirlerindeki kötü yanma sonucunda, silindire alınan yakıtın bir kısmının, silindir içerisinde yanarken yetersiz oksijenden dolayı tam yanmaması ve yakıt molekülünün 2 yerine 1 oksijen ile birleşmesi ile ortaya çıkan zehirli bir gazdır (MEB., Motorlu Araçlar Teknolojisi, 2011).

Temel olarak CO oluşumu hava fazlalık katsayısı (HFK)'nin kuvvetli bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Yanma sırasında oluşan, CO oluşumu (Denklem 3.1)'de verilen su gazı dengesi denklemi ile belirlenmektedir (Tasarım Dizel Emisyonları, 2010);



Temel CO oluşum nedenleri olarak; eksik yanma, düşük gaz sıcaklıkları ya da kısa kalma süresi gösterilmektedir. Motor yükünün artmasıyla silindir içerisine enjekte edilen dizel yakıtın tam yanması için yeterli havanın silindir içerisine alınamamasından dolayı eksik yanmanın gerçekleşmesiyle CO emisyonları oluşmaktadır (Saleh, 2008). Düşük yüklerde motor oldukça fakir karışım ile çalıştığı ve sıcaklıklar düşük olduğu için CO oksidasyonu az olmaktadır. Motor yükü arttıkça, sıcaklıklarda arttığından CO' nun dönüşümünü sağlayan reaksiyonlar hızlanmakta ve CO emisyonu azalmaktadır. Ancak yükün ve buna bağlı olarak HFK' nin belirli bir değerin üzerine çıkması durumunda, sıcaklıklar yüksek

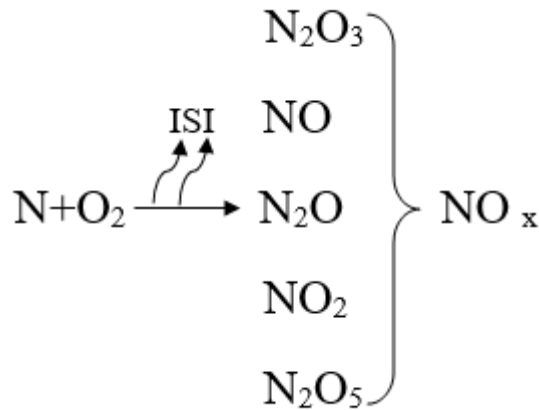
olmasına karşın, oksijen konsantrasyonu az olduğundan ve reaksiyon için zaman kısıtlı kaldığı için CO emisyonu tekrar artış göstermektedir (Ayhan, 2009).

### 3.1.3. Karbondioksit (CO<sub>2</sub>)

Silindir içerisine yeteri kadar hava girmesi durumunda yani yanma olayının eksiksiz gerçekleşmesi durumunda, 1 karbon atomunun 2 oksijen atomuyla birleşmesi sonucunda karbondioksit emisyonları oluşmaktadır. Karbondioksitin egzoz gazları içerisindeki en zararsız gaz olduğu bilinmektedir. Çünkü, egzozdan havaya karışan karbondioksit bitkiler tarafından fotosentez yoluyla oksijene dönüştürülebilmektedir. Fakat, küresel çapta atmosferdeki karbondioksit miktarı sürekli olarak artmaktadır. Böylece, atmosferdeki karbondioksit miktarının artması sera gazı etkisine neden olarak sıcaklıkları arttırmaktadır. Bu durum, çevre ve insan sağlığını tehdit etmektedir.

### 3.1.4. Azot oksitler (NO<sub>x</sub>)

Azot oksitler (NO<sub>x</sub>); yanma odası sıcaklıkları çok yüksek değerlere ulaştığında meydana gelmektedir. 1371 °C ya da daha fazla sıcaklıklarda, azot ve oksijen yanma odasında kimyasal olarak birleşerek azot oksitleri oluşturmaktadır. Azot oksitler; hidrokarbonlar ve güneş ışığı ile birleşerek yaygın olarak duman olarak bilinen havadaki kirli pus miktarını arttırmaktadır. (Kumaraswamy ve Prasad, 2012). Şekil 3.1’de NO<sub>x</sub> oluşum reaksiyonu verilmektedir (MEB., Motorlu Araçlar Teknolojisi, 2011).



Şekil 3.1 : NO<sub>x</sub> oluşum reaksiyonu.

Motordan salınan egzoz gazları içerisindeki azot oksitlerin hacimsel olarak % 90' ını azot oksit (NO), % 5' ini azotdioksit (NO<sub>2</sub>) ve geri kalan % 5' ini ise diazotoksit (N<sub>2</sub>O), diazotetraoksit (N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ve diazotpentaoksit (N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) oluşturmaktadır (Ayhan, 2009). NOx'ler içerisinde NO kokusuz ve renksiz bir gazdır. NO<sub>2</sub> ise kırmızı kahverengi renkli, kokusu kötü ve cildi tahriş eden bir gazdır. NO, yanma sonucu ürünlerde genel olarak bulunmasına rağmen, bir kısmı atmosfere atıldıktan sonra NO<sub>2</sub> 'ye dönüşmektedir. NO gazı felce neden olabilmektedir (Ayhan, 2009).

Dizel motorlarda, hava/yakıt oranı arttıkça yüksek yüklerde maksimum basıncın dolayısıyla maksimum sıcaklığın artması, karışımın daha geniş bir bölgede stokiyometrik orana yakın bir değerde yanmasını sağlamaktadır. Bu durumda NOx oluşumu artmaktadır (Uyumaz ve diğ., 2017). Yanma sistemlerinde Azot oksit oluşumu konusunda birçok mekanizma göz önüne alınmıştır. NO oluşumu için kabul edilen en yaygın model, (Denklem 3.2, Denklem 3.3 ve Denklem 3.4)'de verilen zeldowich mekanizmasıdır (Tasarım Dizel Emisyonları, 2010).

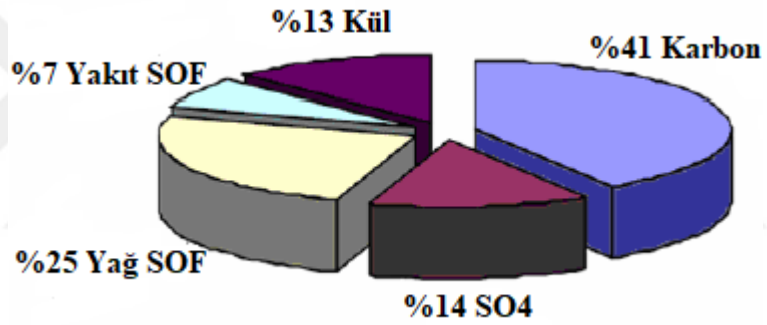


Azot oksit oluşumunda gerekli olan üç unsur oksijen sıcaklık ve zamandır. İçten yanmalı motorlarda sıcaklıklar 1700-3000 K değerlerine ulaşabilmektedir. Dizel motorlara kıyasla benzinli motorlarda daha yüksek sıcaklıklar oluşmasına rağmen HFK'nın yaklaşık olarak 1 olmasıyla yanma ortamında serbest oksijenin az olması sebebiyle NOx emisyonları önemli sorun oluşturmamaktadır. Dizel motorlarda NOx emisyonları büyük sorun oluşturmaktadır. Benzin motorları kadar dizel motorlarda sıcaklık değerleri yüksek olmasa da, fazla oksijenin (HFK > 1,3) olması nedeniyle NOx emisyonları oluşmaktadır (Çavgun, 2019).

### 3.1.5. Partikül maddeler (duman-is)

Dizel motorların partikül madde emisyonları bakımından dezavantajlı olduğu bilinmektedir. Dizel yakıtın yapısında benzine kıyasla daha fazla karbon atomu barındırması buna yol açmaktadır. Yakıt içerisindeki hidrojen atomları karbon atomlarına göre daha aktif şekilde oksijen ile tepkimeye girerler. Karbon atomları, tepkimeye girecek yeteri kadar oksijen atomu ve zaman bulamadığı durumda partikül madde olarak egzozdan dışarı atılırlar.

Dizel egzoz partikülleri, toplanmış katı karbonlu malzeme, kül, uçucu organik ve kükürt bileşiklerinden oluşur. Şekil 3.2’de ağır hizmet tipi dizel motorundan kaynaklanan partikül madde kompozisyonları ve yüzdeleri verilmektedir (MEB., Motorlu Araçlar Teknolojisi, 2011).



Şekil 3.2 : Dizel partikül madde kompozisyonları.

### 3.1.6. Dizel motorların çevre ve insan sağlığına zararları

Dizel motorların; benzinli motorlara kıyasla, düşük yakıt tüketimi ve yüksek sıkıştırma oranı gibi avantajlara sahip oldukları bilinmektedir. Fakat, bu avantajların yanında, konvansiyonel dizel motorların çevre ve insan sağlığına etki eden dezavantajlı olduğu durumlar da bulunmaktadır. Bunların başında, partikül madde (ppm) olarak bilinen is emisyonları gelmektedir. Konvansiyonel dizel motorlarda is emisyonlarının benzinli motorlara kıyasla fazla olmasının sebebi; dizel motorlarda yanmanın difüzyon yanma şeklinde gerçekleşmesidir. Dizel yakıt içerisinde bulunan karbon atomları, özellikle yüksek devirlerde silindir içerisine yeterli miktarda hava alınmadığında yanmak için gerekli oksijen molekülü bulamazlar. Bu durumda, diğer egzoz gazları ile birlikte is ve kurum olarak atmosfere atılır.

Soluduğumuz hava içerisinde bulunan partikül maddeler özellikle uzun süre maruz kaldığı durumlarda kanser gibi ciddi sağlık sorunlarına neden olabilmektedir. Birçok farklı bileşenden oluşmuş olan partikül maddeler akciğerdeki nemle bileşerek aside dönüşmektedir. Soluduğumuz hava içerisinde bulunan partikül maddeler kanımıza karışarak kan içerisindeki oksijen oranını düşürmekte ve solunum problemlerine sebep olabilmektedir. Bu durumda oksijen kaybının giderilebilmesi için kalbin daha fazla çalışması gerektiğinden kalp üzerinde ciddi bir baskı oluşturmaktadır. Özellikle ağır sanayi bölgelerinde ve kalabalık şehirlerde yaşayan çocuklarda, üst solunum yolu hastalıkları görülme riski daha yüksektir (MEB., Motorlu Araçlar Teknolojisi, 2011).

Diğer taraftan; konvansiyonel dizel motorların dezavantajlı olduğu bir başka durum NO<sub>x</sub> yani azot oksit emisyonlarıdır. Yüksek silindir içi sıcaklıklarından dolayı meydana gelen azot oksitler çevre ve insan sağlığı açısından oldukça tehlikelidir (MEB., Motorlu Araçlar Teknolojisi, 2011). NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve benzeri bileşiklerin tümü azot oksit (NO<sub>x</sub>) olarak bilinmektedir. Azot oksitlerin çevre için en önemli etkisi; atmosferde doğal gaz çevrimine girerek nitrik asit (HNO<sub>3</sub>) oluşumuyla sonuçlanan zincirleme reaksiyonları tamamlamalarıdır. Atmosferdeki HNO<sub>3</sub> oluşumu ise asit yağışının oluşmasını etkiler. Bu yağışlara maruz kalan insanlarda akciğer fonksiyonlarında bozulmalar meydana gelmektedir.

Azot oksitlerin insan sağlığı için etkileri ise şu şekilde açıklanabilir: Azot oksitler, kandaki hemoglobin ile birleşmektedir. Ciğerdeki nemle birleşerek nitrik asit

oluştururlar. Oluşan asit miktarının konsantrasyonunun azlığı nedeniyle etkisi de az olmaktadır. Ancak zamanla birikerek solunum yolu hastalıkları bulunan kişiler için tehlike oluşturmaktadır (Kelen, 2014; Uyumaz ve diğ, 2017).

Kokusu ve rengi olmayan bu gaz çok zehirlidir. Oksijene kıyasla CO gazının oksijen taşıma görevi olan hemoglobine bağlanma kabiliyeti 200 kat fazladır. Bundan dolayı CO gazının bulunduğu ortamdaki insanın solunumla aldığı CO kanın içindeki hemoglobine zarar verir, vücuttaki hücrelerin oksijen almasına engel olarak zehirlenme ve boğulmaya sebep olur. Solunum yoluyla alınan CO akciğerden vücuda oksijen taşınmasını engeller. Kalp yetmezliği belirli seviyede olan insanlarda tehlike daha fazladır (Çavgun, 2019).

### 3.2. Dizel Motorlarında Emisyon Kontrol Yöntemleri

Dizel motorlar 200-5000 devir aralığını kapsayan uygulamalar için; yüksek enerji gücü, dayanıklılık ve düşük CO emisyonları sağlamaktadır. Ancak, dizel motorların son NO<sub>x</sub> ve PM (partikül madde) emisyonları mevzuatlarından dolayı emisyon standartlarını karşılaması çok zor hale gelmiştir. Tablo 3.1'de Avrupa binek araç egzoz emisyon standartları ve yürürlüğe girme tarihleri verilmektedir (Emisyon Standartları, 2019).

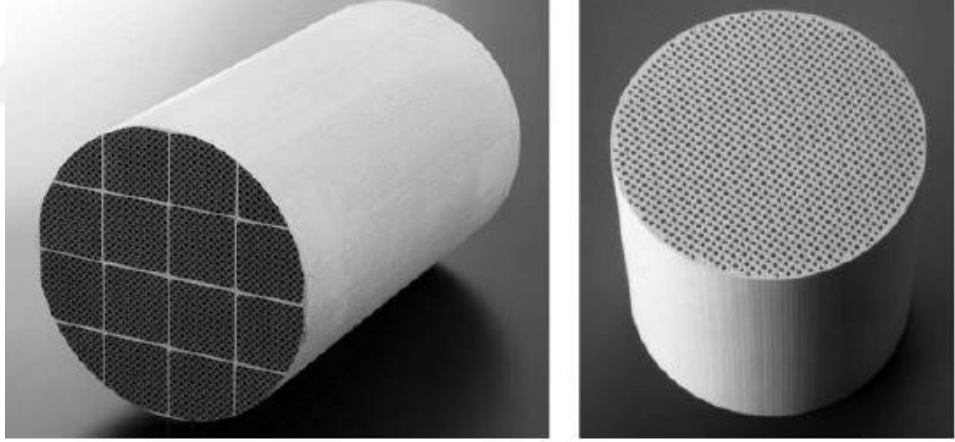
Tablo 3.1 : Avrupa binek araç egzoz emisyon standartları.

|        | Tarih | Dizel        |              |                           |              | Benzin       |              |                           |              |
|--------|-------|--------------|--------------|---------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------------------|--------------|
|        |       | CO<br>(g/km) | HC<br>(g/km) | NO <sub>x</sub><br>(g/km) | PM<br>(g/km) | CO<br>(g/km) | HC<br>(g/km) | NO <sub>x</sub><br>(g/km) | PM<br>(g/km) |
| Euro-1 | 1992  | 2,72         | 0,49         | 0,48                      | 0,14         | 2,72         | 0,49         | 0,48                      | -            |
| Euro-2 | 1996  | 1            | 0,35         | 0,35                      | 0,08         | 2,20         | 0,25         | 0,25                      | -            |
| Euro-3 | 2000  | 0,64         | 0,06         | 0,50                      | 0,05         | 2,30         | 0,20         | 0,15                      | -            |
| Euro-4 | 2005  | 0,50         | 0,05         | 0,25                      | 0,025        | 1,00         | 0,10         | 0,08                      | -            |
| Euro-5 | 2009  | 0,50         | 0,05         | 0,18                      | 0,005        | 1,00         | 0,10         | 0,06                      | 0,005        |
| Euro-6 | 2014  | 0,50         | 0,09         | 0,08                      | 0,005        | 1,00         | 0,10         | 0,06                      | 0,005        |



Tabloda görüldüğü gibi hem dizel hem de benzinli araçlar için egzoz emisyon standartlarını sağlamak yıllar geçtikçe güçleşmektedir. Mühendisler ve bilim insanları bu standartları sağlayabilmek için; Egzoz gazı geri gönderimi (EGR), Katalitik konvertör, DPF (Dizel Partikül Filtresi) ve SCR (Seçici Katalitik İndirgeme) gibi yanma öncesi ve sonrası kullanılan çeşitli teknolojiler geliştirmiştir (Elnajjar ve diğ, 2013).

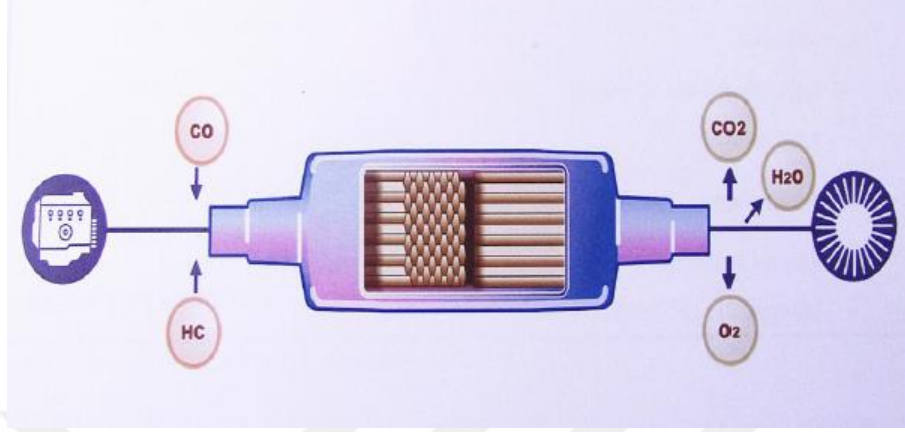
Dizel partikül filtreleri partikül maddelerin azaltılmasında teknik olarak en uygun çözümlerden birisi olarak düşünülmektedir. Dizel partikül filtresi, egzoz konumlandırıldıktan sonra egzoz gazlarının sistem boyunca geçişine izin verirken katı ve sıvı partikül madde emisyonlarını içinde hapsedmektedir. Genellikle bir yanma sonrası PM kontrol sistemi dizel egzozundaki PM veya isi tutabilen gözenekli metal veya seramik bir filtreden oluşur. Filtreden, düşük bir basınç azalması ve yüksek is tutma kapasitesine sahip olması istenir. Günümüzde ticarileşmiş dizel partikül filtreleri silikon karpit, kordierit veya metalden yapılmaktadır. Şekil 3.3’de karpit ve kordierit DPF örnekleri verilmektedir (MEB., Motorlu Araçlar Teknolojisi, 2011).



Şekil 3.3 : Karpit (solda) ve kordierit (sağda) DPF'leri.

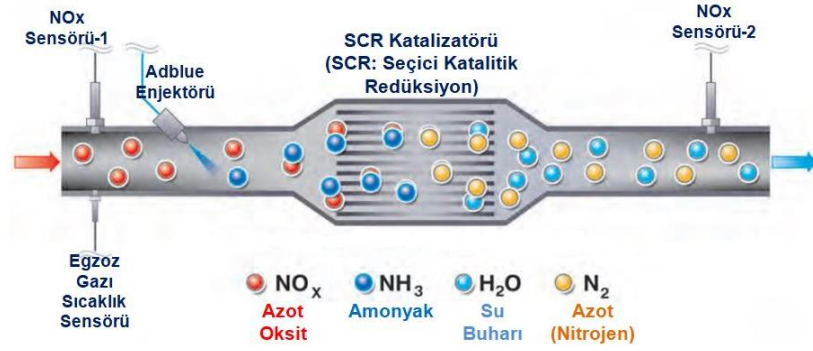
Dizel motorlardaki bir başka emisyon kontrol yöntemi katalitik konvertördür. Katalizörün görevi, kirletici gazların zararsız gazlara dönüşümünü sağlamaktır. Dizel motorlarda kullanılan katalizörler “oksidasyon katalizörü” olarak adlandırılır ve karbon monoksit ile yanmamış hidrokarbonları dönüştürür. Katalizör, paslanmaz çelikten bir dış muhafazadan oluşmaktadır. Muhafazanın içinde, petek yapısında bir seramik blok bulunmaktadır. Bazı araçlar, daha etkin olarak kirliliğin önlenmesini sağlayan bir ön katalizörle donatılmıştır.

Şekil 3.4’de katalitik konvertörün çalışma mantığı verilmektedir. (MEB., Motorlu Araçlar Teknolojisi, 2013).



Şekil 3.4 : Katalitik konvertör çalışması.

Euro standartlarına uymak amacıyla, yanmayı kötüleştirmeden düşük emisyon üretmek için dizel motorlarda AdBlue katkı maddesi ve SCR kullanılmaya başlanmıştır. SCR’de, metal, katalizör üzerine AdBlue isimli %67,5 sıvılaştırılmış su ve %32,5 üreden oluşan su bazlı çözelti püskürtülüp NOx’in atmosfer için zararsız olan nitrojen ve su buharına dönüşümü sağlanmaktadır. Egzoz manifolduna entegre bir şekilde çalışan SCR ile birlikte NOx atılımı %85, kurum partiküllerinin atılımı ise %40 oranında azaltılmaktadır. SCR sisteminde kullanılan AdBlue için yakıt tankından ayrı olarak birde AdBlue tankına ihtiyaç duyulmaktadır ve bu katkı maddesi akaryakıt istasyonlarından temin edilmektedir. AdBlue tankı içerisindeki katkı maddesi miktarının takibi araç içerisindeki gösterge ekranından yapılmaktadır. AdBlue bitince emisyon değerleri yükseleceği için motor çalışmamaktadır. (Mühendis Beyinler, 2018). Şekil 3.5.’de SCR çalışma şeması verilmektedir (Otomobil Teknolojisi, 2018).



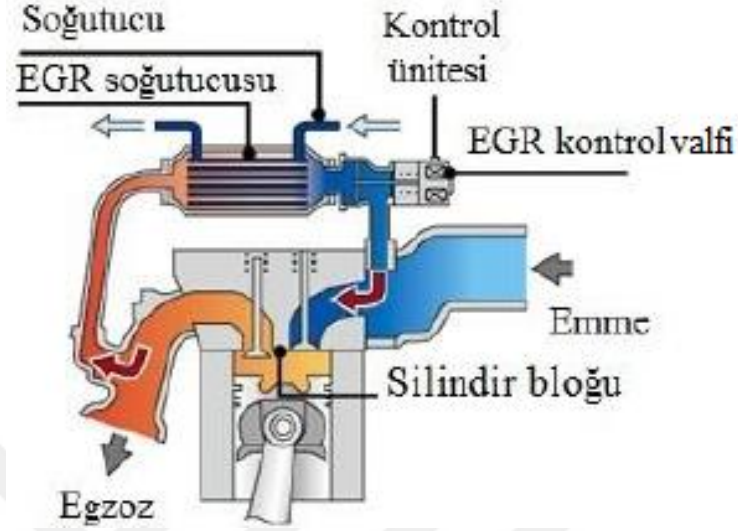
Şekil 3.5 : SCR çalışma mantığı.

### 3.2.1. EGR (egzoz gazı geri gönderim) sistemi

Yanma odası sıcaklıklarının 1371 °C ya da daha yüksek sıcaklıklara çıkması durumunda azot ve oksijen yanma odasında kimyasal olarak birleşerek azot oksitler (NO<sub>x</sub>) olarak bilinen emisyonları oluşturmaktadır (Kumaraswamy ve Prasad, 2012). EGR sistemi, yanma sonucu oluşan egzoz gazlarının bir kısmının tekrar silindirlere gönderilmesini sağlayan bir işlemdir. EGR ile silindir içerisine giren oksijenin bir kısmının yerini atık gazlar aldığından lokal oksijen konsantrasyonu azalmaktadır. Bu durum yakıt ve oksijen moleküllerinin reaksiyona girme ihtimalini azaltır. Buna bağlı olarak reaksiyon hızı ve lokal alev sıcaklığı düşerek, NO<sub>x</sub> oluşumu azalmaktadır (Ayhan, 2009).

EGR, genellikle %10 ila %20 oranlarında uygulanmaktadır. EGR oranı arttıkça azot oksit emisyonları azalmaktadır. Fakat hava fazlalık katsayısı (HFK)'nin azalmasından dolayı is emisyonları, partikül madde ve yakıt tüketimi artan EGR oranlarıyla kötüleşebilmektedir. Ayrıca, silindir içerisindeki oksijen miktarının azalması CO

emisyonlarının artmasına neden olacaktır. (Tasarım Dizel Emisyonları, 2010). Şekil 3.6'da EGR sisteminin çalışma şeması verilmektedir (Uyumaz ve diğ., 2017).



Şekil 3.6 : EGR sistemi.

### 3.2.2. EGR sistemini oluşturan parçalar

#### 3.2.2.1. EGR valfi

EGR valfi, elektropnömatik bir valftir. Motor bölmesinde bulunur ve egzoz gazı devirdaim işlemine kumanda etmek için kullanılır. Egzoz gazı geri dönüşüm sistemi kullanılarak egzoz gazındaki azot oksitler azaltılır. Egzoz gazının bir kısmı emilen havaya karıştırılır. Böylece yanma odasındaki yanma reaksiyon hızı azalır ve yanma sıcaklığı düşer. Düşük yanma sıcaklığı, nitrojen oksit emisyonunun azaltılmasını sağlamaktadır. Motor tam yükte çalışırken egzoz gazı devirdaimi gerçekleştirilmez çünkü iyi bir güç kazancı için yanma odasında fazla miktarda oksijen bulunması gerekir. Egzoz gazı devirdaimi, motor kontrol ünitesindeki (ECU) bir tabloya göre kontrol edilir. Bunun için motor kontrol ünitesi EGR valfini kullanır. EGR valfini kumanda etmek için kullanılan kontrol basıncı sinyalin durumuna bağlı olarak belirlenir. Bu şekilde devirdaim halindeki egzoz gazı miktarı belirlenmektedir (MEB., Motorlu Araçlar Teknolojisi, 2013).

### 3.2.2.2. EGR soğutucusu

Günümüz modern dizel motorlarında kullanılan EGR sistemleri üzerinde soğutucular bulunmaktadır. Çok yüksek sıcaklıkta olan egzoz gazı içeri alınmakta olan temiz havanın sıcaklığını arttırırken yoğunluğunu azaltmaktadır. Bu durum içeri alınan havanın normalden çok yüksek olmasından dolayı yanma sonu sıcaklığının artmasına ve NO<sub>x</sub> oluşumunun hızlanmasına neden olabilmektedir. Ayrıca içeri alınan havanın yoğunluğunun azalması hacimsel verimin azalmasına ve performans kayıplarına neden olabilmektedir (Uyumaz ve diğ., 2017). Soğutucu kullanılarak, geri dönen egzoz gazı manifolda girmeden önce soğutulurken, içerisine karıştığı havayı ısıtması ve volümetrik verimi düşürmesi önlenir. EGR soğutucusu soğutma suyu devresine bağlıdır. Soğutma yüzeyini büyütmek için metal gövde petek biçimindeki kanallarla donatılmıştır. Geri dönen egzoz gazı kanalların içinden geçer ve bu esnada ısınısını soğutma suyuna aktarır. Egzoz gazının soğutulması sayesinde yanma sıcaklığı daha da düşer ve azot oksitlerde de ilave bir düşüş sağlanmış olur (MEB., Motorlu Araçlar Teknolojisi, 2013).

## BÖLÜM 4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada; bir dizel motorunda dizel yakıtta ek ikinci yakıt olarak LPG kullanımının, motor performansı, egzoz emisyonları ve motor indike parametreleri üzerine etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Deneylere başlamadan önce 1000-2500 d/d aralığında 35, 32, 29 ve 27° avans açıları için optimum avans taraması yapılmıştır. Motor performans ve emisyon değerleri dikkate alındığında en uygun püskürtme avansının 29 °KMA olduğuna karar verilmiştir. Deneyler 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2200 ve 2400 d/d ve 29 °KMA statik püskürtme avansında gerçekleştirilmiştir. Ölçümlere başlamadan önce motorun rejim sıcaklığına gelmesi sağlanmıştır. Daha sonra saf dizel yakıt kullanılarak standart motor deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ardından tek silindri dizel motor LPG-dizel çift yakıtla çalışılabilir duruma getirilerek LPG-dizel çift yakıt deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler değerlendirildiğinde LPG-dizel çift yakıt çalışmanın NOx emisyonlarını arttırdığı tespit edilmiştir. Son olarak; artan NOx emisyonlarını düşürmek için deney düzeneğine EGR sistemi kurulumu yapılarak LPG-dizel çift yakıt+EGR'li deneyler gerçekleştirilerek motor deneyleri tamamlanmıştır.

### 4.1. Materyal

#### 4.1.1. Deney yakıtları

Deneylerde; Shell, Sakarya/Serdivan istasyonundan temin edilen motorin ve Miks LPG (%30 propan %70 bütan) kullanılmıştır.

Tablo 4.1.'de deneylerde kullanılan motorin ve LPG'nin yakıt özellikleri verilmektedir.

Tablo 4.1 : Motorin ve LPG özellikleri.

| Özellikler      | Birim | LPG (%30 propan %70 bütan)                                    | Motorin                         |
|-----------------|-------|---|---------------------------------|
| Kimyasal formül | -     | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> -C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | C <sub>14</sub> H <sub>29</sub> |

Tablo 4.1 (devam) : Motorin ve LPG özellikleri.

| Özellikler                   | Birim             | LPG (%30 propan %70 bütan) | Motorin |
|------------------------------|-------------------|----------------------------|---------|
| Yoğunluk (15 °C, 1 atm)      | g/cm <sup>3</sup> | 0,562                      | 0,828   |
| Alt ısııl değeri             | Kj/kg             | 45908                      | 43760   |
| Setan sayısı                 | -                 | <3                         | 45-55   |
| Teorik hava gereksinimi      |                   | 15,5                       | 14,5    |
| Kaynama noktası              | °C                | -13                        | 260     |
| Ağırlığa göre kükürt içeriği | -                 | 0,02                       | 14,5    |
| Alt tutuşma sınırı           | % vol.            | 2                          | 0,6     |
| Üst tutuşma sınırı           | % vol.            | 8,7                        | 5,6     |

#### 4.2. Deney Düzeneginin Tanıtımı

Deneyleer Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Otomotiv Anabilim Dalı Deney Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deney düzenegi; deney motoru, yakıt sistemi, kontrol sistemleri ve EGR sistemi olmak üzere 4 ana bölümden oluşmaktadır. Yakıt sistemi; LPG ilavesi için kurulan akış kontrol mekanizması ve akış hattı elemanlarından oluşmaktadır. Kontrol sistemleri ise; dinamometre ve çeşitli ölçüm aletlerinden oluşmaktadır. EGR sistemi ise; akış elemanları, ısı eşanjörü ve kontrol mekanizmasından meydana gelmektedir. Şekil 4.1’de deney düzeneginin genel görünümü, Şekil 4.2’de ise deney düzeneginin şematik görünümü verilmektedir.





#### 4.2.1. Deney motoru

Deneyleerde dört zamanlı, doğal emişli, tek silindirli, direkt püskürtmeli, su soğutmalı ve çanak piston yapılı Süper Star marka bir dizel motor kullanılmıştır. şekil 4.3’de deney motorunun görünümü ve Tablo 4.2.’de deney motorunun teknik özellikleri verilmektedir.



şekil 4.3 : Deney motoru.

Tablo 4.2 : Deney motoru teknik özellikleri.

| Motor tipi                     | Süper Star       |
|--------------------------------|------------------|
| Piston apı [mm]               | 108              |
| Strok [mm]                     | 100              |
| Silindir Sayısı                | 1                |
| Strok Hacmi [dm <sup>3</sup> ] | 0,92             |
| Güç 1500 d/d, [kW]             | 14,7             |
| Enjektör Basıncı, [bar]        | 200              |
| Püskürtme Avansı, [°KMA]       | 29               |
| Maksimum Devir, [d/d]          | 2400             |
| Soğutma Tipi                   | Su               |
| Püskürtme Tipi                 | Direk enjeksiyon |
| Piston tipi                    | anak            |

#### 4.2.2. Dinamometre

Deneylerde; hidrolik dinamometre kullanılmıştır. Motor tarafından üretilen gücün tespiti için dinamometre koluna 0,1 kg hassasiyetinde S tipi Loadcell bağlanmış ve deneylere başlamadan önce Loadcelin kalibrasyonu hassas bir şekilde yapılmıştır. Şekil 4.4’de deneylerde kullanılan dinamometrenin genel görünümü yer almaktadır.



Şekil 4.4 : Deneylerde kullanılan dinamometre.

#### 4.2.3. LPG-dizel çift yakıt sistemi

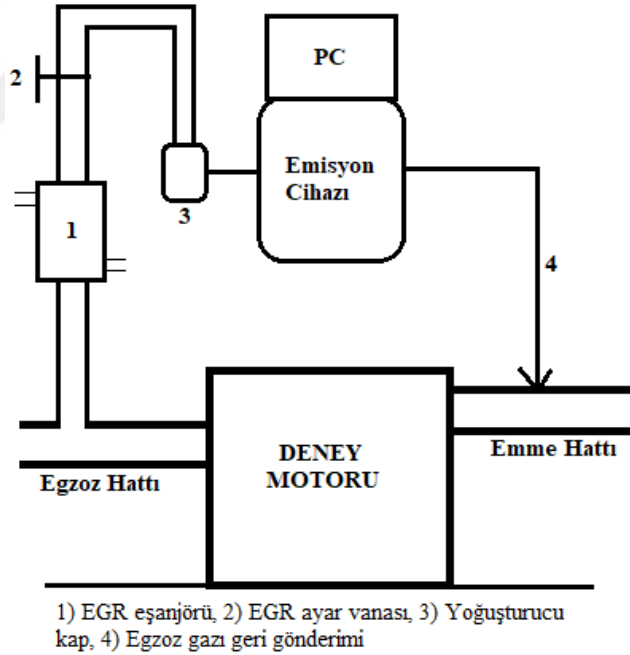
LPG’nin çift yakıt olarak motorda kullanılabilmesi için deney düzeneğine LPG-dizel çift yakıt sistemi kurulumu yapılmıştır. Sistem; LPG yakıt tankı, manometre, akış kontrol elemanları, yakıt enjektörü ve alev kapanından oluşmaktadır. Şekil 4.5’de çift yakıt sistemini oluşturan elemanların bir kısmı verilmektedir.



Şekil 4.5 : Çift yakıt sistemi elemanları.

#### 4.2.4. EGR sistemi

EGR sistemi; akış kontrol elemanları, eşanjör ve su buharı yoğuşturma kabından oluşmaktadır. Şekil 4.6'da sistemi oluşturan elemanların şematik görünümü verilmektedir.



Şekil 4.6 : EGR hattı şematik görünüm

Şekilde görüldüğü üzere, egzoz hattından borular vasıtasıyla gelen egzoz gazı yüksek sıcaklığa sahiptir. Bu yüzden, silindir içerisindeki volümetrik verimi düşürmemesi ve olası bir erken yanmayı engellemek adına sıcak egzoz gazı soğutucu eşanjörden geçirilerek soğutulmuştur. Ardından gerekli hesaplamalar yapılarak belirlenen

oranlardaki egzoz gazı, ayar vanası ile ayarlanarak emme hattından silindir içerisine gönderilmiştir.

#### 4.2.5. Ölçüm elemanları ve göstergeler

##### 4.2.5.1. Dizel yakıt sarfiyatı ölçümü

Deneyleerde kullanılan yakıt miktarını ölçmek için hacimsel ölçüm sistemi kullanılmıştır. Tüketilen dizel yakıt miktarı, silindirik yakıt ölçüm kabının içerisindeki 25 cm<sup>3</sup>'lük dizel yakıt miktarının tüketim süresi ölçülerek tespit edilmiştir. Yakıt tüketim süresi elektronik bir kronometre ile ölçülmüştür. Şekil 4.7'de deneyleerde kullanılan yakıt ölçüm sistemi görülmektedir.



Şekil 4.7 : Dizel yakıt sarfiyatı ölçüm sistemi.

##### 4.2.5.2. LPG sarfiyatı ölçümü

Deneyleer esnasında, motora gönderilen doğalgaz miktarının ölçülebilmesi için, Alicat Scientific marka bir akış ölçer kullanılmıştır. LPG tankından 1 bar basınç ile akış hattına gelen gazın miktarı hassas vana ile ayarlanmıştır. Debi ölçerden geçen LPG, ilave bir yakıt enjektörü ile kademeli olarak motor emme hattından püskürtülmüştür. Deneyleerde kullanılan akış ölçerin görünüşü Şekil 4.8'de yer almaktadır.



Şekil 4.8 : LPG sarfiyatı ölçüm sistemi.

#### 4.2.5.3. Hava sarfiyatı ölçümü

Deneyle esnasında motor emiş hattına gönderilen havanın ölçümünde elektronik hava debi ölçer kullanılmıştır. Bunun yanı sıra, stabil bir akış sağlamak ve etkili bir ölçüm elde edebilmek adına motor ve ölçüm tertibatı arasında silindirik bir hava sönümlenme tankı konumlandırılmıştır. Şekil 4.9’da hava debisi ölçüm tertibatı verilmektedir.



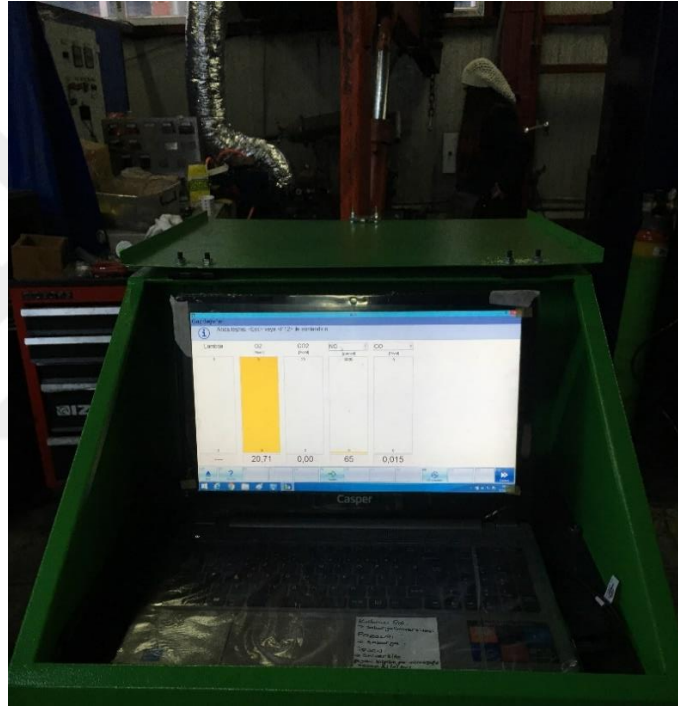
Şekil 4.9 : Hava sarfiyatı ölçüm tertibatı.

#### 4.2.5.4. Emisyon ölçümü

Deneylede; CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> ve HC gibi egzoz gazlarının ölçümü için Şekil 4.10’da görülen MRU Spectra 1600 L marka egzoz gaz analiz cihazı kullanılmıştır. Ayrıca, egzoz

gazı ölçüm cihazına girmeden önce yoğuşma kabından geçirilmiştir. Böylece, egzoz gazı içerisindeki su buharının yoğunlaşması sağlanarak filtrelerin tıkanması ve ölçüm cihazının yanlış ölçüm yapmasının önüne geçilmiştir. Cihaz; gazların egzozdaki miktarlarını yüzde (%) ve ppm (milyonda bir) olarak vermektedir.

Duman koyuluğunun tespitinde ise Bilsa Mode 5000 is ölçer kullanılmıştır. Cihaz yüzde veya K faktörü şeklinde ölçüm yapabilmektedir. Deneylerden önce, emisyon ve duman ölçer cihazlarının kalibrasyonları ve filtrelerin temizlikleri yapılarak stabil bir ölçüm yapılması sağlanmıştır.



Şekil 4.10 : Emisyon ölçüm cihazı.

#### 4.2.5.5. Sıcaklık ölçümü ve göstergeler

Deneyler sırasında; motor soğutma suyu giriş-çıkış sıcaklıkları, ortam sıcaklığı, emme manifold sıcaklığı, egzoz manifold giriş-çıkış sıcaklıkları termokupullar vasıtasıyla ölçülmüştür.

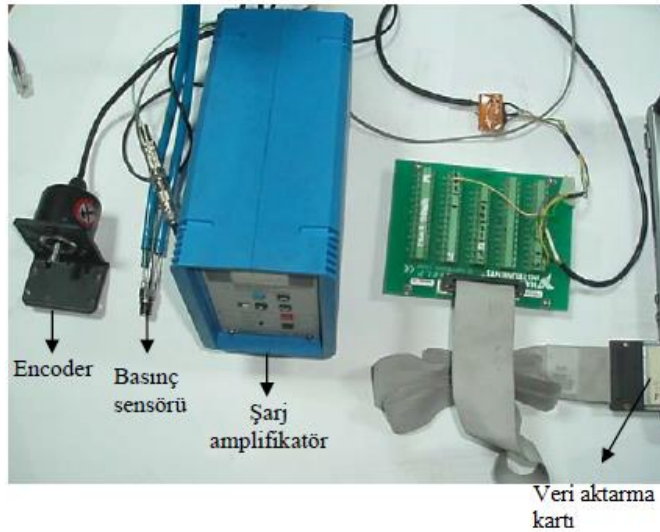
Deneyler esnasında ölçülen motor yük, devir ve sıcaklık değerleri Şekil 4.11’de görülen kontrol panalinde bulunan göstergelerden izlenmiştir.



Şekil 4.11 : Sıcaklık ölçümü ve göstergeler.

#### 4.2.5.6. Silindir içi indike basınç ölçümü

Silindir basıncı ölçümünde Kistler marka 6061B model su soğutmalı piezo-elektrik sensör ve Kistler 5011B model şarj amplifikatör kullanılmıştır. Veri aktarımı için tek kanaldan 500 kHz hızla veri aktaran National Instrument marka AI-16E-4 model veri aktarma kartı, açılal konumun ölçümü için Koyo TRD J1000-RZ model 1000 pals/tur özelliğine sahip encoder kullanılmıştır. Şekil 4.12’de silindir içi basınç ölçme sistemi elamanları verilmektedir.



Şekil 4.12 : Silindir içi basınç ölçüm elemanları

### 4.3. Deney Yöntemi

Motor deneyleri standart dizel yakıt deneyleri, LPG-dizel çift yakıt deneyleri ve LPG-dizel çift yakıt+EGR deneyleri olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır. Belirtilen şekilde tüm motor deneyleri, tam yük (TY) değişken devir olmak üzere; 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2200 ve 2400 d/d'da gerçekleştirilerek; motor yükü, motor devri, yakıt tüketimi, silindir içi indike parametreler ve egzoz emisyon değerleri ölçülmüştür.

Motor deneylerine başlamadan önce enjektör püskürtme avansı kontrol edilerek enjektör püskürtme basıncı 200 bar'a ayarlanmıştır. Ayrıca, motor performans ve emisyon değerleri göz önünde bulundurularak optimum püskürtme avansı tespit edilmiştir. Bunun için; 26, 29, 32 ve 35 °KMA olmak üzere dört farklı avans açısı 1000-2500 d/d aralığında taranmıştır. Veriler değerlendirildikten sonra en uygun püskürtme avansının 29° KMA olduğuna karar verilmiştir.

Ölçüme başlamadan önce motor; 10 dk rölantide, ardından bir süre kısmi yükte çalıştırılarak soğutma suyu ve yağ sıcaklıkları kararlı hale getirilmiştir. Motor soğutma suyu sıcaklığı 75 °C'ye sabitlenmiştir.

Karşılaştırma yapabilmek adına ilk önce motor tam yük şartlarında dizel yakıt ile çalıştırılmıştır. Ardından, LPG-dizel çift yakıt deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada; daha önce belirlenen motor yük değeri gaz kolu yardımı ile %10, %20 ve %30 oranında azaltılmıştır. Ardından, dizel yakıtı ilave olarak, istenilen yük değeri elde edilecek miktarda LPG; ikinci bir yakıt olarak motor emme hattından enjektör yardımı ile kademeli olarak püskürtülmüştür. LPG miktarı; enjektör kontrol ünitesi ve ayarlanabilir vana yardımı ile belirlenmiştir.

Son olarak LPG ilavesi ile artan NO<sub>x</sub> emisyonlarını düşürebilmek adına EGR'li deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada; %20 ve %30 LPG'ye ek olarak %10, %15 ve %20 oranlarında egzoz gazı motor emme hattına geri gönderilmiştir.

Tüm deneyler tamamlandıktan sonra elde edilen veriler grafiklerde karşılaştırmalı olarak verilmiş, sonuçlar yorumlanarak sunulmuştur.



#### 4.4. Belirsizlik Analizi

Deneysel çalışmalarda, elde edilen sonuçlar kadar önemli bir başka nokta; ölçülen değerlerin doğruluğudur. Sonuçların doğruluğunu etkileyen en önemli etken ise, deneyler sırasında farklı nedenlerden ortaya çıkabilecek hatalardır. Literatürde belirtilen standartlara uygun olarak kurulan bir deney düzeneğinde yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilerde, hata iki farklı şekilde ortaya çıkabilir. Bunlardan biri, deney setinin ve ölçü araçlarının yapısından kaynaklanan hatalar yani kalibrasyon hatalarıdır. Diğeri ise, deneyi yapan kişiden yani insan kaynaklı hatalardır (Hitit Üniversitesi, 2019). Dolayısı ile meydana gelebilecek bu hata unsurlarına karşı bu deneysel çalışmada ölçüm esnasında kullanılan cihazların belirsizlikleri ve ölçümden kaynaklanan belirsizlikler belirsizlik analizi ile hesaplanmıştır.

Deneyler esnasında her ölçüm noktasında 2 deneyin ortalaması alınmıştır. Elde edilen ortalamaların standart sapması hesaplanarak şüpheli verilerin atılması ya da tekrar edilerek güvenilir limiti içerisine sokulabilmesi için Chauvenet kriterine tabi tutulmuştur. Tek bağımsız parametrenin ölçümünde ölçümün ortalamasındaki belirsizlik (Denklem 4.1);

$$S_{\bar{x}} \approx \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (4.1)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Burada;

N=tekrarlı ölçmelerin sayısı,

$\sigma$ =ölçümün standart sapması,

$S_{\bar{x}}$ =yapılan büyüklüğün ortalamasındaki belirsizliğini ifade etmektedir.

Sistematik belirsizliğin olmadığı durumda sonlu sayıdaki verinin ortalaması (Denklem 4.2);

$$x_i = \bar{x}_m \pm t_{v,95} S_{\bar{x}} = x_m \pm B_{xi} \quad (4.2)$$

olarak verilmektedir.

Burada;

$t_{v,95} S_{\bar{x}}$  =ölçümün ortalamasındaki rastgele belirsizliği,

t=serbestlik derecesi v'ye bağılı P % güvenirlilik aralığının bir göstergesidir.

Serbestlik derecesi  $v=N-1$  bağıntısıyla ifade edilir.

Performans parametreleri pek çok bağımsız değişkenler içerdiğinden ortalamadaki belirsizlik artar. Değişkenlerin ortalama üzerindeki etkileri toplam belirsizlik olarak verilir.

$x_i$  bağımsız değişkenin sistematik belirsizliği  $A_{xi}$  ve ölçüm esnasında ortaya çıkan rastgele belirsizlik  $B_{xi}$  olmak üzere toplam belirsizliği içeren doğru ortalama değer (Denklem 4.3),

$$R = \bar{R} \pm u_R \quad (4.3)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Burada;

R=ölçümün ortalama değerini göstermektedir.

Sistematik ve rastgele belirsizlik birlikte dikkate alındığında toplam belirsizlik  $u_R$  (Denklem 4.4),

$$u_R = \pm [A_x^2 + (t_{v,99} B_x)^2]^{1/2} \quad (4.4)$$

şeklinde hesaplanır.

Üretim esnasında ortaya çıkan sistematik belirsizliklerin toplamı  $A_x$  aşığıdaki gibidir (Denklem 4.5).

$$A_x = (\sum_{i=1}^n [\theta_i A_{xi}]^2)^{1/2} \quad (4.5)$$

Burada;

$\theta_i$  duyarlılık indeksidir.

Deneyle esnasında ortaya çıkan rastgele belirsizlikler toplamı  $B_x$  ise aşığıdaki gibi olmaktadır (Denklem 4.6).

$$B_x = (\sum_{i=1}^n [\theta_i B_{xi}]^2)^{1/2} \quad (4.6)$$

Hesaplanan toplam belirsizlikler Tablo 4.3'de verilmektedir.

Tablo 4.3 : Sistematik ve toplam belirsizlikler

| Parametreler                              | Sistematik belirsizlikler, ± |
|---|------------------------------|
| Yük (kg)                                  | 0.1                          |
| Devir (d/d)                               | 1.0                          |
| Zaman (s)                                 | 0.1                          |
| Sıcaklık (°C)                             | 1.0                          |
| Yakıt tüketimi (g/s)                      | 0.1                          |
| NO <sub>x</sub> (ppm)                     | 5.0                          |
| CO (hacimsel, %)                          | 0.06                         |
| CO <sub>2</sub> (hacimsel, %)             | 0.5                          |
| HC (ppm)                                  | 12                           |
| Duman yoğunluğu (hacimsel, %)             |                              |
| Parametreler                              | Toplam belirsizlik, %        |
| Moment (Nm)                               | 1.0                          |
| Motor gücü (kW)                           | 1.1                          |
| Özgül yakıt sarfıyatı (dizel, g/kWh)      | 1.4                          |
| Özgül yakıt sarfıyatı (çift yakıt, g/kWh) | 1.1                          |
| Efektif verim (dizel, %)                  | 1.2                          |
| Efektif verim (çift yakıt, %)             | 1.3                          |

## 4.5. Hesaplamalarda Kullanılan Formüller

### 4.5.1. Standart motor deneyleri

#### 4.5.1.1. Motor momenti ve efektif güç

Motor yükü; hidrolik bir dinamometre ve loadcell yardımıyla ölçülmüştür. Aşağıda yer alan eşitlikler kullanılarak motor momenti ve motor efektif gücü hesaplanmıştır.

Motor momenti; aşağıdaki eşitlik (Denklem 4.7) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$M_d = F \times L \quad (4.7)$$

Motor efektif gücü aşağıdaki eşitlik (Denklem 4.2.) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$P_e = \frac{2\pi \times F \times L \times n}{60000} \quad (4.8)$$

Burada;

$M_d$  = Döndürme momenti (Nm),

$F$  = Fren kuvveti (N),

$P_e$  = Efektif güç (kW),

$L$  = Moment kolu uzunluğu (m),

$n$  = Motor devri (d/d) olarak verilmektedir.

#### 4.5.1.2. Dizel yakıt debisi

Deneyleerde; dizel yakıt tüketimini belirlemek için 25 cm'lük yakıt tüketim süresi elektronik kronometre ile ölçülmüştür.

Dizel yakıt debisi aşağıdaki eşitlik (Denklem 4.9) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\dot{m}_{y\ dizel} = 25 \times m_{\rho\ dizel} \times t \text{ (g/s)} \quad (4.9)$$

Burada;

$\dot{m}_{y\ dizel}$  =dizel yakıt debisi (g/s),

$m_{\rho\ dizel}$  =dizel yakıt yoğunluğu (g/cm<sup>3</sup>),

$t=25\text{ cm}^3$ 'lük yakıt tüketim süresi (s) olarak verilmektedir.

Ayrıca, maliyet karşılaştırması yapabilmek adına dizel yakıt tüketimi hesaplanarak yakıt maliyeti belirlenmiştir.

#### 4.5.1.3. Dizel yakıt sarfiyatı

Dizel yakıt sarfiyatı ( $Y.S_{dizel}$ ); aşağıdaki eşitlik (Denklem 4.10) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$Y.S_{dizel} = \frac{\dot{m}_{y\ dizel} \times 3600}{m_{\rho\ dizel} \times 1000} \quad (4.10)$$

Burada;

$Y.S_{dizel}$  =dizel yakıt sarfiyatı olarak verilmiştir.

#### 4.5.1.4. Dizel yakıt maliyeti

Dizel yakıt maliyeti ( $Y.M_{dizel}$ ); aşağıdaki eşitlik (Denklem 4.11) kullanılarak hesaplanmıştır. Dizel yakıt litre fiyatının belirlenmesinde, Shell internet sitesindeki 25.08.2019 tarihli fiyatlar dikkate alınmıştır (Shell Türkiye, 2019).

$$Y.M_{dizel} = Y.S_{dizel} \times \$_{dizel} \quad (4.11)$$

Burada;

$Y.M_{dizel}$  =yakıt maliyeti (TL/h),

$Y.S_{dizel}$  =yakıt sarfiyatı (lt/h),

$\$_{Dizel}$ =dizel yakıt litre fiyatı (TL/lt) olarak verilmektedir.

#### 4.5.1.5. Özgül yakıt tüketimi (ÖYT)

Aşağıdaki eşitlik (Denklem 4.12) kullanılarak özgül yakıt tüketimi hesaplanmıştır.

$$b_{e\ dizel} = \frac{3600 \times \dot{m}_{y\ dizel}}{P_e} \quad (4.12)$$

Burada;

$b_{e\ dizel}$  = Standart deney özgül yakıt sarfiyatı (g/kWh),

$\dot{m}_{y\ dizel}$  = Dizel yakıt debisi (g/s),

$P_e$  = Efektif motor gücü (kW) olarak verilmiştir.

#### 4.5.1.6. Efektif verim

Efektif verimin hesaplanmasında aşağıda yer alan eşitlik (Denklem 4.13) kullanılmıştır.

$$\eta_{e\ dizel} = \frac{P_e \times 10^5}{(\dot{m}_{y\ dizel} \times Hu_{dizel})} \quad (4.13)$$

Burada;

$\eta_{e\ dizel}$  = dizel efektif verim,

$\dot{m}_{y\ dizel}$  = Dizel yakıt debisi (g/s),

$Hu_{dizel}$  = Dizel yakıt ısı enerjisi (kJ/kg) olarak verilmektedir.

#### 4.5.2. LPG-dizel çift yakıt deneyleri

LPG-dizel çift yakıt deneylerindeki yakıt tüketim ölçümleri için LPG debi ölçer ve elektronik enjektör kontrol ünitesi kullanılarak, püskürtme süresi (ms) ve LPG debisi (g/s) ayarı yapılmıştır.

##### 4.5.2.1. LPG-dizel yakıt debisi

Aşağıdaki eşitlikler (Denklem 4.14), (Denklem 4.15), (Denklem 4.16) ve (Denklem 4.17) kullanılarak LPG debisi hesaplanmıştır.

$$\dot{\theta}_{giren\ dizel} = \dot{\theta}_{giren\ LPG-dizel} \quad (4.14)$$

$$\theta_{giren\ dizel} = \dot{m}_{y\ dizel} \times Hu_{dizel} \quad (4.15)$$

$$\Delta\theta = \dot{\theta}_{giren\ dizel} - \dot{\theta}_{giren\ LPG-dizel} \quad (4.16)$$

$$\dot{m}_{y\ LPG} = \frac{\Delta\theta \times 1000}{Hu_{LPG}} \quad (4.17)$$

Burada;

$\dot{\theta}_{giren\ dizel}$  = Sisteme giren dizel enerjisi (kW),

$\dot{\theta}_{giren\ LPG-dizel}$  = Sisteme giren LPG + dizel enerjisi (kW) ,

$\dot{m}_{y\ LPG}$  = LPG debisi (g/s),

$Hu_{LPG}$  = LPG ısııl enerjisi (kj/kg) olarak verilmiştir.

##### 4.5.2.2. LPG-dizel yakıt sarfiyatı

LPG yakıt sarfiyatı ( $Y.S_{LPG}$ ) aşağıdaki eşitlik (Denklem 4.18) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$Y.S_{LPG} = \frac{\dot{m}_{y\ LPG} \times 3600}{m_{\rho\ LPG} \times 1000} \quad (4.18)$$

Burada;

$Y.S_{LPG}$  =LPG yakıt sarfiyatı (lt/h),

$m_{\rho\ LPG}$  =LPG yakıt yoğunluğu (g/cm<sup>3</sup>) olarak verilmiştir.

#### 4.5.2.3. LPG-dizel yakıt maliyeti

LPG yakıt maliyeti ( $Y.M_{LPG}$ ) aşağıdaki eşitlik (Denklem 4.19) kullanılarak hesaplanmıştır. LPG litre fiyatının belirlenmesinde, Shell internet sitesindeki 25.08.2019 tarihli fiyatlar dikkate alınmıştır (Shell Türkiye, 2019).

$$Y.M_{LPG} = Y.S_{LPG} \times \$_{LPG} \quad (4.19)$$

Burada;

$Y.M_{LPG}$  =LPG yakıt maliyeti (TL/h),

$\$_{LPG}$  =LPG litre fiyatı (TL/lt) olarak hesaplanmıştır.

#### 4.5.2.4. Özgül yakıt tüketimi (ÖYT)

Özgül yakıt sarfiyatının hesaplanmasında aşağıdaki eşitlik (Denklem 4.20) kullanılmıştır.

$$b_{e\text{ LPG-dizel}} = \frac{3600 \times (\dot{m}_{y\text{ dizel}} + \dot{m}_{LPG})}{P_e} \quad (4.20)$$

Burada;

$b_{e\text{ LPG-dizel}}$  = LPG – dizel özgül yakıt sarfiyatı (g/kWh),

$\dot{m}_{y\text{ dizel}}$  =Dizel debisi (g/s),

$\dot{m}_{LPG}$  =LPG debisi (g/s),

$P_e$  = Efektif güç (kW) olarak verilmiştir.

#### 4.5.2.5. Efektif verim

Efektif verimin hesaplanmasında aşağıda yer alan eşitlik (Denklem 4.21) kullanılmıştır.

$$\eta_{e\text{ LPG-dizel}} = \frac{P_e \times 10^5}{(\dot{m}_{y\text{ dizel}} + \dot{m}_{y\text{ LPG}}) \times H_{u\text{ dizel}}} \quad (4.21)$$

Burada;

$\eta_{e\text{ LPG-dizel}}$  = LPG – dizel efektif verimi olarak verilmektedir.

### 4.5.3. LPG-dizel çift yakıt+EGR deneyleri

LPG-dizel çift yakıt+EGR deneyleri için; özgül yakıt sarfiyatı, efektif güç, efektif verim gibi parametrelerin hesaplanmasında LPG-dizel çift yakıt deneylerinde kullanılan formüllerin aynıları kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Ayrıca, emme hattına gönderilecek olan egzoz gazı miktarını belirlemek adına EGR oranı hesaplanmıştır.

#### 4.5.3.1. EGR oranının hesaplanması

EGR oranı aşağıdaki eşitlik (Denklem 4.22) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$EGR = \frac{[(CO2_{emme\ manifoldu}) - (CO2_{çevre})]}{(CO2_{egzoz\ manifoldu})} * 100 \quad (4.22)$$

Burada;

$EGR$  = Motora geri gönderilen egzoz gazı miktarı (%),

$CO2_{emme\ manifoldu}$  = emme manifoldunda bulunan  $CO_2$  miktarı (hacimsel, %),

$CO2_{çevre}$  = Ortam da yani atmosferde bulunan  $CO_2$  miktarı (hacimsel, %),

$CO2_{egzoz\ manifoldu}$  = Egzoz gazı içerisinde bulunan  $CO_2$  miktarı (hacimsel, %)

olarak hesaplanmıştır.

Havanın içerisinde hacimsel olarak %0,03  $CO_2$  bulunmaktadır. Bu değer çok küçük olduğu için emisyon cihazının hassasiyeti ortamdaki karbondioksit miktarını ölçmek için yeterli olmamıştır.

Dolayısı ile ortamdaki karbondioksit miktarı sıfır olarak kabul edilmiştir.



## BÖLÜM 5. DENEY BULGULARI

Hazırlanan deney düzeneğinde, tek silindirli dizel motorun; dizel yakıt, LPG-dizel çift yakıt ve LPG-dizel+EGR sistemi ile çalıştırılmasıyla gerekli ölçümler yapılarak sonuçlar incelenmiştir. Ölçümlere başlamadan önce motorun fabrika çıkış avans değeri dışında, motor maksimum performans ve emisyon değerlerini veren avans değeri 29° KMA olarak belirlenmiştir. Ardından, egzoz ölçüm cihazlarının kontrolü yapılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle, %100 dizel yakıt kullanılarak 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2200, ve 2400 d/d'da tam yük değişken devir standart motor deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler; verilerin daha doğru tespit edilebilmesi adına 2 tekrarlı olarak yapılmıştır. Grafiklerde; %100 dizel yakıt kullanıldığını belirtmek adına veri adı, standart (std) olarak verilmiştir.

Ardından, çift yakıtlı motor deneyleri; tam yük değişken devir şartlarında aynı deney koşullarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerin bu aşamasında, çift yakıt içeriğindeki LPG'nin oranı; %10, %20 ve %30 olarak belirlenmiştir. Yakıtlar; grafiklerde içerdikleri LPG miktarlarına bağlı olarak tanımlanmıştır. Böylece, %10 LPG-%90 dizel yakıt içerikli çift yakıt %10LPG, %20 LPG-%90 dizel yakıt içerikli çift yakıt %20LPG ve %30 LPG-%70 dizel yakıt içerikli çift yakıt %30LPG şeklinde verilmiştir.

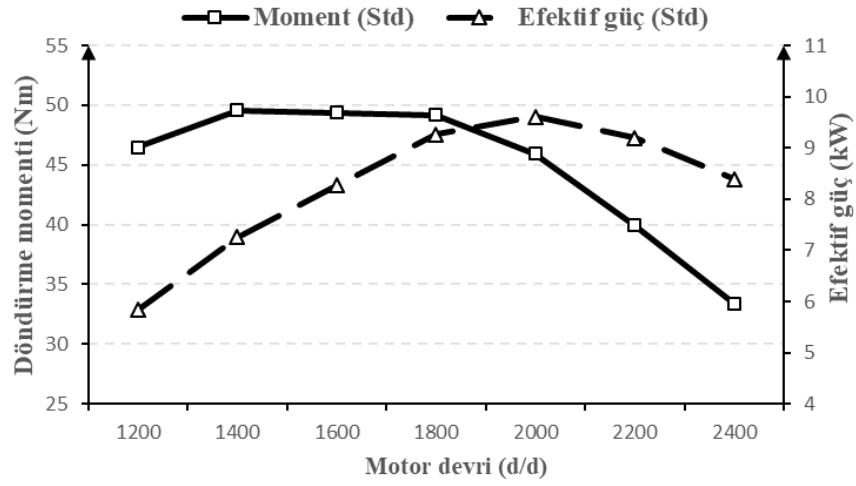
Son olarak, motorda çift yakıt olarak LPG kullanımından kaynaklı ortaya çıkan sorunların giderilmesi için EGR uygulaması uygun görülmüştür. Burada; motorda çift yakıt olarak %20 ve %30 oranlarında LPG kullanımının NOx emisyon değerlerini standart verilere göre oldukça arttırdığı görülmüştür. Bu sorunu ortadan kaldırmak adına deney düzeneğine EGR tertibatı adapte edilerek LPG-dizel+EGR'li ölçümler gerçekleştirilmiştir. EGR oranları; %10, %15 ve %20 olarak belirlenmiştir. Grafiklerde, kullanılan yakıt ve EGR miktarları içerdikleri oranlara göre göre adlandırılmıştır. Böylece, %20 LPG+%10 EGR içerikli çift yakıt %20LPG+%10EGR, %20 LPG+%15 EGR içerikli çift yakıt %20LPG+%15EGR ve %20 LPG+%20 EGR içerikli çift yakıt %20LPG+%20EGR olarak grafiklerde tanımlanmıştır. Aynı adlandırma, %30 LPG+EGR'li çift yakıt için de kullanılmıştır.

## 5.1. Standart Motor Deneyleri

Deneyler, sabit moment ve güç değerine göre tam yük, değişken motor devirlerinde gerçekleştirilmiştir.

### 5.1.1. Motor momenti ve efektif güç

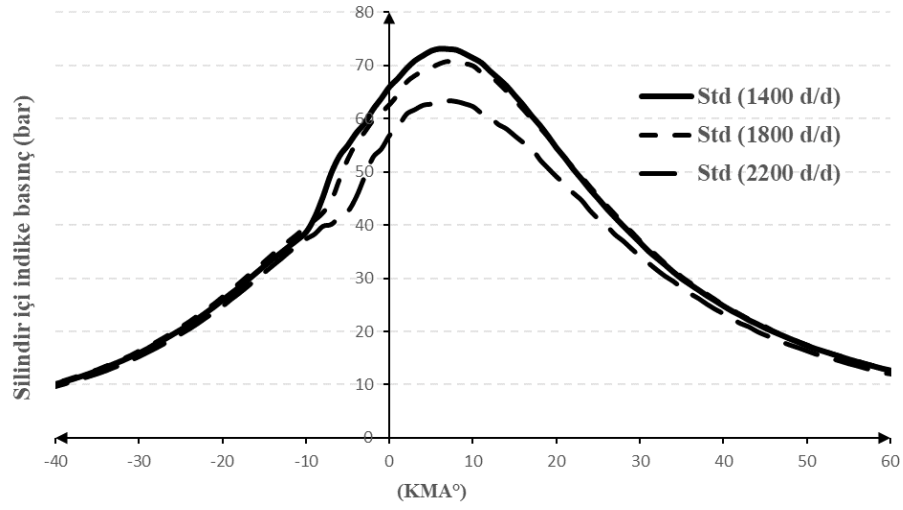
Standart deneyler sonucunda elde edilen verilere göre hesaplanan motor döndürme momenti ve efektif güç değerleri Şekil 5.1’de verilmektedir.



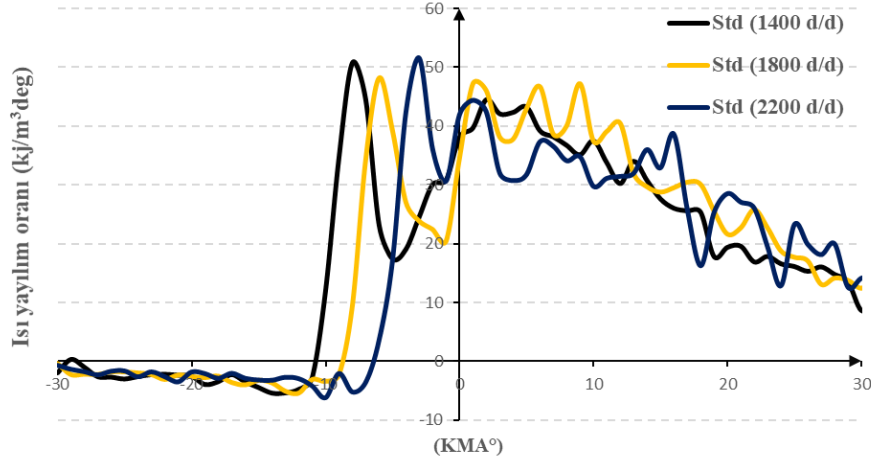
Şekil 5.1 : Motor moment ve efektif güç.

### 5.1.2. Silindir içi basınç ve ısı yayılım oranı

Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’de, standart dizel çalışma durumunda ölçülen silindir içi basınç ve ısı yayılım oranı verilmektedir.



Şekil 5.2 : Silindir içi indike basınç.



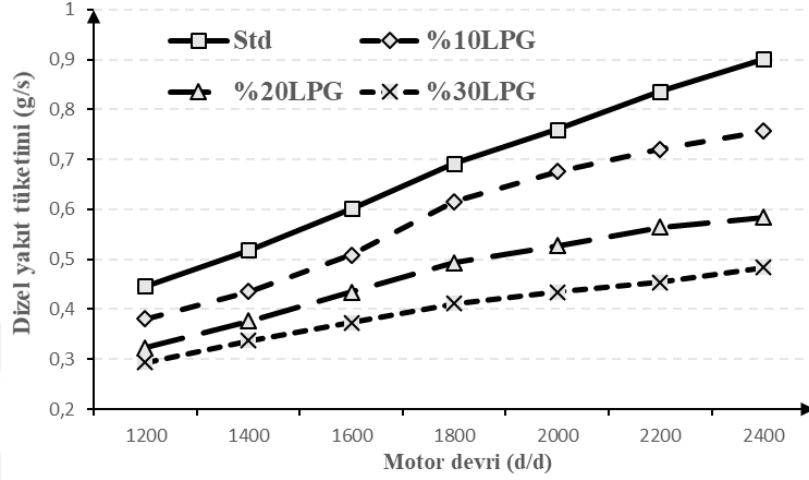
Şekil 5.3 : Isı yayılım oranı.

## 5.2. LPG-dizel Çift Yakıt Deneyleri

Daha önceki bölümlerde bahsedildiği üzere deneyin bu aşamasında motor emme hattından dizel yakıtı ilave olarak ikinci bir yakıt olarak LPG yakıtı belirli oranlarda motor emme hattından kademeli olarak püskürtülmüştür. Bunun sonucunda, LPG ilavesinin motor performans ve emisyon karakteristiklerine etkileri incelenmiştir. Deneyler, sabit moment ve güç değerine göre tam yük, değişken devir koşullarında gerçekleştirilmiştir.

### 5.2.1. Dizel yakıt tüketimi

Şekil 5.4’de standart durum ve çift yakıt çalışma durumundaki dizel yakıt tüketimi verilmektedir.

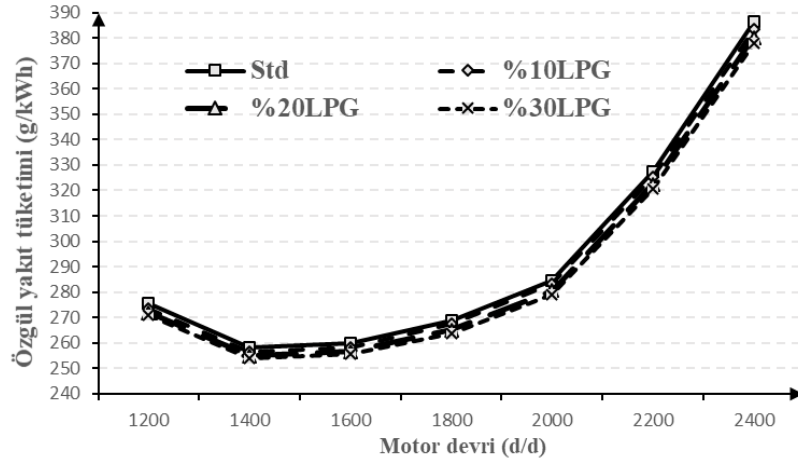


Şekil 5.4 : Dizel yakıt tüketimi.

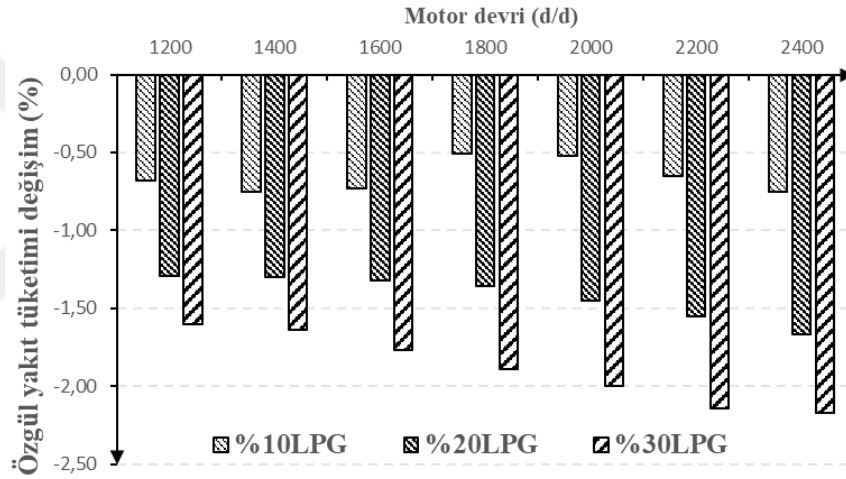
Buna göre; standart (std) dizel yakıt ile çalışma durumunda ortalama 0,67 g/s olan dizel yakıt tüketimi; %10 LPG ilavesi durumunda ortalama 0,58 g/s, %20 LPG ilavesi durumunda ortalama 0,47 g/s ve %30 LPG ilavesi durumunda ise ortalama 0,39 g/s olarak gerçekleşmiştir. Böylece, LPG-dizel çift yakıt çalışmanın dizel yakıt tüketimini azalttığı tespit edilmiştir. Bu durumda, en düşük dizel yakıt tüketimi; %30 LPG ilavesi durumunda 1200 d/d ‘da yaklaşık 0,29 g/s ve en fazla dizel yakıt tüketimi ise standart (Std) dizel yakıt ile çalışmada 2400 d/d’da 0,90 g/s olarak gerçekleşmiştir.

### 5.2.2. Özgül yakıt tüketimi (Ö.Y.T)

Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da LPG-dizel çift yakıt çalışmanın özgül yakıt tüketimine etkileri ve standart duruma göre % değişim oranları verilmektedir.



Şekil 5.5 : Özgül yakıt tüketimi.



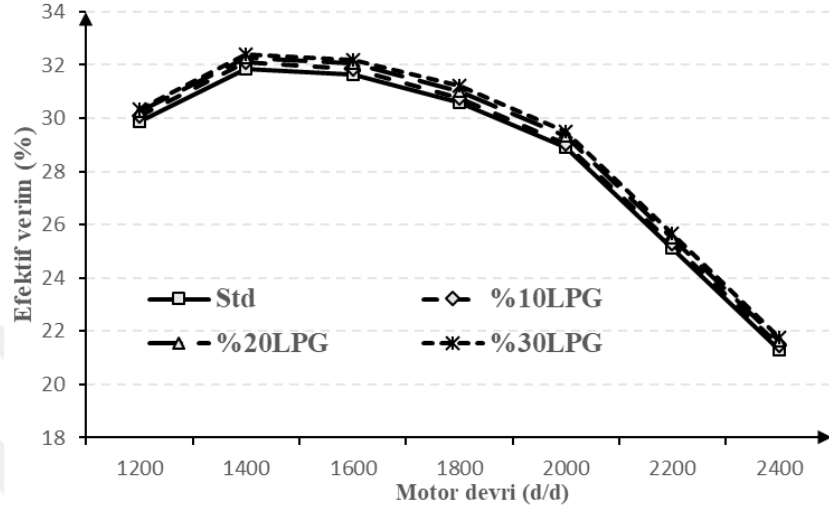
Şekil 5.6 : Özgül yakıt tüketimi % değişim.

Grafiklerde görüldüğü gibi; LPG ilavesinin özgül yakıt tüketimini bir miktar iyileştirdiği görülmektedir. Bu durumun, LPG'nin dizel yakıtı göre kütleli olarak daha fazla ısı enerjisiye sahip olmasından dolayı kaynaklandığı düşünülmektedir.

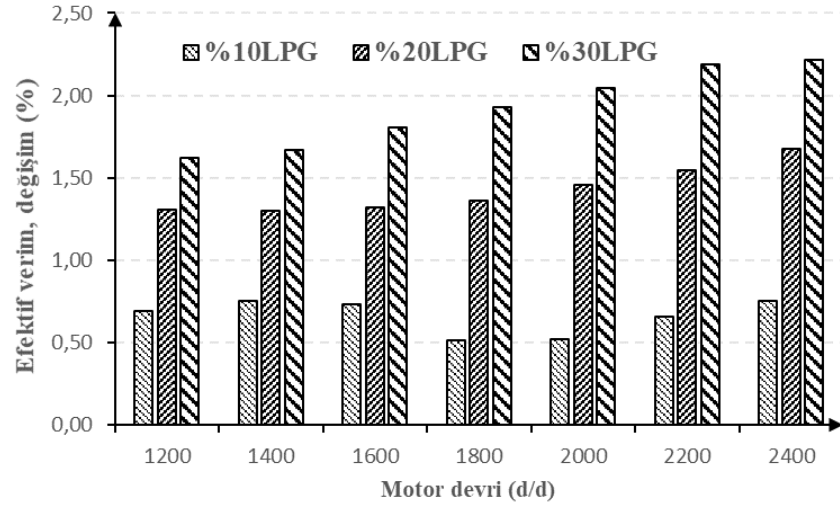
Burada, %10 LPG kullanımının özgül yakıt tüketimini ortalama %0,7 iyileştirdiği, %20 LPG ilavesinin özgül yakıt tüketimini ortalama %1,42 iyileştirdiği, %30 LPG ilavesinin ise özgül yakıt tüketimini ortalama %1,9 iyileştirdiği tespit edilmiştir. Bu durumun, LPG'nin dizel yakıtı kıyasla kütleli olarak daha fazla ısı enerjisiye sahip olmasından dolayı daha az yakıtla aynı motor gücünü üretmesinden kaynaklandığı söylenebilir.

### 5.2.3. Efektif verim

Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de, LPG-dizel çift yakıt çalışmanın efektif verime etkileri ve standart duruma göre % değişim oranları verilmektedir.



Şekil 5.7 : Efektif verim grafiği.



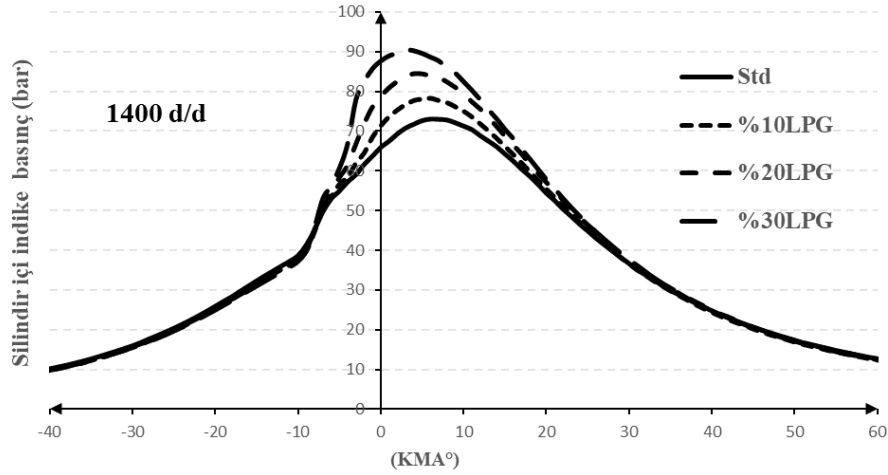
Şekil 5.8 : Efektif verim % değişim.

Grafiklerden anlaşılacağı gibi; çift yakıt ile çalışmanın, standart duruma göre efektif verimi nispeten arttırdığı tespit edilmiştir. Burada; %10 LPG ilavesinin efektif verimi ortalama %0,66 arttırdığı, %20 LPG ilavesinin efektif verimi ortalama 1,42 arttırdığı, %30 LPG ilavesinin ise efektif verimi ortalama %1,93 arttırdığı tespit edilmiştir. Genel olarak LPG-dizel çift yakıt çalışmanın efektif verimi olumlu yönde etkilediği

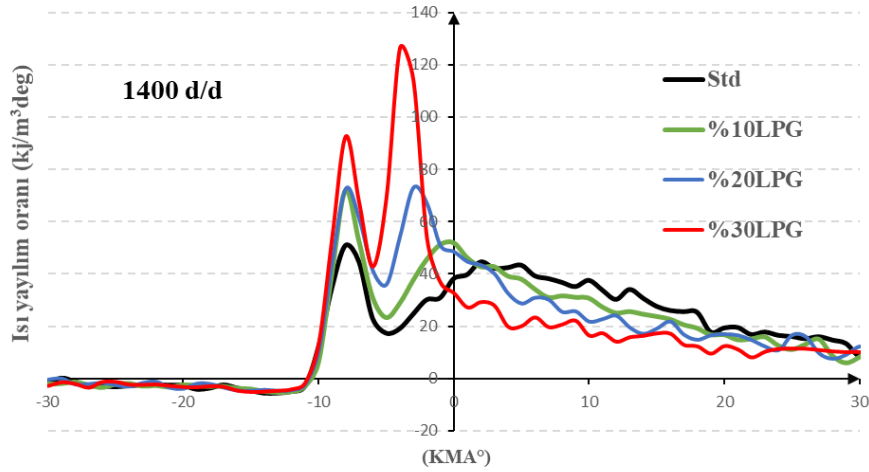
görülmektedir. Bu durumun, emme hattına kademeli olarak püskürtülen LPG'nin yanmayı iyileştirerek dizel yakıt tüketimini azaltmasından dolayı gerçekleştiği söylenebilir.

#### 5.2.4. Silindir içi indike basınç ve ısı yayılım oranı

Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da standart dizel çalışma ve çeşitli oranlarda LPG-dizel çift yakıt çalışmanın silindir içi indike basınç ve ısı yayılım oranlarına etkileri verilmektedir.



Şekil 5.9 : Silindir içi basınç grafiği.



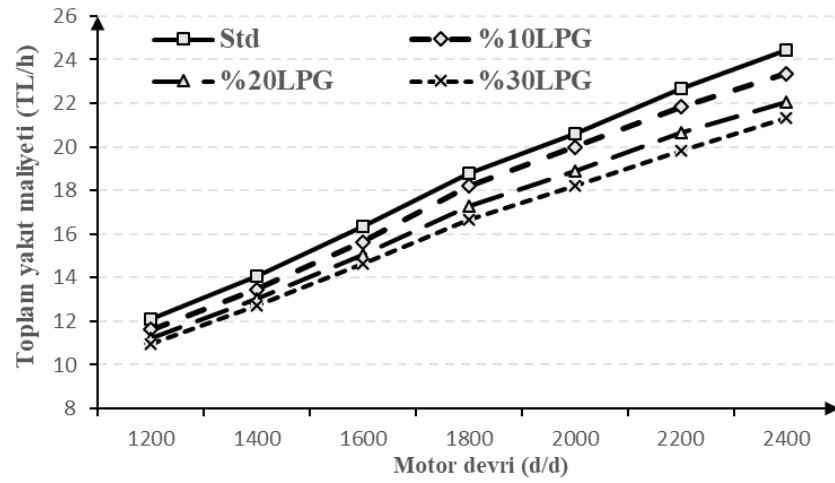
Şekil 5.10 : Isı yayılım oranı.

Grafiklerde görüldüğü gibi dizel yakıtına ek olarak LPG ile çalışmanın silindir içi maksimum basıncı arttırdığı ve standart duruma göre üst ölü noktadan biraz öne

kaydırdığı görülmektedir. Diğer taraftan, LPG ilavesinin ısı yayılım oranını standart duruma göre iyileştirdiği görülmektedir. Burada; öncelikle üst ölü noktadan yaklaşık 10° KMA önce dizel yakıtın yanması ile ısı yayılım dalgasının oluştuğu ve üst ölü noktadan 5° KMA önce LPG ilavesi ile ikinci bir ısı yayılım dalgasının meydana geldiği görülmektedir. Bu durumun, LPG ilavesiyle yanmanın iyileşmesinden dolayı kaynaklandığı düşünülmektedir.

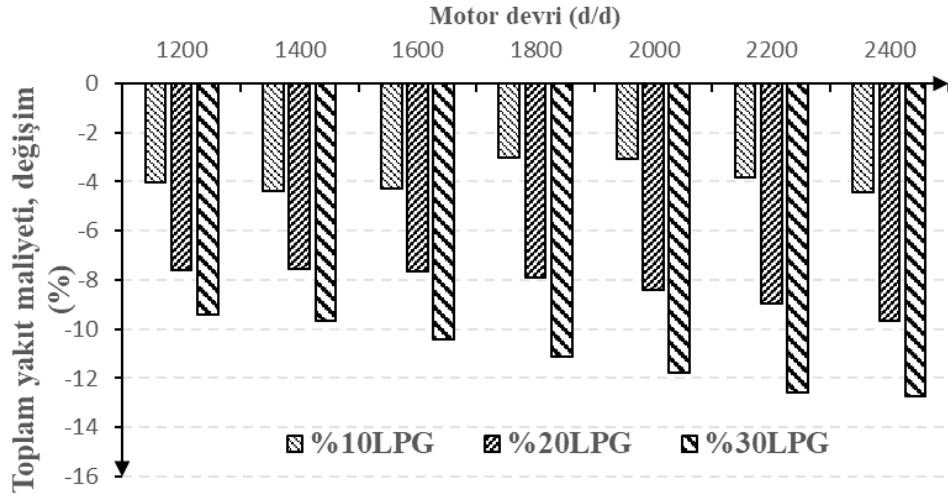
### 5.2.5. Toplam yakıt maliyeti

Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de, çift yakıt ile çalışmanın toplam yakıt maliyetlerine etkileri ve standart duruma göre % değişim oranları verilmektedir. Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen veriler gerekli formüller kullanılarak TL/h olarak hesaplanmıştır. Burada, motorin ve LPG litre fiyatının belirlenmesi için Shell resmi internet sitesindeki 25.08.2019 tarihli akaryakıt pompa fiyatları dikkate alınmıştır (Shell.com.tr, 2019).



Şekil 5.11 : Toplam yakıt maliyeti.



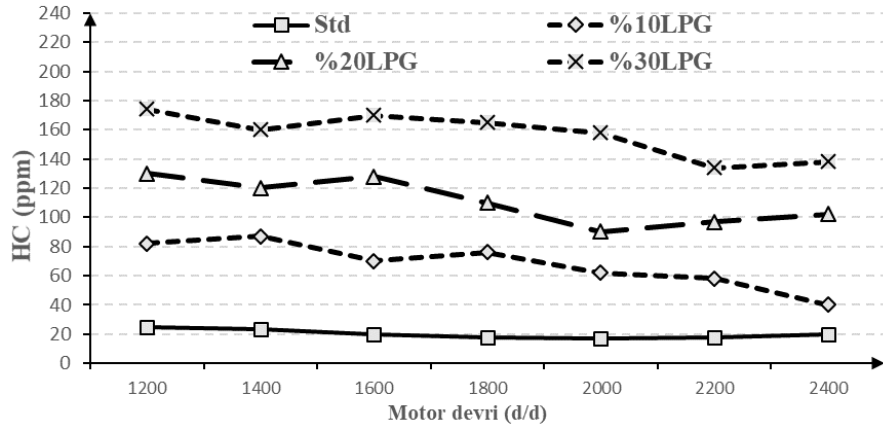


Şekil 5.12 : Toplam yakıt maliyeti % değişim.

Grafiklerde görüldüğü gibi; LPG ilavesi durumunda standart çalışma koşullarına göre yakıt maliyetlerinde iyileşmeler olduğu tespit edilmiştir. Burada; %10 LPG ilavesi durumunda toplam yakıt maliyetinde ortalama %4, %20 LPG ilavesi durumunda toplam yakıt maliyetinde ortalama %8 ve %30 LPG ilavesi durumunda ise toplam yakıt maliyetinde ortalama %11 tasarruf sağlandığı tespit edilmiştir. Bu durumun; LPG yakıtının dizel yakıtına göre hem ısıl enerjisinin daha yüksek olmasından, hem de litre fiyatının dizel yakıtına göre oldukça ekonomik olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

#### 5.2.6. Hidrokarbon (HC) emisyonları

LPG-dizel çift yakıt çalışmanın standart duruma göre hidrokarbon emisyonlarına etkisi Şekil 5.13'de verilmektedir.

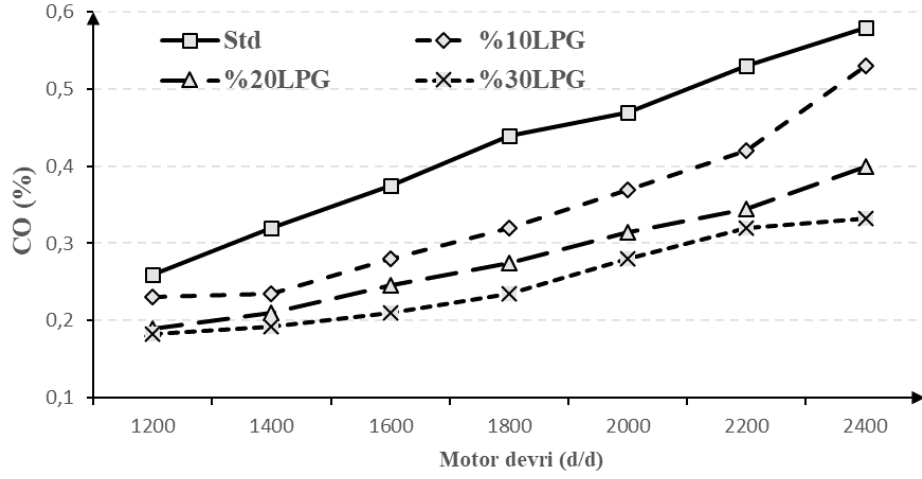


Şekil 5.13 : Hidrokarbon emisyonları.

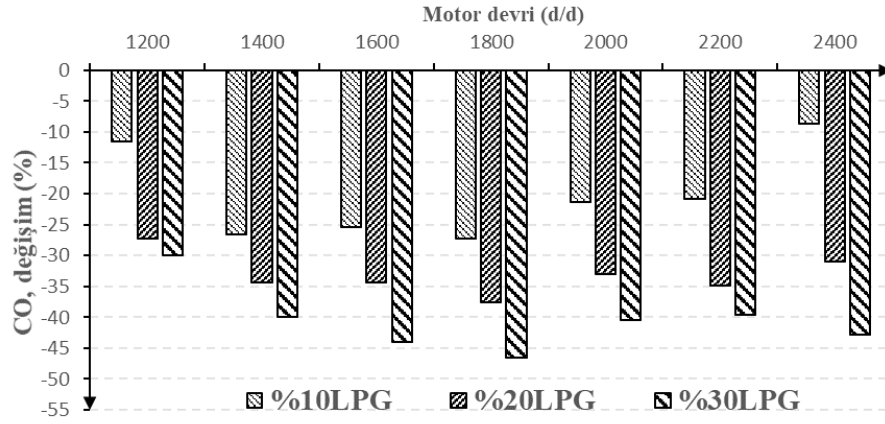
Şekilde görüldüğü üzere, LPG ilavesi durumunda hidrokarbon emisyonlarında ciddi bir artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Burada, hidrokarbon emisyonlarında; standart duruma göre %10 LPG ilavesinde ortalama 47 ppm, %20 LPG ilavesinde ortalama 90 ppm ve %30 LPG ilavesinde ise ortalama 136 ppm gibi ciddi artışlar meydana gelmiştir. Rimkus ve diğ. (2017), dizel yakıtı ilave olarak belirli oranlarda LPG ilavesinin HC emisyonlarını ciddi oranda arttırdığını tespit etmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada; dizel yakıt çalışma durumunda 10 ppm olan hidrokarbon emisyonlarının, %30 LPG ilavesi durumunda yaklaşık olarak 190 ppm'e yükseldiği görülmüştür. Bu durumun; LPG ilavesi ile silindir içi basıncın ani olarak artmasından dolayı dizel yakıt damlacıklarının yanma odası boşluklarından yanmadan egzozu karışması veya silindir içerisinde yakıtın tam olarak yanması için gerekli oksijen miktarının bulunmamasından dolayı meydana geldiği düşünülmektedir.

### 5.2.7. Karbonmonoksit (CO) emisyonları

LPG-dizel çift yakıt çalışmanın karbonmonoksit emisyonlarına etkileri ve standart dizel çalışmaya kıyasla % değişim oranları Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'de verilmektedir.



Şekil 5.14 : Karbonmonoksit emisyonları.

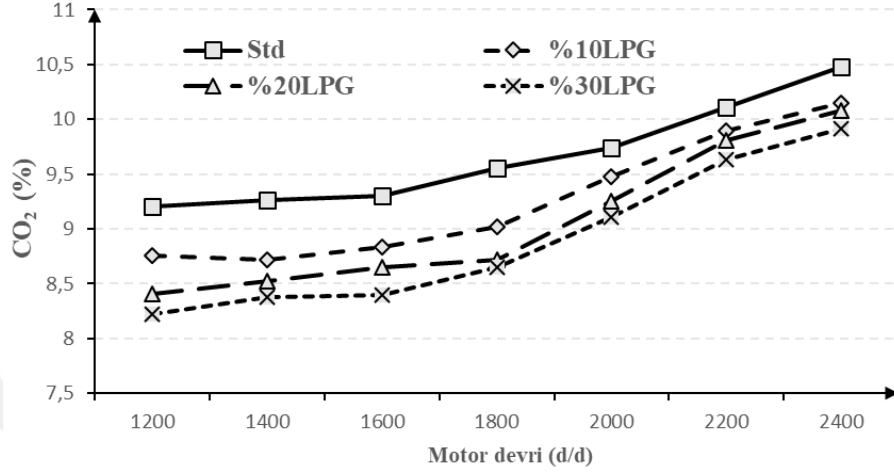


Şekil 5.15 : Karbonmonoksit emisyonları.

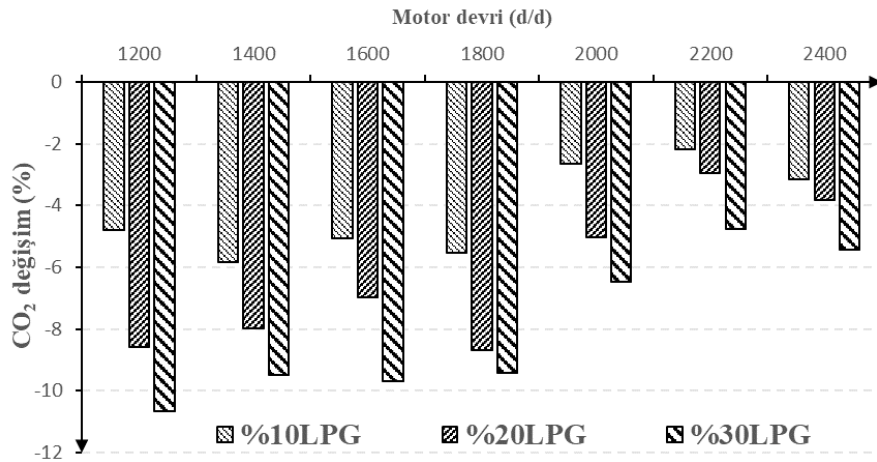
Grafiklerden anlaşılacağı gibi, LPG-dizel çift yakıt ile çalışma durumunda karbonmonoksit emisyonlarında hatırı sayılır miktarda azalma meydana geldiği görülmektedir. Burada, karbonmonoksit emisyonlarında; %10 LPG ilavesinde ortalama %20, %20 LPG ilavesinde ortalama %33 ve %30 LPG ilavesi durumunda ise ortalama %40 iyileşme meydana geldiği görülmektedir. Ashok ve diğ. (2015), LPG-dizel çift yakıt ile yapılan çalışmalarını bir araya getirdikleri makalelerinde; tam yük şartlarında LPG ilavesinin karbonmonoksit emisyonlarını ciddi miktarda iyileştirdiğini tespit etmişlerdir. Bu durumun, LPG ilavesiyle silindir içi sıcaklıklarının artırmasından dolayı CO oksidasyonunun iyileşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

### 5.2.8. Karbondioksit (CO<sub>2</sub>) emisyonları

LPG-dizel çift yakıt çalışmanın, karbondioksit emisyonlarına etkileri ve standart dizel çalışmaya kıyasla % değişim oranları Şekil 5.16 ve Şekil 5.17’de verilmektedir.



Şekil 5.16 : Karbondioksit emisyonları.

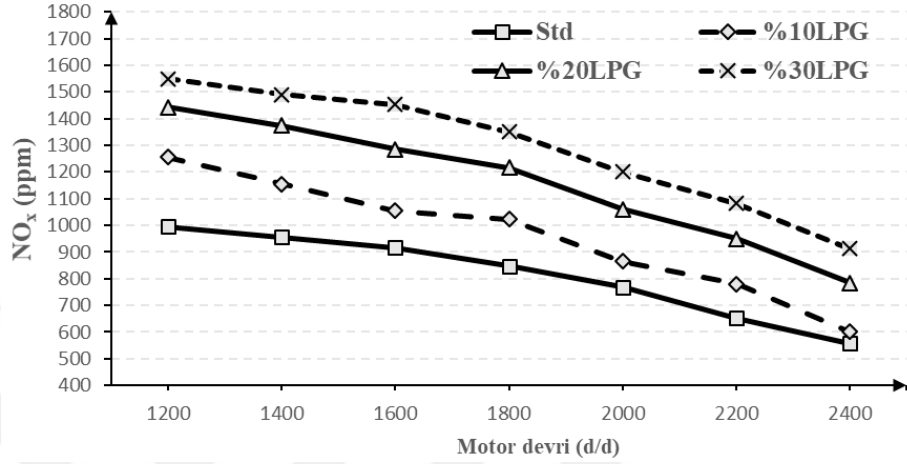


Şekil 5.17 : Karbondioksit emisyonları % değişim.

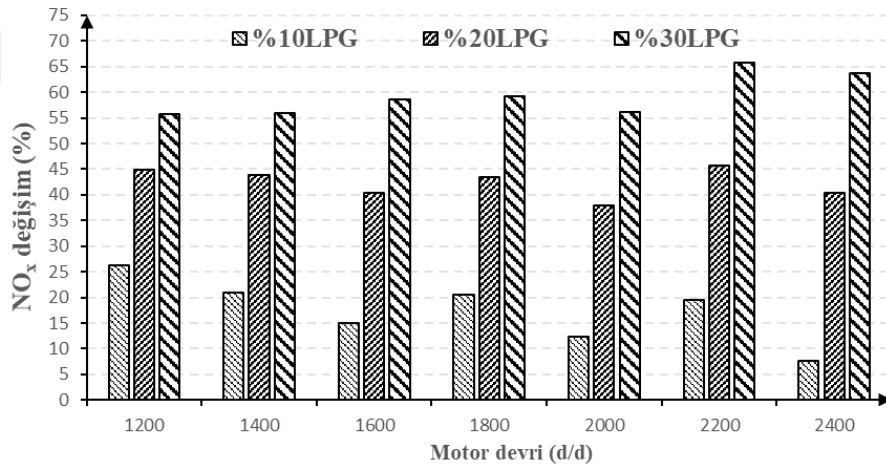
Grafiklerde görüldüğü üzere, LPG ilavesinin; çevre ve insan sağlığı açısından zararlı bir gaz olan karbondioksit emisyonlarını iyileştirdiği görülmektedir. Burada; %10, %20 ve %30 LPG ilavesiyle karbondioksit emisyonlarının ortalama olarak sırasıyla; %4, %6 ve %8 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Bu durumun, LPG'nin dizel yakıtıya kıyasla yapısında daha az karbon atomu barındırmasından dolayı daha temiz bir yakıt olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

### 5.2.9. Azot oksit (NO<sub>x</sub>) emisyonları

LPG-dizel çift yakıt çalışmanın, azot oksit emisyonlarına etkileri ve standart dizel çalışmaya kıyasla % değişim oranları Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da verilmektedir.



Şekil 5.18 : Azot oksit emisyonları.



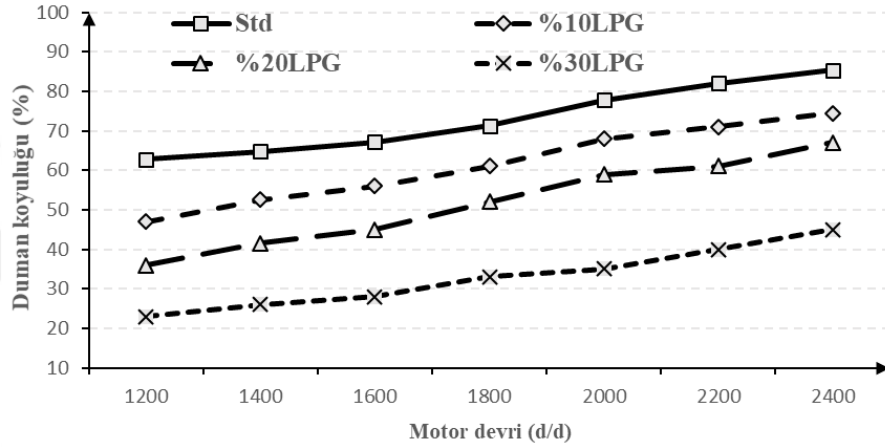
Şekil 5.19 : Azot oksit emisyonları % değişim.

Grafiklerde görüldüğü gibi, çift yakıt olarak LPG kullanımının azot oksit emisyonlarını önemli ölçüde arttırdığı saptanmıştır. %10 LPG ilavesi durumunda azot oksit emisyonlarının ortalama %17, %20 LPG ilavesi durumunda ortalama %42 ve %30 LPG ilavesi durumunda ise ortalama %60 arttığı tespit edilmiştir. Burada; en yüksek azot oksit emisyonu %30 LPG ilavesinde 1200 d/d'da 1550 ppm, en düşük azot oksit emisyonu ise standart dizel çalışmada 2400 d/d'da 557 ppm olarak gerçekleşmiştir. Bu durumun,

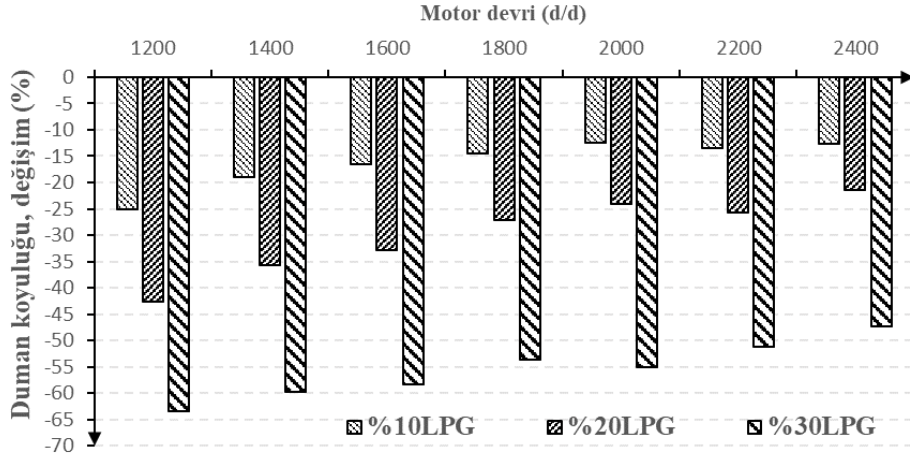
düşük hava yakıt ( $\lambda$ ) oranlarında çalışmasından ve LPG ilavesinin yanmayı iyileştirerek silindir içi sıcaklıklarını arttırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

### 5.2.10. Duman koyuluğu

LPG-dizel çift yakıt çalışmanın, duman koyuluğuna etkileri ve standart dizel çalışmaya göre % değişim oranları Şekil 5.20 ve Şekil 5.21’de verilmektedir.



Şekil 5.20 : Duman koyuluğu.



Şekil 5.21 : Duman koyuluğu % değişim.

Grafiklerden anlaşılacağı gibi, çift yakıt olarak LPG ilavesinin; çevre ve insan sağlığı bakımından oldukça tehlikeli sonuçlar doğurabilecek olan egzoz gazı içerisindeki duman koyuluğunu (partikül madde) önemli oranda azalttığı görülmektedir. Burada; %10 LPG ilavesi durumunda duman koyuluğunun ortalama olarak % 16, %20 LPG ilavesi

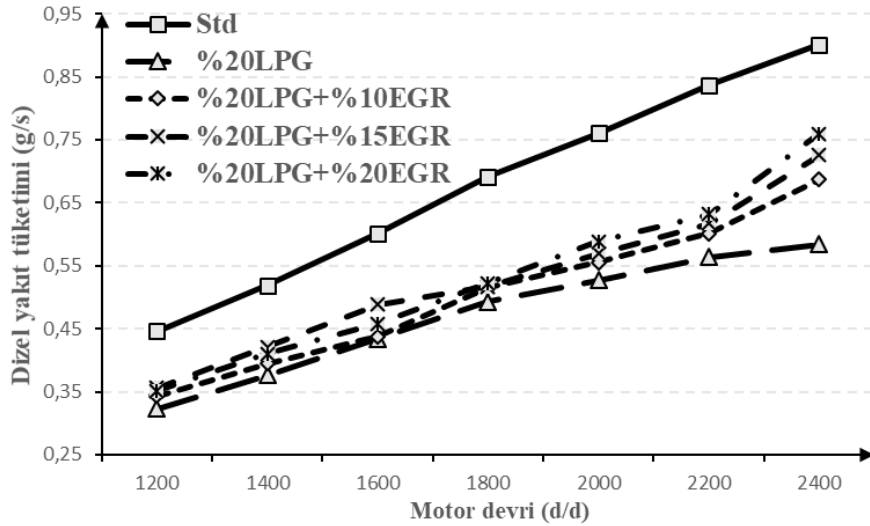
durumunda ortalama olarak %30 ve %30 LPG ilavesi durumunda ise ortalama olarak %55 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Bu durumun; LPG'nin dizel yakıtla kıyasla yapısında daha az karbon atomu barındırmasından dolayı daha temiz yanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

### 5.3. LPG-Dizel Çift Yakıt+EGR Deneyleri

Deneyin bu aşamasında %20 ve %30 LPG oranlarına ilave olarak %10, %20 ve %30 oranlarında egzoz gazı silindir içerisine geri gönderilerek NO<sub>x</sub> emisyonlarının düşürülmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, EGR uygulamasının motor performans ve egzoz emisyonları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneyler, bir önceki deney şartlarında olduğu gibi sabit motor moment ve güç değerleri ve tam yük değişken devir şartlarında gerçekleştirilmiştir.

#### 5.3.1. Dizel yakıt tüketimi

%20 LPG ilavesine ek olarak %10, %15 ve %20 oranlarında EGR uygulamasının dizel yakıt tüketimine etkileri Şekil 5.22'de verilmektedir.



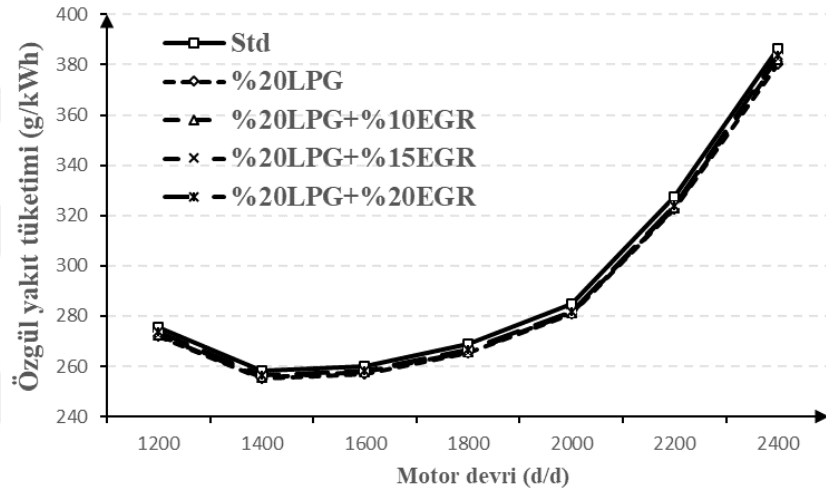
Şekil 5.22 : Dizel yakıt tüketimi.

Şekilde görüldüğü üzere, sadece %20 LPG ilavesine kıyasla çeşitli oranlarda EGR ilavesinin dizel yakıt tüketimini bir miktar arttırdığı tespit edilmiştir. Fakat, saf dizel

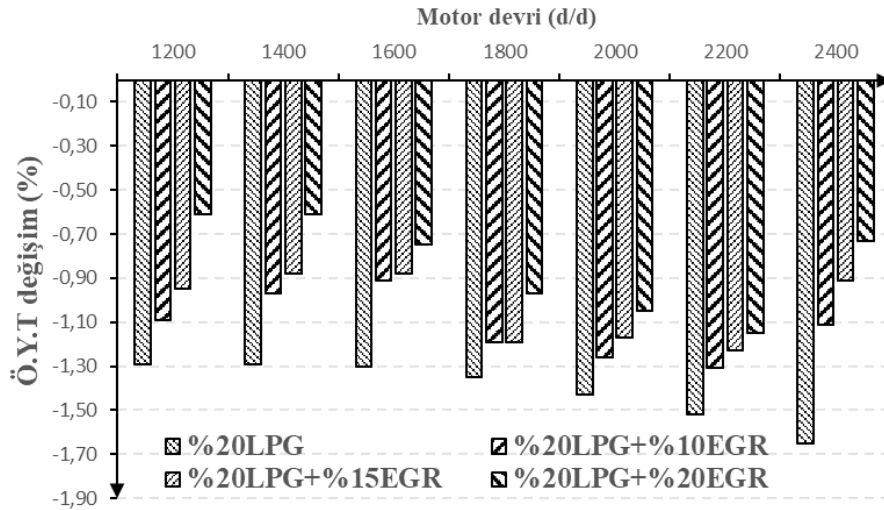
çalışma ile kıyaslandığında LPG-dizel+EGR'li çalışmanın dizel yakıt tüketimini azalttığı görülmektedir.

### 5.3.2. Özgül yakıt tüketimi (Ö.Y.T)

Şekil 5.23, Şekil 5.24 ve Şekil 5.25'de, %20 ve %30 LPG ilavesine ek olarak %10, %15 ve %20 oranlarında egzoz gazı geri gönderiminin özgül yakıt tüketimine etkileri ve standart duruma göre % değişim oranları verilmektedir.

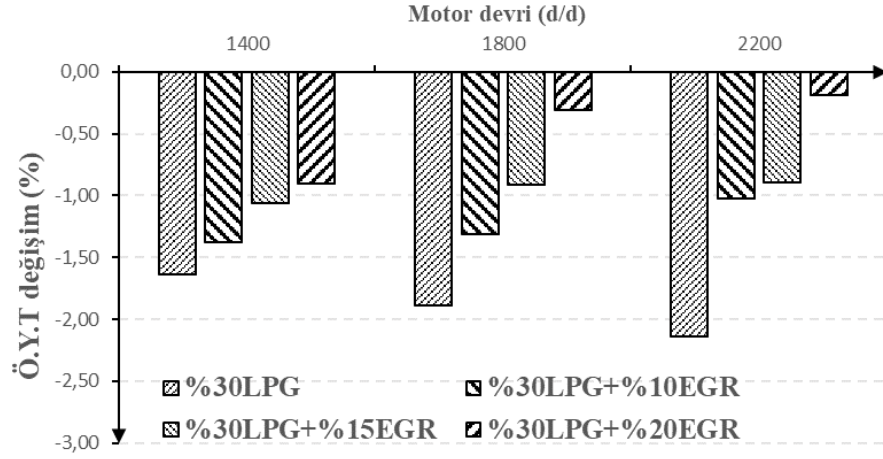


Şekil 5.23 : Özgül yakıt tüketimi.



Şekil 5.24 : Özgül yakıt tüketimi % değişim.



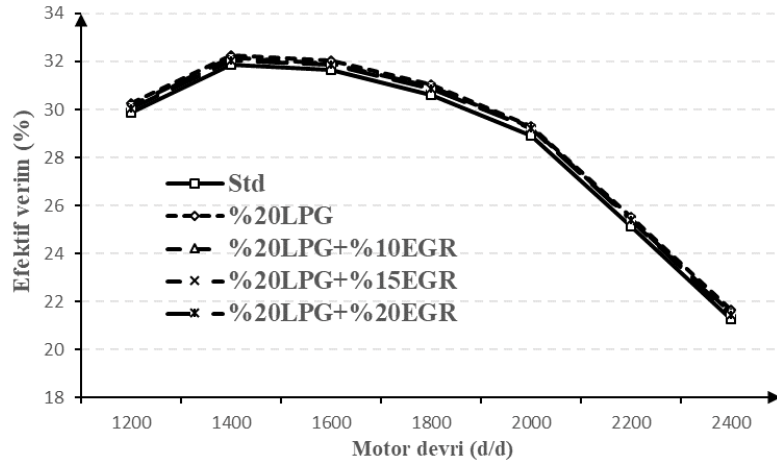


Şekil 5.25 : Özgül yakıt tüketimi % değişim.

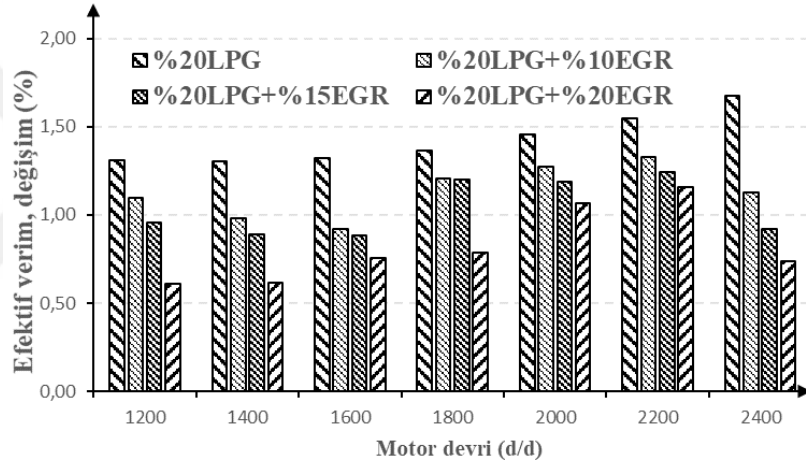
Grafiklerden anlaşılacağı üzere, LPG-dizel çift yakıt çalışmaya ek %10, %15 ve %20 oranlarında EGR uygulamasının standart dizel çalışmaya kıyasla özgül yakıt tüketimini eser miktarda iyileştirdiği görülmektedir. Fakat, sadece LPG-dizel çalışma ile kıyaslandığında artan EGR oranlarıyla birlikte özgül yakıt tüketiminin nispeten arttığı görülmektedir. Bu durumun, yanma odasına gönderilen egzoz gazlarının volümetrik verimi düşürmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

### 5.3.3. Efektif verim

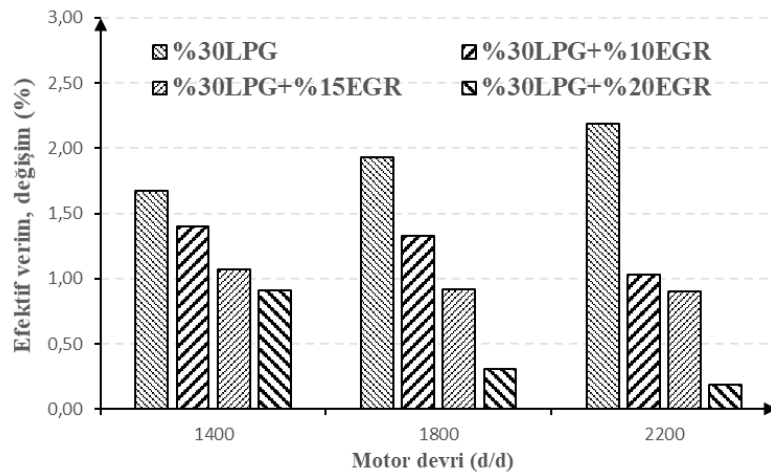
Şekil 5.26, Şekil 5.27 ve Şekil 5.28'de, %20 ve %30 LPG ilavesine ek olarak çeşitli oranlarda EGR uygulamasının efektif verime etkileri ve standart dizel çalışmaya kıyasla efektif verimde meydana gelen değişimler % olarak verilmektedir.



Şekil 5.26 : Efektif verim grafiği.



Şekil 5.27 : Efektif verim % değişim

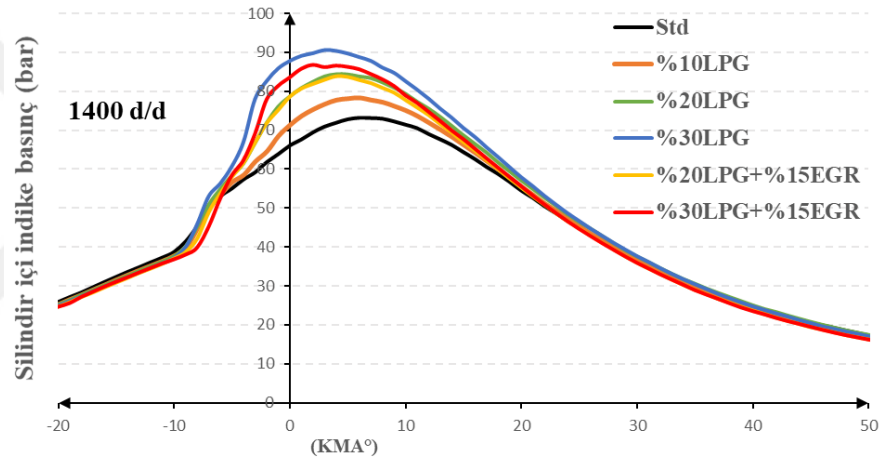


Şekil 5.28 : Efektif verim % değişim

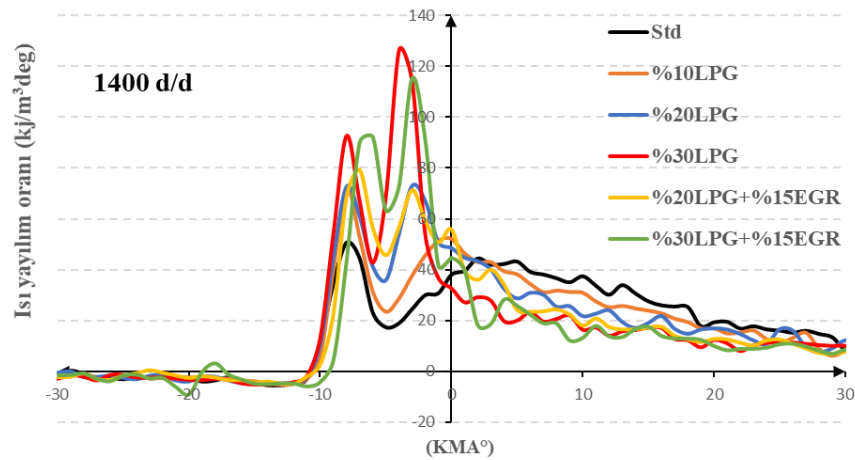
Grafiklerden anlaşılacağı gibi, LPG-dizel çift yakıt çalışmaya ek olarak çeşitli oranlarda egzoz gazı geri gönderiminin efektif verime önemli bir etkisi olmamıştır. Fakat, standart dizel çalışmaya kıyasla eser miktarda bir artış olduğu görülmektedir. Ayrıca, artan EGR oranlarıyla efektif verimin bir miktar kötüleştiği görülmektedir. Bu durumun, silindir içerisine gönderilen egzoz gazının volümetrik verimi düşürerek yanmayı kötüleştirmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

#### 5.3.4. Silindir içi indike basınç ve ısı yayılım oranı

Şekil 5.29 ve Şekil 5.30'da LPG-dizel çift yakıt ve %15 EGR uygulamasının silindir içi basınç ve ısı yayılımının oranına etkileri verilmektedir.



Şekil 5.29 : Silindir içi indike basınç.

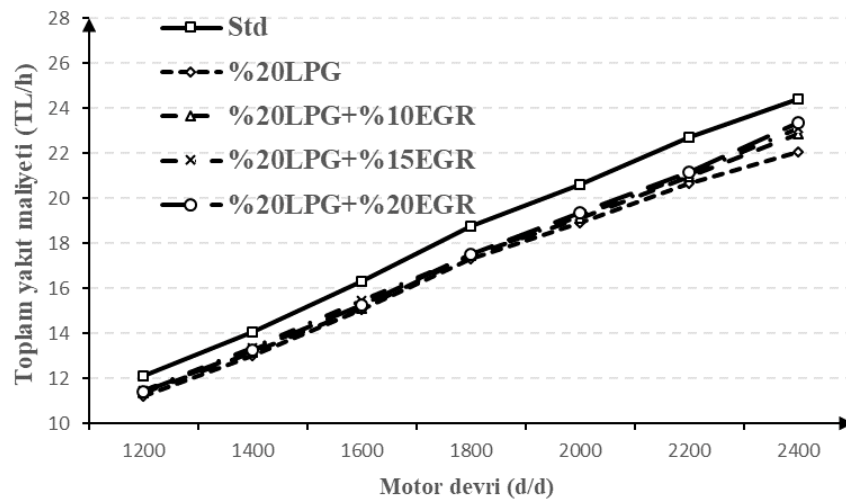


Şekil 5.30 : Isı yayılım oranı.

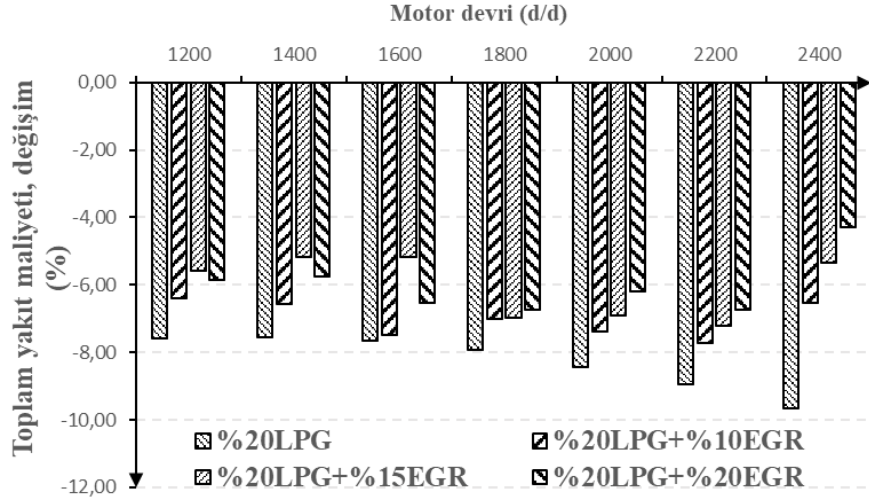
Grafiklerde görüldüğü üzere, LPG-dizel çalışmaya ek olarak %15 oranında EGR uygulamasının silindir içi indike basıncı ve ısı yayılım oranını LPG-dizel çalışmaya kıyasla düşürdüğü görülmektedir. Fakat, standart dizel çalışma ile kıyaslandığında özellikle yanma başlangıcından yanma süresi boyunca daha yüksek silindir içi indike basınç ve ısı yayılımı elde edilmiştir. Yanma sonunda ise standart dizel çalışmanın daha avantajlı olduğu görülmektedir.

### 5.3.5. Toplam yakıt maliyeti

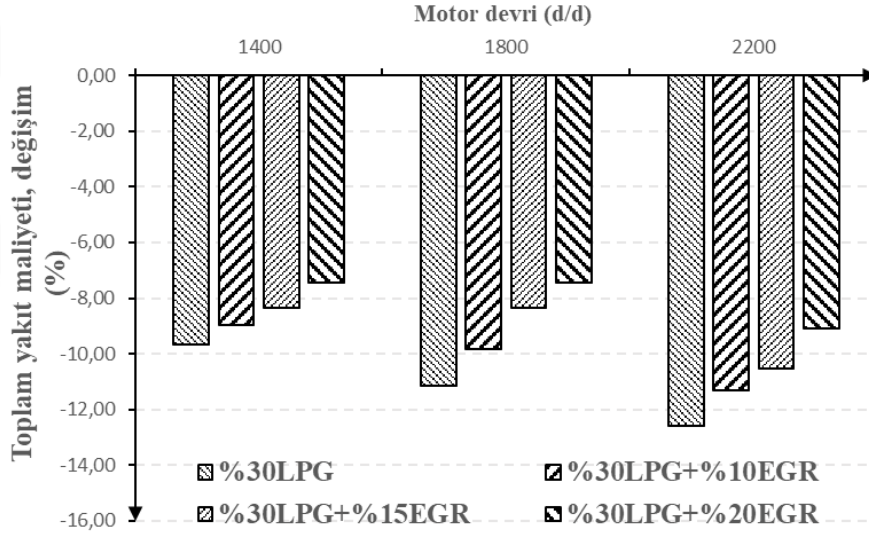
Şekil 5.31, Şekil 5.32 ve Şekil 5.33’de, %20 ve %30 LPG ilavesine ek olarak %10, %15 ve %20 EGR uygulamasının toplam yakıt maliyetine etkileri ve standart duruma göre % değişim oranları verilmektedir.



Şekil 5.31 : Toplam yakıt maliyeti.



Şekil 5.32 : Toplam yakıt maliyeti % değişim.

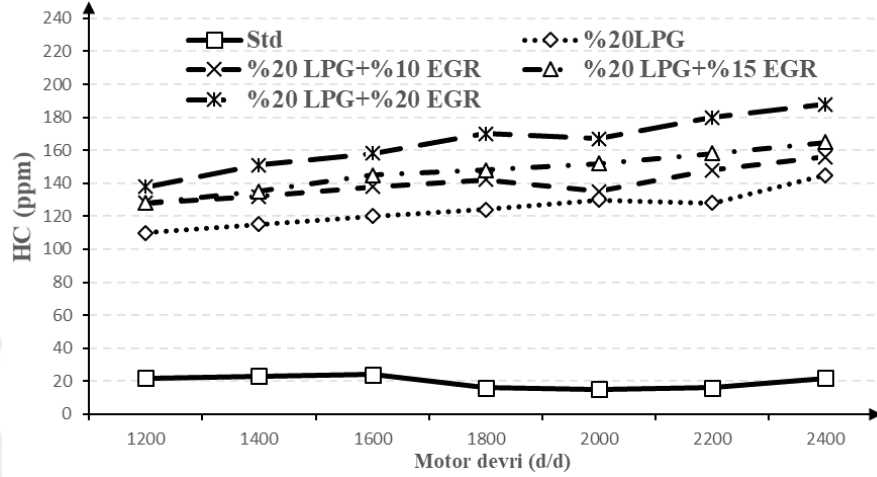


Şekil 5.33 : Yakıt maliyeti % değişim.

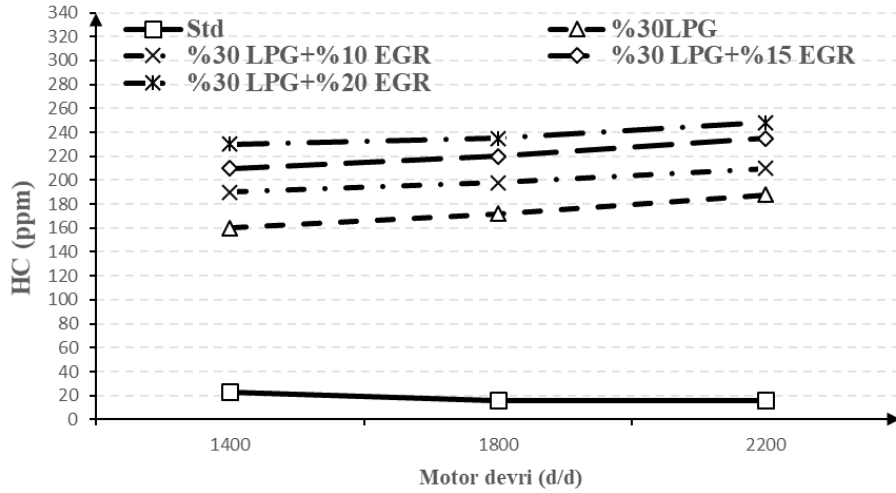
Grafiklerde görüldüğü gibi, çeşitli oranlarda EGR ilavesinin, %20 ve %30 LPG çalışma ile kıyaslandığında yakıt maliyetlerini bir miktar arttırdığı görülmektedir. Fakat, standart dizel çalışma ile kıyaslandığında LPG-dizel+EGR ile çalışmanın yakıt maliyetleri açısından daha avantajlı olduğu görülmektedir. Bu durumun, LPG'nin motorine kıyasla daha ekonomik bir yakıt olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

### 5.3.6. Hidrokarbon (HC) emisyonları

Şekil 5.34 ve Şekil 5.35’de, LPG ilavesine ek olarak çeşitli oranlarda EGR uygulamasının, hidrokarbon emisyonları üzerindeki etkileri verilmektedir.



Şekil 5.34 : Hidrokarbon emisyonları.

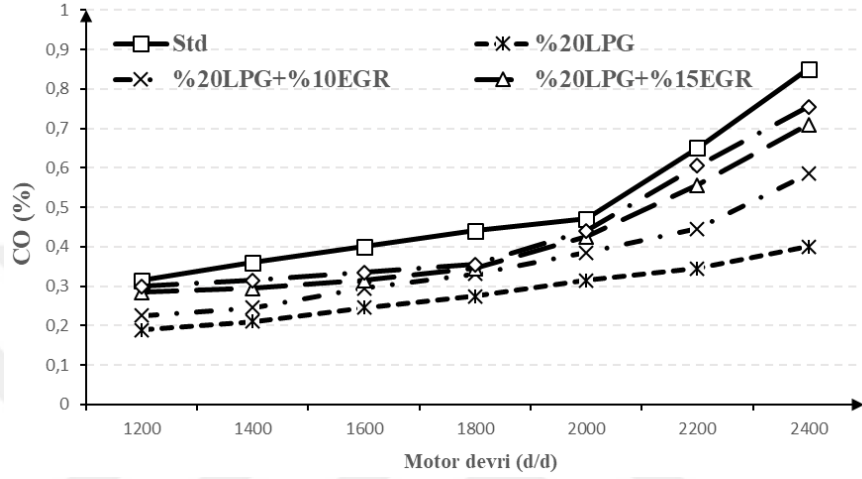


Şekil 5.35 : Hidrokarbon emisyonları.

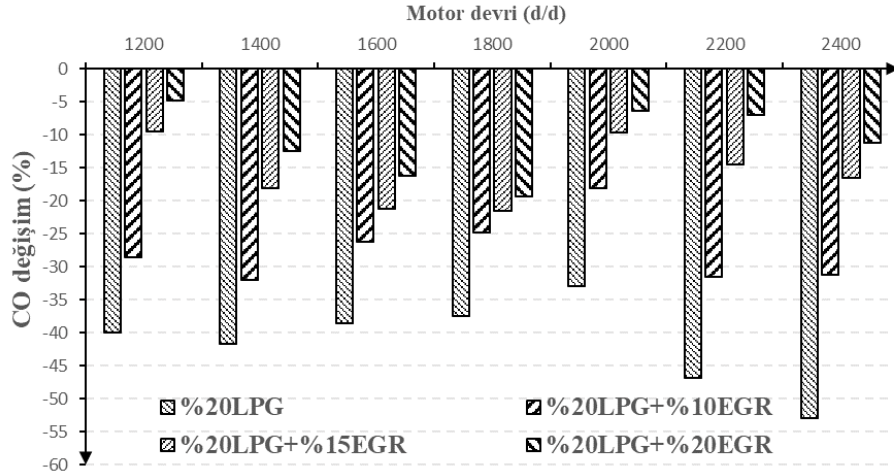
Grafiklerde görüldüğü gibi, LPG ilavesi ile artan hidrokarbon emisyonlarının EGR ilavesi ile bir miktar daha arttığı görülmektedir. Hidrokarbon emisyonları; %20 LPG ilavesi durumunda 2400 d/d’da 145 ppm, %20 LPG+%20 EGR ilavesi durumunda 2400 d/d’da 188 ppm, %30 LPG+%20 EGR ilavesi durumunda 2200 d/d’da 248 ppm olarak gerçekleşmiştir.

### 5.3.7. Karbonmonoksit (CO) emisyonları

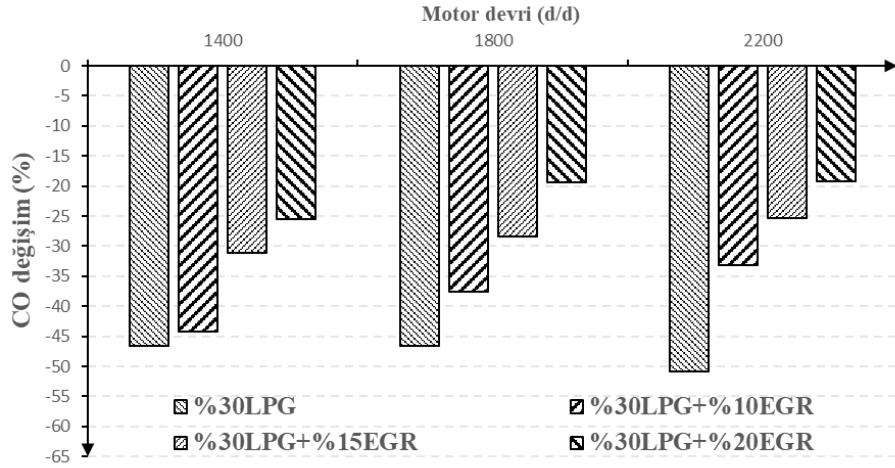
Şekil 5.36, Şekil 5.37 ve Şekil 5.38'de LPG ilavesine ek olarak çeşitli oranlarda EGR uygulamasının, karbonmonoksit emisyonlarına etkileri ve standart dizel duruma göre % değişim oranları verilmektedir.



Şekil 5.36 : Karbonmonoksit emisyonları.



Şekil 5.37 : Karbonmonoksit emisyonları % değişim.

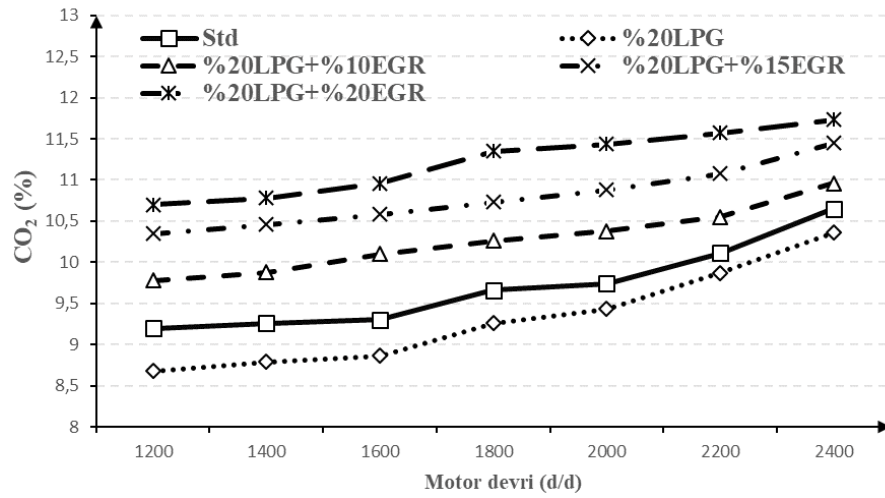


Şekil 5.38 : Karbonmonoksit emisyonları % değişim.

Grafiklerde görüldüğü gibi, LPG ilavesi ile önemli oranda azalan karbonmonoksit emisyonlarında EGR uygulaması ile artış meydana geldiği görülmektedir. Fakat, standart dizel çalışma ile kıyaslandığında LPG-dizel+EGR ile çalışmanın karbonmonoksit emisyonları açısından avantajlı olduğu görülmektedir.

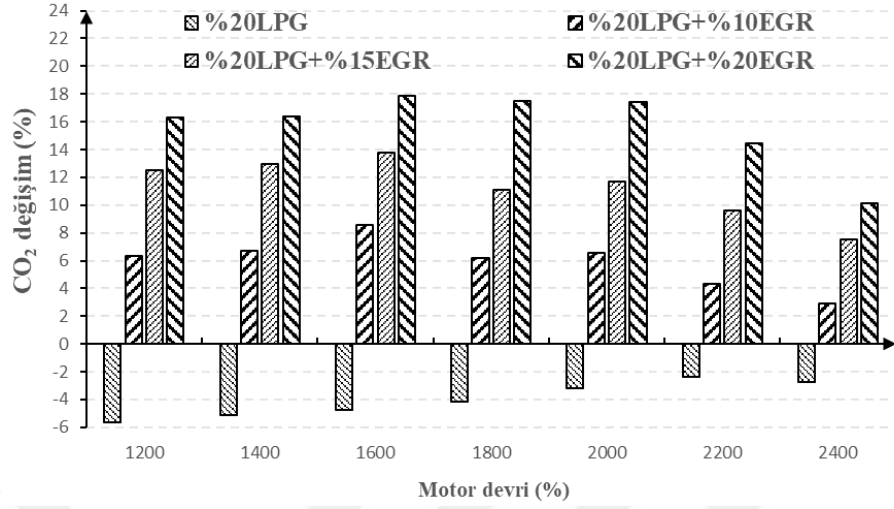
### 5.3.8. Karbondioksit (CO<sub>2</sub>) emisyonları

Şekil 5.39, Şekil 5.40 ve Şekil 5.41’de LPG ilavesine ek olarak çeşitli oranlarda EGR uygulamasının, karbondioksit emisyonlarına etkileri ve standart dizel çalışmaya göre % değişim oranları verilmektedir.

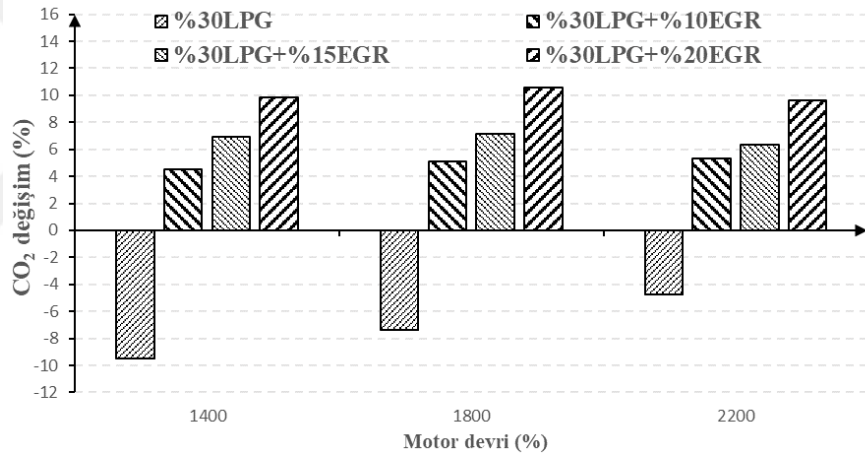


Şekil 5.39 : Karbondioksit emisyonları.





Şekil 5.40 : Karbondioksit emisyonları % değişim.

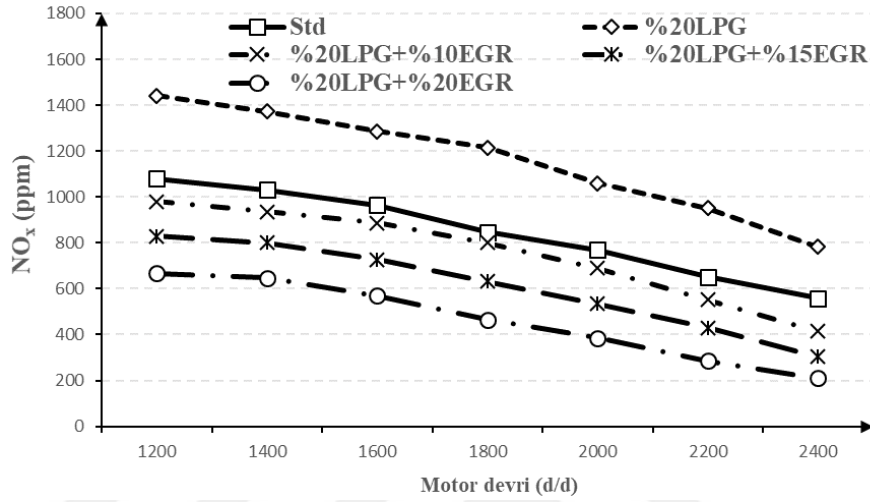


Şekil 5.41 : Karbondioksit emisyonları % değişim.

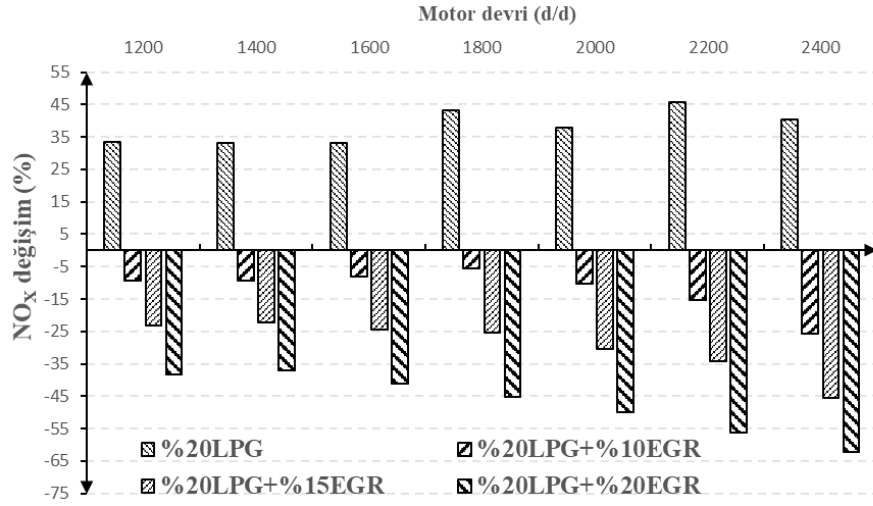
Grafiklerden anlaşılacağı üzere, LPG ilavesiyle azalan karbondioksit emisyonlarında, EGR ilavesi ile artış meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca, standart dizel çalışma ile kıyaslandığında bile karbondioksit emisyonlarının kötüleştiği tespit edilmiştir. Burada, standart dizel çalışma durumuna göre; %20 LPG ilavesi durumunda, 1200 d/d'da karbondioksit emisyonlarının yaklaşık %6 azaldığı, %20 LPG+%20 EGR ilavesi durumunda, 1600 d/d'da karbondioksit emisyonlarının standart dizel çalışmaya kıyasla yaklaşık olarak %18 arttığı, %30 LPG ilavesi durumunda, 1400 d/d'da karbondioksit emisyonlarının yaklaşık %8 azaldığı ve %30 LPG+%20 EGR ilavesi durumunda, 1800 d/d'da karbondioksit emisyonlarının yaklaşık %10 arttığı tespit edilmiştir.

### 5.3.9. Azot oksit (NO<sub>x</sub>) emisyonları

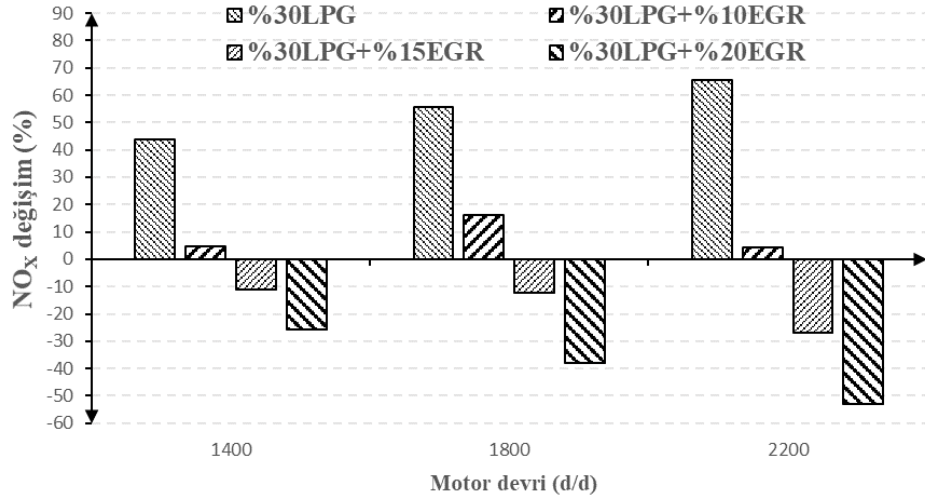
Şekil 5.42, Şekil 5.43 ve Şekil 5.44'de, %20 ve %30 LPG ilavesine ek olarak çeşitli oranlarda EGR uygulamasının, azot oksit emisyonlarına etkileri ve standart dizel duruma göre % değişim oranları verilmektedir.



Şekil 5.42 : Azot oksit emisyonları.



Şekil 5.43 : Azot oksit emisyonları % değişim.

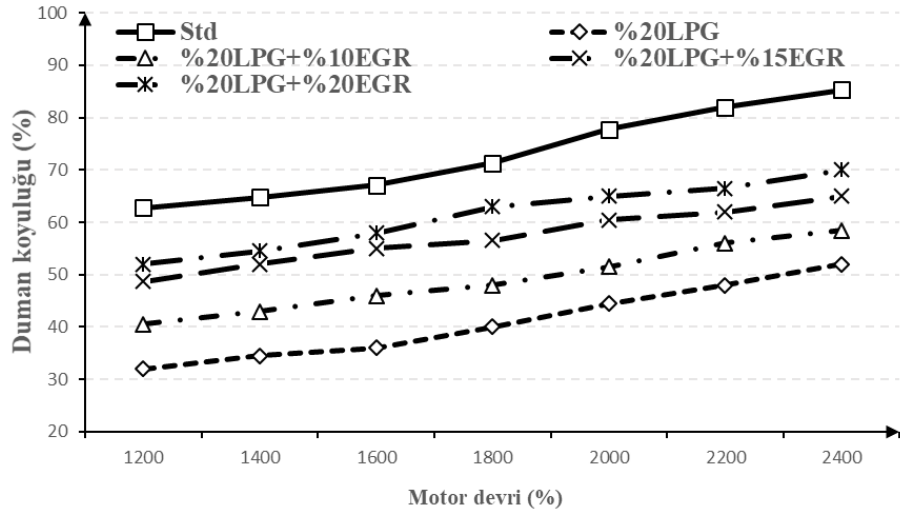


Şekil 5.44 : Azot oksit emisyonları % değişim.

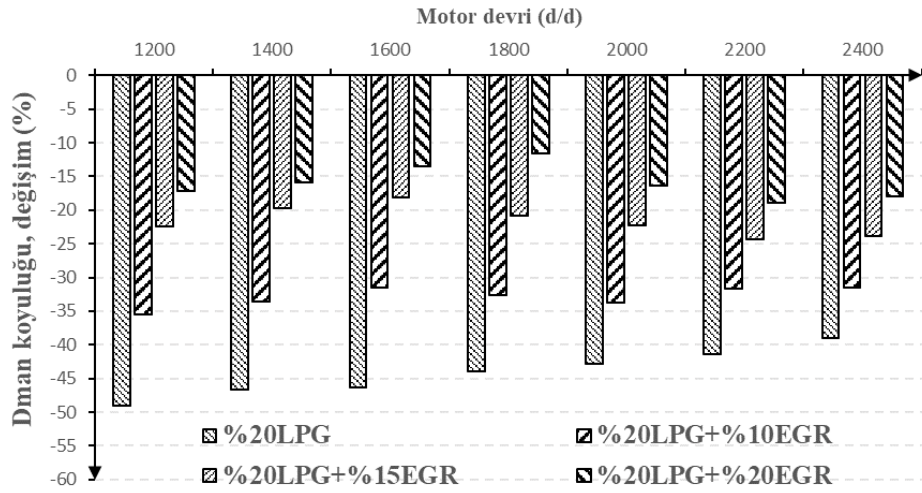
Grafiklerden görüldüğü gibi, LPG ilavesi ile artan azot oksit emisyonlarının EGR ilavesi ile hatırı sayılır oranlarda azaldığı görülmektedir. Burada, azot oksit emisyonlarının standart dizel çalışmaya kıyasla; %20 LPG+%10 EGR ilavesi durumunda ortalama %9, %20 LPG+%15 EGR ilavesi durumunda ortalama %27 ve %20 LPG+%20 EGR ilavesi durumunda ise ortalama %45 azaldığı görülmektedir. Bu durumun, silindir içerisine gönderilen egzoz gazının silindir içi sıcaklıklarını düşürmesinden dolayı meydana geldiği düşünülmektedir.

### 5.3.10. Duman-is koyuluğu

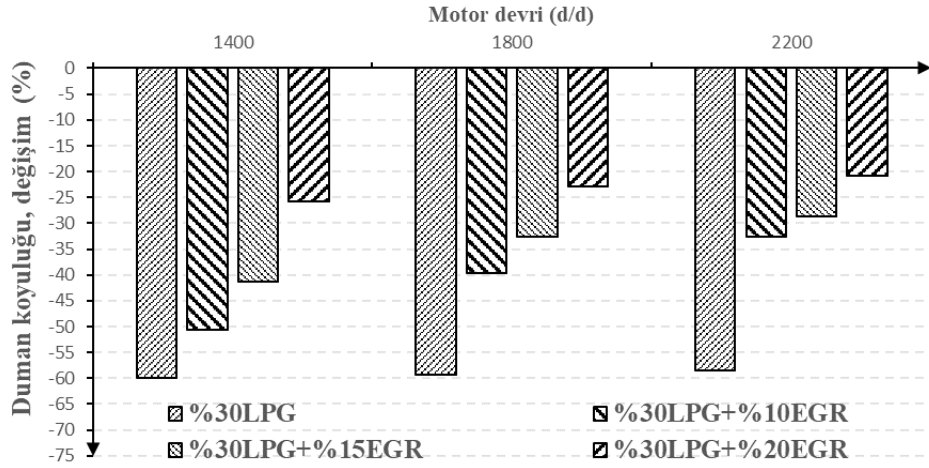
Şekil 5.45, Şekil 5.46 ve Şekil 5.47’de, LPG ilavesine ek olarak çeşitli oranlarda EGR uygulamasının, duman emisyonları olarak adlandırılan partikül madde oluşumlarına etkileri ve standart dizel duruma göre % olarak değişim oranları verilmektedir.



Şekil 5.45 : Duman koyuluğu.



Şekil 5.46 : Duman koyuluğu % değişim



Şekil 5.47 : Duman koyuluğu % değişim

Grafiklerden anlaşılacağı üzere, LPG ilavesi ile ciddi oranlarda azalan is emisyonlarının EGR ilavesi ile kötüleştiği görülmektedir. Fakat, standart dizel çalışmayla kıyaslandığında LPG-dizel+EGR ile çalışmanın is emisyonları bakımında daha avantajlı olduğu görülmektedir. Bu durumun, LPG'nin yapısında bulunan karbon yüzdesinin dizel yakıtıya kıyasla daha az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Burada, standart dizel çalışmaya kıyasla; %20LPG ilavesi durumunda ortalama %44 azalan duman koyuluğu, %20LPG+%20EGR ilavesi durumunda ortalama %15 azalmıştır. Duman koyuluğu, standart dizel yakıt çalışma ile kıyaslandığında, %30 LPG ilavesinde tüm devirler için ortalama %60 azalırken, %30LPG+%20EGR ilavesi durumunda ise duman koyuluğunun ortalama %23 azaldığı tespit edilmiştir.

## BÖLÜM 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu deneysel çalışmada, tek silindirli bir dizel motorunda, LPG-dizel çift yakıt ile çalışmanın motor performans ve emisyon karakteristikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Deneylere başlamadan önce motorun çift yakıt modunda çalışabilmesi için LPG yakıt sistemi deney düzeneğine adapte edilmiştir. Her bir deneyden önce motor rölanti devrinde çalıştırılarak motor suyu ve yağının rejim sıcaklıklarına gelmesi sağlanmıştır. Öncelikle, standart motor deneyleri %100 dizel yakıt kullanılarak sabit motor yükü ve gücünde tam yük ve değişken devir şartlarında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen; motor moment, güç, özgül yakıt sarfiyatı, efektif verim, indike parametreler ve emisyon değerleri kaydedilmiştir.

Ardından, LPG-dizel çift yakıt deneyleri sabit moment ve güç değerlerinde tam yük değişken devir şartlarında gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, motor yükü püskürtülecek LPG yüzdesi oranında düşürülerek dizel yakıt miktarı azaltılmıştır. Ardından %10, %20 ve %30 oranlarında LPG gazı pilot dizel yakıtı ilave olarak motor emme hattından kademeli olarak püskürtülmüştür. Ardından elde edilen veriler standart dizel çalışma ile karşılaştırılarak LPG-dizel çift yakıt çalışmanın sağladığı faydalar ve neden olduğu olumsuzluklar tespit edilerek çözüm yolları aranmıştır.

Elde edilen veriler karşılaştırıldığında, tüm motor devirlerinde LPG ilavesiyle çalışmanın özgül yakıt sarfiyatını kısmen iyileştirdiği görülmüştür. Burada, %10 LPG ilavesiyle en yüksek iyileşme 1400 ve 2400 d/d'da %0,75, %20 LPG ilavesiyle 2400 d/d'da %1,67 ve %30 LPG ilavesiyle ise yine 2400 d/d'da %2,17 olarak gerçekleşmiştir.

Dizel motorunda, çift yakıt uygulaması sonucunda tüm motor devirlerinde efektif verimde kısmen artmalar meydana geldiği görülmüştür. Burada; %10 LPG ilavesiyle en yüksek artış 2400 d/d'da %0,76, %20 LPG ilavesiyle 2400 d/d'da %1,67 ve %30 LPG ilavesiyle ise yine 2400 d/d'da %2,22 olarak gerçekleşmiştir.

Silindir içi indike parametreler bakımından karşılaştırıldığında ise LPG ilavesi ile silindir içi indike basınç ve ısı yayılım oranında standart dizel çalışma ile kıyaslandığında iyileşmeler olduğu görülmüştür.

LPG'nin motorine kıyasla daha ekonomik bir yakıt olmasının getirdiği avantajlar düşünüldüğünde LPG-dizel çift yakıt kullanımının standart dizel çalışma ile kıyaslandığında tüm motor yüklerinde tasarruf sağladığı tespit edilmiştir. Burada, en yüksek tasarruf %30 LPG ilavesiyle 2400 d/d'da %12,75 olarak sağlanmıştır. Çalışılan deney moturunun tek silindirli olduğu düşünüldüğünde daha yüksek silindir sayılarına sahip motorlar için bu oran silindir sayısı ile çarpılacaktır. Böylelikle, maliyetlerde çok ciddi tasarruflar elde edilebilecektir.

Emisyonlar açısından değerlendirdiğimizde, LPG-dizel çift yakıt çalışmanın Duman emisyonlarını oldukça ciddi oranlarda düşürdüğü görülmektedir. Burada, duman emisyonlarında; %10, %20 ve %30 LPG ilavesiyle 1200 d/d'da standart dizel yakıt çalışma ile kıyaslandığında sırasıyla %25, %43 ve %65 oranlarında iyileşme meydana gelmiştir.

Diğer bir önemli emisyon parametresi olan karbonmonoksit emisyonları açısından değerlendirildiğinde yine tüm motor devirlerinde LPG ilavesiyle karbonmonoksit emisyonlarında azalmalar olduğu görülmüştür. Burada, en yüksek iyileşme %10 LPG ilavesiyle 1800 d/d'da %27, %20 LPG ilavesiyle yine 1800 d/d'da %37,5 ve %30 LPG ilavesiyle ise yine 1800 d/d'da %47 olarak gerçekleşmiştir.

Karbondioksit emisyonlarında LPG-dizel çift yakıt çalışma durumunda standart dizel yakıt çalışmaya kıyasla azalmalar meydana gelmiştir. En yüksek iyileşme oranı ise %30 LPG ilavesiyle 1200 d/d'da %10,65 olarak gerçekleşmiştir.

Diğer taraftan, LPG-dizel çift yakıt çalışmanın, emisyonlar açısından birtakım olumsuzluklara neden olduğu görülmüştür. Tüm motor devirlerinde LPG ilavesiyle hidrokarbon emisyonlarında ciddi artışlar meydana gelmiştir. Standart dizel çalışma durumunda 1800 d/d'da 18 ppm olan hidrokarbon emisyonları, %10, %20 ve %30 LPG ilavesi durumunda sırasıyla; 76, 110 ve 165 ppm olarak gerçekleşmiştir.

Bir diğer önemli emisyon parametresi olan azot oksitlerde de LPG ilavesiyle tüm motor devirlerinde artışlar meydana geldiği görülmüştür. En yüksek artış; %10 LPG ilavesiyle 1200 d/d'da %26, %20 LPG ilavesiyle 2200 d/d'da %45 ve %30 LPG ilavesiyle yine 2200 d/d'da %65 olarak gerçekleşmiştir. Bu aşamada, LPG-dizel çift yakıt çalışmanın genel olarak motor performans ve emisyonlar açısından sağladığı avantajlar

düşünüldüğünde azot oksit emisyonlarını iyileştirebilmek adına EGR (Egzoz Gazı Geri Gönderim) uygulaması yapılmasına karar verilmiştir.

Motor performans ve emisyonları düşünüldüğünde %20 ve %30 LPG oranları için %10, %15 ve %20 oranlarında EGR uygulanması uygun bulunmuştur. Bu aşamada, %20 LPG oranı için tüm motor devirlerinde EGR uygulaması yapılırken, %30 LPG için ise 1400, 1800 ve 2200 d/d motor devirleri için EGR uygulanarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

Dizel motorunda, LPG ilavesine ek olarak EGR uygulaması ile özgül yakıt sarfiyatında çift yakıt çalışmaya kıyasla nispeten artışlar meydana geldiği görülmüştür. Fakat, standart dizel çalışma ile kıyaslandığında LPG-dizel+EGR ile çalışmanın nispeten avantajlı olduğu anlaşılmıştır. Standart dizel yakıt çalışma ile kıyaslandığında özgül yakıt sarfiyatında; %20LPG+%10EGR ilavesiyle 2200 d/d'da %1,31, %20LPG+%15EGR ilavesiyle 2200 d/d'da %1,23 ve %20LPG+%20EGR ilavesiyle yine 2200 d/d'da %1,15 oranında iyileşmeler meydana gelmiştir. Diğer taraftan, %30LPG+%10 EGR ilavesiyle 1400 d/d'da %1,38, %30 LPG+%15 EGR ilavesiyle 1400 d/d'da %1,06 ve %30 LPG+%20 EGR ilavesiyle ise % 0,90 olarak gerçekleşmiştir. Görüldüğü gibi artan EGR oranlarıyla birlikte özgül yakıt sarfiyatında LPG-dizel çalışmaya kıyasla nispeten artışlar meydana geldiği tespit edilmiştir.

Pilot dizel yakıtı ek olarak LPG gazı ilavesiyle nispeten artan efektif verimde, egzoz gazı geri gönderimi ile bir miktar azalmalar meydana gelmiştir. Fakat, dizel çalışma ile kıyaslandığında LPG-dizel+EGR'li çalışmanın avantajlı olduğu görülmüştür. Standart dizel yakıt çalışma ile kıyaslandığında, efektif verim; 20 LPG+%10 EGR oranı için 1200 d/d'da % 1,10 ve %30 LPG+%10 EGR ilavesiyle 1400 d/d'da %1,40 oranında artmıştır. Diğer taraftan, artan EGR oranlarıyla birlikte LPG-dizel çift yakıt çalışmaya kıyasla efektif verimde nispeten azalmalar meydana gelmiştir.

LPG ilavesine ek olarak EGR uygulaması ile silindir içi indike basınçta LPG-dizel çift yakıt çalışma ile kıyaslandığında nispeten azalmalar olduğu görülmüştür. Diğer taraftan, ısı yayılım oranında da EGR uygulaması ile artış meydana geldiği görülmüştür.

Yine, LPG-dizel çift yakıt çalışma durumunda EGR ilavesi ile birlikte yakıt tasarrufunda bir miktar kötüleşme olduğu görülmüştür. Fakat, standart dizel çalışma ile kıyaslandığında LPG-dizel+EGR ile çalışmanın yakıt maliyetleri bakımından standart duruma göre daha avantajlı olduğu tespit edilmiştir. Burada, en çok artış %20 LPG+%10



EGR ilavesiyle 2200 d/d'da %7,71 olarak ve %30 LPG+%10 EGR ilavesiyle 2200 d/d'da %11,3 olarak gerçekleşmiştir. Artan EGR oranlarıyla birlikte yakıt maliyetleri, çift yakıt çalışmayla kıyaslandığında nispeten artış göstermiştir.

Duman emisyonları açısından değerlendirildiğinde ise, standart dizel yakıt çalışma ile kıyaslandığında LPG ilavesiyle önemli oranda azalan duman emisyonları EGR uygulaması ile nispeten artış göstermiştir. Fakat, dizel çalışma ile kıyaslandığında avantajlı durumunda olduğu görülmüştür. Burada; %20 LPG ilavesi durumunda 1200 d/d'da standart dizel çalışmaya kıyasla %49 azalan duman emisyonları, %20LPG+%20EGR ilavesi durumunda ise 1200 d/d'da %17 oranında azalmıştır. %30 LPG ilavesi durumunda ise standart dizel yakıt çalışmaya kıyasla duman emisyonlarında en yüksek iyileşme 1200 d/d'da %63 olurken, %30LPG+%20 EGR ilavesi durumunda 1400 d/d'da yaklaşık %25 olarak gerçekleşmiştir.

LPG-dizel çift yakıt çalışma ile kıyaslandığında karbonmonoksit emisyonlarında EGR uygulaması ile artış meydana geldiği görülmüştür. Fakat, dizel çalışma ile karşılaştırıldığında karbonmonoksit emisyonları bakımından EGR uygulamasının avantajlı olduğu görülmüştür. Burada, standart dizel yakıt çalışma ile kıyaslandığında; %20 LPG ilavesi durumunda karbonmonoksit emisyonlarında ortalama %40 azalma meydana gelirken, %20 LPG ilavesine ek olarak %10, %15 ve %20 oranında EGR ilavesi durumunda ise karbonmonoksit emisyonlarında sırasıyla; %28, %16 ve %11 oranında azalma meydana gelmiştir.

LPG ilavesi ile azalan karbondioksit emisyonlarında, EGR uygulaması ile birlikte artış meydana geldiği görülmüştür. Burada, standart dizel çalışma ile kıyaslandığında; %20 LPG ilavesi durumunda, karbondioksit emisyonları ortalama %4 oranında azalırken, %20 LPG'ye ek olarak %10, %15 ve %20 oranında EGR ilavesi ile birlikte karbondioksit emisyonlarında standart dizel yakıt çalışma ile kıyaslandığında sırasıyla; %6, %11 ve %15 oranında artış meydana geldiği tespit edilmiştir.

Dizel motorlarında, LPG ilavesi ile ciddi oranda artan hidrokarbon emisyonlarının, EGR ilavesi ile birlikte bir miktar daha arttığı görülmüştür. Burada; %20 LPG ilavesi durumunda, 1400d/d'da 115 ppm olan hidrokarbon emisyonu, %10, %15 ve %20 oranında EGR ilavesiyle 1400 d/d'da sırasıyla; 132, 144 ve 155 ppm olarak gerçekleşmiştir.

Son olarak, LPG ilavesiyle artan azot oksit emisyonları, EGR uygulaması ile birlikte beklendiği şekilde önemli miktarda iyileşmiştir. Burada, standart dizel yakıt çalışma ile kıyaslandığında; %20 LPG ilavesi durumunda ortalama %38 oranında artan azot oksit emisyonları, %10, %15 ve %20 oranında EGR uygulaması ile birlikte standart dizel yakıt çalışmaya kıyasla, sırasıyla; %12, %30 ve %47 oranında azalmıştır. En yüksek azalış; %20 LPG+%20 EGR ilavesi durumunda 2400 d/d'da %62 ve %30 LPG+%20 EGR ilavesiyle 2200 d/d'da %52 olarak gerçekleşmiştir.

Sonuç olarak, tek silindirli dizel motorunda, LPG ilavesinin efektif verimi arttırdığı, özgül yakıt tüketimini iyileştirdiği, duman, karbonmonoksit ve karbondioksit emisyonlarını düşürdüğü fakat azot oksit ve hidrokarbon emisyonlarını arttırdığı görülmüştür. En iyi LPG oranının, motor performans ve emisyon karakteristikleri göz önünde bulundurulduğunda %20 LPG oranı olduğu düşünülmektedir. Diğer taraftan, en iyi EGR oranının ise %15 EGR olduğu görülmüştür. Bu durumda, %20 LPG+%15 EGR ile çalışmanın motor performans ve emisyonları bakımından uygun olduğuna karar verilmiştir.

Deneyisel çalışmalar neticesinde elde edilen veriler dikkate alındığında yeni çalışmalara yol göstermesi açısından şu öneriler yapılabilir;

-Motor vuruntusu ortadan kaldırıldığı durumda daha yüksek oranlarda LPG uygulaması yapılarak motor performans değerleri artırılabilir.

-Daha yüksek HFK oranlarında çalışılarak azot oksit emisyonlarında iyileşmeler sağlanabilir.

-LPG'nin direkt olarak silindir içerisine püskürtülmesiyle yanmanın iyileştirilmesi ve volümetrik verimin artmasıyla hidrokarbon emisyonları iyileştirilebilir.

-Deneyin gerçekleştirildiği dizel motorun tek silindirli bir motor olduğu düşünüldüğünde, Daha yüksek silindir sayılarına sahip dizel motorlarında yapılacak ufak modifikasyonlar sayesinde konvansiyonel dizel motor LPG-dizel çift yakıt çalışacak duruma getirilerek özellikle kamyon, otobüs, iş makinaları gibi ağır vasıtalarda önemli oranda yakıt tasarrufu sağlanabilir.

## KAYNAKLAR

Acaroğlu, M., Ünalđı, M. ve Aydoğan, H. (2009). Yakıtlar ve Yanma. Yer: Nobel Yayın Dağıtım.

Aktaş, A. ve Doğan, O. (2009). Çift Yakitli Bir Dizel Motorda Lpg Yüzdesinin Performans ve Egzoz Emisyonlarına Etkisi. *Dergipark, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 25, 171-178. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/75679>

Aliustaoğlu, S. ve Ayhan, V. (2018). Tek Silindirli Dizel Motorda LPG-Dizel Çift Yakıt Karışımının Performans ve İS Emisyonlarına Etkileri. *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi (IMASCON), Bildiriler Kitabı, Kasım 2018*. 1684-1690. Erişim adresi: [http://www.imascon.com/dosyalar/imascon2018/imascon2018\\_tam\\_metin.pdf](http://www.imascon.com/dosyalar/imascon2018/imascon2018_tam_metin.pdf)

Arslan, Ü. Ç. ve Demirağ, Y. H. (2017). Sanayi Devrimi: Sonuçları ve Uluslararası Sisteme Yansımaları. *Başkent Üniversitesi, Avrupa Birliği ve Uluslararası İlişkiler Enstitüsü*, Erişim adresi: [https://www.academia.edu/35814711/Sanayi\\_Devrimi\\_Sonu%C3%A7lar%C4%B1\\_ve\\_Uluslararası\\_Sisteme\\_Yans%C4%B1malar%C4%B1](https://www.academia.edu/35814711/Sanayi_Devrimi_Sonu%C3%A7lar%C4%B1_ve_Uluslararası_Sisteme_Yans%C4%B1malar%C4%B1)

Ashok, B., Ashok, S.D. ve Kumar, C.R. (2015). LPG diesel dual fuel engine – A critical review. *Alexandria Engineering Journal, Science Direct*, 54, 105-126, 2015. doi: 10.1016/j.aej.2015.03.002

Avrupa Komisyonu, (2018). European Commission, *Environmental aspects of the automotive industry, Emission in the automotive sector*, Erişim adresi: [https://ec.europa.eu/growth/sectors/automotive/environment-protection/emissions\\_en](https://ec.europa.eu/growth/sectors/automotive/environment-protection/emissions_en)

Avrupa Otomobil Üreticileri Birliği (ACEA), (2018). European Automobile Manufacturers Association, *Vehicle in Use Europe, 2018*. Erişim adresi: [https://www.acea.be/uploads/statistic\\_documents/ACEA\\_Report\\_Vehicles\\_in\\_use-Europe\\_2018.pdf](https://www.acea.be/uploads/statistic_documents/ACEA_Report_Vehicles_in_use-Europe_2018.pdf)

Avrupa Otomobil Üreticileri Birliği (ACEA), (2016). Passenger Car Fleet by Fuel Type, EU passenger car fleet by fuel type. Erişim adresi: <https://www.acea.be/statistics/tag/category/passenger-car-fleet-by-fuel-type>

Ayhan, V. (2009). *Bir Dizel Motoruna Buhar Enjeksiyonunun NOx ve İS Emisyonlarına Etkisinin Araştırılması*, (Doktora Tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya. Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>

Ayhan, V. (2016). Bir Dizel Motora Metanol Fumigasyonunun Performans ve Emisyonlara Etkisi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 13, (65-76). Erişim adresi: [www.teknolojikarastirmalar.com](http://www.teknolojikarastirmalar.com)

Ayhan, V., Parlak, A., Cesur, I., Boru, B. ve Kolip, A. (2011). Performance and exhaust emission characteristics of a diesel engine running with LPG. *International Journal of the Physical Sciences, Academic Journals*, 6, 1905-1914, 2011. doi: 10.5897/IJPS11.288

Aytaş, E.N. (2012). Doğalgazın İçten Yanmalı Motorlarda Kullanımı, *Academia*, Erişim adresi:

[https://www.academia.edu/6080868/DO%C4%9EALGAZIN\\_%C4%B0%C3%87TEN\\_YANMALI\\_MOTORLARD\\_A\\_KULLANILMASI](https://www.academia.edu/6080868/DO%C4%9EALGAZIN_%C4%B0%C3%87TEN_YANMALI_MOTORLARD_A_KULLANILMASI)

Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı (EPA), (2018). United States Environmental Protection Agency, *Emission Standards Reference Guide for On-road and Nonroad Vehicles and Engines*. Erişim adresi: <https://www.epa.gov/emission-standards-reference-guide>

Birleşik Devletler Enerji Bilgi Yönetimi (EIA), (2019). U.S Energy Information Administration, *Wholesale spot petroleum prices*. Erişim adresi: <https://www.eia.gov/petroleum/>

Can, Ö. (2012). *Bir DI Dizel Motorda Etanol Ön Karışımli Kısmi-HCCI Uygulamasının Yanma ve Emisyonlar Üzerine Etkilerinin İncelenmesi*, (Doktora Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara. Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>

ClimateTechWiki, (2011). A Clean Technology Platform, Status of the technology and its future market potential. Erişim adresi: <https://www.climatetechwiki.org/technology/lpg#Introduction>

Çavgun, E. (2019). *Çift Yakıtlı Bir Dizel Motorda Sıkıştırma Oranının LPG Kullanımına Etkilerinin Deneysel Olarak Araştırılması*. Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman. Erişim adresi: [http://earsiv.batman.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/20.500.12402/1955/Erdal%20%C3%87AVGUN-](http://earsiv.batman.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/20.500.12402/1955/Erdal%20%C3%87AVGUN-%C3%87ift%20Yak%C4%B1tl%C4%B1%20Bir%20Dizel%20Motorda%20S%C4%B1k%C4%B1C5%9Ft%C4%B1rma%20Oran%C4%B1n%C4%B1n%20LPG%20Kullan%C4%B1m%C4%B1na%20Etkilerinin%20Deneysel%20Olarak%20Ara%C5%9Ft%C4%B1r%C4%B1lmas%C4%B1.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

<http://earsiv.batman.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/20.500.12402/1955/Erdal%20%C3%87AVGUN-%C3%87ift%20Yak%C4%B1tl%C4%B1%20Bir%20Dizel%20Motorda%20S%C4%B1k%C4%B1C5%9Ft%C4%B1rma%20Oran%C4%B1n%C4%B1n%20LPG%20Kullan%C4%B1m%C4%B1na%20Etkilerinin%20Deneysel%20Olarak%20Ara%C5%9Ft%C4%B1r%C4%B1lmas%C4%B1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Deniz, O. (2008). İçten Yanmalı Motorlar Ders Notları. Erişim adresi: <http://www.yildiz.edu.tr/~odeniz/Ders%20Kitabi.pdf>

Dhole, A.E., Yarasu, Y.B., Lata, D.B. ve Priyam, A. (2014). Effect on performance and emissions of a dual fuel diesel engine using hydrogen and producer gas as secondary fuels. *Elsevier, International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 8087-8097, 2014. doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.03.085

Dizel motorlarının çalışma prensibi. Dizel motorlarında yanma olayı, (25 Ağustos 2019). Erişim adresi: <https://www.tech-worm.com/dizel-motorlarinin-calisma-prensibi/>

Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, (2018). *2018 Enerji Görünümü: 2040'a Bakış*, Erişim adresi: <https://www.dunyaenerji.org.tr/2018-enerji-gorunumu-2040a-bakis/>

Dünya Enerji Konseyi, (2018). *World Energy Council, Annual Report 2018*. Erişim adresi: <https://www.worldenergy.org/about-us/annual-reports>

- Dünya LPG Derneği (WLPGA), (2018). World LPG Association, What is LPG. Erişim adresi: <https://www.wlpga.org/about-lpg/what-is-lpg/>
- Dünya LPG Derneği (WLPGA), (2018). World LPG Associaton, On the move. Erişim adresi: <https://www.wlpga.org/about-lpg/applications/>
- Dünya nüfusu, (2018). Erişim adresi: <http://www.worldometers.info/tr/>
- Elnajjar, E., Selim, M.Y.E. ve Hamdan, M.O. (2013). Experimental study of dual fuel engine performance using variable LPG composition and engine parameters. *Elsevier, Science Direct*, 76, 32-42, 2013. doi: 10.1016/j.enconman.2013.06.050
- Emisyon Standartları, (2019). Emission Standarts, Cars and Light Trucks. Erişim adresi: <https://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php#stds>
- Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, (2018). *Yenilenebilir Enerji, Biyodizel*. Erişim adresi: <http://www.yegm.gov.tr/yenilenebilir/biyodizel.aspx>
- Ergen, G. (2011). *Doğalgaz Kullanılan Çift Yakıtlı Bir Dizel Motorunda Biyoyakıt ve Katkı Maddesi Kullanımının Kısmi Yüklerdeki Performans ve Emisyon Karakteristiklerine Etkileri*, (Doktora Tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya. Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Güler, Y. (2006). *İçten Yanmalı Motorlarda Lpg'nin Yakıt Olarak Kullanımı* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Haşimoğlu, C. (2005). *Düşük Isı Kayıplı Bir Dizel Motorunda Biyodizel Kullanımının Performans ve Emisyon Parametrelerine Etkileri* (Doktora Tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya. Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Hitit Üniversitesi, (2019). Deneysel Çalışmalarda Hata ve Belirsizlik Analizi. Erişim adresi: [http://cdn.hitit.edu.tr/mf/files/66164\\_2047113654.pdf](http://cdn.hitit.edu.tr/mf/files/66164_2047113654.pdf)
- İpragaz, (2019). Otogaz Nedir? Erişim adresi: <https://www.ipragaz.com.tr/yolda/otogaz/otogaz-nedir>
- Karabektaş, M. ve Ergen, G. (2009). Taşıtlarda Doğalgaz Kullanım Teknolojileri. 5. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*. Erişim adresi: <https://pdfs.semanticscholar.org/468c/83777441bc8a9af05553fc7b2031b4d37cc1.pdf>
- Kelen, F. (2014). Motorlu Taşıt Emisyonlarının İnsan Sağlığı ve Çevre Üzerine Etkileri. *Dergipark, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19, 80-87, 2014. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed/issue/21969/235883>
- Kılıç, T., Bozkurt, T., Mamalı, C., Ünal, G., Gümüş, A., Şentürk, H., Solak, Z. ve Karataş, Ö. (2008). *Motorlu Taşıtlar ve Adapazarın'da Motorlu Taşıtlardan Kaynaklanan Emisyonların Envanterlenmesi*. Erişim adresi: <http://www.sahakk.sakarya.edu.tr/documents/raporlar/motorlu-tasitlar-ve-emisyonlari.pdf>

Kim, T. Y., Park, C., Oh, S. ve Cho, G. (2016). The effects of stratified lean combustion and exhaust gas recirculation on combustion and emission characteristics of an LPG direct injection engine. *Elsevier, Science Direct*, 115, 386-396. doi: 10.1016/j.energy.2016.09.025

Kumaraswamy, A. ve Prasad, B.D. (2012). Performance Analysis of a Dual Fuel Engine Using LPG and Diesel with EGR System. *Elsevier, Science Direct*, 38, 2784-2792, 2012. doi: 10.1016/j.proeng.2012.06.326

Lata, D.B., Misra, A. ve Medhekar, S. (2011). Investigations on the combustion parameters of a dual fuel diesel engine with hydrogen and LPG as secondary fuels. *Elsevier, Science Direct*, 36, 13808-13819, 2011. doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.07.142

Makine Mühendisleri Odası (MMO), (2015). Erişim adresi: [http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya\\_ekler/75fcb6de80025fe\\_ek.pdf?tipi=68&turu=X&sube=7](http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/75fcb6de80025fe_ek.pdf?tipi=68&turu=X&sube=7)

Milli Eğitim Bakanlığı (MEB.), (2011). Motorlu Araçlar Teknolojisi, Egzoz Emisyon Kontrolü. Ankara, 2011. Erişim adresi: [http://www.megep.meb.gov.tr/mte\\_program\\_modul/moduller\\_pdf/Egzoz%20Emisyon%20Kontrol%C3%BC.pdf](http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Egzoz%20Emisyon%20Kontrol%C3%BC.pdf)

Milli Eğitim Bakanlığı (MEB.), (2012). Kimya Teknolojisi, LPG Üretimi ve LPG Kükürt Giderme Ünitesi. Ankara, 2012. Erişim adresi: [http://www.megep.meb.gov.tr/mte\\_program\\_modul/moduller\\_pdf/Lpg%20%C3%9Cretimi%20Ve%20Lpg%20K%C3%BCk%C3%BCrt%20Giderme%20%C3%9Cnitesi.pdf](http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Lpg%20%C3%9Cretimi%20Ve%20Lpg%20K%C3%BCk%C3%BCrt%20Giderme%20%C3%9Cnitesi.pdf)

Milli Eğitim Bakanlığı (MEB.), (2013). Motorlu Araçlar Teknolojisi, Motor Çevrimleri ve yakıtlar. Ankara, 2013. Erişim adresi: [http://www.megep.meb.gov.tr/mte\\_program\\_modul/moduller\\_pdf/Motor%20%C3%87e%20vrimleri%20Ve%20Yak%C4%B1tlar.pdf](http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Motor%20%C3%87e%20vrimleri%20Ve%20Yak%C4%B1tlar.pdf)

Mühendis Beyinler, (2018). SCR Nedir? Erişim adresi: <https://www.muhendisbeyinler.net/scr-nedir/>

Otomotiv Sanayii Derneği (OSD), (2018). Otomotiv Sanayii Derneği, *TÜİK Motorlu Kara Taşıtları Mayıs 2018*. Erişim adresi: <http://www.osd.org.tr/bilgi-bankasi/tuik/>

Otomobil Teknolojisi, (2018). SCR Sistemi Nedir? Nasıl Çalışır? Erişim adresi: <https://otomobilteknoloji.blogspot.com/2019/05/scr-sistemi-nedir-nasl-calsr-secici.html>

Petro Industry News, (2018). How Many Vehicles Use LPG? Erişim adresi: <https://www.petro-online.com/news/analytical-instrumentation/11/breaking-news/how-many-vehicles-use-lpg/47570>

Polat, S. (2011). Hitit Üniversitesi, Meslek Yüksek Okulu. Erişim adresi: <http://web.hitit.edu.tr/dosyalar/materiyaller/hicriyavuz@hititedutr100220179U6G8Q9S.pdf>

Rimkus, A., Melaika, M. ve Matijošius, J. (2017). Efficient and Ecological Indicators of CI Engine Fuelled with Different Diesel and LPG Mixtures. *Elsevier, Science Direct*, 187, 504-512, 2017. doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.407

- Rimkus, A., Berioza, M., Melaika, R., Juknelevičiusa, R. ve Bogdanovičius, Z. (2016). Improvement of the Compression-ignition Engine Indicators Using Dual Fuel (Diesel and Liquefied Petroleum Gas). *Elsevier, Science Direct, 134*, 30-39, 2016. doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.035
- Saleh, H.E. (2008). Effect of variation in LPG composition on emissions and performance in a dual fuel diesel engine. *Elsevier, Science Direct, 87*, 3031-3039, 2008. doi: 10.1016/j.fuel.2008.04.007
- Sekiz Silindir. 4 zamanlı dizel motor, (15 Mayıs 2019). Erişim adresi: <https://www.sekizsilindir.com/2017/11/motor-freni-retarder-nedir-nasil-calisir.html/4-zamanlc4b1-dizel-motor>
- Shell Türkiye, (2019). Akaryakıt Pompa Satış Fiyatları. Erişim adresi: <https://www.shell.com.tr/motorists/shell-fuels/akaryakit-pompa-satis-fiyatları.html>
- SinghYadav, V., Soni, S.L. ve Sharma, D. (2011). Performance and emission studies of direct injection C.I. engine in duel fuel mode (hydrogen-diesel) with EGR. *Elsevier, Science Direct, 37*, 3807-3817, 2012. doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.04.163
- Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), (2018). International Energy Agency, *World Energy Outlook The gold standard of energy analysis*. Erişim adresi: <https://www.iea.org/weo/>
- Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), (2018). International Energy Agency, *Statistics Global energy data at your fingertips*. Erişim adresi: <https://www.iea.org/statistics/?country=TURKEY&year=2016&category=Energy%20supply&indicator=TPESbySource&mode=chart&dataTable=BALANCES>
- Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), (2018). International Energy Agency (IEA). *World Energy Outlook 2018, The Gold Standard of Energy Analysis*. Erişim adresi: <https://www.iea.org/weo2018/>
- Uluslararası Motorlu Taşıtlı Üreticileri Organizasyonu (OICA), (2018). International Organization of Motor Vehicle Manufacturers, *World Vehicles in Use*. Erişim adresi: [http://www.oica.net/wp-content/uploads//Total\\_in-use-All-Vehicles.pdf](http://www.oica.net/wp-content/uploads//Total_in-use-All-Vehicles.pdf)
- Uyumaz, A., Boz, F., Yılmaz, E., Solmaz, H. ve Polat, S. (2017). Taşıtlı Egzoz Emisyonlarını Azaltma Yöntemlerindeki Gelişmeler, *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi Özel Sayı 1*, 15-24. Erişim adresi: [https://www.researchgate.net/publication/329091501\\_TASIT\\_EGZOZ\\_EMISYONLARINI\\_AZALTMA\\_YONTEMLERINDEKI\\_GELISMELERTASIT\\_EGZOZ\\_EMISYONLARINI\\_AZALTMA\\_YONTEMLERINDEKI\\_GELISMELER](https://www.researchgate.net/publication/329091501_TASIT_EGZOZ_EMISYONLARINI_AZALTMA_YONTEMLERINDEKI_GELISMELERTASIT_EGZOZ_EMISYONLARINI_AZALTMA_YONTEMLERINDEKI_GELISMELER)
- Tasarım Dizel Emisyonları, (2010). Dizel Motor Emisyonlarının İncelenmesi. Erişim adresi: <http://www.sahakk.sakarya.edu.tr/documents/23.12.2009%20Tasarim%20Dizel%20emisyonları.pdf>
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, (2017). *Dünya ve Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Görünümü*. Erişim adresi: <https://www.enerji.gov.tr/File/?path=ROOT%2F1%2FDocuments%2FEnerji%20ve%20>

Tabii%20Kaynaklar%20G%C3%B6r%C3%BCn%C3%BCm%C3%BC%2FSayı\_15.pdf

T.C. Milli Eğitim Bakanlığı (MEB), (2011). Motorlu Araçlar Teknolojisi, Egzoz Emisyon Kontrolü. Erişim adresi: [http://www.megep.meb.gov.tr/mte\\_program\\_modul/moduller\\_pdf/Egzoz%20Emisyon%20Kontrolü.pdf](http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Egzoz%20Emisyon%20Kontrolü.pdf)

TMMOB Kimya Mühendisleri Odası, (2015). Sıvılaştırılmış Petrol Gazı (LPG) Mevzuatı, Ankara Şubesi. Erişim adresi: [http://www.kmo.org.tr/genel/bizden\\_detay.php?kod=2508](http://www.kmo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=2508)

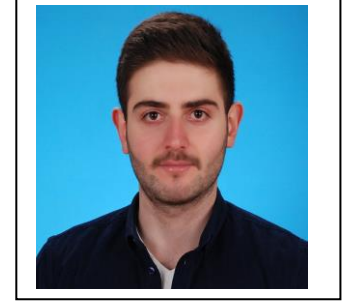
Türkiye LPG Derneği (TLPGD), (2018). *LPG'nin Çevre Üzerindeki Etkileri*. Erişim adresi: <https://www.tlpgder.org.tr/Default.aspx>

2872 sayılı Çevre Kanunu (1983) ve 644 sayılı Çevre ve Şehircilik Bakanlığının Teşkilat ve Görevleri Hakkında Kanun Hükmünde Kararname (2011). Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2017). *Egzoz Gazı Emisyonu Yönetmeliği*. Erişim adresi: <https://egzoz.csb.gov.tr/Egz/Files/EgzozYonetmelik.docx>



## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Semih Aliustaoğlu  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 21.09.1990 / Kastamonu  
**E-posta** : semihaliusta@gmail.com



### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2019, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Lisans eğitimi kapsamında zorunlu üretim stajımı TürkTraktör Ziraat Makineleri A.Ş. (2013) firmasında ve zorunlu yönetim stajımı, TAİ-TUSAŞ (Türk Havacılık ve Uzay Sanayii) (2014) şirketinde tamamladım.
- 2015 yılında, onur belgesi ile birlikte Karabük Üniversitesi, Otomotiv Mühendisliği bölümünden mezun oldum.
- 2015 yılında Sakarya Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimime başladım. Bu süreçte, Erasmus programı kapsamında Polonya'nın Czeszochowa Teknoloji Üniversitesi, Makine Mühendisliği bölümünde 5 ay süresince eğitim faaliyetinde bulundum. Ayrıca, Romanya'nın Transilvanya Braşov Üniversitesi, otomotiv mühendisliği bölümünde 3 ay boyunca stajyer mühendis olarak görev aldım.
- 2017-2018 yılları arasında, Brightworks Mühendislik firmasında, Satış&Teknik Destek Mühendisi olarak çalıştım.
- 2019 yılında, Sakarya Üniversitesi, Otomotiv Mühendisliği bölümünden mezun oldum.
- Halihazırda, Kronospan A.Ş. Türkiye şirketinde üretim mühendisi olarak çalışmaktayım.

### YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR

Aliustaoğlu, S. ve Ayhan, V. (2018). Tek Silindirli Dizel Motorda LPG-Dizel Çift Yakıt Karışımının Performans ve İS Emisyonlarına Etkileri. *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi (IMASCON), Bildiriler Kitabı, Kasım 2018*, 1684-1690.