

Ağır Ticari Araçlarda Dizel Yakıt Yerine Sıvılaştırılmış Doğal Gaz (LNG) Kullanımının
Deneysel Olarak İncelenmesi

Bekir Barış Erçelik

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

şubat 2021

Experimental Investigation of Liquefied Natural Gas (LNG) Usage Instead of Diesel Fuel in
Heavy Commercial Vehicles

Bekir Barış Erçelik

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mechanical Engineering

February 2021

Ağır Ticari Araçlarda Dizel Yakıt Yerine Sıvılaştırılmış Doğal Gaz (LNG) Kullanımının
Deneysel Olarak İncelenmesi

Bekir Barış Erçelik

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Enerji-Termodinamik Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak hazırlanmıştır.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Bahadır Doğan

şubat 2021

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Dr. Öğr. Üyesi Bahadır DOĞAN danışmanlığında hazırlamış olduğum “Ağır Ticari Araçlarda Dizel Yakıt Yerine Sıvılaştırılmış Doğal Gaz (LNG) Kullanımının Deneysel Olarak İncelenmesi” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik, ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 08/02/2021

Bekir Barış Erçelik

ÖZET

Teknolojik alandaki gelişmeler ve sanayileşmenin getirdiği enerji talebindeki artış nedeniyle alternatif enerji kaynaklarının kullanımı giderek önem kazanmaktadır. Bunun yanı sıra, hükümetler ve çevre koruma kuruluşlarının artan hava kirliliğini önlemek için uyguladıkları politikalar, araçlarda daha temiz ve daha verimli yakıt kullanılmasını gerektirmektedir. Bu çalışmada, taşımacılık ve ulaşım sektöründe kullanılan ağır ticari araçlarda, en popüler yakıt olan dizel yakıtına alternatif olabilecek sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) yakıtının kullanımı araştırılmıştır.

Çalışma kapsamında, dizel yakıtlı bir ağır ticari kamyon ile aynı özelliklerdeki LNG yakıtlı bir ağır ticari kamyonun araç performansı ve yakıt tüketimi parametreleri gerçek yol koşullarında deneysel olarak test edilmiştir. Testler sırasında, toplam ağırlıkları 41000 kg olan, 338 kW gücünde, Euro VI motorlu, aynı kabin tasarımına sahip ağır ticari sınıf çekici kamyonlar kullanılmıştır. Araçların, performans ve yakıt tüketimi değerlerini etkileyebilecek, aerodinamik yapısı ve yuvarlanma direnci metrikleri eğimsiz bir yolda yapılan coast-down testi ile analiz edilmiştir. Araçlar birbiriyle benzer tasarımlara ve özelliklere sahip oldukları için yol yükü dirençleri arasındaki farkların ihmal edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür. Dizel ve LNG araçların performans değerlendirilmesi için, eğimsiz düz bir yolda 0-85 km/h tam gaz hızlanma testi gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları, LNG aracın hızlanma süresinin dizel araca göre %24 fazla olduğunu ortaya koymuştur. Diğer yandan, araçların 60 km/h, 70 km/h, 80 km/h sabit hızlardaki yakıt tüketimi testleri ve otoyol, kırsal yol ve şehir içi yol profillerini içeren bir güzergahta ortalama yakıt tüketimi testleri gerçekleştirilmiştir. Araçların ortalama yakıt tüketimleri ve yakıt maliyetleri göz önünde bulundurulduğunda, LNG aracın dizel araca göre %27 oranında yakıt tasarrufu sağladığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dizel yakıt, LNG yakıt, hızlanma performansı, yakıt tüketimi, yakıt ekonomisi

SUMMARY

The use of alternative energy sources becomes important gradually due to the technological developments and the increase in the energy demand brought about by industrialization. In addition, the policies implemented by governments and environmental protection organizations to prevent increased air pollution require the use of cleaner and more efficient fuel in vehicles. In this study, the use of liquefied natural gas (LNG) fuel, which can be an alternative to diesel fuel that is the most popular fuel in heavy commercial vehicles used in the long-haul transportation sector, was investigated.

In the scope of the study, the vehicle performance and fuel consumption parameters of a diesel-fueled heavy commercial truck and an LNG-fueled heavy commercial truck with the same characteristics were experimentally tested under real road conditions. During the tests, heavy commercial-type tractor trucks with a total weight of 41000 kg, powers of 338 kW, Euro VI engines, and the same cabin designs were used. The aerodynamic structures and rolling resistance metrics of the vehicles, which can affect performance and fuel consumption values, were analyzed by the coast-down test on a smooth road. Since the vehicles have similar designs and features, it has been observed that the differences between the road load resistances are negligible. For performance evaluation of diesel and LNG vehicles, 0-85 km/h full-throttle acceleration test was performed on a straight smooth road. The test results revealed that the acceleration time of the LNG vehicle was 24% more than the diesel vehicle. On the other hand, steady speed fuel consumption tests of vehicles at 60 km/h, 70 km/h, 80 km/h speeds, and average fuel consumption tests on a route including highway, rural road, and urban road profiles were realized. Considering the average fuel consumption of the vehicles and fuel costs, it was concluded that the LNG vehicle provided 27% fuel savings compared to the diesel vehicle.

Keywords: Diesel fuel, LNG fuel, acceleration performance, fuel consumption, fuel economy

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1. Taşımacılık Sektöründeki Alternatif Enerji İhtiyacının Artışı	4
2.2. Alternatif Yakıt Olarak Doğal Gaz	6
2.3. Doğal Gaz ve Taşıtlarda Doğal Gaz Kullanımı	7
2.4. LNG'nin Yakıt Olarak Kullanılması	8
2.5. Dizel Araçların Çalışma Şekli	9
2.6. LNG Araçların Çalışma Şekli	12
2.7. LNG Yakıt Tankı ve Depolama	14
2.8. Yakıt Tüketimi ve Yakıt Ekonomisi	15
2.9. LNG Yakıtlı Araçların Performansı	19
3. MATERYAL VE YÖNTEM	21
3.1. Materyal	21
3.2. Yöntem	21
3.2.1. Coast-down test	21
<u>3.2.1.1. Validasyon</u>	21
<u>3.2.1.2. Test koşulları</u>	25
<u>3.2.1.3. Test prosedürü ve testin yapılışı</u>	26
<u>3.2.1.4. Raporlama</u>	26

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.2.2. Hızlanma performansı testi	27
<u>3.2.2.1. Testin amacı</u>	27
<u>3.2.2.2. Test koşulları</u>	28
<u>3.2.2.3. Test prosedürü ve testin yapılışı</u>	28
<u>3.2.2.4. Raporlama</u>	28
3.2.3. Sabit hızda yakıt tüketimi testi	29
<u>3.2.3.1. Testin amacı</u>	29
<u>3.2.3.2. Test koşulları</u>	29
<u>3.2.3.3. Test prosedürü ve testin yapılışı</u>	29
<u>3.2.3.4. Raporlama</u>	30
3.2.4. Gerçek yol koşulu yakıt tüketimi testi	30
<u>3.2.4.1. Testin amacı</u>	30
<u>3.2.4.2. Test koşulları</u>	30
<u>3.2.4.3. Test prosedürü ve testin yapılışı</u>	32
<u>3.2.4.4. Raporlama</u>	32
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	33
4.1. Coast-down Test Sonuçları	33
4.2. Hızlanma Performansı Test Sonuçları	37
4.3. Sabit Hızda Yakıt Tüketimi Test Sonuçları	43
4.4. Gerçek Yol Koşulu Yakıt Tüketimi Test Sonuçları	44
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	49
KAYNAKLAR DİZİNİ	52
EK AÇIKLAMALAR	60

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Ülke gruplamasına göre taşımacılık sektöründe enerji tüketimi, 2012-2040	5
2.2. Dünya taşımacılık sektörü enerji tüketimini karşılayan enerji kaynakları, 2010-2040	6
2.3. Bir dizel aracın ana komponentleri	11
2.4. Bir LNG kamyonun ana komponentleri	13
2.5. LNG tankı ve iç yapısı	15
3.1. Araca etki eden yol yükü kuvvetleri	24
3.2. Coast-down – performans testi güzergahı	27
3.3. Gerçek yol koşulu ortalama yakıt tüketimi test güzergahı	31
4.1. Coast-down test sonuçlarının karşılaştırılması – Hız-Zaman grafiği	35
4.2. Araç tiplerine göre lastiğin enerji verimlilik sınıfı ve RRC değerleri	35
4.3. Dizel ve LNG çekici araçların hızlanma performansı Hız-Zaman grafiği	40
4.4. Dizel ve LNG çekici araçların hızlanma performansı Mesafe-Zaman grafiği	41
4.5. Dizel ve LNG çekici araçların hızlanma performansı İvme-Hız grafiği	43
4.6. Dizel aracın testlere göre yakıt tüketimi değerleri	45
4.7. LNG aracın testlere göre yakıt tüketimi değerleri	46
A.1. Dizel ve LNG yakıtın moleküler yapısı	60
B.1 Dizel çevrimi diyagramları (a) P-v diyagramı (b) T-s diyagramı	62
B.2 Otto çevrimi diyagramları (a) P-v diyagramı (b) T-s diyagramı	64

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. IANGV 2019 raporuna göre doğal gazlı araç sayıları	8
2.2. LNG ve dizel yakıtın referans özellikleri	10
2.3. ABD ulusal perakende yakıt fiyatları	16
2.4. Şubat 2018’de bazı Avrupa ülkelerindeki LNG ve dizel otomotiv yakıt fiyatları	17
3.1. 4x2 dizel çekici kamyonun teknik özellikleri	22
3.2. 4x2 LNG çekici kamyonun teknik özellikleri	23
4.1. Test sırasında hava durumu verileri	33
4.2. Dizel ve LNG yakıtlı araçların coast-down test verileri	34
4.3. Dizel ve LNG yakıtlı araçların yol yükü sabiti değerleri	36
4.4. Dizel ve LNG yakıtlı araçların performans test verileri	38
4.5. Dizel ve LNG yakıtlı araçların ivme değerleri	42
4.6. Dizel ve LNG çekici araçların sabit hızda yakıt tüketimi test sonuçları	43
4.7. Dizel ve LNG çekici araçların ortalama yakıt tüketimi değerleri	45
4.8. Dizel ve LNG araçların yakıt maliyetlerinin karşılaştırılması	46

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A_{frontal}	Aracın ön yüzey alanı, m^2
a	İvme, m/s^2
c_p	Sabit basınçta ısı değeri, $kJ/kg.K$
c_v	Sabit hacimde ısı değeri, $kJ/kg.K$
C_w	Aerodinamik sürtünme katsayısı
CH_4	Metan
CO_2	Karbondioksit
$F_{\text{air-drag}}$	Aerodinamik direnç, N
$F_{\text{driveline}}$	Yürüyen aksam sürtünme kuvveti, N
F_{rolling}	Yuvarlanma direnci, N
F_0	Yol yükü katsayısı, N,
F_1	Yol yükü katsayısı, $N/(km/h)$
F_2	Yol yükü katsayısı, $N/(km/h)^2$
g	Yerçekimi sabiti, m/s^2
H_2	Hidrojen
LHV	Alt ısı değeri, MJ/kg
HHV	Üst ısı değeri, MJ/kg
M	Araç ağırlığı, kg
m_r	Aracın dönme ataleti, kg
η	Isıl verim
P	Basınç, kPa
q	Isı, kJ/kg
ρ_{air}	Hava yoğunluğu, kg/m^3
RRC	Yuvarlanma direnci katsayısı
T	Sıcaklık, K
t	Zaman, s
u	Entalpi, kJ/kg

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Simgeler

v	Hız, km/h
W	İş, kJ
x	Mesafe, m

Açıklama

Kısaltmalar

AB	Avrupa Birliği
CNG	Sıkıştırılmış doğal gaz
DGE	Dizel galon eşdeğeri
EIA	Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bilgi Yönetim İdaresi
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
FDR	Diferansiyel oranı
GGE	Benzin galon eşdeğeri
HP	Beygir gücü
IANGV	Doğal gazlı araçlar hakkında bilgiler
KDV	Katma Değer Vergisi
LNG	Sıvılaştırılmış doğal gaz
LODE	Dizel litre eşdeğeri
NREL	Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
OECD	Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü
ÖTV	Özel Tüketim Vergisi
TL	Türk Lirası

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Enerji, insanların daha konforlu bir hayat sürdürmesi için toplumun vazgeçilmez bir olgusu olarak nitelendirilmektedir. Dünya nüfusundaki hızlı artış, sanayileşme ve beraberinde yaşam standartlarının hızla yükselmesi enerji ihtiyacını giderek arttırmaktadır. Enerji kaynaklarının kullanımıyla birlikte zararlı çevresel faktörlerin artışı ve iklim değişiklikleri dünya ülkelerini alternatif enerji kaynakları arayışına itmiştir (Lale, 2016).

Taşımacılık ve ulaşım sektöründe kullanılan en yaygın enerji kaynağı petroldür. Buna bağlı olarak günümüzde bu sektörde benzin ve dizel yakıtları oldukça popülerdir (Engerer ve Horn, 2010). Benzin ve dizel yakıtın en çok kullanıldığı sektörlerden olan karayolu taşımacılığı, taşımacılıktan kaynaklanan toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %73'ünden sorumludur (European Environment Agency, 2017). Bu istatistikler, genel olarak ulaştırma sektörünün ve özellikle karayolu ulaştırmasının çevresel hedeflere uygun şekilde uyulmasının önünde ciddi engeller olduğunu açıkça göstermektedir. Bu doğrultuda, alternatif yakıtlar ve tahrik sistemlerinin tanıtılması, Avrupa Komisyonu'nda da yayımlanmış önemli bir stratejidir (European Commission, 2011).

Petrol yakıtlarına (benzin ve dizel) alternatif olarak daha az kirletici ve düşük maliyetli doğal gaz kullanımı önerilmektedir. Avrupa'da doğal gaz, 2020 yılına kadar karayolu taşımacılığı için kullanılan konvansiyonel yakıtların %20'sini değiştirmekle ilgili, temel olarak çevresel etkiyi azaltmak ve Avrupa Birliği (AB) hedefine ulaşmak için geleneksel yakıtların (benzin ve dizel) alternatifi olarak kabul edilmiş, 2001 yılında enerji arz güvenliği ile ilgili Yeşil Kitap'ta önerilmiştir. Bu süre zarfında AB, kısa ve orta vadede biyoyakıtların, orta ve uzun vadede doğal gazın ve uzak uzun vadede hidrojenin piyasaya sürülmesini planlamıştır (Osorio-Tejada vd., 2015).

Alternatif yakıtlar için AB stratejisi, her ihtiyaç için yeni teknolojilere devam etme önceliği ile geliştirilmektedir. Kentsel alanlarda kısa mesafeler için sıkıştırılmış doğal gaz (Compressed Natural Gas - CNG), elektrik ve hidrojen gibi çeşitli uygun alternatifler

bulunurken, uzun mesafeli ulaşım için dizel yakıt yerine tek geçerli ve olgun alternatifin sıvılaştırılmış doğal gaz (Liquefied Natural Gas - LNG) yakıtı olacağı belirtilmiştir (European Commission, 2013).

LNG'nin Avrupa pazarı için önemi, Avrupa Birliği'nin 2016 yılında yayınlanan “Sıvılaştırılmış doğal gaz ve gaz depolama stratejisi” raporu ile daha da vurgulanmaktadır. Bu strateji, tüm üye devletlerin alternatif bir gaz kaynağı olarak LNG'ye erişimini geliştirmeyi ve LNG'nin tüm potansiyelinden yararlanmayı amaçlamaktadır (European Commission, 2016). Ayrıca, 2014/94/EU Direktifi ağır ticari araçların Euro VI standartlarının katı kirletici emisyon sınırlarını karşılayabilen düşük maliyetli bir teknoloji olduğu için LNG'yi de kapsamaktadır (European Union, 2014).

Maliyet açısından ağır ticari araçlar incelendiğinde, LNG kamyonlar geleneksel dizel kamyonlara göre yaklaşık %30 daha pahalıdır (Osorio-Tejada vd., 2017; Smajla vd., 2019). LNG kamyonların bakım maliyetleri, ekstra eğitim ve potansiyel yol kenarı arızaları ile birlikte, ortalama tamir süresi ve yedek parçalara sahip kalifiye bir bakım teknisyeni bekleme süresi nedeniyle yaklaşık %10 daha yüksek olacağı düşünülmektedir (Chandler ve Proc, 2004; Jaffe vd., 2015). Ancak yakıt ekonomisine bakıldığında, günlük kullanımda LNG kamyonların geleneksel dizel kamyonlara göre yaklaşık %30 oranında yakıt maliyeti tasarrufu sağladığı gözlenmiştir (Osorio-Tejada vd., 2017; Smajla vd., 2019). Buna bağlı olarak, bir LNG aracın yüksek ön maliyetleri dikkate alındığında, geri ödeme süresi, yılda kat edilen ortalama mesafeye bağlı olacaktır. Aracın daha yüksek kilometre değeri (yıllık yapılan km), LNG aracının dizel araca göre daha yüksek olan ön maliyetlerini telafi edeceği öngörülmektedir (Enerdata, 2014).

LNG yakıt kullanımındaki artışla birlikte, hem bilim insanları hem de mühendisler tarafından ilgi görmekte ve performans, yanma ve emisyon özellikleri hakkında birçok çalışma yapılmaktadır. Ticari LNG motorları geleneksel dizel motorlara kıyasla, düşük hızlarda daha düşük tork değerine sahiptir ve hızlanma durumunda araç tepki performansının daha düşük olduğu belirtilmiştir. Bu konuda geliştirme ve verimliliği artırma çalışmaları yapılmaktadır (Chen vd., 2017; Tang vd., 2016).

Özellikle Avrupa'nın sürdürdüğü alternatif enerji kaynaklarına ve alternatif yakıtlara yönelme politikası giderek karşılığını almaktadır. Almanya'daki ilk LNG yakıt ikmal istasyonu Haziran 2016'da, Avusturya'daki ilk LNG yakıt ikmal istasyonu Eylül 2017'de açılmıştır (Pfoser vd., 2018). Son dönem verilerine bakıldığında, Avrupa'daki ağır ticari LNG araç sayısı 5459, LNG yakıt dolum istasyonu sayısı 311'dir (European Alternative Fuels Observatory, 2020). Yakıt ikmali ve tedarik sorunu ilk adımda ele alınmaktadır, bu yüzden tedarik ağının kısa sürede genişletilmesi planlanmaktadır. LNG'nin başarılı bir şekilde uygulanmasının Avrupa'da talebin gelişimine tabi olduğunu göstermektedir (Arteconi ve Polonara, 2013).

Günümüzde insan yaşantısında oldukça önemli bir yere sahip olan taşıtlarda kullanılan enerji kaynakları çoğunlukla petrol kökenli (benzin ve dizel) yakıtlardır. Gelişen teknoloji ve sanayileşmenin getirdiği enerji talebindeki artış sebebiyle alternatif enerji kaynaklarının kullanımı giderek önem kazanmaktadır. Bunun yanında devletlerin ve çevre koruma örgütlerinin hava kirliliğini önlemek için uyguladığı politikalar ve ilerleyen teknolojik gelişmeler araçlarda daha temiz ve yüksek verimli bir yakıtın kullanımını gerektirmektedir.

Bu çalışmanın amacı, taşımacılık ve ulaşım sektöründe kullanılan ağır ticari kamyon araçlarda, dizel yakıtı alternatif olabilecek sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) yakıtının içten yanmalı motorlarda kullanımını incelemektir. Çalışmada, LNG yakıtla çalışan bir ağır ticari çekici kamyon ile aynı standartlardaki geleneksel dizel yakıtla çalışan bir ağır ticari çekici kamyon gerçek yol koşullarında deneysel olarak test edilmiştir. Yapılan testlerde, belirlenen test güzergahında araçların karşılaştırmalı yakıt tüketimi değerleri ve buna bağlı olarak yakıt ekonomisi verileri incelenmiştir. Ayrıca, LNG ve dizel araçların belirlenen test koşullarında hızlanma ve motor performansları karşılaştırılmıştır. Bu çalışma ile birlikte, ağır ticari araçlarda LNG yakıt kullanımının araç performansı ve yakıt tüketimine etkisi, avantajları-dezavantajları dizel yakıt ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

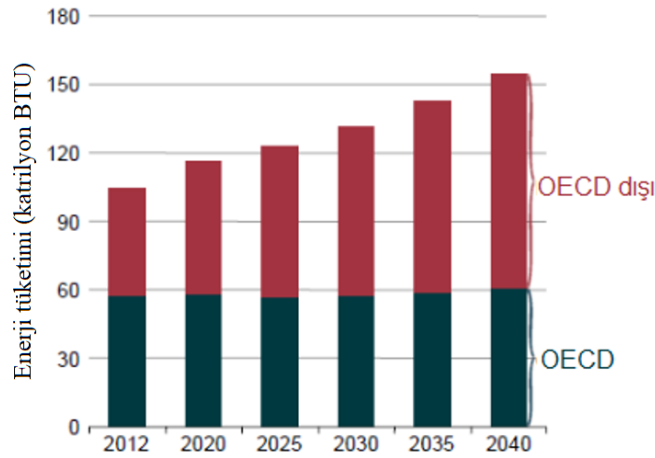
2.1. Taşımacılık Sektöründeki Alternatif Enerji İhtiyacının Artışı

Dünya genelinde insan nüfusu her yıl yaklaşık 83 milyon kişi ile %1,1'lik artış göstermektedir (United Nations, 2017). Küresel nüfus 1800 yılında yaklaşık 1 milyar iken, günümüzde 7,8 milyar civarına ulaşmıştır (Wordometers, 2020). 2050 yılına gelindiğinde, dünya nüfusunun 9,2 milyar seviyesine ulaşacağı ve bu nüfusun üçte ikisinden fazlasının şehirlerde yaşayacağı öngörülmektedir (World Energy Council, 2011).

Nüfus artışı ve şehir nüfusundaki artış ile birlikte araç kullanımında da artış kaçınılmaz olacaktır. 2010 yılında dünyada yaklaşık 1 milyar motorlu taşıt olduğu belirlenmiştir. Bu sayının 2030 yılında iki katına çıkarak 2 milyar olacağı tahmin edilmektedir (Gross, 2016; World Energy Council, 2011).

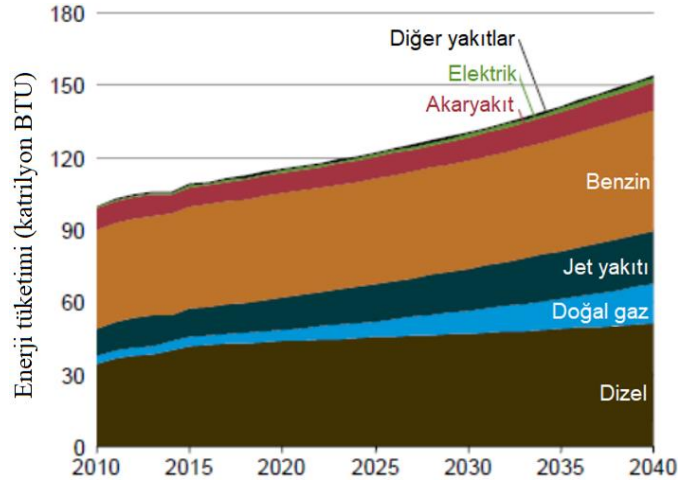
Taşıt sayısındaki bu artış otomotiv ve ulaşım-taşımacılık sektörünün geleceğini önemli ölçüde etkileyecektir. Tüm motorlu taşıtlar enerji harcaması gerektirir. Küresel olarak, taşımacılık sektörü, sanayi sektöründen sonra ikinci en büyük enerji tüketen sektördür ve dünyadaki tüketilen enerjinin %30'unu oluşturmaktadır (Atabani vd, 2011; Moriarty ve Honnery, 2016). Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bilgi Yönetim İdaresi'nin (U.S. Energy Information Administration - EIA) 2016 yılında yayınlanan raporuna göre, taşımacılık sektörü yıllık ortalama %1,4 oranında enerji tüketimi artışı sağlamaktadır. Bu da 2012 yılında 104 katrilyon Btu (British Thermal Units) olan enerji tüketiminin 2040 yılına gelindiğinde 155 katrilyon Btu olacağını öngörmektedir. Taşımacılık sektöründeki enerji talebi büyümesi neredeyse tamamen Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü (Organization for Economic Cooperation and Development - OECD) dışındaki ülkelerin sahip olduğu bölgelerde gerçekleşmekte olup, OECD ülkeleri bölgelerinde kabaca sabittir. Gelişmiş ülkelerle karşılaştırıldığında, gelişmekte olan ülkeler ekonomik büyüme açısından daha yüksek beklentilere sahiptir (U.S. Energy Information Administration, 2016).

2012 yılında OECD ülkeleri dünyanın taşımacılık sektöründeki toplam enerji tüketiminin %55'ini, OECD üyesi olmayanlar ise %45'ini oluşturmuştur (Şekil 2.1). 2020 yılında dünya taşımacılık sektörü enerjisi kullanımının OECD ve OECD dışı paylarının eşit olacağı öngörülmektedir. OECD dışı ülkelerin talebi giderek artmakta olup, 2040 yılında bu ülkelerin küresel taşımacılık enerji tüketiminin %61'ini oluşturması beklenmektedir (U.S. Energy Information Administration, 2016).



Şekil 2.1. Ülke gruplamasına göre taşımacılık sektöründe enerji tüketimi, 2012-2040 (katrilyon BTU) (U.S. Energy Information Administration, 2016)

Taşımacılık ve ulaşım sektöründeki enerji tüketim talebinin günümüze kadar artması ve gelecekte beklenen talep artışı nedeniyle yakın geçmişte çeşitli alternatif yakıt teknolojileri ortaya çıkmıştır (Pfoser vd., 2018). Dünya çapında, petrol ve diğer sıvı yakıtların (doğal gaz, biyo yakıt vs.) 2012'den 2040'a kadar toplam payları %96'dan %88'e düşeceği öngörülsede, bu yakıtlar taşımacılık ve ulaşım sektörünün başlıca enerji kaynakları olmaya devam edecektir. Bu sektördeki en büyük enerji kaynağı olan benzin bu ünvanını korumaya devam edecektir fakat, 2012'de %39 iken 2040 yılında %33'e düşeceği tahmin edilmektedir. Benzinden sonra dizel yakıtın da (biyodizel dâhil) 2012'den 2040'a gelindiğinde %36'dan %33'e düşeceği tahmin edilmektedir. Diğer yandan jet yakıtı %12'den %14'e çıkarak sektörün enerji kaynaklarında pay artışı göstereceği düşünülmektedir (U.S. Energy Information Administration, 2016). Taşımacılık ve ulaşım sektöründeki enerji tüketiminin karşılığında enerji kaynaklarının durumu Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Dünya taşımacılık sektörü enerji tüketimini karşılayan enerji kaynakları, 2010-2040 (katrilyon BTU) (U.S. Energy Information Administration, 2016)

Doğal gazın ulaşım ve taşımacılık sektöründeki yakıt olarak payı 2012’de %3 iken, 2040’ta %11’e yükseleceği düşünülmektedir. 2012 yılında bu sektörde doğal gaz kullanımının %66’sını boru hatları ulaşımı, %28’ini hafif ticari araçlar, %4’ünü otobüsler oluşturmaktadır. Uygun yakıt ekonomisinin bir sonucu olarak, doğal gazın artan bir payı, boru hatları dışında ulaşım modları için kullanılmaktadır. EIA 2016 raporuna göre, büyük kamyonların toplam enerji kullanımının doğal gaz payı için 2012’de %1’den 2040 yılında %15’e güçlü bir artış öngörülmektedir (U.S. Energy Information Administration, 2016).

2.2. Alternatif Yakıt Olarak Doğal Gaz

Günümüzde, benzin ve dizel en yaygın ulaşım yakıtlarıdır (dizel ağır vasıta araçlarda tekel konumundadır). Dizel yakıtın karbon içeriği ve bu nedenle litre başına CO₂ emisyonu seviyesi diğer yakıtlara göre fazla olduğu için çevresel etkilerden dolayı alternatif yakıt gereksinimini ortaya çıkarmaktadır (Engerer ve Horn, 2010).

Yakın geçmişte çeşitli alternatif yakıt teknolojileri ortaya çıkmıştır, fakat ağır vasıta araçlar uzun mesafe taşımacılığı için kullanıldığında önemli kısıtlamalar oluşmaktadır (Pfoser vd., 2018). Avrupa Komisyonu, her uygulamadaki teknolojinin gelişimine ve yaşatılabilirliğine göre alternatif yakıtlar önermiştir. Örneğin; kentsel kullanım araçları için elektrik, sıkıştırılmış

doğal gaz (CNG) ve hidrojen; uzun yol taşımacılığı için sıvılaştırılmış doğal gazın (LNG) uygunluğu vurgulanmıştır (European Commission, 2013). Elektrikli araçlar bataryaların düşük güç yoğunluğu sebebiyle kısa mesafelerde kullanılması gerekmektedir. Ayrıca bataryaların şarj edilmesi birkaç saat gerektirir. Bu kısıtlamalar elektrikli taşıt uygulamalarını temel olarak kentsel kullanım ve kısa mesafeli ulaşımına itmektedir (Engerer ve Horn, 2010). Hidrojen, kullanılabilecek diğer alternatif yakıt türlerinden biridir. Hidrojenin sera gazı emisyonlarını azaltma potansiyeli yüksektir. Fakat hidrojen gazı depolanması çok zordur, çünkü en küçük molekül olan H_2 oldukça dağınık haldedir. Bu yüzden H_2 depolama mekanik araçları finansal açıdan oldukça maliyetlidir. Hidrojenin üretim maliyetinin azaltılması için araştırmalar kapsamlı şekilde devam etmektedir (Durbin ve Malardier-Jugroot, 2013). Biyoenerji son yıllarda enerji talebinin artışıyla birlikte kullanılmaya başlanan alternatif yakıt türlerinden biri olmuştur. Ancak dünya üzerinde henüz çok yaygın olarak kullanılmamaktadır. Çünkü biyokütle kullanılabilirliği arazi kullanım rekabeti ile sınırlıdır. Arazi kullanımını öncelikle gıda üretimi ve elektrik üretimi için kurulan güneş panelleri için ayrılmıştır (De Simio vd., 2013). Doğal gazın, benzin ve dizel yakıtı alternatif olarak son yıllarda taşıtlarda kullanılmaya başlanması dikkat çekmektedir. Özellikle Asya ve Latin Amerika ülkelerinde doğal gazlı araçlar, geleneksel araçlara önemli bir alternatif olarak kabul edilmekte ve sayıları günden güne artmaktadır (Engerer ve Horn, 2010). Araçlarda doğal gaz kullanımının artışıdaki başlıca sebepler: yerel hava kirliliğinin azaltılmasının amaçlanması, fiyatının petrol yakıtlarına göre nispeten daha düşük olması ve kaynakların kullanılabilirliğinin artırılmak istenmesidir (Osorio-Tejada vd., 2017).

2.3. Doğal Gaz ve Taşıtlarda Doğal Gaz Kullanımı

Doğal gaz, ev ve iş yerlerinde ısıtma amacıyla kullanılmasının yanı sıra içten yanmalı motorlarda da kullanılabilen bir yakıttır. Karayolu, demiryolu ve deniz yolu taşıtlarının tamamında uygulanabilmektedir (NGV Global, 2020).

Doğal gaz %90-96 oranında CH_4 (metan) gazından oluşmaktadır. Geri kalan bölümünü ise %2,411 C_2H_6 (etan), %0,736 C_3H_8 (propan), %0,371 C_4H_{10} (bütan), %0,776 N_2 (azot), %0,164 C_5H_{12} (pentan) ve %0,085 CO_2 (karbondioksit) oluşturmaktadır (Gümüş, 1998). Doğal

gazın ısıl değeri 47 MJ/kg veya 40 MJ/m³'e eşit olup, 1 kg doğal gaz 1,33 litre benzine veya 1,22 litre motorine eşittir. Diğer bir karşılaştırma ile 1 m³ doğal gaz 1,1 litre benzine veya 1,0 litre motorine eşit olmaktadır. Araç motorlarında kullanılan yakıtların karşılaştırması yapılırken motorun verimliliği de dikkate alınmalıdır. Doğal gazın enerji verimliliği genel olarak benzinden daha iyi, motorinle ise aynıdır (İGDAŞ, 2018).

Doğal gazlı araçların kullanımı 1930'lara dayanmaktadır. Çok çeşitli araçlara uygulanabilen olgun bir teknoloji olarak kabul edilir (Yeh, 2007). Doğal gaz, günümüzde araçlarda oldukça yaygın şekilde kullanılmaktadır. Güncel verilere bakıldığında, dünyada 28 milyona yaklaşan doğal gazlı araç ve 32577 doğal gaz dolmuş istasyonu bulunmaktadır (NGV Global, 2019). Çizelge 2.1'de dünyadaki doğal gazlı araçların ve doğal gaz istasyonlarının kıtalara göre dağılımı verilmiştir.

Çizelge 2.1. IANGV 2019 raporuna göre doğal gazlı araç sayıları (NGV Global, 2019)

Kıta	Doğal Gazlı Araç Sayısı	İstasyon Sayısı
Asya-Pasifik	19.841.688	19.606
Latin Amerika	5.417.146	5.789
Avrupa	2.013.693	5.116
Kuzey Amerika	224.500	1.856
Afrika	268.349	210

Doğal gazın araç yakıtı olarak kullanılabilmesi için iki farklı durum vardır: sıkıştırılmış doğal gaz (compressed natural gas - CNG), sıvılaştırılmış doğal gaz (liquefied natural gas - LNG). LNG ağır vasıta araçlar için daha uygundur, çünkü CNG'den çok daha yoğun enerjiye sahip bir yakıttır (Arteconi vd., 2010). Bu nedenle CNG düşük enerji yoğunluğu nedeniyle kentsel taşıtlarda kullanılırken, LNG taşımacılık sektörü ve uzunyol ulaşımında kullanılmaya oldukça uygundur (Osorio-Tejada vd., 2017).

2.4. LNG'nin Yakıt Olarak Kullanılması

Sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG), doğal olarak oluşan bir hidrokarbon karışımıdır (esas olarak metan veya CH₄). Saflaştırılmış veya kriyojenik olarak -162 °C'ye soğutulmuş sıvı forma

yoğunlaştırılır. Genel olarak, $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ olan maddeler kriyojenik olarak kabul edilir. Kriyojenik sıcaklık, temas halinde herhangi bir dokuyu (bitki veya hayvan) donduracağı ve diğer malzemelerin kırılgan hale gelmesine ve güçlerini veya işlevlerini kaybetmelerine neden olabileceği anlamına gelir. Sıvılaştırılmış doğal gaz atmosfer basıncında, buhar formdaki doğal gaz hacminin sadece $1/600$ 'ünü kaplamaktadır, bu nedenle LNG'nin taşınması oldukça ekonomiktir (Chandler ve Proc, 2004; Tabak, 2009). LNG kokusuz, renksiz, aşındırıcı ve toksik değildir. Toprak, yüzey suyu veya yeraltı suyu için tehdit oluşturmaz. Doğal gazın ortak kokusu, dağıtım şebekesine gönderilmeden önce doğal gaza eklenen bir koku verici maddeden kaynaklanır. Bunun nedeni gaz kaçağlarının tespit edilmesidir (Chandler ve Proc, 2004; Tabak, 2009).

Yüksek enerji yoğunluğuna sahip sıvılaştırılmış formdaki doğal gaz, su kaynaklı faaliyetler (nakliye, deniz hizmetleri ve balıkçılık), kamyon ve demiryolu sektörlerinde kullanılmaktadır. Düşük kirletici ve CO_2 emisyonları ve daha yüksek enerji verimliliği sağlayarak dizele uygun maliyetli bir alternatif sunar. LNG, dizel alternatiflerinin son derece sınırlı olduğu uzun mesafeli karayolu yük taşımacılığı için özellikle uygundur. Kamyonlarda EURO VI standartlarının daha katı uygulanacağı gelecek yıllarda, kirletici emisyon sınırlarını etkin bir şekilde karşılayabilir (European Commission, 2013). Metan fosil yakıtların en basit molekülüdür ve çok temiz bir şekilde yakılabilir. 130 oktan oranına ve kıvılcım ateşlemeli içten yanmalı motorlar için mükemmel özelliklere sahiptir (Boretti, 2020). Çizelge 2.2'de LNG ve dizel yakıtın özellikleri verilmiştir. Ayrıca, dizel ve LNG yakıtın kimyasal yapısı ve yanma denklemi Ek Açıklamalar-A bölümünde detaylı olarak verilmiştir.

2.5. Dizel Araçların Çalışma Şekli

Dizel araçlar benzinli araçlara benzer, çünkü her ikisi de içten yanmalı motorlar kullanır. Dizel motorların farkı, benzinli araç tarafından kullanılan kıvılcımla ateşlenen sistemden ziyade, sıkıştırılmalı ateşlemeli bir enjeksiyon sistemine sahip olmasıdır. Sıkıştırılmalı ateşlemeli bir sistemde, dizel yakıt motorun yanma odasına enjekte edilir ve gaz motor pistonu tarafından sıkıştırıldığında elde edilen yüksek sıcaklıklarla ateşlenir. Otoyol kamyonları için turboşarjlı dizel motorlar yaklaşık %45 verimlilikle çalışmaktadır.

Çizelge 2.2. LNG ve dizel yakıtın referans özellikleri (Boretti, 2020)

	Dizel	LNG
Kimyasal formülü	$C_{13,5}H_{23,6}$	CH_4
Molekül başına karbon atomu	13,5	1
Molekül başına hidrojen atomu	23,6	4
Moleküler ağırlık	186	16
15°C ve 1 bar basınçta fiziksel durum	Sıvı	Gaz
Enjeksiyon basıncı, bar	2850	300
Enjeksiyon sıcaklığı, K	298	113
Yoğunluk, kg/m^3	837	443,5
LHV, MJ/kg	43,25	50,00
HHV, MJ/kg	45,60	55,00
Gizli buharlaşma ısısı, MJ/kg	0,25	0,50
Kritik sıcaklık, K	569,4	190,4
Kritik basınç, bar	24,6	46
Fiziksel durum	Sıvı	Kriyojenik sıvı
Setan sayısı	40-55	N/A
Oktan sayısı	N/A	120+
Alevlenme noktası, K	347	425
Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı, K	589	813
Alt yanıcılık sınırı, %hacim	1	5,3
Alt yanıcılık sınırı, %hacim	6	15

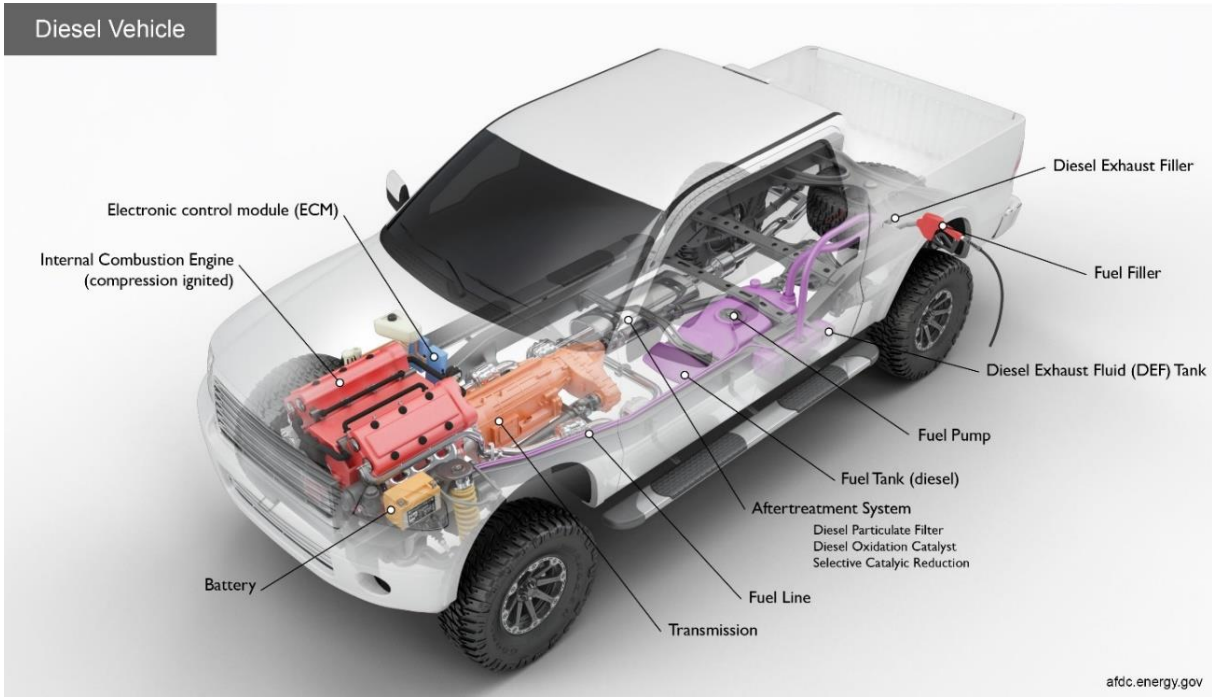
Benzinli araçlardaki emisyon kontrol sistemlerinden farklı olarak, birçok dizel araçta partikül maddeleri azaltan ve tehlikeli NO_x emisyonlarını zararsız azot ve suya parçalayan ilave son işlem bileşenleri bulunur. Dizel, yaygın bir nakliye yakıtıdır ve diğer bazı yakıt seçenekleri de benzer motor sistemleri ve bileşenleri kullanır (U.S. Department of Energy, 2000, 2020a). Şekil 2.3'te bir dizel araçta kullanılan ana komponentler gösterilmiştir. Ayrıca, dizel araç motorunun çalışma sistemi Ek Açıklamalar-B bölümünde detaylı olarak açıklanmıştır.

Son işlem sistemi (Aftertreatment System): Bu sistem, egzoz borusu emisyon gereksinimlerini karşılamak için motor egzoz gazını filtrelemekten sorumlu olan birden fazla bileşenden oluşur. Motorun egzoz gazı, partikül maddeyi azaltmak için dizel partikül filtresi ve dizel oksidasyon katalizörü ile filtrelendikten sonra, aracın egzoz borusu aracılığıyla atmosfere

bırakılmadan önce seçici katalitik redüktör içinde egzoz gazı karışımına dizel egzoz sıvısı enjekte edilir ve kimyasal dönüşümle azot ve suya indirgenir.

Akü (Battery): Akü, motoru ve elektrikli araç elektroniklerini/aksesuarlarını çalıştırmak için elektrik sağlar.

Dizel egzoz dolumu (Diesel Exhaust Filler): Bu port dizel egzoz sıvısı deposunu doldurmak içindir.



Şekil 2.3. Bir dizel aracın ana komponentleri (U.S. Department of Energy, 2020a)

Dizel egzoz sıvısı tankı (Diesel Exhaust Fluid Tank): Bu tank, seçici katalitik indirgeme sırasında egzoz akışına enjekte edilen sulu bir üre çözeltisi olan dizel egzoz sıvısını depolar.

Elektronik kontrol modülü (Electronic Control Module): ECM yakıt karışımını, ateşleme zamanlamasını ve emisyon sistemini kontrol eder; aracın çalışmasını izler; motoru kötüye kullanımdan korur; sorunları tespit edip giderir.

Yakıt dolum (Fuel Filler): Yüksek basınçlı bir hidrojen dağıtıcıdan gelen bir nozul, tankı doldurmak için araç üzerindeki yuvaya takılır.

Yakıt hattı (Fuel Line): Metal boru veya esnek hortum (veya bunların bir kombinasyonu) yakıtı depodan motorun yakıt enjeksiyon sistemine aktarır.

Yakıt pompası (Fuel Pump): Yakıtı depodan motorun yakıt enjeksiyon sistemine yakıt hattı üzerinden aktaran pompadır.

Yakıt deposu (Fuel Tank): Araçta yakıtı depolayan tanktır.

İçten yanmalı motor – Sıkırma ateşlemeli (Internal Combustion Engine – Compression-ignited): Bu konfigürasyonda, yakıt yanma odasına enjekte edilir ve yanma odasındaki hava büyük ölçüde sıkıştırıldığında elde edilen yüksek sıcaklıkla tutuşturulur.

Şanzıman (Transmission): Şanzıman, tekerlekleri sürmek için motordan ve/veya elektrikli çekiş motorundan mekanik güç aktarır (U.S. Department of Energy, 2020a).

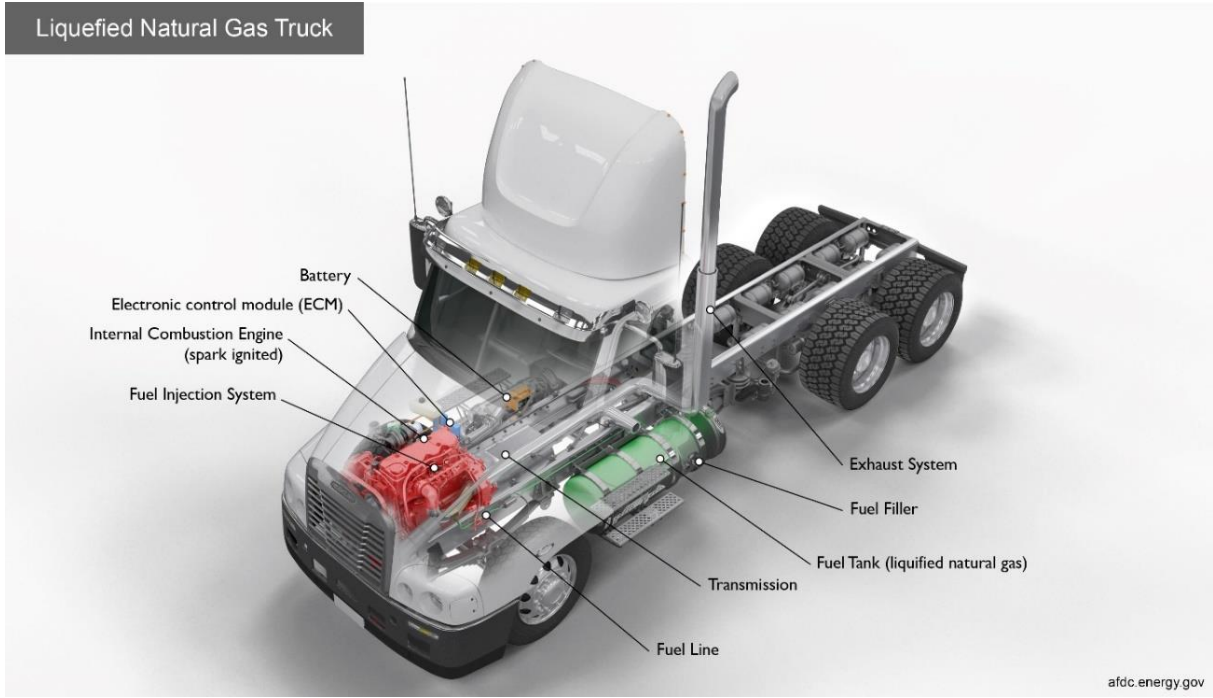
2.6. LNG Araçların Çalışma Şekli

Ağır vasıta sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) araçları, kıvılcımla ateşlenen bir içten yanmalı motora sahip benzinli araçlar gibi çalışır. Doğal gaz, kriyojenik tankta süper soğutma işlemi uygulanarak sıvı formda, genellikle kamyonun yan tarafındaki bir depoda depolanır. LNG tipik olarak sıkıştırılmış doğal gazdan (CNG) daha pahalı bir seçenektir ve çoğunlukla daha uzun menzilli gereksinimleri karşılamak için ağır vasıta araçlarda kullanılır. Sıvı olduğundan, LNG'nin enerji yoğunluğu CNG'den daha fazladır, bu nedenle araçta daha fazla yakıt depolanabilir. Bu, LNG'yi daha uzak mesafelere giden Sınıf 7 ve 8 kamyonlar için çok uygun hale getirir (U.S. Department of Energy, 2020b). Şekil 2.4'te bir LNG kamyonunda kullanılan ana komponentler görsel olarak verilmiştir. Ayrıca, LNG araç motorunun çalışma sistemi Ek Açıklamalar-B bölümünde detaylı olarak açıklanmıştır.

Akü (Battery): Akü, motoru ve elektrikli araç elektroniklerini / aksesuarlarını çalıştırmak için elektrik sağlar.

Elektronik kontrol modülü (Electronic Control Module): ECM yakıt karışımını, ateşleme zamanlamasını ve emisyon sistemini kontrol eder; aracın çalışmasını izler; motoru kötüye kullanımdan korur; sorunları algılar ve giderir.

Egzoz sistemi (Exhaust System): Egzoz sistemi egzoz gazlarını motordan egzoz borusuna yönlendirir. Egzoz sistemindeki motor emisyonlarını azaltmak için üç yollu bir katalizör tasarlanmıştır.



Şekil 2.4. Bir LNG kamyonunun ana komponentleri (U.S. Department of Energy, 2020b)

Yakıt dolum (Fuel Filler): Yüksek basınçlı bir hidrojen dağıtıcıdan gelen bir nozul, tankı doldurmak için araç üzerindeki yuvaya takılır.

Yakıt enjeksiyon sistemi (Fuel Injection System): Bu sistem, ateşleme için motorun yanma odalarına yakıt verir.

Yakıt hattı (Fuel Line): Metal boru veya esnek hortum (veya bunların bir kombinasyonu) yakıtı depodan motorun yakıt enjeksiyon sistemine aktarır.

Yakıt deposu - sıvılaştırılmış doğal gaz (Fuel Tank – LNG): Sıvılaştırılmış doğal gazı motorun ihtiyacı olana kadar araçta depolar.

İçten yanmalı motor - kıvılcımla ateşlenen (Internal Combustion Engine – Spark Ignited): Bu konfigürasyonda yakıt, emme manifolduna veya hava ile birleştirildiği yanma odasına enjekte edilir ve hava / yakıt karışımı bir bujiden gelen kıvılcım tarafından tutuşturulur.

Şanzıman (Transmission): Şanzıman, tekerlekleri sürmek için motordan ve/veya elektrikli çekiş motorundan mekanik güç aktarır (U.S. Department of Energy, 2020b).

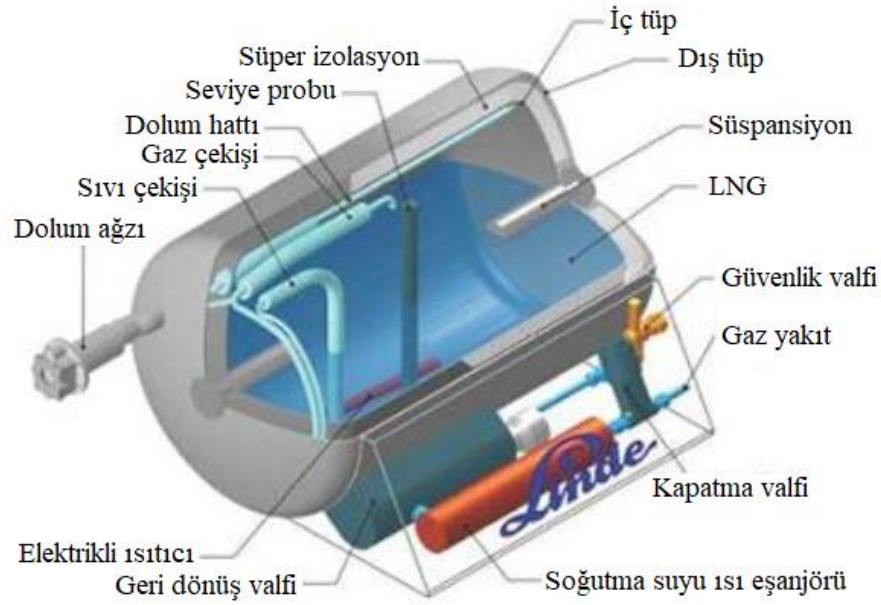
2.7. LNG Yakıt Tankı ve Depolama

Araç içi yakıt deposu incelendiğinde, dizel ve LNG arasında oldukça farklılıklar vardır. Standart dizel araçların yakıt tankları tek duvarlı alüminyum yapıdadır ve boyuta bağlı olarak maliyetleri değişmektedir. Kriyojenik LNG tankları, yüksek vakum altında süper yalıtımlı, tanklar arası boşluğa sahip, %9 nikel çelik iç astar ve karbon çelik dış astardan oluşan çift duvarlı paslanmaz çelik yapıdadır. Tank basıncı normalde 20 ile 150 psi arasındadır, ancak araç kullanılmadığında tankın ısı kazancını telafi etmek için bu miktarın en az 2 katına basınçlandırılmalıdır (Chen vd., 2004; National Renewable Energy Laboratory, 1999). İç basınç belirli bir değerin üzerine çıktığında patlamadan kaçınmak için tanklarda çok sayıda emniyet valfi bulunur, buralardan tank içindeki basınçlı gaz dışarı salınır (Bassi, 2011). Buharlaşma kayıpları, yalıtım yeterli olduğu sürece, tank içeriği için günde %0,1 kadar düşük olabilmektedir (Kumar vd., 2011). Şekil 2.5'te bir LNG tankı ve iç yapısı gösterilmiştir (Aytaş, 2012).

Kriyojenik tank ile ilişkili olarak bir geri çekme sistemi, sıvı yakıtı tanktan alır, bir basınç regülatöründen geçirirerek yakıt basıncı dengelenir ve bir buharlaştırıcıdan motor besleme sistemine ve enjektörlere iletir. Motor, buhar formdaki doğal gazla çalışır. Son zamanlarda bazı

yeni motorlar, yanma odasına doğrudan sıvı doğal gaz enjekte eden kriyojenik enjektörlere dayanan bir besleme sistemi ile tasarlanmıştır (Bassi, 2011).

LNG kriyojenik tanklarının emniyet valfleri özel konfigürasyonu nedeniyle, LNG araçlarının tercihen sürekli olarak uzun park etme olmadan çalıştırılması gerektiği belirtilmektedir. Bu sayede, havalandırma sisteminden ve kaynama sisteminden doğal gaz kaçağı en aza indirilir (Bassi, 2011).



Şekil 2.5. LNG tankı ve iç yapısı (Aytaş, 2012)

LNG yakıt depolama sistemleri tasarım ve üretim açısından büyük ölçüde daha karmaşıktır ve maliyetleri dizel araç yakıt tanklarına göre daha büyük bir mertebededir (National Renewable Energy Laboratory, 1999).

2.8. Yakıt Tüketimi ve Yakıt Ekonomisi

Taşımacılık sektöründe kullanılan ağır ticari araçlarda dizel yakıtı alternatif gösterilen LNG araçların yakıt tüketimi ve buna bağlı olarak yakıt tüketimi maliyeti önemli parametrelerdir. LNG kamyonların ilk alım maliyeti dizel kamyonlara göre %30 daha fazladır (Osorio-Tejada vd., 2017). Ayrıca LNG kamyonların bakım maliyetleri, yedek parça ve kalifiye

bakım teknisyeninin yetersizliği ve bekleme süresinin fazla olması nedeniyle %10 fazla olacağı öngörülmektedir (Chandler ve Proc, 2004; Jaffe vd., 2015). Yakıt tüketimi değerleri test yapılan yol koşullarına ve güzergaha bağlı değişiklik göstermektedir, ancak LNG yakıt fiyatı dizele göre daha uygun olduğundan yakıt ekonomisi açısından avantaj sağlamaktadır. Enerdata analizinin verilerine göre, LNG araçlar dizel araçlara göre %25-30 yakıt tasarrufu sağlamaktadır (Enerdata, 2014). Bir başka araştırmada ise, LNG aracının yakıt maliyeti, LNG ve dizel fiyatlarına bağlı olarak dizel araca göre %20-40 daha düşük olduğu belirtilmiştir. Yıllık sürüş mesafesi 100.000 km'nin üzerinde olan ticari lojistik kamyonlar için, ilk yüksek satın alma maliyetinin bir yıl içinde geri kazanılabileceği söylenmektedir (Hao vd., 2016).

Çizelge 2.3'te ABD Enerji Departmanı'nın Ocak 2020 verilerine göre ulusal ortalama perakende yakıt fiyatları gösterilmektedir. LNG yakıt fiyatı, dizel yakıt fiyatının eşdeğeri olacak şekilde verilmiştir (U.S. Department of Energy, 2020c). Türkiye'de ise bu rakamlar Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu Kasım 2020 verilerine göre, LNG fiyatı ÖTV dâhil, KDV hariç 1,946805 TL/m³, dizel fiyatı vergiler dâhil ortalama 6,40 TL/L'dir (Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, 2020).

Çizelge 2.3. ABD ulusal perakende yakıt fiyatları (U.S. Department of Energy, 2020c)

Konvansiyonel ve alternatif yakıtlar için ulusal ortalama perakende yakıt fiyatları				
Yakıt tipi	Ekim 2019	Ocak 2020	Fiyat değişikliği	Ölçü birimi
Benzin	\$2,68	\$2,59	-\$0,09	Galon başına
Dizel	\$3,08	\$3,05	-\$0,03	Galon başına
CNG	\$2,20	\$2,18	-\$0,03	BGE
LNG	\$2,69	\$2,77	-\$0,08	DGE
Etanol (E85)	\$2,28	\$2,28	-\$0,00	Galon başına
Propan	\$2,76	\$2,79	-\$0,03	Galon başına
Biyodizel (B20)	\$2,87	\$2,87	-\$0,02	Galon başına
Biyodizel (B99/B100)	\$3,73	\$3,72	-\$0,01	Galon başına

Önemli sayıda LNG kamyonu bulunan Avrupa ülkelerinin çoğunda, LNG'nin dizele kıyasla yaklaşık %40 veya daha fazla uygun fiyatlı olduğu görülmektedir. Çizelge 2.4'te Şubat 2018'de bazı ülkelere ait LNG ve dizel otomotiv yakıtı fiyat örnekleri yer almaktadır. Çizelgede

LNG yakıt fiyatı €/kg, dizel yakıt fiyatı €/L üzerinden verilmiştir. Fiyatların doğru karşılaştırılabilmesi için LNG yakıt fiyatının dizel yakıta eşdeğer litre fiyatı da hesaplanmıştır. Bazı ülkelerdeki sınırlı sayıda LNG kamyonu, istasyonu ve kamuya açık LNG fiyat bilgilerinin eksikliği göz önüne alındığında, tüm Avrupa ülkeleri için tam bir yakıt fiyatı karşılaştırması sağlamak mümkün değildir (European Commission, 2018).

Çizelge 2.4. Şubat 2018'de bazı Avrupa ülkelerindeki LNG ve dizel otomotiv yakıt fiyatları (European Commission, 2018)

Ülke	Dizel fiyatı €/litre	LNG fiyatı €/kg	LNG fiyatı €/litre dizel eşdeğeri	Dizele kıyasla LNG tasarrufu
İtalya	1,44	0,95	0,69	%52
İspanya	1,15	0,81	0,59	%49
Fransa	1,39	1,04	0,75	%46
Hollanda	1,25	1,09	0,78	%38
İngiltere	1,41	1,34	0,97	%39

Yakıt tüketimi ve yakıt ekonomisi üzerine literatürde bazı çalışmalar yer almaktadır. Song vd. (2017) Çin'de farklı uygulamalarda kullanılan, farklı tonaj türlerinde dizel ve LNG ağır ticari araçların gerçek zamanlı yakıt tüketim verilerini bir dizi araştırma ve anket yoluyla gerçek verilere dayandırarak elde etmiştir. Çalışmada yakıt tüketim oranı, araçların 100 km seyahat etmesi için gereken yakıt tüketiminin karşılığı olarak sunulmuştur.

Smajla vd. (2019) yaptıkları çalışmada, LNG'nin ağır ticari kamyonlar için yakıt olarak kullanımını analiz etmiştir. LNG'nin farklı yönlerinden, LNG uygulamasının ekonomik ve ekolojik faydalarından söz edilmiştir. Dizel ve LNG kamyonların karşılaştırmalı analizi yapılmış ve uzun vadeli kullanımda LNG'nin klasik dizel araçlara göre daha uygun maliyetli olacağı sonucuna varılmıştır. Maliyet etkinliğine ek olarak, LNG araçların CO₂ emisyonlarını azalttığı belirtilmiştir.

2017 yılında Iveco piyasaya çıkardığı LNG çekici kamyon ile ilgili bir test raporu paylaşmıştır. Raporda, LNG kamyon, yine aynı marka ve benzer özelliklere sahip dizel çekici

kamyon ile karşılaştırılmıştır. Araçların yakıt tüketimi verileri ve CO₂ emisyon değerleri belirtilen raporda paylaşılmıştır (Iveco, 2017).

Thiruvengadam vd. (2010) çalışmalarında, Los Angeles şehrinde katı atık toplama amacıyla kullanılan sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) yakıtlı ve LNG-Ultra düşük kükürtlü dizel çift yakıtlı 12 çöp kamyonu aracının emisyon değerlerini ve ekonomik uygulanabilirliğini incelemişlerdir.

Zhang vd. (2014) yaptıkları çalışmada, aralarında dizel, CNG/LNG ve hibrit dizel motorların bulunduğu, neredeyse tüm önemli otobüs teknolojisi gruplarını kapsayan, 75 ağır vasıta transit otobüs için Pekin'de yol test profilleri toplamışlardır. Dört farklı halk otobüsü güzergahında yaklaşık 40 saatlik sürüş koşulu verileri de toplanmıştır. Test edilen tüm araç grupları için ortalama gerçek yakıt tüketimi ve CO₂ emisyon faktörleri elde edilmiştir. Ayrıca, gerçek yakıt tüketimi ve çalışma koşulları arasındaki ilişkileri, bir çalışma modu yöntemi kullanılarak araştırılmıştır.

Yan vd.nin (2016) çalışmalarında, şehir içinde kullanılan benzinli bir halk otobüsünün LNG yakıt dönüşümü gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, LNG modifikasyonu yapılan otobüsün, güç performansı ve yakıt ekonomisi parametreleri incelenmiştir. LNG uygulaması ile birlikte, yakıt ekonomisinde benzinli araca göre yaklaşık %40 oranında iyileşme görüldüğü belirtilmiştir. Alternatif yakıtlarla ilgili olarak, He vd. (2013) çalışmalarında, kok fırını gazının yakıt olarak kullanımını test etmek amacıyla, kok fırını gazı, LNG ve dizel yakıtı otomobillerde deneyip hızlanma performansı, emisyon değerleri, yakıt ekonomisi ve güvenlik parametrelerini karşılaştırmışlardır.

Ayrıca LNG ve dizel yakıtlı araçların yakıt tüketimi ve emisyon değerleri ile ilgili Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı'nın (National Renewable Energy Laboratory - NREL) 2000'li yılların başında farklı uygulamalarda kullanılan kamyon ve otobüs ağır vasıta araçları üzerinde yaptığı birçok çalışma vardır. Bu çalışmalarda LNG'nin dizele alternatif yakıt olarak araçlarda kullanılabilirliği gerçek şartlarda karşılaştırılarak tartışılmıştır (Chandler vd., 2000a; Chandler vd., 2000b; Chandler vd., 2001; Chandler ve Proc, 2004; Motta vd., 1996; National Renewable

Energy Laboratory, 1999). Ancak bu araçların, günümüz filolarına güç veren gelişmiş teknoloji motorlarını temsil etmediğine dikkat edilmelidir.

2.9. LNG Yakıtlı Araçların Performansı

LNG'nin otomobil motorlarındaki geniş uygulamaları ile birlikte, hem bilim insanlarından hem de mühendislerden artan ilgi görmektedir. Bu nedenle LNG araçların performans, yanma ve emisyon özellikleri ile ilgili birçok çalışma yapılmaktadır. Ticari LNG araç motorlarında hala birçok engel vardır, özellikle düşük hızda zayıf tork ve hızlanma işlemi sırasında kötü tepki performansı gösterdiği belirtilmektedir. (Chen vd., 2017; Tang vd., 2016). LNG araç performansındaki bu handikaplar bazı nedenlere dayandırılmıştır:

- LNG motorunun zayıf performansının kilit noktalarından biri, emme sistemindeki LNG'nin gazlaştırılmasından kaynaklanan düşük hacimsel verimdir. Tang vd. (2016) çalışmalarında, emme havası beslemeli LNG motorunun performansını orijinal motorla karşılaştırmıştır. Sonuçlar, gaz tüketiminin emme havası beslemesiyle neredeyse değişmediği halde, motor torkunun düşük hızda belirgin şekilde iyileştirilebileceğini göstermektedir. Orijinal doğal gaz aracı ile karşılaştırıldığında, emme havası beslemesi ile hızlanma süresinin %14,7-30 oranında azaldığı ve yüksek dişli oranının daha iyi hızlanma performansına katkıda bulunduğu belirtilmiştir.
- Bir diğer nedenin doğal gazlı motorlarda enjeksiyon ve ateşleme arasındaki gecikmelerden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Nwafor (2000) yaptığı çalışmada, ileri enjeksiyon zamanlamasının, çift yakıtlı yanmada birincil yakıt olarak kullanılan doğal gazın performansı üzerindeki etkisini incelemiştir. Doğal gazın, özellikle düşük yük seviyelerinde daha uzun tutuşma gecikmeleri ve daha yavaş yanma oranları sergilediği ve dolayısıyla genişleme strokunda geç yanmaya neden olduğu kaydedilmiştir.

- LNG yakıttaki metan içeriğinin araç performansı üzerinde etkisi olduğu kanısı vardır. Chen vd. (2017) çalışmalarında, doğal gazdaki metan içeriğinin sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) ağır ticari araç motorunun ateşleme ve performansı üzerindeki etkilerini araştırmak için bir deney yapmıştır. Üç sıkıştırma oranıyla (11,6, 14 ve 16) ve çeşitli ateşleme zamanlamalarıyla birlikte farklı metan içeriğine sahip iki çeşit LNG (%93 ve %99) motor test edilmiştir ve çeşitli motor devirlerinde karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, %99 metan içeriğine sahip doğal gazın, %93 metan içeriğine sahip olandan daha iyi daha iyi güç performansına ve yakıt ekonomisine sahip olduğunu göstermektedir.

Literatürde LNG'nin araç performansına etkisi ile ilgili farklı çalışmalar da vardır. Cao vd. (2013) yaptıkları çalışmada, üç farklı yakıtla çalışan (LNG, dizel ve benzin) birbirinden farklı özelliklerdeki araçların hızlanma performansları ve yakıt ekonomilerini incelemiştir.

Cheenkachorn vd. (2013) çalışmalarında, sıvı doğal gazın (LNG) ağır ticari araç motoru üzerindeki etkilerini sunmaktadır. Birincil yakıt olarak doğal gaz kullanılırken, ateşleme kaynağı olarak pilot miktarda dizel kullanılmıştır. Motor performansı ile birlikte dizel ve çift yakıtlı motordan kaynaklanan emisyonlar, 1100 ve 1900 rpm motor devri aralığında gerçekleştirilmiştir. Motor performansı tork, güç, özgül yakıt tüketimi, hacim verimliliği ve termal verimliliği içermektedir. Geleneksel dizel motora kıyasla, çift yakıtlı motor sistemi daha az spesifik yakıt tüketimi, termal verimlilik ve hacimsel verimlilik göstermiştir.

Yan vd.nin (2016) çalışmalarında, şehir içinde kullanılan benzinli bir otobüsün LNG dönüşümü yapılmıştır. LNG modifikasyonundan sonra güç performansını ve enerji performansını kontrol etmek için motor laboratuvar ortamında test edilmiştir. Testin sonuçlarına bakılarak LNG aracın iyi bir yakıt ekonomisi performansına ve iyi bir soğutma etkisine sahip olduğu ancak özellikle ağır yük koşullarında güç performansının iyileştirilmesi gerektiği belirtilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Çalışma kapsamında benzer özelliklerdeki 4×2 dizel çekici kamyon ile 4×2 LNG çekici kamyon araçlarının yakıt tüketimi ve performans metrikleri karşılaştırılacaktır. İki araç da Avrupa standartlarına uygun, araç seviyesi açısından son seviyeye yakın araçlardır. Adil ve doğru bir karşılaştırma elde etmek için, araçların teknik özelliklerin birbirinin muadili olmasına dikkat edilmiştir. Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’de test edilen araçların teknik özellikleri detaylı olarak verilmiştir.

3.2. Yöntem

Çalışma kapsamında benzer teknik özelliklere sahip dizel yakıtlı çekici kamyon ile LNG yakıtlı çekici kamyonun ortalama yakıt tüketimi ve hızlanma performansı testleri gerçek yol koşullarında yapılmaktadır. Test sonuçlarının daha doğru bir şekilde karşılaştırılabilmesi için yol koşullarına bağlı kayıpların belirlenmesi gerekmektedir. Bu bölümde, aerodinamik sürtünmeler ve yuvarlanma direnci üzerinde durulmakta ve bu değerleri elde etmek için yapılan test yöntemi açıklanmaktadır. Ayrıca araçların 0-85 km/h hızlanma performansı test yöntemi ile ortalama yakıt tüketimi değerlerini belirlemek için yapılan yol testlerinin detayları ve prosedürleri paylaşılmaktadır.

3.2.1. Coast-down test

3.2.1.1. Validasyon

Yol yükü enerjisi, aracın hareketine karşı çıkan kuvvetlerin toplamı ile kat edilen mesafenin toplamıdır. Menşesine göre dört ana kategoriye ayrılabilir: aerodinamik sürtünme, yuvarlanma direnci, yol derecesi ve atalet kuvvetleri. Aerodinamik sürüklenme kuvveti temel olarak taşıt geometrisinin ve taşıt hızının karesinin bir fonksiyonudur.

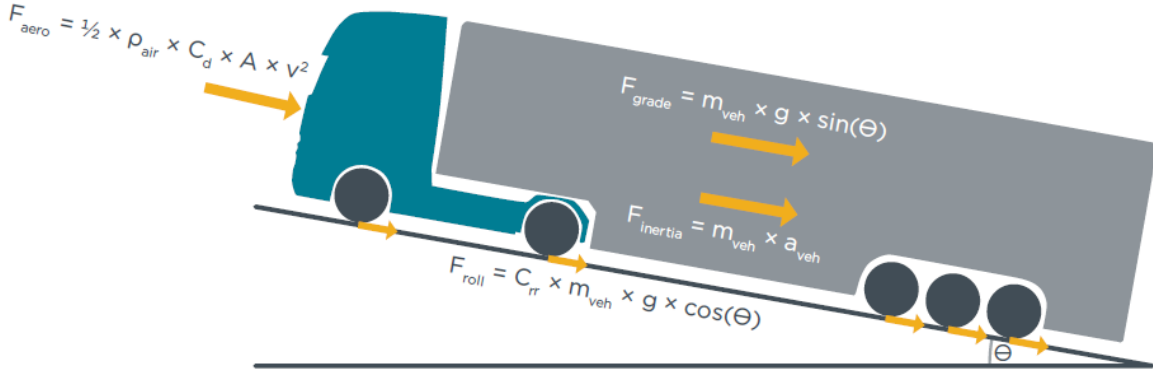
Çizelge 3.1. 4×2 dizel çekici kamyonun teknik özellikleri

Güç Aktarım Grubu	Motor	FPT Cursor 11 ENT VI (Step-C)			
	Güç	338 kW (460 bg)			
	Devir	1900 d/d			
	Tork	2150 Nm			
	Tork aralığı	1050-1550 d/d			
	Şanzıman tipi	12 ileri otomatik			
	Şanzıman vites oranı	12,9 – 0,7			
	Diferansiyel oranı	3,08			
	Emisyon seviyesi	EU6			
Aerodinamik	Kabin tipi – tavan	Yataklı - Yüksek Tavan			
	Spoiler	Var	X	Yok	
	Yan uzatmalar	Var	X	Yok	
	Yan etek	Var	X	Yok	
	Güneşlik	Var	X	Yok	
	Ek Aero Özellikleri	Basamak kapama			
Şasi	Dingil Arası Mesafe (mm)	3700			
	5. Teker Yüksekliği (mm)	1100			
	Jantlar (Çelik/Alüminyum)	8,25 × 22,5 Çelik			
	Yedek Lastik	Var		Yok	X
	Lastik Boyutları	315/70 R22,5			
	Lastik Sınıfı	B			
	Lastik Basıncı (psi)	130			
	Lastik derinliği (mm)	17			
	Lastik Boyutları	315/70 R22,5			
	Lastik Sınıfı	B			
	Lastik Basıncı (psi)	130			
	Lastik derinliği (mm)	15			
Yakıt Ekonomisi	Yakıt Ekonomisi Özellikleri	Düşük yuvarlanma direncine sahip lastikler			
		Son seviye şanzıman kalibrasyonu			
		-			
Diğer	Model	2018			
	Kilometre	18700			
	Boş Ağırlık	8760 kg (Full yakıt + Full üre)			
	Toplam Ağırlık	41000 kg			
	Yakıt / Üre Tankı	900 lt Yakıt / 80 lt Üre			
	Akü (Ah)	12 V 220 A (2 Adet)			
	Hız Sabitleyici	Aktif			
	Intarder / Retarder	Intarder			
Treyler	Boyut (uzunluk / genişlik / yükseklik) (mm)	13600 / 2550 / 4000			
	Lastik Boyutları (1. Dingil)	385/65 R22,5			
	Lastik Sınıfı	B			
	Lastik Basıncı (psi)	130			
	Lastik Derinliği (mm)	15			
	Lastik Boyutları (2. Dingil)	385/65 R22,5			
	Lastik Sınıfı	B			
	Lastik Basıncı (psi)	130			
	Lastik Derinliği (mm)	15			
	Lastik Boyutları (3. Dingil)	385/65 R22,5			
	Lastik Sınıfı	B			
Lastik Basıncı (psi)	130				
Lastik Derinliği (mm)	15				

Çizelge 3.2. 4×2 LNG çekici kamyonun teknik özellikleri

Güç Aktarım Grubu	Motor	13 Litre NG Euro VI (Step-D)			
	Güç	338 kW (460 bg)			
	Devir	1900 d/d			
	Tork	2000 Nm			
	Tork aralığı	1200-1500 d/d			
	Şanzıman tipi	12 ileri otomatik			
	Şanzıman vites oranı	12,9 – 0,7			
	Diferansiyel oranı	3,40			
	Emisyon seviyesi	EU6			
Aerodinamik	Kabin tipi – tavan	Yataklı - Yüksek Tavan			
	Spoiler	Var	X	Yok	
	Yan uzatmalar	Var	X	Yok	
	Yan etek	Var		Yok	X
	Güneşlik	Var	X	Yok	
	Ek Aero Özellikleri	Basamak kapama			
Şasi	Dingil Arası Mesafe (mm)	3700			
	5. Teker Yüksekliği (mm)	1100			
	Jantlar (Çelik/Alüminyum)	8,25 × 22,5 Çelik			
	Yedek Lastik	Var		Yok	X
	Lastik Boyutları	315/70 R22,5			
	Lastik Sınıfı	B			
	Lastik Basıncı (psi)	130			
	Lastik derinliği (mm)	17			
	Lastik Boyutları	315/70 R22,5			
	Lastik Sınıfı	B			
	Lastik Basıncı (psi)	130			
	Lastik derinliği (mm)	15			
Yakıt Ekonomisi	Yakıt Ekonomisi Özellikleri	Düşük yuvarlanma direncine sahip lastikler			
		-			
		-			
		-			
Diğer	Model	2020			
	Kilometre	3300			
	Boş Ağırlık	8870 kg (Full yakıt + Full üre)			
	Toplam Ağırlık	41000 kg			
	Yakıt / Üre Tankı	1000 litre yakıt			
	Akü (Ah)	12 V 220 A (2 Adet)			
	Hız Sabitleyici	Aktif			
	Intarder / Retarder	Intarder			
Treyler	Boyut (uzunluk / genişlik / yükseklik) (mm)	13600 / 2550 / 4000			
	Lastik Boyutları (1. Dingil)	385/65 R22,5			
	Lastik Sınıfı	B			
	Lastik Basıncı (psi)	130			
	Lastik Derinliği (mm)	15			
	Lastik Boyutları (2. Dingil)	385/65 R22,5			
	Lastik Sınıfı	B			
	Lastik Basıncı (psi)	130			
	Lastik Derinliği (mm)	15			
	Lastik Boyutları (3. Dingil)	385/65 R22,5			
	Lastik Sınıfı	B			
	Lastik Basıncı (psi)	130			
Lastik Derinliği (mm)	15				

Yuvarlanma direnci kuvveti esas olarak araç kütlesine ve aracın lastiklerinin yuvarlanma direnci katsayısına bağlıdır. Yol kalite kuvveti, yol eğiminin ve araç kütlesinin bir fonksiyonudur. Son olarak, eylemsizlik kuvvetleri araç kütlesine ve sürüş döngüsünün getirdiği ivmeye bağlıdır (Rodríguez vd., 2018). Bu kuvvetler Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Araca etki eden yol yükü kuvvetleri (Rodríguez vd., 2018)

Aracı yavaşlatmak için etkileyen kuvvetlerin basitleştirilmiş olarak yuvarlanma ve aerodinamik dirençten kaynaklandığı kabul edilmektedir. Bir aracın Newton [N] cinsinden kuvvet dengesi Denklem (3.1)’de verilmiştir (Ligterink vd., 2014):

$$(M + m_r) a = F_{\text{driveline}} + F_{\text{rolling}} + F_{\text{air-drag}} \sim F_0 + (F_1)(v) + (F_2)(v^2) \quad (3.1)$$

Burada:

- M : aracın ağırlığı [kg]
- m_r : aracın dönme ataleti (I_{moment}/R^2) [kg]
- a : hızlanma ($a=dv/dt$) [m/s^2]
- F_x : ilgili kuvvetler [N]
- v : hız [km/h]
- F_0, F_1, F_2 : yol yükü katsayıları [N, N/(km/h), N/(km/h)²]

Tipik olarak F_0 , aktarma organları ve yuvarlanma direnci ile, F_2 hava sürüklemesi ile ilişkilidir. Yuvarlanma direnci, debriyaj devreden çıkarıldığında, coast-down testi sırasında aktarma organları üzerinde baskındır. F_1 katsayısı, ara hızlardaki detaylara bağlı olarak pozitif veya negatif olabilir. Ancak bu katsayı ve ilişkilendirme yaklaşık bir değerdir (Ligterink vd., 2014).

Hava sürüklemesi aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$F_{\text{air-drag}} \sim \frac{1}{2} (C_w)(\rho_{\text{air}})(v^2)(A_{\text{frontal}}) \quad (3.2)$$

Burada, ρ_{air} hava yoğunluğu [kg/m^3], v^2 hızın karesi [km/h], A_{frontal} aracın ön alanı [m^2] ve C_w aracın tasarımı ile ilişkili aerodinamik sürüklenme katsayısıdır. Bu, tipik olarak binek otomobiller için $C_w \sim 0,25 - 0,5$ aralığındadır (ağır vasıta araçlar ve çift çekerli araçlar için daha yüksektir). Bu formül, aracın etrafındaki türbülanslı bir akışa dayanmaktadır (Ligterink vd., 2014).

Lastikler, tekerlek üzerindeki dikey kuvvetle birleştiğinde direnç kuvvetini veren yuvarlanma direnci katsayılarına (Rolling Resistance Coefficients - RRC) sahiptir. Lastik etiketleri bu katsayılara dayanmaktadır ve bu nedenle yuvarlanma direnci, aracın ağırlığı ile orantılıdır. Bu yaklaşım aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Ligterink vd., 2014):

$$F_{\text{rolling}} \sim (\text{RRC})(M)(g) \quad (3.3)$$

Formülde, M aracın ağırlığını [kg], $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ yerçekimi sabitini ifade etmektedir (Ligterink vd., 2014).

3.2.1.2. Test koşulları

- Test parkuru; araç istikameti ve yanal yönlerde %1'den az eğimde olması gereklidir.
- Test zemini; kuru, temiz beton veya asfalt zemin olmalıdır.

- Hava koşulları; yağışlı ve rüzgarlı günde test yapılamaz. Rüzgar, 3 m/s hızı geçmemelidir.
- Test, 850 rakımın üzerinde yapılmamalıdır.

3.2.1.3. Test prosedürü ve testin yapılışı

- Motor sıcaklıklarının normal sıcaklık seviyesinde olması gerekmektedir. Eğer normal seviyede değil ise aracı 20-30 dk arasında ısındırma testi yapılmalıdır.
- Lastik basınçlarının uygun psi değerinde olmalıdır.
- Araçların motor ve şanzımanında herhangi bir hata kodu bulunmamalıdır.

Test geliş ve gidiş yönü olarak 2 evreden oluşmaktadır. Testin doğruluğunu arttırmak için testler en az 3 kez yapılır.

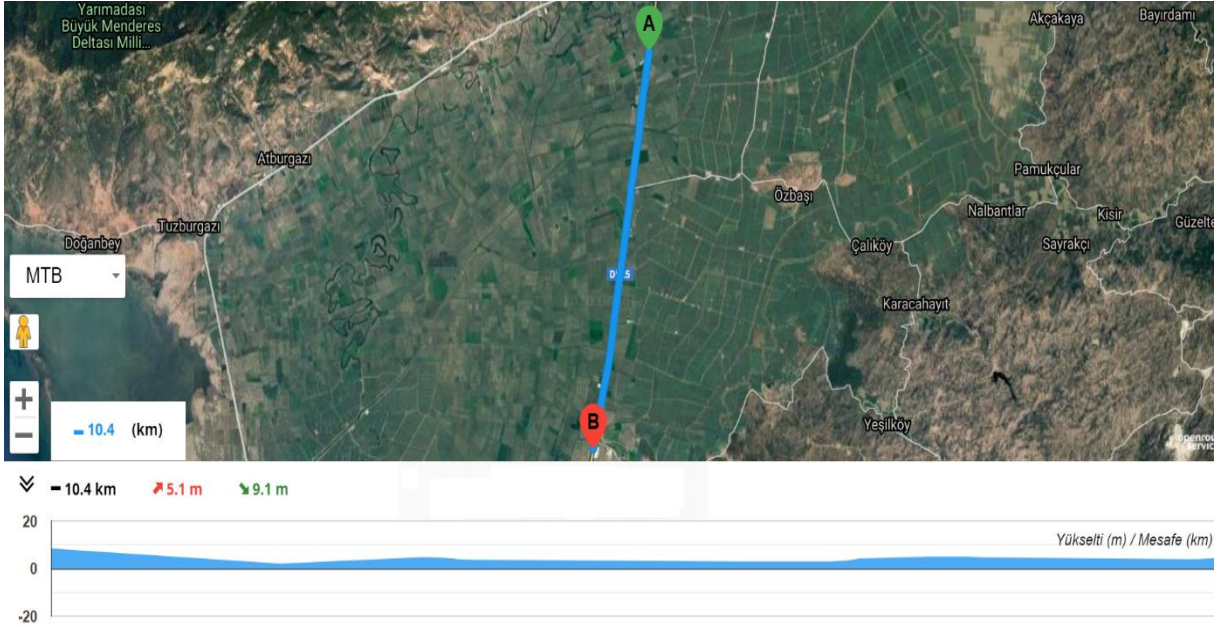
Test için belirlenen rotada araçlar 500 m aralıklarla 90 km/h hıza kadar hızlandırılır. 90 km/h hızda belirlenen noktada araçların vitesi boşa alınarak hızın 15 km/h hıza kadar hiç müdahale edilmeden düşmesi beklenir. 15 km/h hıza düştükten sonra test başarılı halde bitirilmiş olur.

Her test sonrası alınan veriler kontrol edilir. Verilerde uyumsuzluk var ise test tekrarlanmalıdır. Test güzergahı ve yol durumu Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

3.2.1.4. Raporlama

- Hıza bağlı olarak aşağıda yer alan metrikler raporlanır.
 - 1) Zaman (s)
 - 2) Hız (km/h)

- 3) Mesafe (m)
- 4) Aerodinamik Katsayısı
- 5) Yuvarlanma Direnci Katsayısı



Şekil 3.2. Coast-down - performans testi güzergahı

Bu testin amacı, belirlenen hız ve yol koşullarında araç üzerinde etkili olan aerodinamik ve yol direnç kuvvetlerini hesaplamaktır. Direnç kuvvetleri, performans ve ortalama yakıt tüketimi metriklerini doğrudan etkiler ve hesaplanan direnç kuvvetleri burada kullanılır.

3.2.2. Hızlanma performansı testi

3.2.2.1. Testin amacı

Test, belirlenen hız ve yol koşullarında araçların 0 km/h'den 85 km/h'e hızlanma metriğinin incelenmesini amaçlar. Test güzergahı, coast-down test güzergahı ile aynı sürüş yoludur ve Şekil 3.2'de verilmiştir.

3.2.2.2. Test koşulları

- Test parkuru; araç istikameti ve yanal yönlerde %1'den az eğimde olması gereklidir.
- Test zemini; kuru, temiz beton veya asfalt zemin olmalıdır.
- Hava koşulları; yağışlı ve rüzgarlı günde test yapılamaz. Rüzgar, 3 m/s hızı geçmemelidir.
- Test, 850 rakımın üzerinde yapılmamalıdır.

3.2.2.3. Test prosedürü ve testin yapılışı

- Motor sıcaklıklarının normal sıcaklık seviyesinde olması gerekmektedir. Eğer normal seviyede değil ise aracı 20-30 dk arasında ısıdırma testi yapılmalıdır.
- Lastik basınçlarının uygun psi değerinde olmalıdır.
- Araçların motor ve şanzımanında herhangi bir hata kodu bulunmamalıdır.

Test geliş ve gidiş yönü olarak 2 evreden oluşmaktadır. Testin doğruluğunu arttırmak için testler en az 3 kez yapılır.

Araç, test için belirlenen noktadan 0 km/h hızdan 85 km/h hıza kadar tam gaz (varsa kick-down) yaparak hızlandırılır. Her test sonrası alınan veriler kontrol edilir. Verilerde uyumsuzluk var ise test tekrarlanmalıdır.

3.2.2.4. Raporlama

- Hıza bağlı olarak aşağıda yer alan metrikler raporlanır.
 - 1) Zaman (s)
 - 2) Hız (km/h)

- 3) Mesafe (m)
- 4) İvme (m/s^2)

3.2.3. Sabit hızda yakıt tüketimi testi

3.2.3.1. Testin amacı

Test, belirlenen hız ve yol koşullarında, araçların eğimsiz bir yolda ($< \%1$ eğim) farklı sabit hızlarda (60 km/h, 70 km/h, 80 km/h) yakıt tüketimi verilerinin incelenmesini amaçlar. Test güzergahı, coast-down test ve hızlanma performansı testi güzergahı ile aynı sürüş yoludur ve Şekil 3.2’de verilmiştir.

3.2.3.2. Test koşulları

- Test parkuru; araç istikameti ve yanal yönlerde $\%1$ ’den az eğimde olması gereklidir.
- Test zemini; kuru, temiz beton veya asfalt zemin olmalıdır.
- Hava koşulları; yağışlı ve rüzgarlı günde test yapılamaz. Rüzgar, 3 m/s hızı geçmemelidir.
- Test, 850 rakımın üzerinde yapılmamalıdır.

3.2.3.3. Test prosedürü ve testin yapılışı

- Motor sıcaklıklarının normal sıcaklık seviyesinde olması gerekmektedir. Eğer normal seviyede değil ise aracı 20-30 dk arasında ısındırma testi yapılmalıdır.
- Lastik basınçlarının uygun psi değerinde olmalıdır.
- Araçların motor ve şanzımanında herhangi bir hata kodu bulunmamalıdır.

Sabit hızda yakıt tüketimi testi 60 km/h, 70 km/h ve 80 km/h olmak üzere farklı hızlarda gerçekleştirilmektedir. Test mesafesi, test güzergahı üzerinde başlangıç noktasından itibaren 3 km’lik bir mesafedir.

Araç, test başlangıç noktasına gelmeden belirlenen sabit hıza (60, 70 ya da 80 km/h hıza) ayakla çıkarılır. Belirlenen sabit hızda, hız sabitleyici aktif hale getirilerek araç hızının sabit tutulması sağlanır. Araç sabit hızla giderken, test başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki 3 km'lik mesafede yakıt tüketimi ölçümü yapılır.

Test geliş ve gidiş yönü olarak 2 evreden oluşmaktadır. Testin doğruluğunu arttırmak için testler en az 3 kez yapılır. Her test sonrası alınan veriler kontrol edilir. Verilerde uyumsuzluk var ise test tekrarlanmalıdır.

3.2.3.4. Raporlama

- Hıza bağlı olarak aşağıda yer alan metrikler raporlanır.

- 1.) Yol (km)
- 2.) Hız (km/h)
- 3.) Yakıt tüketimi (L/100km, kg/100km)

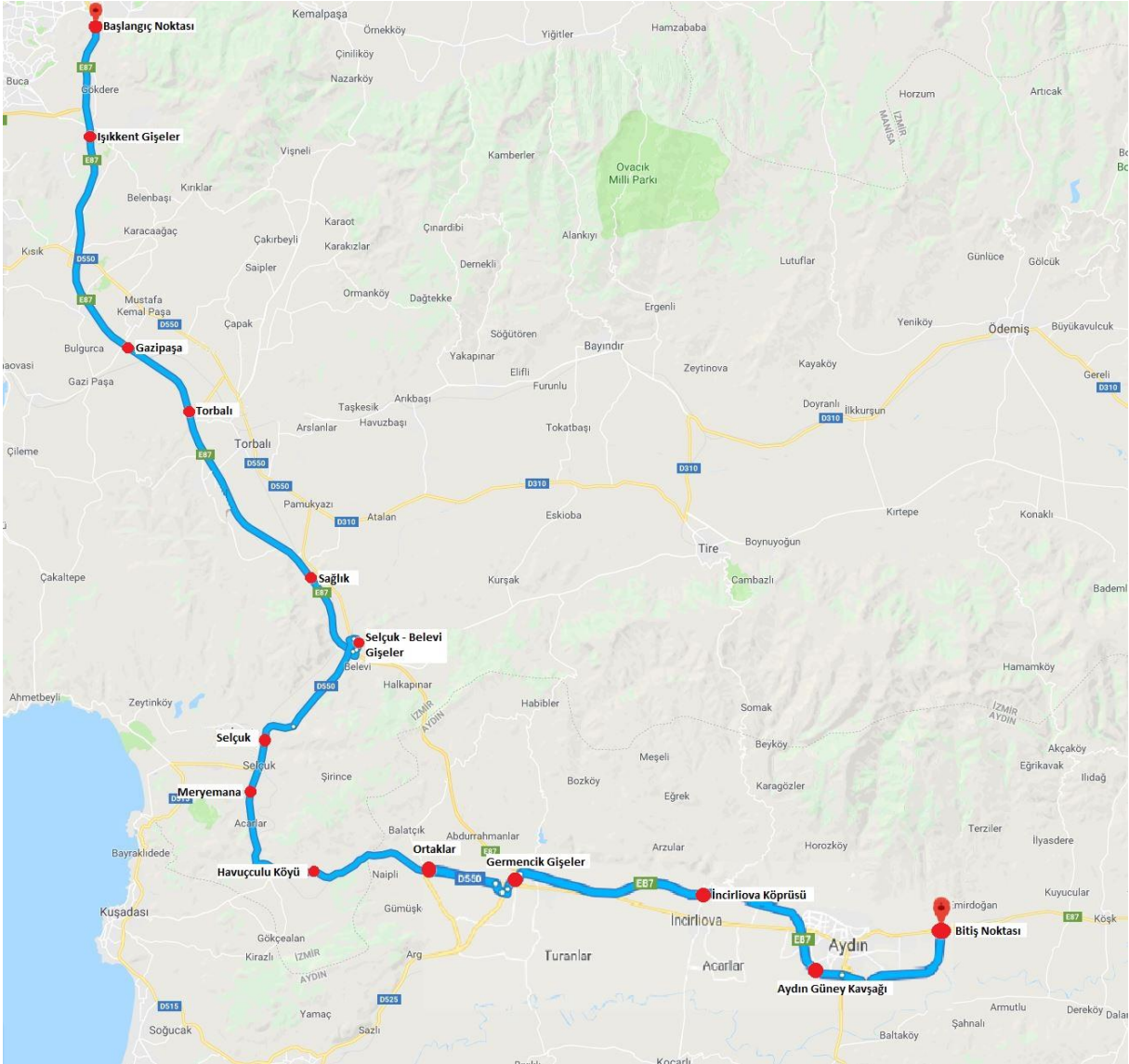
3.2.4. Gerçek yol koşulu yakıt tüketimi testi

3.2.4.1. Testin amacı

Test, çekici serisi araçların belirlenen gerçek yol koşullarında yakıt tüketimi metriklerini belirlemeyi amaçlar. Yakıt tüketimi testi için belirlenen yol güzergahı Şekil 3.3'te gösterilmiştir.

3.2.4.2. Test koşulları

- Test zemini; temiz beton veya asfalt zemin olmalıdır. Zemin kuruluşuna dikkat edilmelidir.



Şekil 3.3 - Gerçek yol koşulu ortalama yakıt tüketimi test güzergahı

- Hava koşulları; hava sıcaklığı $10-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, rüzgar hızı maksimum 5 m/s , nem seviyesi $\leq 95\%$ ve atmosferik basınç $(1\text{ bar}) \pm 7,5\%$ olduğu durumlarda test yapılabilir. Hava durumu düzenli olarak takip edilmeli, yağmurlu havada test yapılmamalıdır.
- Test, maksimum ağırlık koşulunda (40.000 kg) gerçekleştirilir. Her test öncesi yakıt ve adblue dolumu yapılarak araç ağırlıkları ölçülür.
- Nominal motor ve şanzıman sıcaklıklarına ulaşıldığından emin olunmalıdır.

- Lastik basınçları uygun basınç değerinde (130 psi) olmalıdır.
- Motor ve şanzımda herhangi bir hata kodu bulunmamalıdır.

3.2.4.3. Test prosedürü ve testin yapılışı

Test, belirlenen rotada gidiş ve geliş olarak çift yönlü gerçekleştirilmektedir. Şekil 3.3'te test güzergahının haritadaki görüntüsü verilmiştir. Şekilde gösterilen test güzergahının %62'si otoyol, %17'si kırsal yol, %21'i şehir içi yol koşullarını temsil etmektedir.

Dış etkenlerin yakıt tüketimine etkisini minimize etmek için araçlarda dorse ve şoför değişiklikleri yapılır. Örneğin;

- 1.gün; 1. araç: X şoför ve A dorse, 2. araç: Y şoför ve B dorse
- 2.gün; 1. araç: Y şoför ve A dorse, 2. araç: X şoför ve B dorse
- 3.gün; 1. araç: Y şoför ve B dorse, 2. araç: X şoför ve A dorse
- 4.gün; 1. araç: X şoför ve B dorse, 2. araç: Y şoför ve A dorse

3.2.4.4. Raporlama

- Hıza bağlı olarak aşağıda yer alan metrikler raporlanır.
 - 1.) Hız (km/h)
 - 2.) Yol (km)
 - 3.) Yakıt tüketimi (L/100km, kg/100km)

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bir önceki bölümde Dizel ve LNG çekici araçlarda yapılan coast-down testi, hızlanma performansı testi, sabit hızda yakıt tüketimi testi ve ortalama yakıt tüketimi gerçek yol testlerinin detayları paylaşılmıştır. Uygulanan testlerin sonuçları bu bölümde açıklanmaktadır.

4.1. Coast-down Test Sonuçları

Testler prosedürde belirtilen koşullara uygun şekilde yapılmıştır. Test için belirlenen rotada araçlar, 500 m aralıklarla 90 km/h hızda belirlenen noktada araçların vitesi boşa alınarak 15 km/h hıza kadar hiç müdahale edilmeden düşmesi ile başarılı bir şekilde tamamlanmıştır. Verilerin doğruluğunu artırmak amacıyla test her iki yönde olmak üzere en az 3'er kez tekrarlanmıştır.

Test başlamadan hava durumu verileri incelenmiş ve test sırasında oluşacak hava durumu değerleri Çizelge 4.1'deki gibi öngörülmüştür.

Çizelge 4.1. Test sırasında hava durumu verileri

Sıcaklık	12 - 14 °C
Rüzgar	2 m/s
Nem	%60
Hava durumu	Yağışsız

Çizelge 4.2'de dizel ve LNG çekici araçların coast-down testine ait zaman, hız ve mesafe değerleri bulunmaktadır. Bu çizelgede, araç boş vitesinde giderken 85 km/h hızdan 20 km/h hıza kadar geçen süre ve mesafe bilgilerine yer verilmiştir. Yol durumu ve rüzgarın etkisini azaltmak amacıyla testler A ve B yönü olmak üzere çift yönde yapılmıştır. Çizelgedeki veriler, çift yönlü yapılan test değerlerinin ortalamasını yansıtmaktadır.

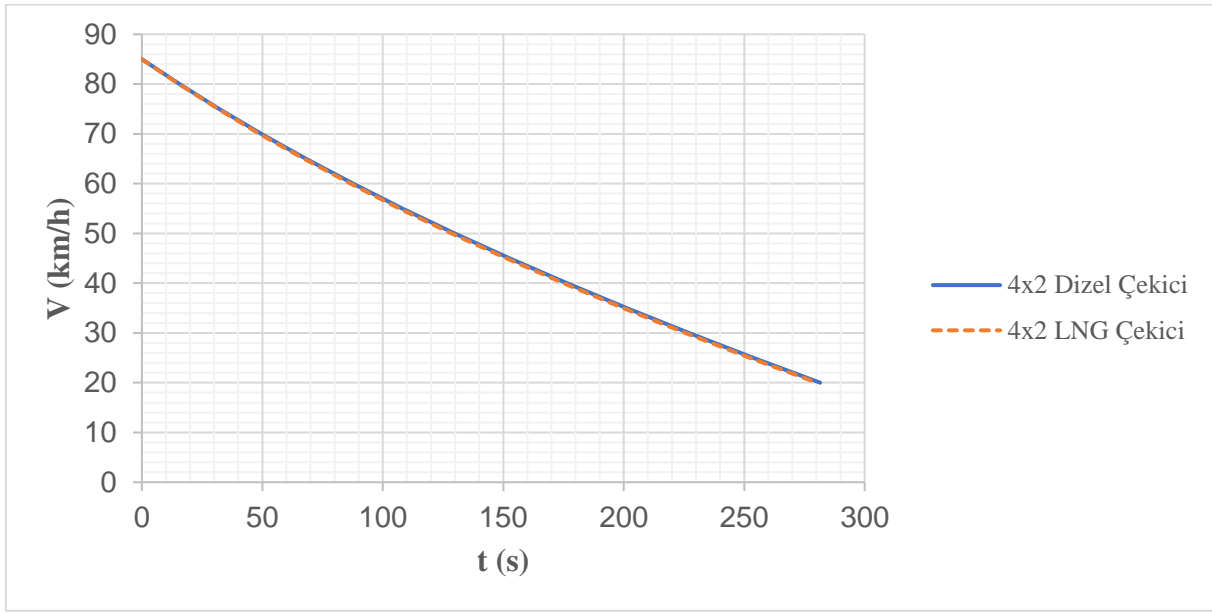
Çizelge 4.2. Dizel ve LNG yakıtlı araçların coast-down test verileri

4×2 Dizel yakıtlı çekici			4×2 LNG yakıtlı çekici		
Zaman	Hız	Mesafe	Zaman	Hız	Mesafe
t	V	x	t	V	x
s	km/h	m	s	km/h	m
0,0	85	0,0	0,0	85	0,0
15,6	80	352,1	15,4	80	350,4
32,1	75	694,6	31,7	75	689,8
49,6	70	1074,2	48,9	70	1068,5
68,0	65	1418,0	67,2	65	1412,4
87,6	60	1751,7	86,5	60	1745,1
108,1	55	2099,7	106,9	55	2090,9
129,8	50	2409,2	128,5	50	2400,3
152,5	45	2703,4	151,1	45	2692,6
176,4	40	2984,1	174,9	40	2972,2
201,2	35	3229,1	199,7	35	3216,4
227,1	30	3461,7	225,6	30	3445,0
253,9	25	3669,9	252,5	25	3652,8
281,5	20	3838,4	280,2	20	3818,7

Değerler göz önünde bulundurularak Şekil 4.1’de araçların 85 km/h hızdan 20 km/h hıza kadar salınımlında geçen sürüklenme süreleri gösterilmiştir. Araç boyutları ve kabin tasarımları aynı olduğu için grafikteki verilerin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Test sonucunda araçların sürüklenme süreleri ve mesafeleri belirlendikten sonra, yuvarlanma direnci katsayısı (RRC) ve aerodinamik sürtünme katsayısını (C_w) hesaplayabilmek için Bölüm 3.2.1’deki Denklem (3.1)’de bulunan F_0 , F_1 ve F_2 yol yük katsayılarının korelasyonunun yapılması gereklidir. F_0 katsayısı araçta kullanılan lastiğin enerji verimlilik sınıfına bağlı olarak bir değer almaktadır. Araç tipine göre, araçta kullanılan lastiğin modeline bağlı olarak enerji verimlilik sınıfı ve RRC değerlerinin yer aldığı veriler Şekil 4.2’te gösterilmektedir (Maagoe, 2016).

F_1 katsayısı pozitif ve negatif değerler alabileceği daha önceki bölümlerde söz edilmişti. Bu çalışmada F_1 değeri, test yöntemine ve testin yapıldığı yol koşullarına bağlı olarak hız

profilinin düzenli şekilde azalması nedeniyle her iki araçta da ihmal edilmiştir. F_2 katsayısı için Bölüm 3.2.1'deki Denklem (3.1) ve Denklem (3.2)'deki değişkenler göz önünde bulundurularak uygun değerler verilmiştir.



Şekil 4.1. Coast-down test sonuçlarının karşılaştırılması – Hız-Zaman grafiği

Passenger car C1 Tyres		Light Truck C2 Tyres		Truck & Bus C3 Tyres	
RRC in kg/t	Energy Efficiency class	RRC in kg/t	Energy Efficiency class	RRC in kg/t	Energy Efficiency class
$RRC \leq 6,5$	A	$RRC \leq 5,5$	A	$RRC \leq 4,0$	A
$6,6 \leq RRC \leq 7,7$	B	$5,6 \leq RRC \leq 6,7$	B	$4,1 \leq RRC \leq 5,0$	B
$7,8 \leq RRC \leq 9,0$	C	$6,8 \leq RRC \leq 8,0$	C	$5,1 \leq RRC \leq 6,0$	C
Empty	D	Empty	D	$6,1 \leq RRC \leq 7,0$	D
$9,1 \leq RRC \leq 10,5$	E	$8,1 \leq RRC \leq 9,2$	E	$7,1 \leq RRC \leq 8,0$	E
$10,6 \leq RRC \leq 12,0$	F	$9,3 \leq RRC \leq 10,5$	F	$RRC \geq 8,1$	F
$RRC \geq 12,1$	G	$RRC \geq 10,6$	G	Empty	G

Şekil 4.2. Araç tiplerine göre lastiğin enerji verimlilik sınıfı ve RRC değerleri (Maagoe, 2016)

Belirtilen denklemlerde bulunan ρ_{air} hava yoğunluğu, 15 °C sıcaklık baz alınarak 1,225 kg/m³; $A_{frontal}$ araç öz yüzey alanı 10 m² olarak alınmıştır. Yol yükü katsayıları belirlendikten sonra Denklem (3.2) ve Denklem (3.3) kullanılarak araçların yuvarlanma direnci katsayıları (RRC) ve aerodinamik sürtünme katsayıları (C_w) bulunur. Çizelge 4.3'te araçlara ait F_0 , F_1 , F_2 yol yükü katsayıları ve bu katsayılar kullanılarak hesaplanan yuvarlanma direnci katsayısı (RRC) ve aerodinamik sürüklenme katsayısı (C_w) değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.3. Dizel ve LNG yakıtlı araçların yol yükü sabiti değerleri

Sabitler	4×2 Dizel yakıtlı çekici	4×2 LNG yakıtlı çekici
F_0	1962	1950
F_1	0	0
F_2	0,256	0,266
RRC	0,00488	0,00485
C_w	0,542	0,563

Çizelgeye bakıldığında dizel aracın aerodinamik sürüklenme katsayısı 0,542, LNG aracın aerodinamik sürüklenme katsayısı 0,563 olduğu görülmektedir. Literatürde, C_w değerinin binek araçlar için 0,25-0,5 aralığında olduğu, ağır ticari araçlar için bu katsayının daha yüksek olduğu belirtilmektedir (Ligterink vd., 2014). Çalışmamızda coast-down testleri gerçekleştirilen her iki ağır ticari araç için $C_w > 0,5$ sonucu elde edilmiş olup literatürdeki durumla eşleşmektedir.

Araçların aerodinamik sürüklenme katsayısı değerleri incelendiğinde, dizel çekicinin LNG çekiciye göre araç aerodinamiğinin daha iyi olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Araçların aerodinamik yapısını karşılaştırmak için Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'deki araç özellikleri dikkate alındığında, her iki aracın da aynı tasarımı içeren yüksek tavanlı kabine sahip oldukları, aynı tip dorselerle test edildiği, bu durumda da araçların kabin ve dorse boyutlarının aynı olduğu görülmektedir. Araç özellikleri çizelgelerinden yola çıkarak, araç aerodinamiğini etkileyecek tasarımsal farkın, yan etek olarak adlandırılan, araçların sağ ve sol tarafında yakıt tankını kapatacak şekilde kullanılan yan kapama parçaları olduğu söylenebilir. Dizel araçta aerodinamik iyileştirme için yan etek kullanılırken, LNG araçta yakıt tanklarının geniş olmasından kaynaklı tasarım kısıtlaması nedeniyle ve tankların yan tarafında bulunan açma-kapama, boşaltım

valflerine erişimin kolayca sağlanabilmesi adına yan etek kapama parçası kullanılmamıştır. İki araç arasındaki yan etek kullanım farkı, LNG aracın aerodinamik yapısını dizel araca kıyasla olumsuz etkilemektedir.

Çizelge 4.3'te, araçların yuvarlanma direnci katsayılarının (RRC) dizel araç için 0,00488, LNG araç için 0,00485 olduğu görülmektedir. RRC değerleri, Şekil 4.2'de kamyon ve otobüs araçlarında kullanılan C3 tipi lastiklerin B enerji verimliliği sınıfı aralığındadır. Araçlar aynı yol koşullarında, aynı ağırlıklarda ve aynı enerji verimliliği sınıfındaki lastikler kullanılarak test edilmiştir. Bu yüzden iki aracın yuvarlanma direnci katsayıları birbirine oldukça yakındır.

4.2. Hızlanma Performansı Test Sonuçları

Hızlanma performansı testi, belirlenen yol koşullarında araçların kick-down yapılarak 0 km/h hızdan 85 km/h hıza çıkmasıyla test prosedürüne uygun şekilde tamamlanmıştır. Testin doğruluğunu artırmak için hızlanma performansı testi prosedüründe yazıldığı gibi, test gidiş - geliş her iki yönde olmak üzere en az 3'er kez tekrarlanmıştır. Çizelge 4.4'te araçların hızlanma performansı testi verileri yer almaktadır. Değerler, tekrarlanan test verilerinin ortalaması alınarak oluşturulmuştur.

Çizelge 4.4'te bulunan hızlanma performansı verileri incelendiğinde, dizel çekici aracın 0-85 km/h hızlanma süresinin 55,0 saniye, LNG çekici aracın 68,0 saniye olduğu görülmektedir. Ayrıca 0 km/h hızdan 85 km/h hıza dizel aracın 778,2 metrede, LNG aracın 1005,5 metrede ulaştığı sonucuna varılmıştır. Test sonuçlarına dayanarak LNG aracın hızlanma performansının dizel araca göre daha düşük olduğu görülmektedir. 85 km/h hıza ulaşma süreleri karşılaştırıldığında, LNG aracın dizel araca göre %24 oranında dezavantajlı olduğu ortaya çıkmaktadır.

Hızlanma performansı ile ilgili Yan vd.nin (2016) çalışmasında, benzinli bir şehir içi halk otobüsünün LNG yakıt dönüşümü gerçekleştirilip, araçların performans karşılaştırılması yapılmıştır. 0-50 km/h hızlanma performansı metriği benzinli ve LNG araçlar arasında

incelenmiştir. Durur halden 50 km/h hıza ulaşma süreleri benzinli araçta 21,7 saniye, LNG araçta 33,74 saniye olduğu ve LNG aracın 50 km/h hıza ulaşma süresinin benzinli araca göre %55,5 daha fazla olduğu belirtilmiştir. Benzer karşılaştırmayı yapabilmek için çalışmamızda dizel ve LNG çekici araçların 0-50 km/h hızlanma sürelerine bakacak olursak, dizel aracın 24,1 saniyede, LNG aracın 26,8 saniyede 50 km/h hıza ulaştığı görülmektedir. Bu çalışmada LNG aracın 50 km/h hıza ulaşma süresinin %11,2 fazla olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışmadaki sonuç literatürle benzer sonucu verse de, oran olarak birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Bu farkın nedeni, çalışmalardaki araçların (kamyon-otobüs) ve yakıt türlerinin (dizel-benzin) birbirinden farklı olması gösterilebilir. Ayrıca Yan vd. (2016) çalışmasında, testin yapıldığı araç özellikleri (ağırlık, motor gücü, motor hacmi vb.) ve yol koşulları belirtilmemiştir. Araç özellikleri ve çevre şartlarındaki farklılıklar performans parametresini etkilemektedir.

Çizelge 4.4. Dizel ve LNG yakıtlı araçların performans test verileri

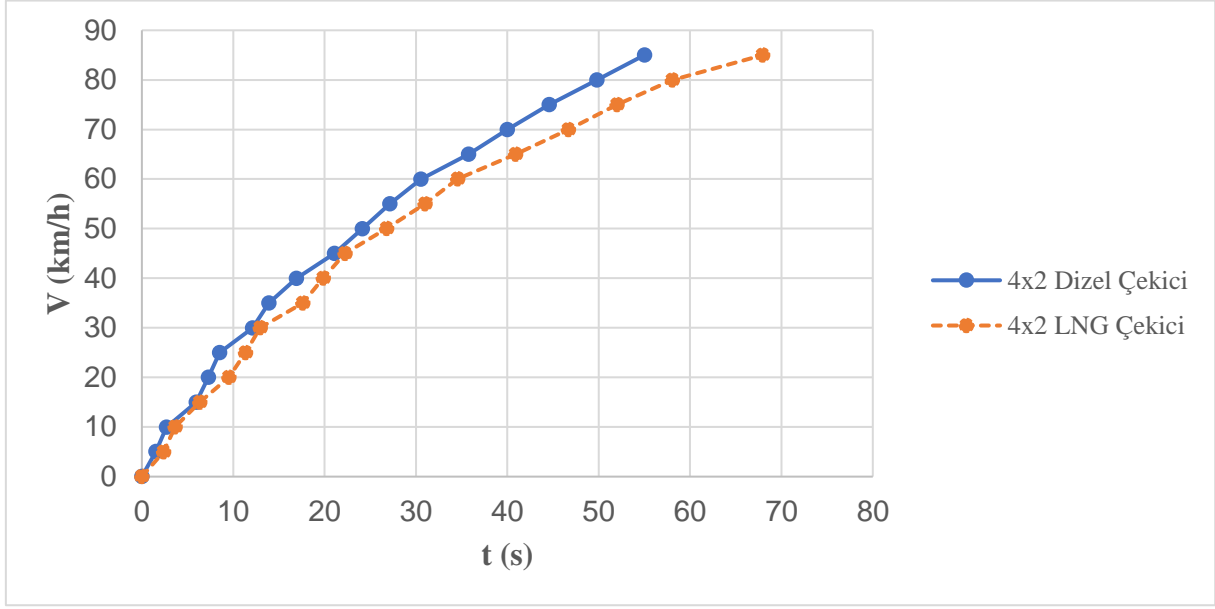
4×2 Dizel yakıtlı çekici			4×2 LNG yakıtlı çekici		
Zaman	Hız	Mesafe	Zaman	Hız	Mesafe
t	V	x	t	V	x
s	km/h	m	s	km/h	m
0,0	0	0,0	0,0	0	0,0
1,5	5	0,9	2,4	5	0,8
2,7	10	3,2	3,6	10	3,4
5,9	15	15,2	6,3	15	13,1
7,3	20	21,5	9,5	20	29,1
8,5	25	29,2	11,3	25	40,4
12,1	30	55,9	13,0	30	53,0
13,9	35	71,8	17,6	35	95,0
16,9	40	103,7	19,8	40	118,3
21,1	45	151,9	22,2	45	146,5
24,1	50	192,0	26,8	50	207,7
27,1	55	235,8	31,0	55	268,5
30,5	60	290,3	34,6	60	326,0
35,7	65	381,3	40,9	65	436,5
40,0	70	460,5	46,7	70	544,4
44,6	75	552,9	52,0	75	651,6
49,8	80	665,1	58,1	80	782,2
55,0	85	778,2	68,0	85	1005,5

Cao vd. (2013) tarafından, gerçek yol koşullarında LNG, dizel ve benzinli üç farklı otobüsün hızlanma performansı, yokuş performansı ve yakıt ekonomisi parametreleri karşılaştırılmıştır. Test sonuçları incelendiğinde, LNG aracın 0-60 km/h hızlanma performansının dizel ve benzinli araca göre daha iyi olduğu, yokuş performansının diğerlerinden daha düşük olduğu görülmektedir. Fakat test edilen üç otobüsün teknik özelliklerine bakıldığında, araçların boyut, ağırlık, motor gücü verilerinin tümünün birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Araçlar eşit özelliklere ve şartlara sahip olmadığı için, yakıt cinslerine göre performans parametrelerinin karşılaştırılması anlamlı bir sonuç vermemektedir.

Meng vd. (2013) çalışmalarında, LNG yakıtın motor performansındaki etkisini incelemek için aynı güçteki bir dizel motor ile dizel-LNG çift yakıtlı motoru laboratuvar şartlarında test etmiştir. Sonuçlar, modifiye edilen dizel-LNG çift yakıtlı motorun güç performansının düştüğünü ve tork-motor devri eğrisinde orijinal dizel motora göre daha düşük tork değerlerine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Motor performansı ve tork değerlerinin dizel motorla karşılaştırıldığında, LNG yakıtla birlikte araç hızlanma performansının olumsuz yönde etkileneceğini göstermektedir. Benzer bir çalışma Cheenkachorn vd. (2013) tarafından yapılmış, dizel motor ile modifikasyonu yapılmış LNG-dizel çift yakıtlı motor incelenmiştir. Motor performansı parametrelerini içeren tork, güç, özgül yakıt tüketimi, hacim verimliliği ve termal verimlilik karşılaştırılmıştır. Geleneksel dizel motora kıyasla, çift yakıtlı motor sistemi daha düşük spesifik yakıt tüketimi, termal verimlilik ve hacimsel verimlilik göstermiştir.

Test verileri doğrultusunda araçların hız - zaman grafikleri Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Grafikteki mavi çizgi dizel aracı, kırmızı çizgi LNG aracı temsil etmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi 0-85 km/h hızlanma performansı testinde, LNG araç hızlanma açısından dizel aracın aşağısında kalmakta ve 85 km/h hıza ulaşması dizel araca göre daha uzun bir süre almaktadır. LNG aracın hızlanma süresinin fazla olmasının nedenlerinden biri doğal gazlı motorlarda enjeksiyon ve ateşleme arasındaki gecikmelerden kaynaklı olduğu söylenebilir. Bu konuyla ilgili Nwafor (2000) bir dizel motor ile birincil yakıt olarak doğal gaz kullanılan çift yakıt sistemli bir motorun ateşleme gecikmelerini incelemiştir. Ateşleme gecikmesi, yakıt enjeksiyonunun başlaması ile yanmanın başlaması arasındaki zaman aralığı olarak tanımlanmıştır. Çalışmada doğal gazın özellikle düşük yük seviyelerinde daha uzun ateşleme

gecikmeleri ve daha yavaş yanma oranları sergilediği, dolayısıyla genleşme strokunda geç yanmaya neden olduğu belirtilmiştir. Bu yüzden gaz yakıtlı motorun güç çıkışının, dizel yakıtlı motorun test sonuçlarına kıyasla düşük olduğu söylenmektedir.

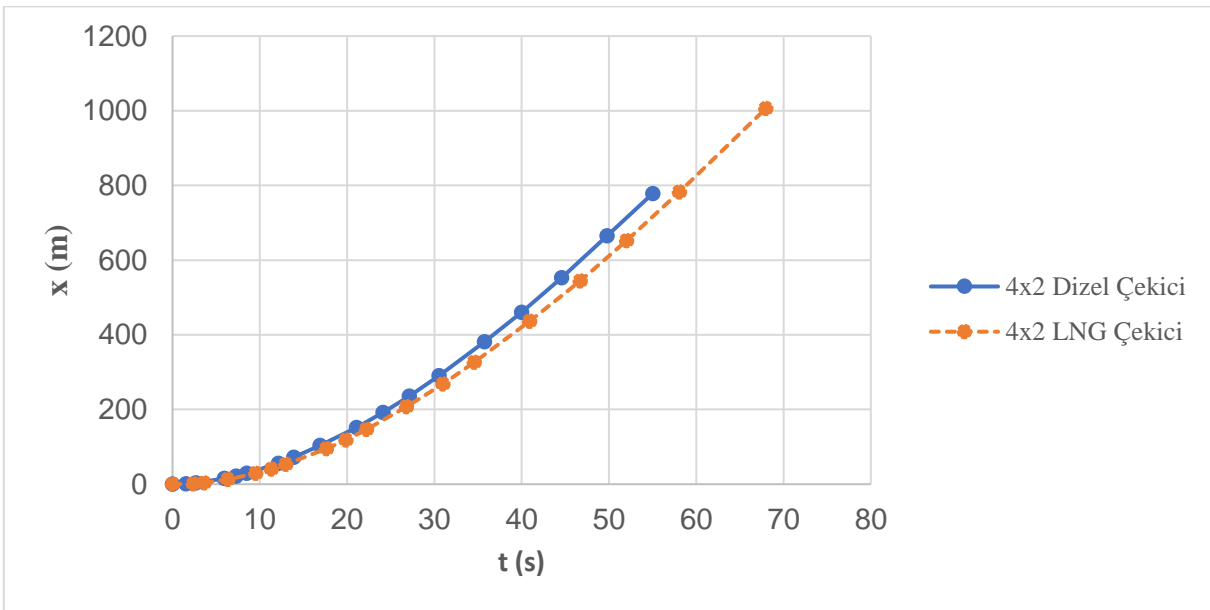


Şekil 4.3. Dizel ve LNG çekici araçların hızlanma performansı Hız - Zaman grafiği

Tang vd. (2016), LNG araçların hızlanma ve tırmanma performansını geliştirmek amacıyla, LNG motoru için giriş havası beslemesi yaklaşımını önermiş ve incelemiştir. Bu şekilde LNG motorun düşük hacimsel verimi artırılarak aracın tork ve hızlanma performansının artırılması hedeflenmiştir. Bu çalışma için emme havası besleme cihazı seti tasarlanmış ve 9,7 L'lik bir LNG motoruna bağlanmıştır. Çeşitli hızlarda sağlanan havanın optimal enjeksiyon basıncı belirlenerek, aracın hem laboratuvar ortamında statik halde hem de gerçek yol koşullarında testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, motor torkunun düşük hızda açıkça geliştirilebileceğini göstermiştir. 1000 dev/dak'da tork değerinin %31 oranda arttığı gözlenmiştir. Orjinal LNG araçla karşılaştırıldığında, giriş havası beslemesi yoluyla hızlanma süresi %14,7-30 oranında azalmıştır.

Şekil 4.4'te hızlanma performansı testine ait, araçların mesafe - zaman grafiği çıkartılmıştır. Grafiğe bakılarak dizel aracın 0 km/h hızdan 85 km/h hıza ulaşmasının daha kısa

mesafede olduğu görülmektedir. LNG araç performansını artırmak için yapılabilecek çalışmalardan biri de yakıt kalitesinin artırılmasıdır. Chen vd. (2017) doğal gazdaki metan içeriğinin LNG ağır ticari araç motorunun performansı üzerindeki etkilerini incelemek için bir çalışma yapmıştır. 9,7 L'lik doğal gazlı bir motorda farklı metan içeriğine sahip (%93 ve %99) iki tip LNG yakıt, çeşitli motor devirlerinde karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, %99 metan içeriğine sahip doğal gazın, %93 metan içeriğine sahip olandan daha iyi vuruş önleyici performansa ve daha iyi güç performansına sahip olduğunu göstermektedir.

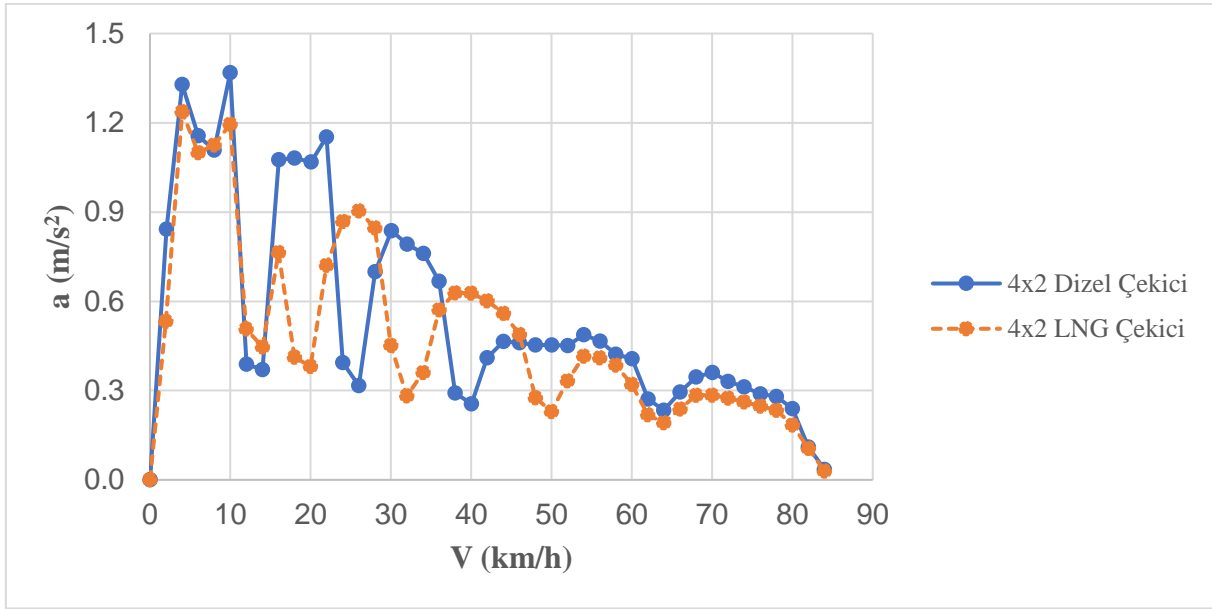


Şekil 4.4. Dizel ve LNG çekici araçların hızlanma performansı Mesafe-Zaman grafiği

Hızlanma performansı testi kapsamında araçların ivmelenmeleri incelenmiştir. Her iki aracın hız - ivme aralıklarının bulunduğu değerler Çizelge 4.5'te paylaşılmıştır. Çizelge 4.5'te verilen araçların ivme değerlerine göre oluşturulan ivme-hız grafiği Şekil 4.5'te bulunmaktadır. Grafikte de görüldüğü gibi, LNG aracın ivme değerleri dizel araca göre daha düşüktür.

Çizelge 4.5. Dizel ve LNG yakıtlı araçların ivme değerleri

4×2 Dizel yakıtlı çekici		4×2 LNG yakıtlı çekici	
Hız	İvme	Hız	İvme
km/h	m/s ²	km/h	m/s ²
0,0	0,0	0,0	0,0
2,0	0,8	2,0	0,5
4,0	1,3	4,0	1,2
6,0	1,2	6,0	1,1
8,0	1,1	8,0	1,1
10,0	1,4	10,0	1,2
12,0	0,4	12,0	0,5
14,0	0,4	14,0	0,4
16,0	1,1	16,0	0,8
18,0	1,1	18,0	0,4
20,0	1,1	20,0	0,4
22,0	1,2	22,0	0,7
24,0	0,4	24,0	0,9
26,0	0,3	26,0	0,9
28,0	0,7	28,0	0,8
30,0	0,8	30,0	0,5
32,0	0,8	32,0	0,3
34,0	0,8	34,0	0,4
36,0	0,7	36,0	0,6
38,0	0,3	38,0	0,6
40,0	0,3	40,0	0,6
42,0	0,4	42,0	0,6
44,0	0,5	44,0	0,6
46,0	0,5	46,0	0,5
48,0	0,5	48,0	0,3
50,0	0,5	50,0	0,2
52,0	0,5	52,0	0,3
54,0	0,5	54,0	0,4
56,0	0,5	56,0	0,4
58,0	0,4	58,0	0,4
60,0	0,4	60,0	0,3
62,0	0,3	62,0	0,2
64,0	0,2	64,0	0,2
66,0	0,3	66,0	0,2
68,0	0,3	68,0	0,3
70,0	0,4	70,0	0,3
72,0	0,3	72,0	0,3
74,0	0,3	74,0	0,3
76,0	0,3	76,0	0,3
78,0	0,3	78,0	0,2
80,0	0,2	80,0	0,2
82,0	0,1	82,0	0,1
84,0	0,0	84,0	0,0



Şekil 4.5. Dizel ve LNG çekici araçların hızlanma performansı İvme-Hız grafiği

4.3. Sabit Hızda Yakıt Tüketimi Test Sonuçları

Sabit hızda yakıt tüketimi testi, Bölüm 3.2.3'te belirtilen yol koşullarında, araçların farklı sabit hızlarda (60 km/h, 70 km/h, 80 km/h), 3 km'lik mesafede yakıt tüketiminin ölçülmesi ile test prosedürüne uygun şekilde tamamlanmıştır. Testin doğruluğunu artırmak için test prosedüründe yazıldığı gibi, test gidiş - geliş her iki yönde olmak üzere en az 3'er kez tekrarlanmıştır. Çizelge 4.6'da araçların sabit hızda yakıt tüketimi testi verileri yer almaktadır. Değerler, tekrarlanan test verilerinin ortalaması alınarak oluşturulmuştur.

Çizelge 4.6. Dizel ve LNG çekici araçların sabit hızda yakıt tüketimi test sonuçları

	4×2 Dizel yakıtlı çekici	4×2 LNG yakıtlı çekici
Sabit 60 km/h hız	21,0 L/100 km	19,0 kg/100 km
Sabit 70 km/h hız	23,4 L/100 km	20,7 kg/100 km
Sabit 80 km/h hız	25,8 L/100 km	22,5 kg/100 km

Çizelge 4.6'da LNG aracın yakıt tüketimi değerleri ile dizel aracın tüketim değerleri karşılaştırıldığında, test edilen hıza bağlı, nümerik olarak %9,5 ile %12,8 arasında bir fark

olduğu görülmektedir. Hız değeri arttıķa araçlar arasındaki yakıt tüketimi farkı artmakta, araç hızları azaldıkça yakıt tüketimleri arasındaki fark da azalmaktadır.

4.4. Gerçek Yol Koşulu Yakıt Tüketimi Test Sonuçları

Araçların ortalama yakıt tüketimi testleri, belirlenen yol koşullarında, Bölüm 3.2.4'te yer alan test direktiflerine uygun şekilde tamamlanmıştır. Test, gidiş dönüş olmak üzere çift yönlü yapılmıştır. Gidiş mesafesi 131,406 km, dönüş mesafesi 131,950 km, toplamda 263,356 km'dir. Test gzerghının yol durumu ve ortalama hız verileri aşağıdaki gibidir:

- **Otoyol** 164,296 km (82,326 km gidiş, 81,970 km dönüş)
Ortalama hız: 80 km/h
- **Kırsal yol** 44,350 km (22,350 km gidiş, 22,000 km dönüş)
Ortalama hız: 60 km/h
- **şehir içi yol** 54,710 km (26,730 km gidiş, 27,980 km dönüş)
Ortalama hız: 40 km/h

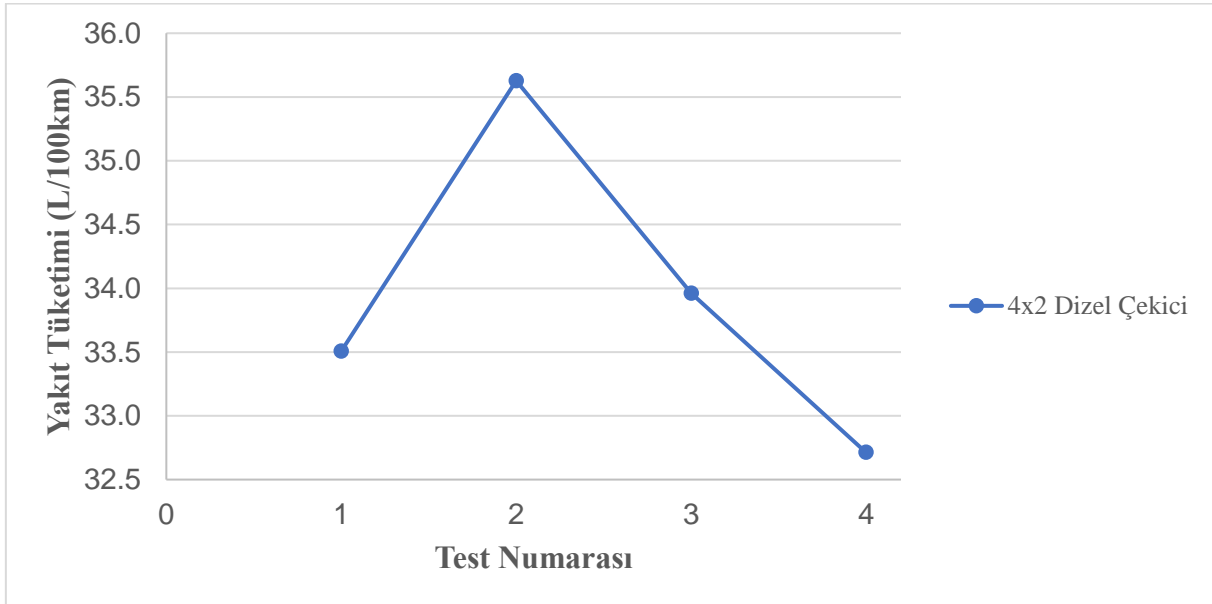
Dış etkenlerin ve sürücü kullanımının yakıt tüketimine etkisini minimize etmek için araçlarda dorse ve sürücü değişiklikleri yapılmıştır. Ayrıca her iki araç için de aynı koşulları sağlamak adına, araçlar yaklaşık 1 dakika arayla teste başlamış ve test boyunca birbiriyle koordineli hareket etmişlerdir. Yakıt tüketimi değerleri, tekrarlanan test verilerinin ortalaması alınarak oluşturulmuştur. Çizelge 4.7'de dizel çekici ve LNG çekici araçlarının, yapılan testler sonucunda ortalama yakıt tüketimi değerleri verilmiştir.

Ortalama yakıt tüketimi değerlerinin test bazında değişimi dizel araç için şekil 4.6'da, LNG araç için şekil 4.7'de gösterilmiştir. Grafiklerde testler sırasında değişen hava şartları ve evre koşullarına bağlı yakıt tüketimi verilerindeki değişimlerin birbirine benzer olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.7. Dizel ve LNG çekici araçların ortalama yakıt tüketimi değerleri

Ortalama yakıt tüketimi, L/100 km					
	Test-1	Test-2	Test-3	Test-4	Ortalama
4×2 Dizel yakıtlı çekici W=41000 kg	33,5	35,6	34,0	32,7	34,0
Ortalama yakıt tüketimi, kg/100 km					
	Test-1	Test-2	Test-3	Test-4	Ortalama
4×2 LNG yakıtlı çekici W=41000 kg	29,8	31,5	31,0	30,3	30,7

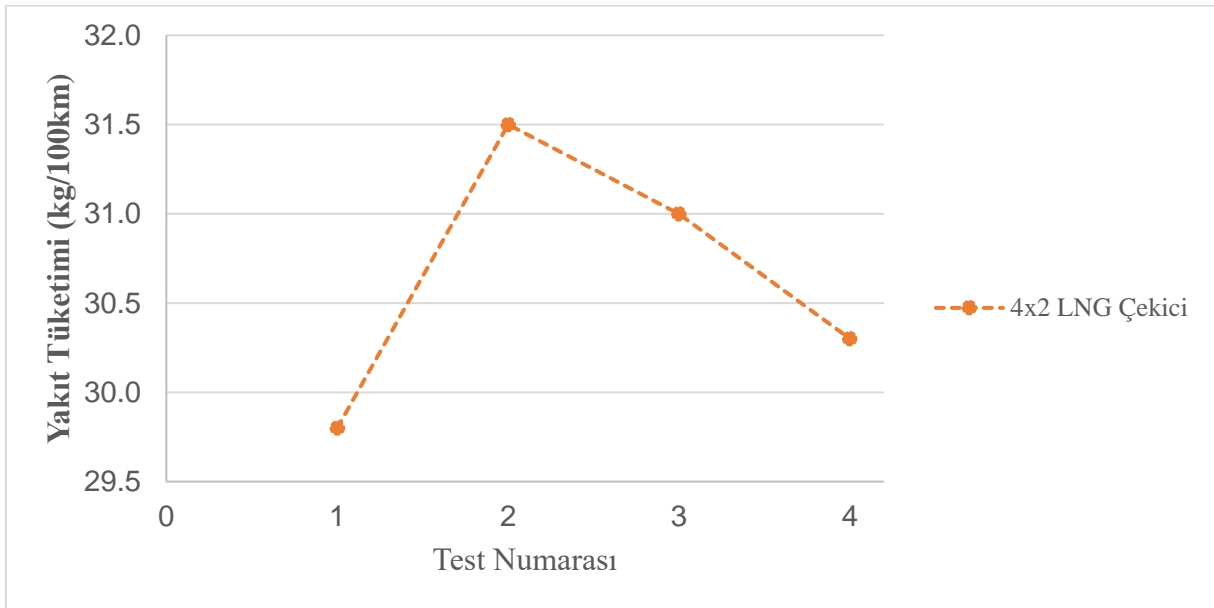
Çizelge 4.7’de gerçek yol koşullarında yapılan testler sonucunda araçların ortalama yakıt tüketimi değerleri dizel araç için 34,0 L/100km, LNG araç için 30,7 kg/100km olduğu görülmektedir. Test verilerine göre LNG aracın ortalama yakıt tüketimi değeri ile dizel aracın ortalama yakıt tüketimi arasında nümerik olarak %9,7’lik bir fark olduğu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.6 - Dizel aracın testlere göre yakıt tüketimi değerleri

LNG yakıt fiyatının dizel yakıt fiyatına göre daha uygun olduğu literatürdeki çalışmalarda belirtilmiştir. Çizelge 2.3’te ABD’deki 2020 yılı verilerine göre LNG yakıtın dizele göre maliyetinin yaklaşık %10 oranında uygun olduğu görülmektedir (U.S. Department

of Energy, 2020c). Ayrıca Çizelge 2.4'te 2018 yılına ait bazı Avrupa ülkelerinin LNG ve dizel yakıt fiyatlarına bakıldığında, LNG yakıtın %40-50 civarında düşük fiyatlı olduğu görülmektedir (European Commission, 2018). Türkiye'de EPDK'nın paylaştığı güncel dizel ve LNG yakıt fiyatları baz alınarak (Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, 2020), LNG ve dizel çekici araçların 100 kilometredeki yakıt maliyetleri Çizelge 4.8'de karşılaştırılmıştır. Dizel aracın 100km'deki yakıt maliyeti 217,6 TL, LNG aracın 159,0 TL olduğu görülmektedir. Değerlere bakılarak, LNG aracın dizel araca göre %27 oranında yakıt tasarrufu sağladığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.7 - LNG aracın testlere göre yakıt tüketimi değerleri

Çizelge 4.8. Dizel ve LNG araçların yakıt maliyetlerinin karşılaştırılması

	Ortalama yakıt tüketimi	Vegiler dâhil birim fiyat	Yakıt maliyeti
4×2 Dizel yakıtlı çekici	34,0 L/100 km	6,40 TL/L	217,6 TL/100 km
4×2 LNG yakıtlı çekici	30,7 kg/100 km	5,18 TL/kg	159,0 TL/100 km

Yakıt tüketimi ile ilgili Song vd. (2017) çalışmalarında, farklı kullanım şartlarındaki LNG ve dizel yakıtlı ağır ticari araçların gerçek zamanlı yakıt tüketim verilerini incelemiştir.

İncelenen araçlar tonaj farklarına ve araç tiplerine göre sınıflandırılmış, LNG ve dizel araçların yakıt tüketimi verileri karşılaştırılmıştır. Çalışmamızda test edilen araçlarla doğru karşılaştırmayı yapabilmek için, toplam ağırlığı 31-60 ton aralığındaki dizel ve LNG çekici araçların yakıt tüketim verileri alınmıştır. Song vd.nin (2017) çalışmasında, toplam ağırlığı 31-60 ton aralığındaki dizel çekici araçların ortalama yakıt tüketimi 47,7 L/100km, LNG çekici araçların ortalama yakıt tüketimi 90,3 L/100km (40,0 kg/100km) olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmadaki verilere göre LNG araçların yakıt tüketim değerleri (kg/100km) ile dizel araçların yakıt tüketim değerleri (L/100km) arasında nümerik olarak %16 oranında bir fark olduğu elde edilmiştir.

Iveco (2017) test raporunda, 400 HP gücünde, Cursor 9 motora sahip bir LNG çekici kamyon ile 460 HP gücünde, Cursor 10 motora sahip bir dizel çekici kamyonun gerçek yol koşullarında yakıt tüketimi karşılaştırılması yapılmıştır. Sürüşler sırasında LNG aracın ortalama ağırlığı 18,9 ton, dizel aracın ortalama ağırlığı 17,9 ton olarak belirtilmiştir. Bu şartlarda yapılan ölçüm sonuçlarına göre LNG aracın ortalama yakıt tüketiminin 23,6 kg/100km, dizel aracın ortalama yakıt tüketiminin 27,7 L/100km olduğu belirlenmiştir. LNG ve dizel araçların yakıt tüketimleri arasında nümerik olarak %15'lik fark olduğu sonucuna varılmıştır, fakat araçlar aynı motor gücünde ve aynı ağırlıkta olmadığı için bu oranın araç özellikleriyle birlikte değişebileceği düşünülmektedir.

Smajla vd. (2019) LNG yakıtın ağır ticari kamyonlarda kullanımını incelemiş ve literatürdeki çalışmalardan yararlanıp bir derleme makalesi yayımlamıştır. Ağır ticari araçlarda uzunyol ve şehirler arası kullanımda mevcut dizel yakıtı alternatif olarak gösterilen LNG yakıt ile dizel yakıt karşılaştırılmıştır. LNG yakıtın dizele göre yakıt ekonomisinde yaklaşık %30 iyileşme sağladığı belirtilmiştir. Yan vd. (2016) araştırma konusu olarak benzinli bir şehir içi otobüs ile LNG modifikasyonu gerçekleştirilmiş aracın yakıt tüketimi ve yakıt ekonomisi parametrelerini ele almışlardır. Çalışma sonuçları yakıt olarak LNG uygulama maliyetinin, benzin uygulama maliyetinden yaklaşık %40 düşük olduğunu göstermektedir.

2000'li yılların başında ABD Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı öncülüğünde, farklı kullanım tiplerindeki kamyon ve otobüs gibi ağır ticari araçlarda LNG kullanımı ile ilgili

birçok detaylı çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların ortak özelliği, ağır ticari araçlarda dizel yakıtın yerine alternatif olabilecek LNG yakıtın performans, emisyon, yakıt tüketimi ve yakıt ekonomisi değerlerinin dizel yakıt ile karşılaştırılmış olmasıdır. Çalışmaların yakıt ekonomisi ile ilgili sonuçları incelendiğinde, araçlarda LNG yakıt kullanımının dizel yakıt kullanımına göre yaklaşık %30 oranında tasarruf sağladığı belirtilmiştir (Chandler vd., 2000a; Chandler vd., 2000b; Chandler vd., 2001; Chandler ve Proc, 2004; Motta vd., 1996; National Renewable Energy Laboratory, 1999).

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, taşımacılık ve ulaşım sektöründe kullanılan ağır ticari araçlarda dizel yakıtı alternatif olabilecek sıvılaştırılmış doğal gazın (LNG) yakıt olarak kullanımı araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, dizel yakıtla çalışan bir çekici kamyon ile aynı teknik özelliklere sahip LNG yakıtla çalışan bir çekici kamyonun hızlanma performansı ve yakıt tüketimi parametreleri gerçek yol koşullarında test edilerek deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Dizel ve LNG araçlarda yapılan çalışmaların bulgularına göre aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Coast-down test sonuçlarına göre yapılan analizde, dizel aracın RRC ve C_w değerleri sırasıyla 0,00488 ve 0,542; LNG aracın RRC ve C_w değerleri sırasıyla 0,00485 ve 0,563 olarak hesaplanmıştır. Her iki araçta da aynı enerji verimliliği sınıfına sahip lastikler kullanıldığı için RRC değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Aradaki farkın lastiklerin kullanım ömründen kaynaklı olduğu sonucuna varılmıştır. C_w değerlerine göre dizel aracın, LNG araca göre daha iyi bir aerodinamik yapıya sahip olduğu ortaya çıkmaktadır. LNG araçta yakıt tankının tasarım kısıtlamasından dolayı yan etek kullanılamaması aracın aerodinamik yapısını olumsuz yönde etkilemiştir. Fakat bu minimal farklar, araçların performans ve yakıt tüketimi değerlerini minimum seviyede etkileyeceği için ihmal edilebilir düzeydedir.
- Araçların hızlanma performansı değerlendirmesi için, 0 km/h hızdan 85 km/h hıza ulaşma süreleri ve bu sürede katedilen mesafeler karşılaştırılmıştır. Dizel aracın 0-85 km/h hızlanma süresinin 55,0 saniye, LNG aracın 68,0 saniye olduğu görülmüştür. LNG aracın hızlanma süresinin dizel araca göre %24 daha uzun sürdüğü sonucuna varılmıştır. Hızlanma süresi ile benzer şekilde, 85 km/h hıza ulaşmak için katedilen mesafeler dizel araç için 778,2 metre, LNG araç için 1005,5 metredir. Bu değerlere göre, LNG aracın hedef hıza ulaşması için gerekli olan mesafenin dizel araca göre %29 daha fazla olduğu sonucu çıkarılmaktadır.

- Hızlanma performansı testinde araçların ivmelenme verileri incelendiğinde, LNG aracın ivme değerlerinin dizel araca göre daha düşük olduğu görülmüştür. İvme-hız grafiğinde, LNG araç eğrisinin, dizel araç eğrisinin çoğunlukla altında kaldığı ve dizel araç eğrisini geriden takip ettiği görülmektedir.
- Araçların hıza bağlı yakıt tüketimi verilerini inceleyebilmek için 60 km/h, 70 km/h ve 80 km/h sabit hızlarda yakıt tüketimi testleri yapılmıştır. Test sonuçlarına göre, araçların yakıt tüketimi değerleri arasında hıza bağlı, nümerik olarak %9,5 ile %12,8 arasında bir fark olduğu görülmüştür. Araçların yakıt tüketimi değerleri arasındaki bu nümerik farkın, hızla doğru orantılı olacak şekilde değiştiği sonucuna varılmıştır.
- Dizel ve LNG çekici kamyonların gerçek yol ve sürüş koşullarındaki ortalama yakıt tüketimi değerlerini belirlemek amacıyla; otoyol, kırsal yol ve şehir içi yol profillerini içeren 263,356 km'lik bir güzergahta, araçların yakıt tüketimi testleri yapılmıştır. Dizel çekici kamyonun ortalama yakıt tüketiminin 34,0 L/100km, LNG çekici kamyonun ortalama yakıt tüketiminin 30,7 kg/100km olduğu hesaplanmıştır. Bu verilere göre, LNG ve dizel çekici kamyon araçlarının ortalama yakıt tüketimi değerleri arasında, sabit hızda yakıt tüketimi test sonuçlarındaki farka benzer şekilde, nümerik olarak %9,7'lik bir fark olduğu ortaya konulmuştur.
- Araçların ortalama yakıt tüketimi değerleri baz alınarak 100 kilometredeki yakıt maliyetleri incelendiğinde; dizel aracın yakıt maliyetinin 217,6 TL/100km, LNG aracın yakıt maliyetinin 159,0 TL/100km olduğu hesaplanmıştır. Bu değerlere göre, LNG aracın dizel araca kıyasla %27 oranında yakıt tasarrufu sağladığı sonucuna varılmıştır. Diğer yandan, LNG araçların satın alma maliyetinin dizel araçlara göre daha yüksek olduğu ve LNG araçların bakım maliyetlerinin, yedek parça ve bekleme süresinin fazla olması nedeniyle, yaklaşık %10 fazla olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. LNG araçların uzun süreli kullanımda sağlayacağı yakıt tasarrufunun, yüksek satın alma ve bakım maliyetlerinin önüne geçerek avantaj sağlayacağı düşünülmektedir.

Dizel ve LNG yakıtla çalışan, aynı standartlardaki çekici kamyonlar ile yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, LNG yakıtlı aracın, performans ve ivmelenme parametrelerinin dizel araca göre düşük olduğu, yakıt tüketimi ve yakıt maliyeti değerlerinin dizel araçtan daha iyi olduğu ortaya konulmuştur. LNG araçların performans parametrelerinin iyileştirilmesi için aşağıda belirtilen hususların uygulanması ve ileriki çalışmalarda araçların benzer şartlarda incelenmesi önerilmektedir.

- LNG aracın 85 km/h hedef hıza daha hızlı bir şekilde ulaşması ve aynı zamanda daha iyi bir ivmelenme performansı için, son dişli oranı ya da diferansiyel oranı (final drive ratio - FDR) olarak adlandırılan, motor hızının ve çekiş gücünün tekerleklere gönderilmeden önce değiştirildiği dişli oranının artırılması çözüm olarak sunulabilir. Diferansiyel oranı artışı ile beraber şanzıman çıkışından tekerleklere iletilen tork değeri artmakta, bununla birlikte daha iyi hızlanma değerlerine ulaşılmaktadır. Ancak bu oranın artmasıyla birlikte, ulaşılan son sürat hızının düşük kalması ve yakıt tüketimi değerlerinin artması beklenmektedir.
- Aracın hızlanma performansını daha iyi seviyeye getirmek için şanzıman vites oranlarında düzenleme yapılabilir. Vites geçişleri aracın hızlanma durumuna ve sürüş karakteristiğine göre doğru zamanda yapıldığında, aracın hızlanma süresi belirgin şekilde azalacaktır. Bu durum yapılan hızlanma performansı testi verileri incelenerek, şanzıman yazılım güncellemesi ile çözümlenebilir.
- LNG yakıt içeriğindeki metan oranının artırılması ile aracın daha iyi güç performansı sağlayacağı düşünülmektedir. Yakıt kalitesi ve yanıcılığının artırılması ile hem araç performansı hem de yakıt tüketimi parametrelerinde iyileşme olması beklenmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Arteconi, A., Brandoni, C., Evangelista, D., Polonara, F., 2010, Life-cycle greenhouse gas analysis of LNG as a heavy vehicle fuel in Europe, *Applied Energy*, 87,6, 2005-2013.
- Arteconi, A., Polonara, F., 2013, LNG as vehicle fuel and the problem of supply: The Italian case study, *Energy Policy*, 62, 503-512.
- Atabani, A. E., Badruddin, I. A., Mekhilef, S., Silitonga, A. S., 2011, A review on global fuel economy standards, labels and technologies in the transportation sector, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15,9, 4586-4610.
- Aytaş, E. N., 2012, Doğalgazın İçten Yanmalı Motorlarda Kullanımı.
- Bassi, A., 2011, Liquefied natural gas (LNG) as fuel for road heavy duty vehicles technologies and standardization, SAE International.
- Boretti, A., 2020, Advances in Diesel-LNG Internal Combustion Engines, *Applied Sciences*, 10,4, p.1296.
- Cao, Z., Li, Y., Sun, F., Feng, L., Gong, H, 2013, The running comparative analysis of the LNG bus and the fuel oil automobile in Plateau region, *Applied Mechanics and Materials*, 253-255, 2168-2171.
- Chandler, K., Norton, P., Clark, N., 2000a, Alternative fuel transit buses: DART's LNG bus fleet - Final results, National Renewable Energy Laboratory, <https://www.nrel.gov/docs/fy01osti/28739.pdf>, erişim tarihi: 12.12.2020.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Chandler, K., Norton, P., Clark, N., 2000b, Raley's LNG truck fleet: Final results, National Renewable Energy Laboratory, <https://www.nrel.gov/docs/fy00osti/27678.pdf>, erişim tarihi: 12.12.2020.
- Chandler, K., Norton, P., Clark, N., 2001, Waste management's LNG truck fleet: Final results, National Renewable Energy Laboratory, <https://www.nrel.gov/docs/fy01osti/29073.pdf>, erişim tarihi: 12.12.2020.
- Chandler, K., Proc, K., 2004, Norcal prototype LNG truck fleet: Final results, National Renewable Energy Laboratory, <https://afdc.energy.gov/files/pdfs/35427.pdf>, erişim tarihi: 12.12.2020.
- Cheenkachorn, K., Poompipatpong, C., Ho, C. G., 2013, Performance and emissions of a heavy-duty diesel engine fuelled with diesel and LNG (liquid natural gas), *Energy*, 53, 52-57.
- Chen, Q. S., Wegrzyn, J., Prasad, V., 2004, Analysis of temperature and pressure changes in liquefied natural gas (LNG) cryogenic tanks, *Cryogenics*, 44,10, 701-709.
- Chen, Z., Zhang, F., Xu, B., Zhang, Q., Liu, J., 2017, Influence of methane content on a LNG heavy-duty engine with high compression ratio, *Energy*, 128, 329-336.
- Çengel, Y.A., Boles, M.A., 2007, *Thermodynamics: An Engineering Approach* 5th Edition, p.494-502.
- De Simio, L., Gambino, M., Iannaccone, S., 2013, Possible transport energy sources for the future, *Transport Policy*, 27, 1-10.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Durbin, D. J., Malardier-Jugroot, C., 2013, Review of hydrogen storage techniques for on board vehicle applications, International Journal of Hydrogen Energy, 38,34, 14595-14617.

Enerdata, 2014, Effect of price reforms on the demand of LNG in transport in China, Enerdata, <https://www.enerdata.net/publications/executive-briefing/china-lng-price-reforms-effets.html>, erişim tarihi: 16.12.2020.

Engerer, H., Horn, M., 2010, Natural gas vehicles: An option for Europe, Energy Policy, 38,2, 1017-1029.

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, 2020, LNG fiyat ilanı, <https://www.epdk.org.tr/Detay/Icerik/3-0-0-1167/lngcng-fiyat-raporlari>, erişim tarihi: 10.01.2020.

European Alternative Fuels Observatory, 2020, Vehicles and fleet | EAFO, <https://www.eafo.eu/vehicles-and-fleet/n2-n3>, erişim tarihi: 19.12.2020.

European Commission, 2011, Roadmap to single European transport area - Towards a competitive and resource efficient transport system, p.30.

European Commission, 2013, Clean power for transport: A European alternative fuels strategy, p.5,9.

European Commission, 2016, Communication from the commission to the European Parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of regions on an EU strategy for liquefied natural gas and gas storage, p. 2-6.

European Commission, 2018, LNG blue corridors market development, p. 37-38.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

European Environment Agency, 2017, Greenhouse gas emissions from transport in Europe, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-greenhouse-gases/transport-emissions-of-greenhouse-gases-12>, erişim tarihi: 19.12.2020.

European Union, 2014, Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council of 22 October 2014 on the deployment of alternative fuels infrastructure, p. 307/6-307/9.

Gross, M., 2016, A planet with two billion cars, *Current Biology*, R307-R310.

Gümüş, M., 1998, İçten yanmalı motorlarda doğalgazın alternatif yakıt olarak kullanılması, Yüksek lisans tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 94 s.

Hao, H., Liu, Z., Zhao, F., Li, W., 2016, Natural gas as vehicle fuel in China: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 521-533.

He, F., Li, Y., Wu, H., Li, H., 2013, A performance study of coke oven gas vehicle, *Advanced Materials Research*, 724, 1201-1205.

He, S., Chang, H., Zhang, X., Shu, S., Duan, C., 2015, Working Fluid Selection for an Organic Rankine Cycle Utilizing High and Low Temperature Energy of an LNG Engine, *Applied Thermal Energy*, 90, 579-589.

İGDAŞ, 2018, Doğalgazın Araçlarda Kullanımı, http://cdn.igdas.com.tr/Web/Content/DogalgazinAraclardaKullanimi_OTO_DO GALGA Z_CNG.pdf, erişim tarihi: 03.12.2020.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Iveco, 2017, Test report of Iveco LNG-powered HD-truck, https://www.cryogas.pl/pliki_do_pobrania/artykuly/20171110_Raport_LNG_Unilever_Link_Iveco_.pdf, erişim tarihi: 19.12.2020.
- Jaffe, A. M., Dominguez-Faus, R., Lee, A., Medlock, K., Parker, N. vd., 2015, Exploring the role of natural gas in US trucking (Revised Version), No: UCD-ITS-RR-15-05, p. 51.
- Kumar, S., Kwon, H. T., Choi, K. H., Lim, W., Cho, J.H. vd., 2011, LNG: An eco-friendly cryogenic fuel for sustainable development, *Applied Energy*, 88,12, 4264-4273.
- Lale, Z., 2016, The reality of sustainable energy for sustainable development in Turkey, *Econworld* 2016, https://barcelona2016.econworld.org/papers/Lale_TheReality.pdf, erişim tarihi: 19.12.2020.
- Ligterink, N. E., Mensch, P., Cuelenaere, R. F. A., Hausberger, S., Leitner, D. vd., 2014, Correction algorithms for WLTP chassis dynamometer and coast-down testing, *TNO Report*, p. 42-44.
- Liu, X., Huang, Z., 2012, Study on Logistics Distribution of Retailing Industry Based on Low-Carbon Economy, *ICLEM 2012: Logistics for Sustained Economic Development - Technology and Management for Efficiency*, p.800-805.
- Maagoe, V., 2016, Review study on the regulation (EC) No: 1222/2009 on the labelling of tyres, p. 17.
- Meng, C., Si, J., Liang, G., Niu, J., 2013, The technical modification and performance analysis of diesel/LNG dual fuel engines, *Advanced Materials Research*, 724-725, 1383-1388.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Moriarty, P., Honnery, D., 2016, Global transport energy consumption, *Alternative Energy and Shale Gas Encyclopedia*, 651-656.

Motta, R., Norton, P., Kelly, K., Chandler, K., Schumacher, L. vd., 1996, Alternative fuel transit buses: Final results from the National Renewable Energy Laboratory vehicle evaluation program, *National Renewable Energy Laboratory*, <https://afdc.energy.gov/files/pdfs/transbus.pdf>, erişim tarihi: 20.12.2020.

National Renewable Energy Laboratory, 1999, Using LNG as a fuel in heavy-duty tractors, <http://www.nrel.gov/docs/fy99osti/24146.pdf>, erişim tarihi: 20.12.2020.

NGV Global, 2020, Natural gas, <http://www.iangv.org/natural-gas-vehicles/natural-gas/>, erişim tarihi: 20.12.2020.

NGV Global, 2019, Current natural gas vehicle statistics, <http://www.iangv.org/current-ngv-stats/>, erişim tarihi: 20.12.2020.

Nwafor, O. M. I., 2000, Effect of advanced injection timing on the performance of natural gas in diesel engines, *Sadhana*, 25,1, 11-20.

Osorio-Tejada, J. L., Llera-Sastresa, E., Scarpellini, S., 2017, A multi-criteria sustainability assessment for biodiesel and liquefied natural gas as alternative fuels in transport systems, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 42, 169-186.

Osorio-Tejada, J., Llera, E., Scarpellini, S., 2015, LNG: an alternative fuel for road freight transport in Europe, *WIT Transactions on The Built Environment*, 168, 235-246.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Pfoser, S., Schauer, O., Costa, Y., 2018, Acceptance of LNG as an alternative fuel: Determinants and policy implications, *Energy Policy*, 120, 259-267.
- Rodríguez, F., Delgado, O., Muncrief, R., 2018, Fuel consumption testing of tractortrailers in the European Union and the United States, *The International Council on Clean Transportation*, 1-13.
- Smajla, I., Sedlar, D. K., Drljača, B., Jukić, L., 2019, Fuel switch to LNG in heavy truck traffic, *Energies*, 12,3, 515.
- Song, H., Ou, X., Yuan, J., Yu, M., Wang, C., 2017, Energy consumption and greenhouse gas emissions of diesel/LNG heavy-duty vehicle fleets in China based on a bottom-up model analysis, *Energy*, 140, 966-978.
- Tabak, J., 2009, *Natural gas and hydrogen*, Infobase Publishing, p.35-38.
- Tang, Q., Fu, J., Liu, J., Zhou, F., Yuan, Z. vd., 2016, Performance improvement of liquefied natural gas (LNG) engine through intake air supply, *Applied Thermal Engineering*, 103, 1351-1361.
- Thiruvengadam, A., Carder, D. K., Krishnamurthy, M., Gautam, M., 2010, Comparison of regulated and unregulated exhaust emissions from a fleet of multi-fuel solid resource collection vehicles, *Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference*, 1-9.
- U.S. Department of Energy, 2000, *OHVT technology roadmap*, No: DOE/OSTI-11690/R2, Oak Ridge National Laboratory, p. 9.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

U.S. Department of Energy, 2020a, Alternative fuels data center: How do diesel vehicles work?, <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-diesel-cars-work>, erişim tarihi: 20.12.2020.

U.S. Department of Energy, 2020b, Alternative fuels data center: How do liquefied natural gas trucks work?, <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-lng-cars-work>.

U.S. Department of Energy, 2020c, Clean cities alternative fuel price report, January 2020, p. 9, https://afdc.energy.gov/files/u/publication/alternative_fuel_price_report_jan_2020.pdf.

U.S. Energy Information Administration, 2016, International energy outlook 2016, p. 127,128.

United Nations, 2017, World population prospects, p.1, https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2017_DataBooklet.pdf, erişim tarihi: 20.12.2020.

Wordometers, 2020, World population clock, <https://www.worldometers.info/world-population/#table-historical>, erişim tarihi: 20.12.2020.

World Energy Council, 2011, Global transport scenarios 2050, World Enerhy Council, p. 7-11.

Yan, F., Xu, B., Liu, N., Zheng, Z., 2016, Study on the construction of an urban liquefied natural gas bus and its cold energy recovery, Energy Procedia, 104, 515-519.

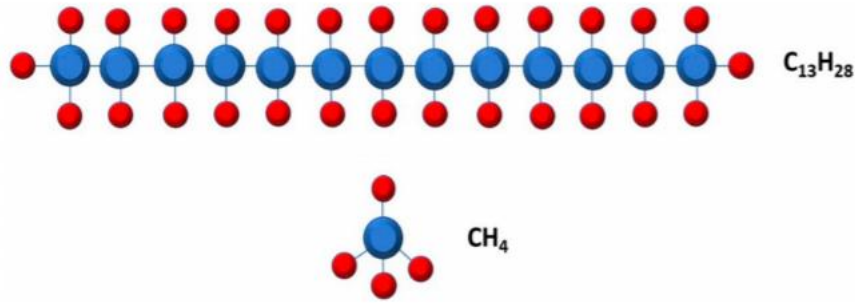
Yeh, S., 2007, An empirical analysis on the adoption of alternative fuel vehicles: The case of natural gas vehicles, Energy Policy, 35,11, 5865-5875.

Zhang, S., Wu, Y., Liu, H., Huang, R., Yang, L. vd., 2014, Real-world fuel consumption and CO2 emissions of urban public buses in Beijing, Applied Energy, 113, 1645-1655.

EK AÇIKLAMALAR

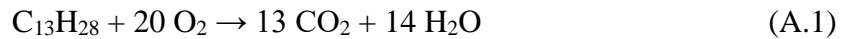
Ek Açıklamalar-A: Dizel ve LNG Yakıtın Kimyasal Yapısı ve Yanma Denklemi

Geleneksel bir dizel ($C_{13}H_{28}$) ve geleneksel bir LNG (CH_4) molekülünün kimyasal bağ yapısı Şekil A.1’de gösterilmiştir.



Şekil A.1 - Dizel ve LNG yakıtın molekül yapısı (Boretti, 2020)

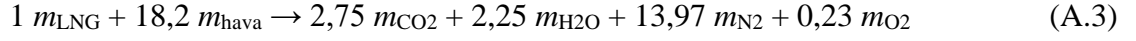
Dizel yakıtın yanma kimyasal reaksiyonu Denklem (A.1)’de verilmiştir:



Denklem (A.1)’e bakıldığında, $C_{13}H_{28}$ dizel yakıtın moleküler kütlesi 184, CO_2 ’in moleküler kütlesi 44’tür. Buradan yola çıkarak her 1 kg dizel yakıt ($C_{13}H_{28}$) başına düşen karbondioksit (CO_2) miktarı 3,11 kg’dır. Dizel yoğunluğunun 0,84 kg/L olduğu kabul edildiğinde, tüketilen her litre dizel için $3,11 \times 0,84 = 2,61$ kg CO_2 olduğu tahmin edilmektedir (Liu ve Huang, 2012). LNG yakıtın yanma kimyasal reaksiyonu Denklem (A.2)’de verilmiştir:



Yeterli miktarda LNG yakıt yanması gerçekleştiğinde, aşağıdaki denklem şu şekilde tasvir edilir:



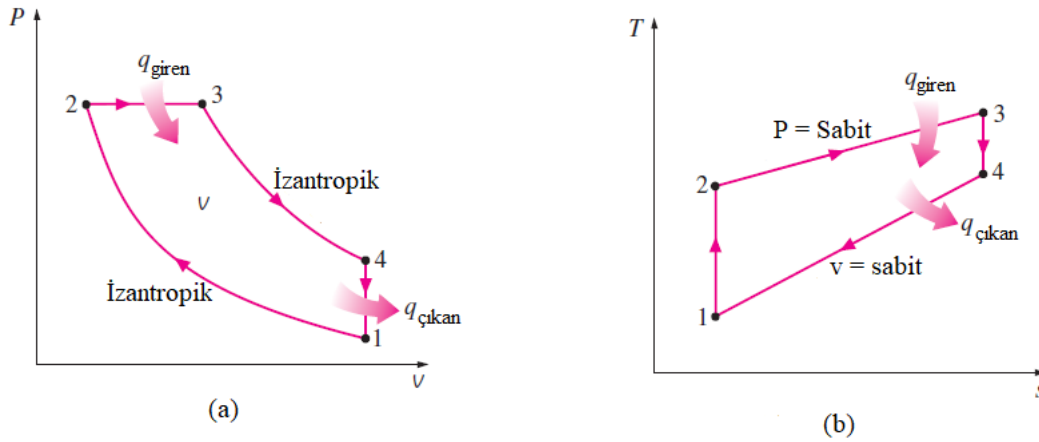
Burada, 1 birim LNG kütlesinin 18,2 birim hava kütlesi gerektirdiği ve egzoz emisyonununun 2,75 birim karbondioksit kütlesi, 2,25 birim su buharı kütlesi, 13,97 birim azot kütlesi ve 0,23 birim kalan oksijen kütlesinden oluştuğu anlamına gelmektedir (He vd., 2015).

Ek Açıklamalar-B: Dizel ve LNG Araç Motorlarının Çalışma Sistemi

Ek Açıklamalar-B.1: İdeal Dizel çevrimi

Dizel çevrimi sıkıştırma ateşlemeli motorlar için ideal çevrimdir. Sıkıştırma ateşlemeli motorlarda hava, yakıtın tutuşma sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklığa sıkıştırılır ve püskürtülen yakıtın sıcak havayla teması sonucu yanma başlar.

Dizel motorlarda yakıt enjeksiyon işlemi, piston üst ölü noktaya (ÜON) yaklaştığında başlar ve güç strokunun ilk bölümünde devam eder. Bu nedenle, bu motorlarda yanma süreci daha uzun bir aralıkta gerçekleşir. Bu daha uzun süre nedeniyle, ideal Dizel çevrimindeki yanma süreci, sabit basınçlı bir ısı ekleme işlemi olarak tahmin edilmektedir. Dizel çevrimine ait P-v ve T-s diyagramları Şekil B.1a ve Şekil B.1b'de verilmiştir. 1-2 noktaları arasındaki hal değişimi izantropik sıkıştırmayı, 3-4 noktaları arasındaki hal değişimi izantropik genişlemeyi, 4-1 noktaları arasındaki hal değişimi sistemden çevreye sabit hacimde ısı geçişini ifade etmektedir (Çengel ve Boles, 2007).



Şekil B.1 - Dizel çevrimi diyagramları (a) P-v diyagramı (b) T-s diyagramı (Çengel ve Boles, 2007)

Dizel çevrimi bir piston-silindir düzeneği içinde gerçekleşir ve kapalı bir sistem olarak incelenebilir. Bu nedenle hal değişimleri tek tek ele alınırken kapalı sistem için geçerli olan

denklemler kullanılmalıdır. Sisteme sabit basınçta verilen ısı ve sistemden sabit hacimde atılan ısı Denklem (B.1) ve Denklem (B.2)'deki gibi yazılabilir.

$$q_{\text{giren}} = P_2 (v_3 - v_2) + (u_3 - u_2) = c_p (T_3 - T_2) \quad (\text{B.1})$$

$$q_{\text{çıkan}} = u_1 - u_4 = c_v (T_4 - T_1) \quad (\text{B.2})$$

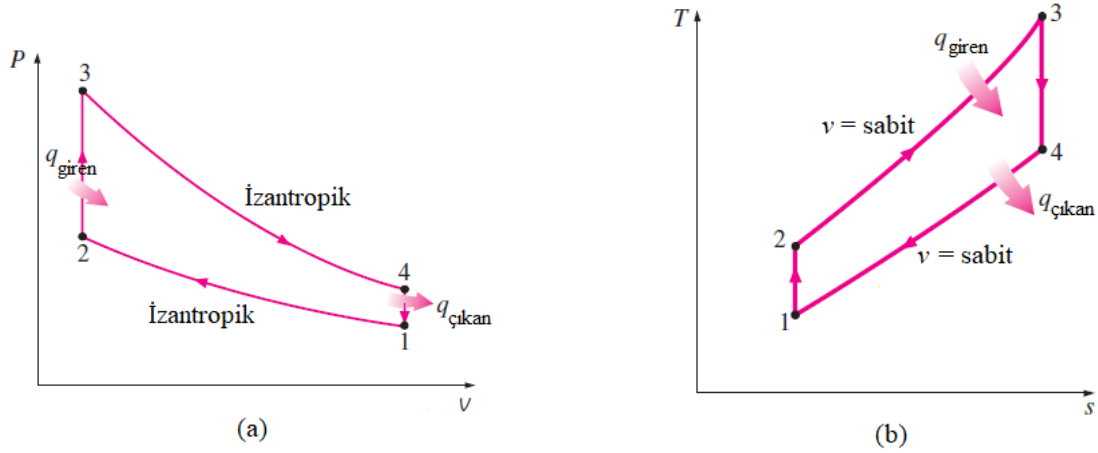
Soğuk hava standardı varsayımları altında ideal Dizel çevriminin ısı verimliliği Denklem (B.3)'te verilmiştir.

$$\eta_{\text{Dizel}} = \frac{W_{\text{net}}}{q_{\text{giren}}} = 1 - \frac{q_{\text{çıkan}}}{q_{\text{giren}}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{k(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{kT_2(T_3/T_2 - 1)} \quad (\text{B.3})$$

Ek Açıklamalar-B.2: İdeal Otto çevrimi

Ağır hizmet sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) araçları, kıvılcım ateşlemeli içten yanmalı motora sahip benzinle çalışan araçlar gibi çalışır (U.S. Department of Energy, 2020b). Otto çevrimi, kıvılcım ateşlemeli pistonlu motorlar için ideal çevrimdir. Buji ile ateşlemeli motorlar, piston üst ölü noktaya geldiğinde azami gücü elde etmek için yakıt-hava karışımının buji kıvılcımı ile ateşlendiği motorlardır. Çevrimlerine göre sabit hacim çevrimli motorlardır. Otto çevrimine ait P-v ve T-s diyagramları Şekil B.2a ve Şekil B.2b'de verilmiştir. İdeal Otto döngüsü tersine çevrilebilir dört işlemde oluşur (Çengel ve Boles, 2007):

- 1-2 İzentropik sıkıştırma
- 2-3 Sabit hacimde ısı ilavesi
- 3-4 İzentropik genişleme
- 4-1 Sabit hacimde ısı çekme



Şekil B.2 – Otto çevrimi diyagramları (a) P-v diyagramı (b) T-s diyagramı (Çengel ve Boles, 2007)

Otto çevrimi kapalı bir sistemde gerçekleşir. Bu nedenle hal değişimleri tek tek ele alınırken kapalı sistem için geçerli olan denklemler kullanılmalıdır. Isı geçişinin olduğu hal değişimleri sırasında iş yoktur, çünkü her iki hal değişimi sabit hacimde gerçekleşir. Bu nedenle, sisteme ve sistemden ısı geçişleri Denklem (B.4) ve Denklem (B.5)'teki gibi yazılabilir.

$$q_{\text{giren}} = u_3 - u_2 = c_v (T_3 - T_2) \quad (\text{B.4})$$

$$q_{\text{çıkan}} = u_4 - u_1 = c_v (T_4 - T_1) \quad (\text{B.5})$$

Soğuk hava standardı varsayımları altında ideal Otto çevriminin ısıl verimliliği Denklem (B.6)'da verilmiştir (Çengel ve Boles, 2007).

$$\eta_{\text{Otto}} = \frac{W_{\text{net}}}{q_{\text{giren}}} = 1 - \frac{q_{\text{çıkan}}}{q_{\text{giren}}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)} \quad (\text{B.6})$$