

AĞIR TİCARİ ARAÇLARDA DİZEL YERİNE SIVILAŞTIRILMIŞ DOĞAL GAZ KULLANIMININ YAKIT TÜKETİMİNE ETKİSİ

Bekir Barış ERÇELİK¹, Bahadır DOĞAN^{2*}

¹ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0001-9573-3677>

^{2*} Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Müh.-Mim. Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0003-4648-1375>

Anahtar Kelimeler	Öz
Dizel Sıvılaştırılmış doğal gaz LNG Yakıt tüketimi Yakıt ekonomisi	<i>Bu çalışmada, ağır ticari araç sınıfında yer alan bir çekicinin yakıt tüketimi ve ivmelenme performansı dizel ve sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) yakıtlı bir motora sahip olması durumunda gerçek yol sürüş testleri ile karşılaştırılmıştır. Testler sırasında her iki çekicide Euro VI normlarına sahip 338 kW gücünde motor kullanılmıştır. Araçlar toplam 41000 kg ağırlıkta eğimsiz düz bir yolda kullanılarak 85 km/h hızdan 20 km/h hıza serbest yavaşlama ve kalkıştan 85 km/h hıza ulaşana kadar hızlanma testlerine tabi tutulmuştur. Ayrıca 164,3 km'si otoyol, 44,4 km'si kırsal yol ve 54,7 km'si şehir içi yol olmak üzere toplam 263,4 km'den oluşan bir güzergâhta kullanılan araçların ortalama yakıt tüketim maliyetleri hesaplanmıştır. Sonuçlara göre, LNG yakıtlı aracın 100 km için yakıt maliyeti 1003,58 TL dizel aracın ise 1359,32 TL olarak hesaplanmıştır. LNG yakıtlı aracın ilk satış maliyetinin %30 daha pahalı olacağı öngörüldüğünde bile elde edilmiş olan %27 oranındaki yakıt tasarrufunun uzun yol kullanılan bir araç için kayda değer bir sonuç olduğu anlaşılmaktadır.</i>

EFFECT OF USE OF LIQUEFIED NATURAL GAS INSTEAD OF DIESEL IN HEAVY COMMERCIAL VEHICLES ON FUEL CONSUMPTION

Keywords	Abstract
Dizel Liquefied natural gas LNG Fuel consumption Fuel economy	<i>In this study, the fuel consumption and acceleration performance of a heavy commercial vehicle have been compared with real road tests in case of an engine with diesel and liquefied natural gas (LNG) fuel. During the tests, a 338-kW motor with Euro VI norms was used in both vehicles. The vehicles with a total weight of 41000 kg were subjected to free deceleration from 85 km/h to 20 km/h and acceleration from take-off to 85 km/h on a straight road without slope. Besides, the average fuel consumption costs of the vehicles used on a total route of 263.4 km consisting of 164.3 km of motorways, 44.4 km of rural roads, and 54.7 km of urban roads were calculated. According to the results, the fuel cost for 100 km of an LNG-fueled vehicle was calculated as 1003.58 TL and for a diesel vehicle as 1359.32 TL. Even if the predicted first sale cost of the LNG-fueled vehicle will be 30% more expensive, it is understood that the 27% fuel saving is a significant result for a long-distance vehicle.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi

Kabul Tarihi

: 13.11.2023

: 08.02.2024

Research Article

Submission Date

Accepted Date

: 13.11.2023

: 08.02.2024

* Sorumlu yazar: bdogan@ogu.edu.tr

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1388761>

1. Giriş

Dünya genelinde insan nüfus her yıl yaklaşık %1,1 artmaktadır ve bu artış ile birlikte araç sayısının da artacağı kaçınılmaz bir gerçektir. 2010 yılında dünyadaki araç sayısı yaklaşık 1 milyarken 2030 yılında bu sayının iki katına çıkacağı tahmin edilmektedir (United Nations, 2017; World Energy

Council, 2011). Artan araç sayısı ile tüketilen enerji miktarı da aynı oranda artmaktadır.

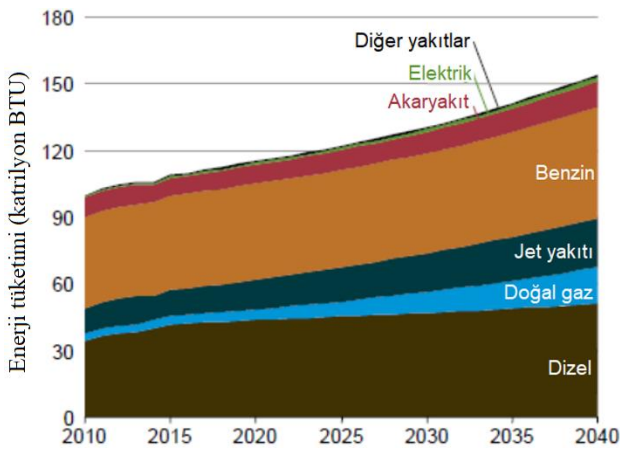
Özellikle taşımacılık ve ulaşım sektöründe kullanılan benzin ve dizel yakıtta olan talebin artmasıyla sıvılaştırılmış doğalgaz gibi alternatif yakıtlar ortaya çıkmıştır. Günümüzde taşımacılık ve ulaşım sektöründe kullanılan sıvı yakıtların toplam içerisindeki payı 2012 yılından 2040 yılına kadar %96'dan %88'e düşeceği



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

beklenirken doğal gazın payının aynı dönem için %3'ten %11'e yükseleceği beklenmektedir (Şekil 1). EIA 2016 raporuna göre ise ağır ticari araçlarda sıvı yakıt yerine doğal gaz kullanımının 2012-2040 yılları arasında %1'den %15'e yükseleceği öngörülmektedir. (U.S. Energy Information Administration, 2016). Enerji tüketimi açısından değerlendirildiğinde taşımacılık sektörü sanayi sektöründen sonra %30'luk bir pay ile dünyada ikinci sırada yer almaktadır (Atabani, Badruddin, Mekhilef ve Silitonga, 2011; Moriarty ve Honnery, 2016). Taşımacılık ve ulaşım sektöründe en yaygın olarak kullanılan petrol türevi yakıtlar içerisinde benzin ve dizel hiç kuşkusuz büyük bir paya sahiptir (Engerer ve Horn, 2010). Özellikle karayolu taşımacılığında tercih edilen söz konusu bu iki enerji kaynağının toplam sera gazı salınımindaki payı ise %73'tür. Bu sebeple, petrol türevi yakıtlara kıyasla daha az kirlenici ve daha ucuz bir enerji kaynağı olan doğal gazın kullanılması önerilmektedir. Avrupa'da kısa ve orta vadede biyo-yakıtların, orta ve uzun vadede doğal gazın ve uzak uzun vadede hidrojenin belirlenen hedeflere ulaşma doğrultusunda piyasaya sürülmesi planlanmaktadır (J. Osorio-Tejada, Llera ve Scarpellini, 2015).



Şekil 1. Dünya taşımacılık sektörü enerji tüketimini karşılayan enerji kaynakları (U.S. Energy Information Administration, 2016)

2. Bilimsel Yazın Taraması

Avrupa Komisyonu'nda karayolu ulaşımında kullanılacak alternatif yakıtlar için bir yol haritası çizilmiştir. Özellikle uzun mesafeli ulaşım için tüketilen dizel yerine ikame yakıtın sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) olabileceği belirtilmiştir (European Commission, 2013). Ayrıca Avrupa Birliği'ne üye tüm devletlerin LNG'nin sıvı yakıtlara alternatif olabileceği konusundaki fikir birlikleri ve LNG'nin Euro VI standartında belirtilen emisyon sınırlarına uygun olması yakın gelecekte LNG'ye olan talebin artacağını bir göstergesidir (European Commission, 2020; Official

Journal of the European Union, 2014). LNG yakıtlı araçların çevreye olan negatif etkilerin azaltılması ve yakıt tasarrufu sağlanması gibi pozitif etkilerinin yanında araçların ilk satın alım ve bakım maliyetlerinin geleneksel dizel araçlara göre daha pahalı olması gibi dezavantajlar da mevcuttur. LNG yakıtlı araçların ilk satın alım maliyeti dizel araçlara göre yaklaşık %30 daha pahalıdır (Smajla, Karasalihović Sedlar, Drljača ve Jukić, 2019). Ayrıca bakım maliyetlerinin de %10 daha pahalı olacağı öngörülmektedir (Osorio-Tejada ve diğ., 2017). LNG yakıtlı bir aracın ilk satın alım maliyeti dikkate alındığında geri ödeme süresi yılda yapılan mesafeye göre değişiklik gösterecektir ancak özellikle ulaştırma sektöründe kat edilen yüksek mesafelerde elde edilen yakıt tasarrufu ile söz konusu maliyet artışlarının telafi edilebileceği öngörülmektedir (Enerdata, 2014). Doğal gazlı araçların kullanımı 1930'lara dayanmaktadır ve çeşitli araçlara uygulanabilen olgun bir teknoloji olarak kabul edilir (Yeh, 2007). 2019 yılı verilerine bakıldığında, dünyada 28 milyona yaklaşan doğal gazlı araç ve 32577 doğal gaz dolmuş istasyonu bulunmaktadır (NGV Global, 2019).

Doğal gaz, araçlarda sıkıştırılmış doğal gaz (CNG) ve sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) olmak üzere iki farklı formda kullanılmaktadır. Bu iki seçenektен birisi olan LNG, CNG'ye göre daha yüksek bir enerji yoğunluğuna sahip olduğundan taşımacılık sektörü ve uzun yol ulaşımında kullanılan ağır ticari araçlarda daha çok tercih edilmektedir (Arteconi, Brandoni, Evangelista ve Polonara, 2010). CNG ise daha çok kent içi ulaşımında kullanılan küçük araçlar için uygundur. Sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG), doğal olarak oluşan bir hidrokarbon karışımıdır ve saflaştırılmış veya kriyojenik olarak -162°C sıcaklığa soğutulmuş sıvı forma dönüştürülür. LNG atmosfer basıncında, buhar formundaki doğal gaz hacminin sadece 1/600'ünü kapladığı için taşınması oldukça ekonomiktir (Tabak, 2009; U.S. Department of Energy, 2004). Hem fiyatının dizel yakıtı göre daha uygun olması hem de hacimce dizel yakıtı göre daha az tüketiliyor olması LNG'yi yakıt tüketim maliyeti anlamında %25-30 avantajlı kılmaktadır (Enerdata, 2014). LNG yakıtlı ağır ticari araçların ilk satın alım maliyeti diğer sıvı yakıtlı araçlara göre daha yüksek olmasına rağmen yıllık sürüş mesafesi 100000 km'nin üzerinde olan araçların bir yıl içerisinde bu maliyeti amorti edebileceği öngörülmektedir (Hao, Liu, Zhao ve Li, 2016).

Literatürde, kara yolu ulaşımında kullanılan farklı tiplerdeki araçlarda LNG dönüşümü ile elde edilebilecek yakıt tasarrufu konusunda çalışmalar yer almaktadır. Song ve diğ., farklı sektörlerde kullanılan araçlar için bir dizi anket yoluyla dizel ve LNG yakıtlı araçların yakıt tüketim performanslarını derlemişlerdir (Song, Ou, Yuan, Yu ve Wang, 2017). Smajla vd. ticari kamyonlar için LNG kullanımını dizel ile kıyaslayarak

analiz etmişlerdir ve CO₂ emisyonu için LNG'nin daha avantajlı olduğunu vurgulamışlardır (Smajla ve diğ., 2019). Thiruvengadam ve diğ., sürekli olarak dur kalk yapan ve bu nedenle yakıt tüketimi açısından en verimsiz grup olarak belirledikleri çöp kamyonu filosundan 12 araç için yaptıkları araştırma sonucunda LNG yakıtlı araçların emisyon değerlerinin %82 daha düşük olduğunu raporlamışlardır (Thiruvengadam, Carder, Krishnamurthy ve Gautam, 2010). Zhang vd. farklı yakıt sistemine sahip yetmiş beş otobüse sürüş sırasında taşınabilir bir emisyon ölçüm cihazı kullanarak emisyon ölçümü yapmışlardır. Belirli bir güzergahta yapılan test sonuçlarına ortalama hızın 25 km/h'ten 15 km/h'e düşmesi ile dizel yakıtlı araçlarda %20-30 yakıt tasarrufu sağlanırken bu oranın doğal gazlı araçlarda %30-45 olduğu belirlenmiştir (Zhang ve diğ., 2014). Yan vd. yakıt olarak benzin kullanılan bir halk otobüsü için LNG dönüşümünü incelemişlerdir. Test sonuçlarına göre LNG dönüşümü yapılan aracın maksimum hızı dikkate alındığında %14,5 daha kötü performansa sahip olduğu görülmüştür (Yan, Xu, Liu ve Zheng, 2016). He ve diğ. LNG'ye alternatif olarak kok gazının kullanımını araştırmışlardır. Yapılan testler sonucunda kok gazı kullanılan araçlar ile LNG kullanılan araçlar hızlanma performanslarının hemen hemen eşit olduğunu tespit etmekle birlikte emisyon miktarında %32,4 oranında azalma olduğunu raporlamışlardır (He, Li, Wu ve Li, 2013). Ayrıca, Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı'nın yapmış olduğu çalışmada kamyon ve otobüs gibi taşımacılık ve ulaşım sektöründe kullanılan ağır ticari araçlar için LNG'nin dizel yakıtı ikame olabileceği gerçek yol testleri sonucunda ortaya konmuş ve tartışılmıştır ancak 2000'li yılların başında yapılan bu çalışmada dikkate alınan ağır ticari araçların günümüzde kullanımında olmadığına dikkat edilmelidir (U.S. Department of Energy, 1999; U.S. Department of Energy, 1996, 2000a, 2000b, 2001, 2004).

LNG motorlu araçların sahip olduğu dezavantajlardan birisi emme sisteminde LNG'nin gazlaştırılmasından kaynaklı düşük hacimsel verim sebebi ile zayıf bir performans gösterebileceğidir. Tang ve diğ. bu dezavantajı ortadan kaldırmak için emme havası beslemeli bir sistem kullanarak özellikle düşük hızlarda belirgin bir iyileşme elde etmişlerdir. Emme havası beslemeli sistem ile hızlanma süresini %14,7-30 oranında azaltmışlardır. Bir diğer dezavantaj ise doğal gazla çalışan motorlarda enjeksiyon ve ateşleme arasında yaşanan gecikmelerden dolayı araç performansın azalmasıdır (Tang ve diğ., 2016). Nwafor çift yakıtlı bir yanma sistemine sahip araçta enjeksiyon zamanlamasının primer yakıt olarak kullanılan doğal gazın performansa etkisini incelemiştir. Doğal gazın özellikle düşük devirlerde tutuşma gecikmelerine sebep olduğunu tespit etmişlerdir (Nwafor, 2000). Bir diğer çalışmada, Chen vd. farklı metan içeriğine sahip iki farklı LNG'nin performansını üç farklı sıkıştırma oranı

ve farklı ateşleme zamanlamalarını dikkate alarak test etmişlerdir. Sonuçlar, %99 metan içeriğine sahip LNG'nin %93 metan içeriğine sahip olana göre daha iyi bir performans ve yakıt ekonomisi sağladığını göstermiştir (Chen, Zhang, Xu, Zhang ve Liu, 2017).

Bu çalışmada, ülkemizde üretilen ve kullanılan dizel yakıtlı ağır ticari sınıf bir araca LNG dönüşümü uygulanarak gerekli performans testleri yapılmış ve kıyaslanmıştır. Euro VI normlarına uygun 338 kW gücünde özdeş motorlara sahip araçlar belirli bir güzergahta serbest yavaşlama, hızlanma ve yakıt tüketimi testlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar, yakıt ekonomisi ön planda olacak şekilde yorumlanmış ve LNG'nin, araçlarda yapılacak bazı iyileştirmeler ile hem performans hem de maliyet anlamında dizele ikame bir yakıt olabileceğini ortaya konmuştur.

3. Yöntem

Bu çalışma kapsamında yapılan testler ve elde edilen sonuçların sunulmasında araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur. Testler her iki araç için iki farklı şoför ile üç tekrarlı olacak şekilde yapılmış ve ortalamaları dikkate alınmıştır. Performans testleri kapsamında; serbest yavaşlama, tam gaz ile hızlanma, sabit hızda yakıt tüketimi ve gerçek yol koşullarında ortalama yakıt tüketimi testleri yapılmıştır. Kamyon ve tır gibi ağır ticari araçlar için dünya genelinde kabul edilmiş bir yakıt tüketimi standardı ve test prosedürü bulunmamaktadır. Aracın yakıt tüketimi; test güzergahı, yol profili, sürücü, çevre ve iklim şartları vb. gibi birçok değişken parametre ile doğrudan ilişkili olduğu için tüm araç üreticileri bu testleri kendi oluşturduğu prosedürlere göre yapmaktadır. Serbest yavaşlama testi, hızlanma testi ve sabit hızda yakıt tüketimi test prosedürleri, SAE (Society of Automobile Engineers) standartları doğrultusunda oluşturulmuş, uluslararası geçerlilikteki bilgilere dayanmaktadır. Gerçek yol koşulunda yakıt tüketim testi belirli bir güzergahta en az iki araç ile karşılaştırmalı olarak yapılan ve çevre, iklim şartları, sürücü etkisi ve yol şartları gibi dış etkenleri en aza indirerek iki aracın yakıt tüketimi parametrelerinin birbiriyle karşılaştırıldığı bir uygulamadır. Buradaki amaç, iki aracı aynı seviyeye getirip, aynı şartlarda test ederek yakıt tüketimi verilerini birbiriyle karşılaştırmaktır. Testlere ait tüm detaylar Tablo 1 ile verilmiştir.

Dizel yakıtlı araçta, aracın anlık ve kümülatif yakıt tüketimini ölçebilen AIC-6004 marka/model bir akış ölçer kullanılmıştır. LNG aracın yakıt ölçümü ise doldur-boşalt metodu ile yapılmıştır. Tam dolu depo ile teste başlayıp, test sonunda tekrar doldurularak kilometre başına yakıt tüketimi hesaplanmıştır. Araçta birbirinden bağımsız çift yakıt deposu bulunmaktadır. Birinci depo sadece test esnasında yakıt tüketimini hesaplamak için kullanılmıştır. Diğer yakıt deposu ise, test aralarındaki ve test dışı güzergahlarda aracın

hareketini sağlamak için kullanılmıştır. Çekiciler ile ilgili fiziki ve teknik detaylar Tablo 2 ile verilmiştir. Testler sırasında kullanılan çekicilerin fiziki özellikleri ve ölçüleri özdeştir. Her ikisi de daha önce kullanılmamış yeni araçlar olup lastik boyutları, lastik basıncı ve lastik sınıfı aynıdır. Her iki çekici de spoiler ve yan eteklere sahipken LNG yakıt tankının tasarım farklılığı sebebiyle LNG yakıtlı çekicide yan etekler kullanılamamıştır. Araçların toplam ağırlıkları çekici ağırlıklarındaki farklılığı dorse ağırlığı ile tolere ederek

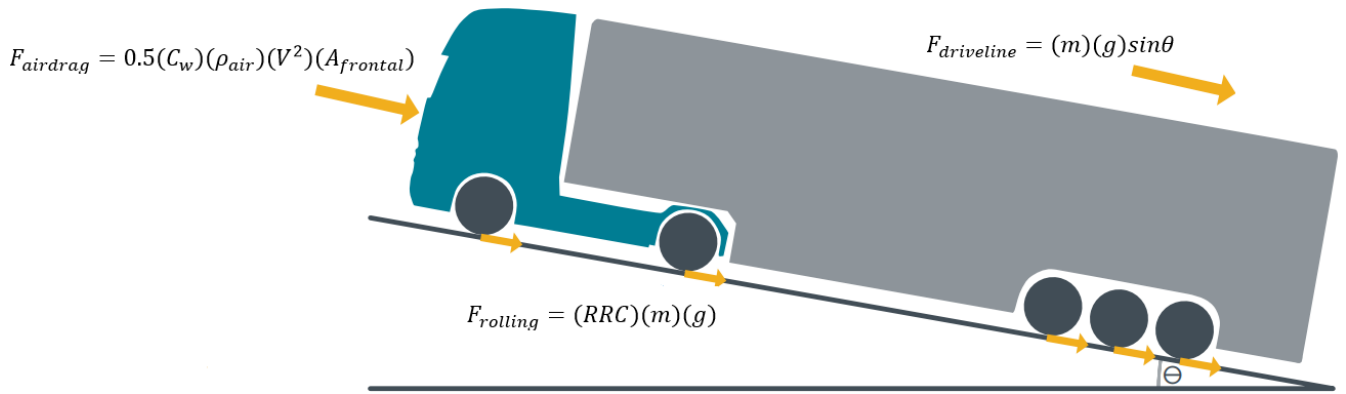
41 ton olarak ayarlanmıştır. Ayrıca bu çalışma kapsamında dikkate alınan ön testler sırasında dizel yakıtlı çekici ile LNG yakıtlı çekicinin 12 ileri otomatik şanzımanı ve 12,9-0,7 olan şanzıman oranı testlerin mümkün olduğunca aynı şartlarda yapılması açısından sabit tutulmuştur. İki farklı motorun dikkate alınması sebebi ile ortaya çıkan farklılıklardan birisi torktur. Her ikisi de 1900 rpm devirde 338 kW güç üreten motorların maksimum torku dizel çekici 2150 Nm iken LNG çekici için 2000 Nm'dir.

Tablo 1. Test Matrisi

Test Adı	Test Koşulları	Testin Varyasyonu	Testin Yapılışı	Referans Test Standart
Serbest yavaşlama testi	- 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 rüzgârlı havada test yapılamaz. Rüzgâr, 3m/s hızı geçmemelidir. - Test, 850 metre rakımın üzerinde yapılmamalıdır.	Dizel çekici, A sürücüsü ile 3 gidiş, 3 geliş yönünde LNG çekici, B sürücüsü ile 3 gidiş, 3 geliş yönünde Dizel çekici, B sürücüsü ile 3 gidiş, 3 geliş yönünde LNG çekici, A sürücüsü ile 3 gidiş, 3 geliş yönünde	85 km/h sabit hızda ilerlerken vites boşa alınarak 20 km/h hıza kadar serbest yavaşlamaya maruz bırakılan araçların her 5 km/h hız düşüşünde zaman (s) ve mesafe (m) bilgileri kaydedilir.	SAE J 1263_201003
Tam gazda hızlanma testi	- 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 rüzgârlı havada test yapılamaz. Rüzgâr, 3m/s hızı geçmemelidir. - Test, 850 metre rakımın üzerinde yapılmamalıdır.	Dizel çekici, A sürücüsü ile 3 gidiş, 3 geliş yönünde LNG çekici, B sürücüsü ile 3 gidiş, 3 geliş yönünde Dizel çekici, B sürücüsü ile 3 gidiş, 3 geliş yönünde LNG çekici, A sürücüsü ile 3 gidiş, 3 geliş yönünde	Araç, test için belirlenen noktadan 0 km/h hızdan 85 km/h hıza kadar tam gaz (varsa kick-down) yaparak hızlandırılır. Zaman (s), hız (km/h), mesafe (m) ve ivme (m/s ²) bilgileri kaydedilir.	SAE J 1491_200607
Sabit hızda yakıt tüketim testi	- 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 rüzgârlı havada test yapılamaz. Rüzgâr, 3m/s hızı geçmemelidir. - Test, 850 metre rakımın üzerinde yapılmamalıdır.	Dizel çekici, A sürücüsü ile 3 gidiş, 3 geliş yönünde LNG çekici, B sürücüsü ile 3 gidiş, 3 geliş yönünde Dizel çekici, B sürücüsü ile 3 gidiş, 3 geliş yönünde LNG çekici, A sürücüsü ile 3 gidiş, 3 geliş yönünde	Araç, test için belirlenen hıza (60 km/h, 70 km/h ya da 80 km/h) çıkarılır. Test için belirlenmiş başlangıç ve bitiş noktaları arasında, belirlenen sabit hızda gidilir. Hız (km/h) ve yakıt tüketimi (L ya da kg) verileri kaydedilir.	SAE J 1526_201509
Gerçek yol koşulunda yakıt tüketimi testi	- Test parkuru; yol şartlarına göre uzman kişiler tarafından belirlenmiştir. - Test zemini; kuru, temiz beton veya asfalt zemin olmalıdır. - Hava koşulları; hava sıcaklığı 10-30°C, rüzgâr hızı maksimum 5 m/s, nem seviyesi ≤%95 ve atmosferik basınç 1 bar ± %7,5 olduğu durumlarda test yapılabilir. Hava durumu düzenli takip edilmeli, yağmurlu havada test yapılmamalıdır.	1. test: Dizel çekici; A sürücüsü, 1. Dorse, LNG çekici; B sürücüsü, 2. dorse 2. test: Dizel çekici; B sürücüsü, 1. Dorse, LNG çekici; A sürücüsü, 2. dorse 3. test: Dizel çekici; B sürücü, Y dorse, LNG çekici; A sürücü, X dorse 4. test: Dizel çekici; A sürücü, Y dorse, LNG çekici; B sürücü, X dorse	Test, belirlenen rotada gidiş ve geliş olarak çift yönlü gerçekleştirilmektedir. Dış etkenlerin yakıt tüketimine etkisini minimize etmek için araçlarda dorse ve sürücü değişiklikleri yapılır. Zaman (s), hız (km/h), yakıt tüketimi (L ya da kg) verileri kaydedilir.	SAE J 1526_201509

Tablo 2. Testlerde Kullanılan Araçların Teknik Özellikleri (Erçelik, 2021)

Araç özellikleri	4×2 Dizel yakıtlı çekici	4×2 LNG yakıtlı çekici
Motor	FPT Cursor 11 (Step-C)	13 Litre NG (Step-D)
Emisyon seviyesi	Euro VI	Euro VI
Maximum güç	460 PS (338 kW) – (1900 rpm)	460 PS (338 kW) – (1900 rpm)
Maximum tork	2150 Nm	2000 Nm
Tork aralığı	1050-1550 rpm	1200-1500 rpm
Şanzıman tipi	12 ileri otomatik	12 ileri otomatik
Şanzıman oranı	12,9 – 0,7	12,9 – 0,7
Diferansiyel oranı	3,08:1	3,40:1
Çekici lastik boyutları	315 / 70 / R22.5	315 / 70 / R22.5
Çekici lastik basıncı	130 psi	130 psi
Çekici lastik sınıfı	B	B
Çekici ağırlığı	7900 kg	8870 kg
Çekilen (dorse) ağırlığı	33100 kg	32130 kg
Toplam ağırlık	41000 kg	41000 kg
Kabin tipi – tavan	Yataklı - Yüksek Tavan	Yataklı - Yüksek Tavan
Spoiler	Var	Var
Yan uzatmalar	Var	Var
Yan etek	Var	Yok



Şekil 2. Araca Etki Eden Kuvvetler (The International Council on Clean Transportation, 2018)

3.1. Serbest Yavaşlama Testi

Serbest yavaşlama testi sırasında dikkate alınması gereken parametreler aerodinamik sürtünme kuvveti, yuvarlanma direnci, yolun eğim derecesi ve atalet kuvvetleridir. Belirli bir hızda ilerlerken serbest yavaşlamaya maruz bırakılan bir araca etki eden kuvvetlerin yuvarlanma ve aerodinamik dirençlerden kaynaklandığı kabul edilmektedir (Ligterink ve diğ., 2015). Bu tanıma uygun olarak araç üzerine etki eden kuvvetler şematik olarak Şekil 2 ile kuvvet dengesi ise Denklem (1) ve (2) ile verilmiştir.

$$(m + m_r)a = F_{rolling} + F_{driveline} + F_{airdrag} \quad (1)$$

$$(m + m_r)a \cong F_0 + F_1V + F_2V^2 \quad (2)$$

Denklem (2)'de;

m =aracın kütlesi [kg]

m_r =aracın dönme ataleti (I_{moment}/R^2) [kg]

a =hızlanma ($a=dv/dt$) [m/s^2]

F = ilgili kuvvetler [N]

V = hız [km/h]

F_0 =yol yükü katsayısı [N]

F_1 = yol yükü katsayısı [N/(km/h)]

F_2 =yol yükü katsayısı [N/(km/h)²]

olarak kullanılmıştır. Denklem (2)'de yer alan F_0 aktarma organları ve yuvarlanma direnci ile ilişkilidir. F_1 ara hızlardaki detaylara bağlı olarak değişebilen negatif veya pozitif bir katsayıdır. F_2 ise hava sürüklenmesi ile ilişkilidir. Denklem (1)'de yer alan hava sürtünmesi ile araca etki eden kuvvet Denklem (3) ile verilmiştir.

$$F_{airdrag} = 0.5(C_w)(\rho_{air})(V^2)(A_{frontal}) \quad (3)$$

Denklem (3)'te;

C_w =aracın aerodinamik sürtünme katsayısı

ρ_{air} =havanın yoğunluğu [kg/m^3]

V =hız [m/s]

$A_{frontal}$ =aracın ön yüz alanı [m²]

olarak kullanılmıştır. Üzerine binen yük sebebiyle lastiklerin sahip olduğu yuvarlanma direnci (RRC) aracın hareketine zıt yönde bir kuvvet uygular. Bu kuvvet Denklem (4) ile ifade edilmiştir.

$$F_{rolling} = (RRC)(m)(g) \quad (4)$$

Denklem (4)'te;

RRC =lastiklerin yuvarlanma direnci

m =aracın kütlesi [kg]

g =yer çekimi ivmesi [m²/s]

85 km/h sabit hızda ilerlerken vites boşa alınarak 20 km/h hıza kadar serbest yavaşlamaya maruz bırakılan araçların her 5 km/h hız düşüşünde zaman (t) ve mesafe (x) bilgileri kaydedilmiştir.

3.2. Hızlanma Testi

Bu testin amacı dizel ve LNG yakıtlı araçların kalkıştan (0 km/h) 85 km/h hıza belirlenen güzergâhta tam gazda hızlanma performansının incelenmesidir. Hızlanma testleri belirlenen güzergâhta yol eğiminin %1'in altında olduğu kuru ve asfalt bir yolda yapılmıştır. Rüzgâr hızı prosedürlere uygun şekilde 3 m/s'nin altındadır. Hızlanma testine geçilmeden önce araçlar önceden çalıştırılarak motor çalışma sıcaklığına ulaştırılmıştır. Serbest yavaşlama testlerinde olduğu gibi testler gidiş ve geliş yönlü olmak üzere üçer kez tekrar edilmiştir. Her iki aracın 0 km/h hızdan tam gazda 85 km/h hıza ulaşmaya kadar her 5 km/h hız artışında zaman (t) ve mesafe (x) bilgileri kaydedilmiştir.

3.3. Sabit Hızda Yakıt Tüketim Testi

Sabit hızda yakıt tüketimi testleri yol eğiminin %1'in altında olduğu bir rotada 60, 70 ve 80 km/h sabit hızlarda yapılmıştır. Prosedürlere uygun olarak rüzgâr hızının 3 m/s'nin altında olduğu yağışsız hava şartlarında yapılan testlerden önce araçlar normal motor sıcaklığına ulaşmaya kadar 20-30 dakika çalıştırılmıştır. Sabit hızda 3 km uzunluğunda bir güzergâhta gidiş-geliş yönlü yapılan testler üçer kez tekrar edilmiştir.

3.4. Gerçek Yol Koşulunda Yakıt Tüketim Testi

Dizel ve LNG yakıtlı çekicilerin yakıt tüketimi performanslarını gerçekçi bir şekilde kıyaslamak için yapılan bu testte İzmir-Aydın arasında gidiş ve dönüş dâhil olmak üzere toplam uzunluğu 263,4 km bir güzergâhta üçer tekrarlı testler yapılmıştır. Söz konusu güzergâhın 164,3 km'si otoyol, 44,4 km'si kırsal yol ve 54,7 km'si şehir içi yollardan oluşmaktadır. Diğer testlerde olduğu prosedüre uygun olarak yürütülen bu testlerde de araç motorları önceden ısıtılmıştır. Seçilen güzergâhta hava sıcaklığı 10-30°C arasında ve yağışın olmadığı bir günde maksimum rüzgâr hızı 5 m/s olarak

ölçülmüştür. Dış etkenlerin yakıt tüketimine etkisini minimize etmek için iki farklı şoför dört farklı günde iki farklı dorse tipi ile bu testleri yapmışlardır.

4. Bulgular

4.1 Serbest Yavaşlama Testinin Değerlendirilmesi

Dizel ve LNG yakıtlı çekicilerin 85 km/h hızda ilerlerken 20 km/h hıza kadar serbest yavaşlamaya maruz bırakıldığı testlere ait ortalama veriler Tablo 3 ile verilmiştir. Tablo 3'te yer alan değerler göz önüne alındığında boyutları ve kabin tasarımları aynı olan her iki aracın benzer bir yavaşlama karakteri gösterdiğinden söz etmek mümkündür. Araçların sürüklenme süreleri (t) ve mesafeleri (x) belirlendikten sonra yuvarlanma direncinin (RRC) ve aerodinamik sürtünme katsayısının (C_w) belirlenebilmesi için Denklem (2)'de yer alan F_0 , F_1 ve F_2 yük katsayılarının hesaplanması gerekmektedir. Denklem (1)-(4) kullanılarak ve Tablo 3'te verilen yavaşlama karakteristikleri dikkate alınarak öncelikle yük katsayıları sonrasında ise yuvarlanma direnci (RRC) ve aerodinamik sürtünme katsayısı (C_w) hesaplanmıştır. Söz konusu katsayılar Tablo 4 ile verilmiştir. Hesaplamalarda hava yoğunluğu $\rho_{air}=1.225$ kg/m³ ve araçların ön yüz alanı $A_{frontal}=10$ m² olarak dikkate alınmıştır.

Tablo 3. Serbest Yavaşlama Test Verileri (Erçelik, 2021)

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

Tablo 4'te yer alan F_1 katsayısı, test yöntemine ve testin yapıldığı yol koşullarına bağlı olarak hız profilinin düzenli şekilde azalması nedeniyle her iki araçta da ihmal edilmiştir. Ayrıca araç tipine ve kullanılan lastiğin modeline bağlı olarak yuvarlanma direnci (RRC) değişiklik göstermektedir. Bu çalışma kapsamında dikkate alınan ağır ticari sınıf bir araçta kullanılan B sınıfı lastikler için yuvarlanma direnci $0,0041 \leq RRC \leq 0,0050$ olmalıdır (European Commission, 2016). Araçların yuvarlanma direnci katsayılarının dizel araç için $RRC=0,00488$, LNG araç için ise $RRC=0,00485$ olduğu görülmektedir. RRC değerleri kamyon ve otobüslerde kullanılan C3 tipi

lastiklerin B enerji verimliliği sınıfı aralığındadır. Araçlar aynı yol koşullarında, aynı yükte ve aynı enerji verimliliği sınıfındaki lastikler kullanılarak test edilmiştir. Bu yüzden iki aracın yuvarlanma direnci katsayıları birbirine oldukça yakındır. Ayrıca, literatürde yer alan çalışmalarda aerodinamik sürtünme katsayısının (C_w) binek bir araç için $0,25 \leq C_w \leq 0,50$ mertebesinde olduğu, ağır ticari araçlar için ise daha dik ve büyük bir ön yüz alanına sahip oldukları için $C_w > 0,50$ olması gerektiği belirtilmiştir [35]. Tablo 4'ten görüldüğü üzere hesaplanan RRC ve C_w değerleri ilgili mertebeleri doğrulamaktadır. Araçların aerodinamik sürtünme katsayıları (C_w) incelendiğinde dizel çekicinin daha avantajlı olduğu görülmektedir.

Tablo 4. Yük, Yuvarlanma Direnci ve Aerodinamik Sürtünme Katsayıları (Erçelik, 2021)

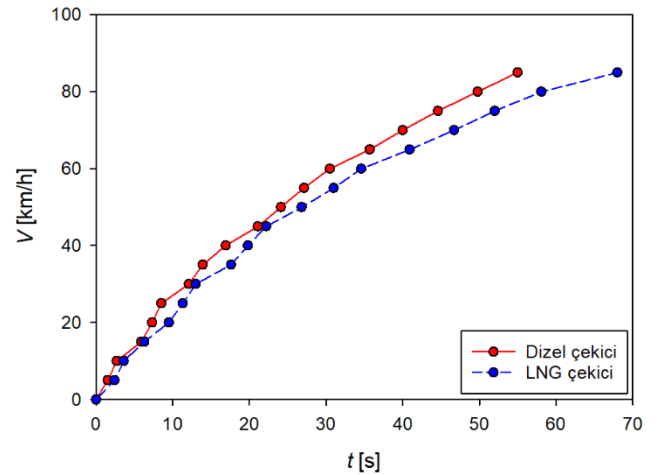
Katsayılar	Dizel çekici	LNG çekici
F_0	1962	1950
F_1	0	0
F_2	0,256	0,266
RRC	0,00488	0,00485
C_w	0,542	0,563

Bu durumun muhtemel sebebi dizel yakıt tankının yerine LNG tankının yerleştirilmesinden dolayı mecburi tasarım farklılığıdır. Tablo 2'de de belirtildiği üzere çekicinin her iki yanında bulunan ve yan etek olarak adlandırılan dizel yakıt tankını kapatan parçaların LNG tankının daha büyük olmasından dolayı kullanılamaması araç aerodinamiğini olumsuz yönde etkilemiştir.

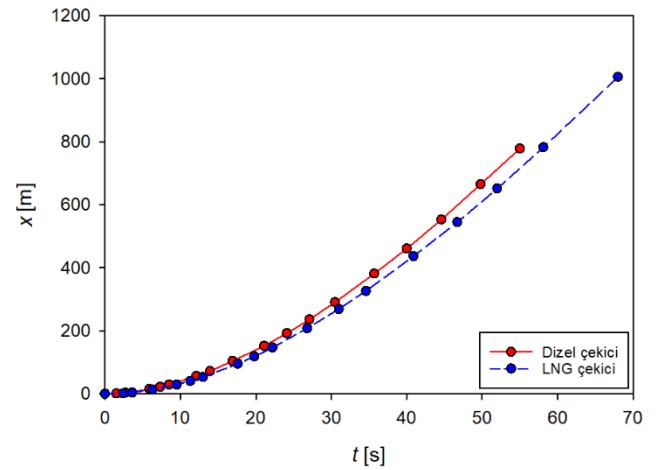
4.2. Hızlanma Testinin Değerlendirilmesi

Önceden motor çalışma sıcaklığına ısıtılan dizel ve LNG yakıtlı araçların kalkıştan tam gaz ile 85 km/h hıza ulaşmaya kadar 5 km/h aralıklarla kaydedilmiş verileri Şekil 3 ve Şekil 4 ile gösterilmektedir. 0'dan 85 km/h hıza ulaşma süresi dizel araç için 55 saniye, LNG yakıtlı araç için ise 68 saniye sürmüştür (Şekil 3). Bu sırada kat edilen mesafeler ise dizel ve LNG yakıtlı araçlar için sırası ile 778,2 m ve 1005,5 m'dir (Şekil 4). Bu verilerden anlaşılacağı üzere LNG yakıtlı çekicinin hızlanma performansı dizel olana göre %24 daha düşüktür. Konvansiyonel bir dizel motor ile çalışan bir çekicinin motor, yakıt sistemi ve yakıt deposu değiştirilerek LNG dönüşümü sonucu elde edilen ve kıyaslaması yapılan bu ön veriler ile LNG yakıtlı aracın performansının artırılması için diğer bileşenlerin de iyileştirilmesi gerekliliği anlaşılmaktadır.

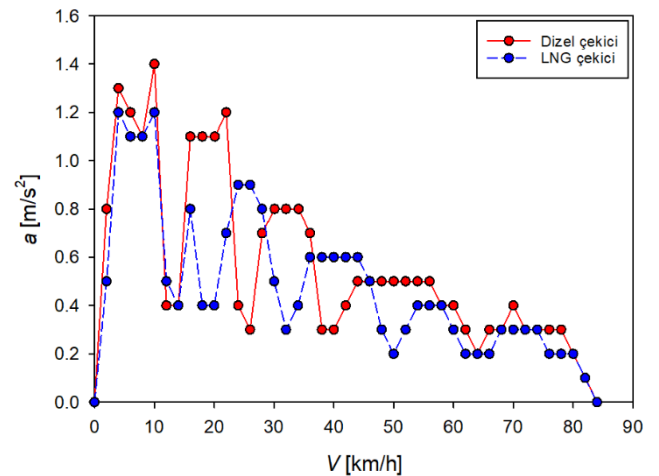
Hızlanma testi kapsamında dizel ve LNG yakıtlı araçların ivme-hız ilişkileri Şekil 5 ile verilmiştir. Şekil 5'den görüldüğü üzere LNG yakıtlı aracın ivme verileri Şekil 3 ve Şekil 4 ile gösterilmiş olan verileri doğrular niteliktedir. LNG yakıtlı araç kalkış anında dizel yakıtlı araçla neredeyse başa baş bir performans göstermiştir ancak 10-30 km/h hız aralığında LNG yakıtlı aracın ivmesi dizel yakıtlı araçtan oldukça geride kalmıştır.



Şekil 3. Hızlanma Testi Sonuçlarına Göre Araçların Hız-Zaman Verileri



Şekil 4. Hızlanma Testi Sonuçlarına Göre Araçların Mesafe-Zaman Verileri



Şekil 5. Hızlanma Testi Sonuçlarına Göre Araçların İvme-Hız Verileri

4.3. Sabit Hızda Yapılan Yakıt Tüketim Testinin Değerlendirilmesi

Testler sırasında kullanılan dizel ve LNG yakıtlı çekicilerin 3 km uzunluğunda bir test güzergâhında üç farklı sabit hızda tükettikleri ortalama yakıtlar ve maliyetleri Tablo 5 ile verilmiştir. Tablo 5'ten anlaşılacağı üzere yakıtlar için birim fiyatlandırma dizel için litre bazında, LNG için ise kilogram bazındadır. Bu çalışmanın yapıldığı 2020 yılı ağustos ayında petrol varil fiyatı yaklaşık 45 dolar, dolar/TL paritesi 7,32, dizelin birim fiyatı 6,40 TL/litre, LNG'nin birim fiyatı ise 5,18 TL/kg'dır. Tablo 5 ve Tablo 6 ile sunulan yakıt maliyetleri ise 2023 Kasım ayı fiyatları dikkate alınarak hazırlanmıştır. Bu dönem için güncel petrol varil fiyatı yaklaşık 80 dolar, dolar/TL paritesi 29,93, dizelin birim fiyatı 39,98 TL/litre, LNG'nin birim fiyatı ise 32,69 TL/kg'dır.

Tablo 5. Sabit Hızda Ortalama Yakıt Tüketimleri

	Dizel çekici	LNG çekici
60 km/h	21,7 L/100 km	19,2 kg/100 km
	21,2 L/100 km	18,5 kg/100 km
	21,0 L/100 km	18,6 kg/100 km
	20,8 L/100 km	19,1 kg/100 km
	20,3 L/100 km	18,9 kg/100 km
	21,0 L/100 km	19,5 kg/100 km
Standart sapma	0,42 L/100 km	0,34 kg/100 km
Ortalama Maliyet	21,0 L/100 km 839,58 TL	19,0 kg/100 km 621,11 TL
70 km/h	24,0 L/100 km	20,1 kg/100 km
	22,7 L/100 km	20,5 kg/100 km
	23,2 L/100 km	20,4 kg/100 km
	23,6 L/100 km	20,8 kg/100 km
	23,6 L/100 km	21,4 kg/100 km
	23,3 L/100 km	21,1 kg/100 km
Standart sapma	0,40 L/100 km	0,43 kg/100 km
Ortalama Maliyet	23,4 L/100 km 935,53 TL	20,7 kg/100 km 676,68 TL
80 km/h	26,2 L/100 km	22,8 kg/100 km
	26,0 L/100 km	22,6 kg/100 km
	25,5 L/100 km	22,2 kg/100 km
	25,9 L/100 km	22,9 kg/100 km
	25,4 L/100 km	22,4 kg/100 km
	25,8 L/100 km	22,3 kg/100 km
Standart sapma	0,27 L/100 km	0,26 kg/100 km
Ortalama Maliyet	25,8 L/100 km 1034,48 TL	22,5 kg/100 km 735,53 TL

4.4. Gerçek Yol Koşullarında Yapılan Yakıt Tüketim Testinin Değerlendirilmesi

Dizel ve LNG yakıtlı araçların gerçekçi bir yakıt tüketimi kıyaslaması için İzmir-Aydın arasında üç farklı

kısımdan oluşan ve gidiş-geliş toplam uzunluğu 263,4 km olan bir güzergâh tercih edilmiştir. Tercih edilen güzergâhın 164,3 km'si otoyol olup araçlar bu yolda 80 km/h bir ortalama hızla ilerlemişlerdir. Kırsal yol olarak değerlendirilecek ve uzunluğu 44,4 km olan ikinci parçada ise araçlar ortalama 60 km/h ortalama hızla ilerlemişlerdir. İzmir'den kalkış, Aydın'a varış ve tekrar İzmir'e dönüş kısmında ise toplamda 54,7 km'lik bir yol şehir içi olarak değerlendirilmekte olup bu kısımda araçlar 40 km/h ortalama hız ile ilerlemişlerdir. Farklı şoförler ile iki farklı dorse kullanılarak üçer kez tekrar edilen testler dört farklı günde yapılmıştır. Trafik yoğunluğunun değiştiği bu dört farklı güne ait sonuçların ortalaması Tablo 6 ile verilmiştir. Tablo 6'dan görüldüğü üzere dört farklı günde yapılan testlerin ortalamasına göre yakıtların birim maliyetleri dikkate alındığında LNG yakıtlı araç 1003,58 TL tutarında bir yakıtla belirlenen güzergâhı kat ederken dizel araç 2 aynı güzergâhı 1359,32 TL ile kat etmiştir. Gerçek yol koşulları dikkate alınarak yapılan bu testler sonucunda LNG yakıtlı araç ile %27 tasarruf sağlanmıştır.

Tablo 6. Gerçek Ortalama Yakıt Tüketimleri

Test	Dizel çekici	LNG çekici
Test-1	33,5 L/100 km	29,8 kg/100 km
Test-2	35,6 L/100 km	31,5 kg/100 km
Test-3	34,0 L/100 km	31,0 kg/100 km
Test-4	32,7 L/100 km	30,3 kg/100 km
Standart sapma	1,07 L/100 km	0,65 kg/100 km
Ortalama Maliyet	34,0 L/100 km 1359,32 TL	30,7 kg/100 km 1003,58 TL

5. Tartışma

Dizel yakıtlı ağır ticari sınıfta yer alan bir çekicinin LNG dönüşümü yapılarak elde edilen sonuçlar dikkate alındığında dizel yakıtlı ivmelenme açısından LNG yakıtlı araca göre daha performanslı olduğu anlaşılmıştır. Sabit hızda yapılan performans testlerinde 100 km için ortalama yakıt tüketim maliyetleri incelendiğinde ise her ne kadar LNG yakıtlı aracın ivmelenme performansı dizele göre daha düşük ise de yakıt maliyeti anlamında kayda değer bir avantajı vardır. LNG yakıtlı araç dikkate alınan üç farklı sabit hızda %27-29 mertebesinde tasarruf sağlamıştır. Ancak, testler sırasında kullanılan LNG yakıtlı çekici için şanzıman oranı ve yazılımı değiştirilmemiştir. Dizel yakıtlı araçla aynı şanzıman tipi ve şanzıman oranına sahip LNG yakıtlı çekicinin şanzıman yazılımı optimize edilerek ivmelenme performansının iyileştirilebileceği ve bununla beraber daha fazla yakıt tasarrufu sağlanacağı öngörülmektedir. Literatürde yer alan çalışmalar dikkate alındığında; özellikle taşımacılık sektöründe kullanılan LNG yakıtlı ağır ticari araçların dizel yakıtlı araçlara göre %25-30 mertebesinde yakıt tasarrufu sağladığı, bununla birlikte LNG'ye dönüşüm

veya LNG yakıtlı bir aracın yeniden satın alınması maliyetlerinin bu sayede amorti edilebileceği hatırlanmalıdır (Enerdata, 2014; Hao ve diğ., 2016).

6. Sonuçlar

Bu çalışmada, dizel yakıtlı ağır ticari sınıfta yer alan bir çekicinin LNG dönüşümü yapılarak performans kıyaslaması yapılmıştır. Performans kıyaslaması serbest yavaşlama, tam gaz hızlanma, sabit hız yakıt ortalama yakıt tüketimi ve gerçek yol koşullarında ortalama yakıt tüketimi testleri dikkate alınarak yapılmıştır. Serbest yavaşlama performansları değerlendirilerek yapılan kıyaslama sonucunda her iki aracın ihmal edilebilir bir fark ile benzer aerodinamik sürtünme katsayına sahip olduğu tespit edilmiştir. Buna karşın, sadece motor, yakıt sistemi ve yakıt deposu değiştirilmiş olan LNG yakıtlı çekicinin hızlanma performansının dizel araca göre düşük olduğu görülmüştür. Uzun menzilli gerçek yol koşullarının dikkate alındığı testlerde ise LNG yakıtlı araç %27 oranında daha düşük bir yakıt maliyeti ile belirtilen mesafeyi kat etmiştir. Bu ön sonuçlar ile ilk satın alım %30 daha pahalı olan LNG yakıtlı araçların uzun mesafe kullanılmaları durumunda satın alınabilir ikame bir araç olduğunu ortaya çıkmıştır. Ayrıca, daha düşük emisyon salınımına sebebiyet veren LNG yakıtlı araçların diğer petrol türevli yakıt kullanan araçlar yerine tercih edilmesi hem enerjinin etkin kullanımı hem de çevresel faktörler açısından bir avantaj olacaktır. İlerleyen aşamalarda özellikle LNG yakıtlı motorun maksimum tork aralığına daha uygun bir şanzıman yazılımının adaptasyonu ile LNG yakıtlı araçların performans anlamında dizel yakıtlı araçları yakalaması hedeflenmektedir.

Teşekkür

Yazarlar bu çalışmaya olan destekleri için BMC Otomotiv Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi'ne teşekkür etmektedir.

Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Bekir Barış ERÇELİK, bilimsel yayın araştırması, deneylerin yapılması ve sonuçların hesaplanması, verilerin görselleştirilmesi ve makalenin oluşturulması; Bahadır DOĞAN, metodoloji, makalenin oluşturulması ve yazılması aşamalarında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

Arteconi, A., Brandoni, C., Evangelista, D. ve Polonara, F. (2010). Life-cycle greenhouse gas analysis of LNG as a heavy vehicle fuel in Europe. *Applied Energy*, 87(6), 2005-2013.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.11.012>

Atabani, A. E., Badruddin, I. A., Mekhilef, S. ve 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. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.092>

Chen, Z., Zhang, F., Xu, B., Zhang, Q. ve Liu, J. (2017). Influence of methane content on a LNG heavy-duty engine with high compression ratio. *Energy*, 128, 329-336. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.039>

Enerdata. (2014). Effect of price reforms on the demand of LNG in transport in China. Erişim adresi: <https://www.enerdata.net/publications/executive-briefing/china-lng-price-reforms-effets.html>

Engerer, H. ve Horn M. (2010). Natural gas vehicles: An option for Europe. *Energy Policy*, 38(2), 1017-1029. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.10.054>

Erçelik, B. B. (2021). *Ağır Ticari Araçlarda Dizel Yakıt Yerine Sivilaştırılmış Doğal Gaz (LNG) Kullanımının Deneysel Olarak İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi), Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

European Commission. (2013). *Clean Power for Transport: A European alternative fuels strategy*. European Commission, Brussels. Erişim adresi: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2013:0017:FIN:EN:PDF>

European Commission. (2016). *Review study on the Regulation (EC) No 1222/2009 on the labelling of tyres*. Erişim adresi:

https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Study%20in%20support%20of%20the%20Review%20of%20the%20Tyre%20Labelling%20Regulation_final.pdf

European Commission. (2020). *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*. European Commission, Brussels. Erişim adresi: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/ac9cd214-53c6-11ea-aece-01aa75ed71a1/language-en>

Hao, H., Liu, Z., Zhao, F. ve Li, W. (2016). Natural gas as vehicle fuel in China: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 521-533. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.015>

- He, F., Li, Y. M., Wu, H. B. ve Li, H. (2013). A Performance Study of Coke Oven Gas Vehicle. *Advanced Materials Research*, 724-725, 1201-1205. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.724-725.1201>
- Ligterink, N. E., Mensch, P., Cuelenaere, R. F. A., Hausberger, S., Leitner, D. ve Silberholz, G. (2015). *Correction algorithms for WLTP chassis dynamometer and coast-down testing*. Erişim adresi: https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/transport/vehicles/docs/wltp_correction_algorithm_en.pdf
- Moriarty, P. ve Honnery, D. (2016). Global Transport Energy Consumption. İçinde *Alternative Energy and Shale Gas Encyclopedia* (1., ss. 651-656). New Jersey, USA: John Wiley ve Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781119066354.ch61>
- NGV Global. (2019). Current Natural Gas Vehicle Statistics. Erişim adresi: <https://www.iangv.org/current-ngv-stats/>
- Nwafor, O. M. I. (2000). Effect of advanced injection timing on the performance of natural gas in diesel engines. *Sadhana*, 25(1), 11-20. <https://doi.org/10.1007/bf02703803>
- Official Journal of the 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*. Official Journal of the European Union. Erişim adresi: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0094&from=EN>
- Osorio-Tejada, J. L., Llera-Sastresa, E. ve 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. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.02.046>
- Smajla, I., Karasalihović Sedlar, D., Drljača, B. ve Jukić, L. (2019). Fuel Switch to LNG in Heavy Truck Traffic. *Energies*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/en12030515>
- Song, H., Ou, X., Yuan, J., Yu, M. ve 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. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.011>
- Tabak, J. (2009). *Natural Gas and Hydrogen*. New York, USA: Infobase Publishing.
- Tang, Q., Fu, J., Liu, J., Zhou, F., Yuan, Z. ve Xu, Z. (2016). Performance improvement of liquefied natural gas (LNG) engine through intake air supply. *Applied Thermal Engineering*, 103, 1351-1361. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.031>
- The International Council on Clean Transportation. (2018). *Fuel consumption testing of tractor trailers in the European Union and the United States*. European Commission. Erişim adresi: https://theicct.org/sites/default/files/publications/EU_HDV_Testing_BriefingPaper_20180515a.pdf
- Thiruvengadam, A., Carder, D. K., Krishnamurthy, M. ve Gautam, M. (2010). Comparison of Regulated and Unregulated Exhaust Emissions from a Fleet of Multi-Fuel Solid Resource Collection Vehicles. *ASME 2010 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference*, 139-147. San Antonio, Texas, USA. <https://doi.org/10.1115/icef2010-35053>
- United Nations. (2017). *World Population Prospects*. United Nations. Erişim adresi: https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2017_Volume-I_Comprehensive-Tables.pdf
- U.S. Department of Energy. (1999). *Using LNG as a Fuel in Heavy-Duty Tractors*. National Renewable Energy Laboratory, Colorado. Erişim adresi: <https://www.nrel.gov/docs/fy99osti/24146.pdf>
- U.S. Department of Energy. (1996). *Alternative Fuel Transit Buses*. Oak Ridge: National Renewable Energy Laboratory. Erişim adresi: <https://afdc.energy.gov/files/pdfs/transbus.pdf>
- U.S. Department of Energy. (2000a). *Dallas Area Rapid Transits's LNG Bus Fleet: Final Results*. Oak Ridge: National Renewable Energy Laboratory. Erişim adresi: <https://www.nrel.gov/docs/fy00osti/28124.pdf>
- U.S. Department of Energy. (2000b). *Raley's LNG Truck Fleet: Final Results*. Oak Ridge: National Renewable Energy Laboratory. Erişim adresi: <https://www.nrel.gov/docs/fy00osti/27678.pdf>
- U.S. Department of Energy. (2001). *Waste Management's LNG Truck Fleet: Final Results*. Oak Ridge: National Renewable Energy Laboratory. Erişim adresi: <https://www.nrel.gov/docs/fy01osti/29073.pdf>
- U.S. Department of Energy. (2004). *Norcal Prototype LNG Truck Fleet: Final Results*. Oak Ridge: National Renewable Energy Laboratory. Erişim adresi: <https://afdc.energy.gov/files/pdfs/35427.pdf>

U.S. Energy Information Administration. (2016). *International Energy Outlook 2016*. Erişim adresi: [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2016).pdf)

World Energy Council. (2011). *Global Transport Scenarios 2050*. World Energy Council. Erişim adresi: https://www.worldenergy.org/assets/downloads/wec_transport_scenarios_2050.pdf

Yan, F., Xu, B., Liu, N. ve Zheng, Z. (2016). Study on the Construction of an Urban Liquefied Natural Gas Bus and Its Cold Energy Recovery. *Energy Procedia*, 104, 515-519. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.12.087>

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. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.06.012>

Zhang, S., Wu, Y., Liu, H., Huang, R., Yang, L., Li, Z., Fu, L. ve Hao, J. (2014). Real-world fuel consumption and CO2 emissions of urban public buses in Beijing. *Applied Energy*, 113, 1645-1655. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.017>