



Dizel Yakıtına Farklı Ağır Alkoller (1-Bütanol, 1-Pentanol ve 1-Hekzanol) İlave Edilmesinin Tek Silindirli Bir Dizel Motorunun Performans, Yanma ve Egzoz Emisyon Karakteristiklerine Etkileri

The Effects of Different Higher Alcohols (1-Butanol, 1-Pentanol, 1-Hexanol) Addition into the Diesel Fuel on the Performance, Combustion, and Exhaust Emission Characteristics of a Single-Cylinder Diesel Engine

Murat Kadir Yeşilyurt*

*Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 66200, Yozgat, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 17/03/2020

Kabul / Accepted: 01/04/2020

Çevrimiçi Basım / Published Online: 19/04/2020

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2020

Öz
Petrol tüketiminin artmasına bağlı olarak tüm dünyada rezervlerin gün geçtikçe azalması ve çevre kirliliğinin ciddi boyutlara ulaşması araştırmacıları içten yanmalı motorlar için alternatif ve temiz enerji kaynakları araştırmaya yönlendirmiştir. Kısa zincirli alkollerin (metanol ve etanol) düşük enerji içerikleri ve setan sayıları gibi olumsuz özelliklerinden dolayı kimyasal yapılarında dört ya da daha fazla karbon atomu içeren ağır alkoller, dizel motorlar için ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmanın amacı, dizel yakıtına hacimsel olarak %15 oranlarında 1-bütanol, 1-pentanol ve 1-hekzanol alkollerini eklenerek hazırlanan alternatif yakıtları (Bt15: %15 1-bütanol + %85 dizel yakıtı, Pt15: %15 1-pentanol + %85 dizel yakıtı, Hk15: %15 1-hekzanol + %85 dizel yakıtı) tek silindirli, dört zamanlı, direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda 1500 d/d sabit motor devri ve farklı yüklerde (%25, %50, %75 ve %100) test ederek performans, emisyon ve yanma karakteristiklerini referans dizel yakıt (D100) ile karşılaştırmaktır. Sonuç olarak, alkollerin dizel yakıtına göre düşük kalori değerlerine sahip olmalarından dolayı, alkol karışımli yakıtlar fren termal veriminin azalmasına, fren özgül yakıt tüketiminin ise yükselmesine neden olmuştur. %100 motor yükünde; D100, Bt15, Pt15 ve Hk15 yakıtlarının maksimum net ısı salımı hızları sırasıyla 29,55 J/°, 31,14 J/°, 32,66 J/° ve 33,80 J/° olarak bulunurken, maksimum silindir basınçları ise sırasıyla 46,97 bar, 47,76 bar, 48,41 bar ve 48,91 bar olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca alkol karışımli yakıtların düşük setan sayılarından dolayı tutuşma gecikmesi süresini dizel yakıtına göre genel olarak artırdığı belirlenmiştir. Dizel yakıtına alkol ilavesi ile CO, HC ve NO_x emisyonları ile egzoz gazı sıcaklıkları azalırken, CO₂ ve O₂ emisyonları ise artmıştır. Tüm deneysel sonuçlar değerlendirildiğinde, Hk15 karışımının performans, emisyon ve yanma özellikleri açısından en iyi sonuçları verdiği söylenebilir.

Anahtar Kelimeler

“Yanma karakteristikleri, egzoz emisyonları, performans, ağır alkol, dizel motor”

Abstract

The reduction of petroleum reserves day by day all over the world depending on the increase in petroleum consumption and the reaching serious levels of environmental pollution have led researchers to search alternative and clean energy sources for internal combustion engines. The higher alcohols having four or more carbon atoms in their chemical structure come to the fore for diesel engines due to the negative properties of short-chain alcohols (methanol and ethanol) such as low energy content and cetane number. The aim of this study is to compare the performance, emissions, and combustion characteristics of a single-cylinder, four-stroke, direct injection diesel engine operating with alternative fuels which contains 15% by volume of 1-butanol, 1-pentanol and 1-hexanol alcohols (Bt15: 15% 1-butanol + 85% diesel fuel, Pt15: 15% 1-pentanol + 85% diesel fuel, Hx15: 15% 1-hexanol + 85% diesel fuel) with reference diesel fuel (D100) by testing at a fixed engine speed of 1500 rpm and different loads (25%, 50%, 75%, and 100%). As a result, it is noticed to be that alcohol-infused fuel blends caused to decrease the brake thermal efficiency and increase brake specific fuel consumption due to the lesser calorific values of the alcohols according to the diesel fuel. At 100% engine load, the maximum cylinder pressures were observed as 46.97 bar, 47.76 bar, 48.41 bar, and 48.91 bar, respectively while the peak net heat release rates of D100, Bt15, Pt15, and Hx15 were found to be at 29.55 J/°, 31.14 J/°, 32.66 J/°, and 33.80 J/°, respectively. Besides, it is determined that the ignition delay period of the alcohol-treated fuel blends is generally extended as compared to the diesel fuel because of the lower cetane number of alcohol. CO₂ and O₂ emissions increased with the addition of alcohol to diesel fuel while CO, HC and NO_x emissions as well as exhaust gas temperatures reduced. When all experimental results were evaluated, it could be noted that the Hx15 blend gave the best results in terms of performance, emissions and combustion properties.

Key Words

“Combustion characteristics, exhaust emissions, performance, higher alcohol, diesel engine”

Terminoloji

<i>HC</i>	<i>Yanmamış hidrokarbon</i>
<i>CO</i>	<i>Karbon monoksit</i>
<i>B15</i>	<i>%15 biyodizel + %85 dizel yakıtı</i>
<i>B20</i>	<i>%20 biyodizel + %80 dizel yakıtı</i>
<i>B50</i>	<i>%50 biyodizel + %50 dizel yakıtı</i>
<i>CO₂</i>	<i>Karbon dioksit</i>
<i>NO_x</i>	<i>Azot oksitler</i>
<i>NO</i>	<i>Azot monoksit</i>
<i>NO₂</i>	<i>Azot dioksit</i>
<i>O₂</i>	<i>Oksijen</i>
<i>ASTM</i>	<i>American society for testing and materials</i>
<i>Bt15</i>	<i>%15 1-butanol + %85 dizel yakıtı</i>
<i>Pt15</i>	<i>%15 1-pentanol + %85 dizel yakıtı</i>
<i>Hk15</i>	<i>%15 1-hekzanol + %85 dizel yakıtı</i>
<i>D100</i>	<i>%100 dizel yakıtı</i>
<i>KMA, θ</i>	<i>Krank mili açısı</i>
<i>NISH</i>	<i>Net ısı salımı hızı</i>
<i>Q_{net}</i>	<i>Enerji miktarı</i>
<i>γ</i>	<i>Özgül ısılar oranı</i>
<i>P</i>	<i>Silindir basıncı</i>
<i>V</i>	<i>Silindir hacmi</i>
<i>EB</i>	<i>Enjeksiyon başlangıcı</i>
<i>YB</i>	<i>Yanma başlangıcı</i>
<i>TG</i>	<i>Tutuşma gecikmesi</i>
<i>FÖYT</i>	<i>Fren özgül yakıt tüketimi</i>
<i>FÖET</i>	<i>Fren özgül enerji tüketimi</i>
<i>η_t</i>	<i>Fren termal verimi</i>
<i>EGS</i>	<i>Egzoz gazı sıcaklığı</i>
<i>R</i>	<i>Bağımsız değişkenlere bağlı bir faktör</i>
<i>x</i>	<i>Bağımsız değişken</i>
<i>w</i>	<i>Belirsizlik değeri</i>
<i>MSBA</i>	<i>Maksimum silindir basıncının oluştuğu krank mili açısı</i>
<i>MSB</i>	<i>Maksimum silindir basıncı</i>
<i>MOGS</i>	<i>Maksimum ortalama silindir gaz sıcaklığı</i>
<i>MOGSA</i>	<i>Maksimum ortalama silindir gaz sıcaklığının oluştuğu krank mili açısı</i>
<i>MNISH</i>	<i>Maksimum net ısı salımı hızı</i>
<i>MNISHA</i>	<i>Maksimum net ısı salımı hızının oluştuğu krank mili açısı</i>
<i>MKIS</i>	<i>Kümülatif ısı salımı</i>
<i>MKIS</i>	<i>Maksimum kümülatif ısı salımı</i>
<i>MKISA</i>	<i>Maksimum kümülatif ısı salımının oluştuğu krank mili açısı</i>
<i>MBAO</i>	<i>Maksimum basınç artış oranı</i>
<i>MBAOA</i>	<i>Maksimum basınç artış oranının oluştuğu krank mili açısı</i>
<i>P_e</i>	<i>Efektif motor gücü</i>
<i>$\dot{m}_{yakıt}$</i>	<i>Yakıtın kütleli debisi</i>
<i>Q_{AID}</i>	<i>Yakıtın alt ısı değeri</i>
<i>\dot{m}_h</i>	<i>Havanın kütleli debisi</i>
<i>ρ_h</i>	<i>Havanın yoğunluğu</i>
<i>N</i>	<i>Motor devri</i>
<i>T</i>	<i>Motor torku</i>
<i>m</i>	<i>Motor yükü</i>
<i>g</i>	<i>Yer çekimi ivmesi</i>
<i>l</i>	<i>Bağlantı kolu uzunluğu</i>
<i>B90D5H5</i>	<i>%90 biyodizel + %5 dizel + %5 hekzanol</i>
<i>ÜÖN</i>	<i>Üst ölü nokta</i>

1. Giriş

Dizel motorlar, benzinle motorlara kıyasla daha yüksek yakıt dönüşüm verimliliği, daha yüksek tork kapasitesi, daha yüksek dayanıklılık ve daha düşük yanmamış hidrokarbon (HC) ve karbon monoksit (CO) emisyonlarından dolayı tüm dünyada bir çok endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Kumar ve ark., 2016). Enerji ihtiyacının artması, petrol rezervlerinin giderek azalması, petrol fiyatlarındaki dalgalanmalar ve özellikle fosil kökenli yakıtların kullanılmasıyla birlikte hava kirliliği ile ilgili endişeler nedeniyle araştırmacıların alternatif, sürdürülebilir ve temiz yakıtlara olan ilgileri her geçen gün artmaktadır (Emiroğlu ve Şen, 2018a). Biyolojik kökenli yakıtların içten yanmalı motorlarda kullanımı, emisyonların azaltılmasında kullanılabilir olan önemli bir adımdır (Park ve ark., 2012). Bu nedenle alkollerin motorlarda alternatif yakıt olarak tercih edilmesi ile hem çevresel kirlenmeler azalacak hem de petrole olan bağımlılık düşecektir.

Alkoller, sıvı fazda olmaları ve bünyelerinde yüksek oksijen içermeleri nedeniyle uygun bir dizel yakıt katkı maddesi olarak düşünülmektedir (Kumar ve ark., 2013). Birçok alkol çeşidi bulunmasına rağmen kısa zincirli alkoller (hafif alkoller) içten yanmalı motorlarda birçok araştırmacı tarafından test edilmiştir (Jamrozik ve ark., 2019; Ma ve ark., 2019; Duraisamy ve ark., 2020). Kısa zincirli alkoller, üç ya da daha az karbon atomu içeren alkollerdir. Bu alkollerin gelişmiş üretim teknolojilerinin bulunması ve motorların emisyon seviyelerini azaltılmasının yanı sıra yanma özelliklerini de iyileştirmesi en önemli avantajlarından (Xingcai ve ark., 2004). Ancak, düşük setan sayıları, yüksek gizli buharlaşma ısıları, dizel yakıt ile karışabilme ve kararlılık sorunları hafif alkollerin dizel motorlarda kullanımını sınırlandırmaktadır (Li ve ark., 2019).

Moleküler yapılarında, dört ya da daha fazla karbon atomu içeren uzun zincirli alkoller (ağır alkoller), düşük karbonlu alkollere göre dizel yakıt katkı maddesi olarak düşünüldüğünde ek avantajlar sağlayabilmektedir. Bütanol (4 karbon), pentanol (5 karbon), heksanol (6 karbon), heptanol (7 karbon), oktanol (8 karbon), dodekanol (12 karbon) ve fitol (20 karbon) ağır alkollerden bazılarıdır (Kumar ve Saravanan, 2016). Bu alkollerin yüksek setan sayılarına ve enerji içeriklerine sahip olmaları en büyük artılarıdır. Ayrıca, ağır alkoller daha iyi karışım oluşturma kabiliyetlerinden dolayı dizel yakıtlar ile daha yüksek karışım oranlarında harmanlanabilirler. Üstelik, ağır alkollerin sahip olduğu zayıf higroskopik özelliklerinden dolayı depolama ve taşıma sırasında herhangi bir olumsuz sorun oluşturmamaktadır (Ma ve ark., 2017). Diğer bir ifadeyle, ağır alkoller düşük korozyon etkilerinden dolayı yakıt enjeksiyon sistemine ve iletim hatlarına zarar vermemektedir (Rasskazchikova ve ark., 2004). Mevcut yakıt dağıtım altyapısı içinde daha güvenli depolama ve kullanım sağlayan yüksek parlama noktalarına sahiptirler (Doğan, 2011). Uzun zincirli alkoller daha düşük oksijen içeriğine sahip olmalarına rağmen hava/yakıt karışımının yeterli miktarda oluşmasına izin veren nispeten daha uzun tutuşma gecikmesi (TG) sayesinde ani yanma fazını ve dolayısıyla difüzyon yanma fazını iyileştirebilme özellikleri bulunmaktadır. (Kumar ve Saravanan, 2016). Ayrıca ağır alkollerin üretimi sırasında diğer hafif alkollere göre enerji tüketim seviyeleri düşüktür. Çünkü büyük makro molekülleri parçalamanın biyolojik süreci daha erken sonlanabilir (Campos-Fernández ve ark., 2012).

Bütanol, n-bütanol, n-bütanol alkol ya da bütan-1-ol olarak da adlandırılan bütanol alkol; renksiz, berrak, suyla karışmayan ve biyolojik kökenli kaynaklardan elde edilebilen bir alkoldür. Bütanol kalıcı olmayan orta dereceli bir kokuya sahiptir. Plastik, kozmetik, boya, yiyecek ve temelde izobütanol asetat üretiminde çözücü olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda, motor yağlarında pas ve yıpranmaya karşı kullanılan maddelere ilave edilmektedir. Bütanol zehirli bir alkoldür. Yanma eğilimi gösterir. Isıl değeri dizel yakıtından azdır. %40 oranına kadar dizel yakıtına katılarak kullanılabilir (Özer, 2010). Bütanol ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, dizel yakıtına ve farklı hammaddelerden üretilmiş biyodizel yakıtına ilave edilerek kullanıldığı gibi bununla birlikte bu üç yakıtın değişik oranlarda harmanlanarak da sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda kullanıldığı çalışmalara rastlanmıştır. Bu çalışmalardan bazıları şu şekilde özetlemek mümkündür. Rakopoulos ve ark. (2010) dizel yakıtına hacimsel olarak %8, %16 ve %24 oranlarında n-bütanol ilave ederek hazırladıkları yakıtları tek silindirli, dört-zamanlı, direkt enjeksiyonlu bir araştırma motorunda sabit devir (2000 d/d) ve üç farklı motor yükü altında test ederek performans ve emisyon değişimlerini dizel yakıt ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, bütanol ilavesi ile duman yoğunluğu, azot oksit (NO_x) ve CO emisyonlarının azaldığını, HC emisyonunun ise arttığı tespit etmişlerdir. Chen ve ark. (2013) dizel yakıtına bütanol katılmasının duman emisyonunu azalttığını ve düşük yüklerde NO_x emisyonlarını düşürdüğünü belirtmişlerdir. Yılmaz ve ark. (2014) atık kızartma yağı biyodizeline hacimsel olarak %5, %10 ve %20 oranlarında bütanol ilave etmişler ve test yakıtlarını iki silindirli, dört zamanlı, indirekt püskürtmeli bir dizel motorda denemişlerdir. Bütanol ilavesinin biyodizel yakıtına göre egzoz gazı sıcaklıklarını ve NO_x değerlerini düşürdüğünü, CO ve HC emisyonlarını ise yükselttiğini bulmuşlardır. Ayrıca, bütanolün kalorifik değerinin dizel yakıttan az olmasından dolayı özgül yakıt tüketimi değerlerinin arttığını belirlemişlerdir. Şahin ve ark. (2015) turbo şarjlı bir motorda dizel/n-bütanol karışımlarını kullanmışlar ve sonuçta duman yoğunluğunun azaldığını, düşük alkol konsantrasyonlarında NO_x emisyonlarının hafifçe azaldığını, yüksek oranlarda ise tam tersi bir durumun söz konusu olduğunu bildirmişlerdir. Atmanlı (2016) aynı orandaki atık kızartma yağı biyodizeli/dizel yakıt karışımına %20 oranlarında propanol, n-bütanol ve 1-pentanol ilavesi yaparak hazırladığı üçlü alternatif yakıt karışımlarını dört silindirli, dört zamanlı, hava soğutmalı bir dizel motorda 1800 d/d sabit motor devri ve 1-9 kW yük koşulları altında test etmiş ve sonuçları B50 (50% biyodizel + %50 dizel yakıtı) karışım yakıtı ile karşılaştırmıştır. Alkollerin enerji içeriklerinin birbirlerinden farklı olmasından dolayı n-bütanol ve 1-pentanol karışımı yakıtların özgül yakıt tüketimlerinin B50 yakıtına göre sırasıyla %0,89 ve %0,95 oranlarında düşük olduğunu buna karşın propanol ilave edilen yakıtın ise %5,28 oranında özgül yakıt tüketimini artırdığını tespit etmiştir. Propanol, n-bütanol ve 1-pentanol katılan yakıt örnekleri CO emisyonlarını sırasıyla %39,95, %38,83 ve %12,60 oranlarında artırırken, NO_x emisyonlarını ise sırasıyla %15,05, %19,27 ve %27,44 oranlarında azaltmıştır. İbrahim (2016) %10 ve %20 oranlarında alkol ihtiva eden bütanol/atık kızartma yağı biyodizeli/dizel yakıt karışımlarını denediği çalışmada, bütanol ilavesinin performans, emisyon ve yanma davranışları noktasında ihmal edilebilir değişimlere yol açtığını ve dizel motorlarda bütanol kullanılmadan önce motorların optimize edilmesi gerektiğini ifade etmiştir. Nabi ve ark. (2017) dizel yakıtına n-bütanol katılmasının motor performansında önemli bir değişikliğe neden olmadığını, ancak birçok egzoz emisyonunu düşürdüğünü bildirmişlerdir. Nanthagopal ve ark. (2018) çalışmalarında *Calophyllum inophyllum*

biyodizeline yüksek oranlarda (%40, %50 ve %60) 1-butanol ve 1-pentanol ilave ederek hazırladıkları yakıtları performans, emisyon ve yanma karakteristikleri açısından karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, her iki alkolün dizel bir motorda herhangi bir modifikasyona gerek duyulmadan katkı maddesi olarak kullanılabilmesini, saf biyodizel yakıtına kıyasla performansı kötüleştirdiğini, NO_x hariç diğer emisyonları azalttığını ve ağır alkollerin yüksek karışım oranlarından ziyade performans ve emisyonları iyileştirmek için daha düşük oranlarda kullanılması gerektiğini vurgulamışlardır. Ashok ve ark. (2019a) *Calophyllum inophyllum* biyodizeline %20 oranında izobütanol ilavesinin fren termal verimini (FTV) %3 oranında iyileştirdiğini, alkol/biyodizel/dizel üçlü karışımlarının CO emisyonunu %29-60 aralığında, NO_x emisyonunu %12 oranında ve duman emisyonunu önemli miktarda azalttığını belirlemişlerdir. Isı salımı hızlarının ise tüm ikili ve üçlü karışımlarda daha yüksek meydana geldiğini tespit etmişlerdir.

Pentanol; n-pentanol, n-amil alkol ya da pentan-1-ol olarak adlandırılmaktadır ve yenilenebilir hammaddelerden üretilmektedir. Setan sayısı ve enerji içeriği diğer alkollere göre fazladır. %45 oranına kadar dizel yakıtına katılarak kullanılabilir (Li ve ark., 2015a). Literatürdeki kaynaklar incelendiğinde pentanol ile ilgili çalışma sayısının sınırlı olduğu ve genel olarak biyodizel ve biyodizel/dizel yakıt karışımlarına harmanlanarak dizel motorlarda kullanıldığı görülmüştür. Örneğin, Campos-Fernández ve ark. (2013) dizel yakıtına hacimsel olarak %10, %15, %20 ve %25 oranlarında 1-pentanol ilave etmiş ve bir dizel motorda performans testleri gerçekleştirmiştir. Karışım yakıt kullanıldığında motor gücü, FTV ve özgül yakıt tüketimi değerlerinde önemsiz değişikliklerin meydana geldiğini, motorun çalıştırılması esnasında herhangi bir zorluk ile karşılaşmadıklarını bildirmişlerdir. Li ve ark. (2015b) pentanolün, dizel yakıtın aksine daha düşük bir tepe basıncı artış oranıyla daha yumuşak bir ısı salımı oranı elde etmek için belirgin özellikler sunduğunu gözlemlemişlerdir. İmradul ve ark. (2016a) tamanu yağı biyodizeli/dizel yakıt karışımlarına hacimsel olarak %15 ve %20 oranlarında n-bütanol ve 1-pentanol eklemişler ve tek silindirli, dört zamanlı, direkt püskürtmeli bir dizel motorda test ederek motor performans ve egzoz emisyonlarını B15 (%15 biyodizel + %85 dizel yakıtı) ve B20 (%20 biyodizel + %80 dizel yakıtı) karışım yakıtları ile karşılaştırmışlardır. Sonuçta, B15 ve B20 yakıtlarına göre alkol ilaveli karışımların özgül yakıt tüketimlerinin azaldığını, fren güçlerinin arttığını, karbon dioksit (CO₂) ve azot monoksit (NO) emisyonlarının arttığını, CO ve HC emisyonlarını ise azaldığını gözlemlemiştir. İmradul ve ark. (2016b) bir başka çalışmalarında ise dizel yakıtına %10, %15 ve %20 oranlarında tamanu yağı biyodizeli ve pentanol ilave etmişler, motor performansı ve egzoz emisyon karakteristiklerini B20 yakıtı ile karşılaştırmışlardır. Pentanol ilavesi ile özgül yakıt tüketimi ortalama %8,7 oranında azalırken, FTV %15 oranında ve fren gücü %10,4 oranında artmıştır. Alkol ilavesinin silindir basıncını artırdığını, yanmayı iyileştirdiğini ve yanma başlangıcını geciktirdiğini belirlemişlerdir. Ayrıca, pentanolün CO, HC ve CO₂ emisyonlarını ortalama %21,2, %33,1, %43,45 ve %2,5 oranlarında düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Zhu ve ark. (2016) atık kızartma yağından ürettikleri biyodizeli hacimsel olarak sırasıyla %10, %20 ve %30 oranlarında n-pentanol ile harmanlamışlar ve dört silindirli- dört zamanlı bir dizel motorda denemişlerdir. Karışım içerisindeki pentanol oranının artmasına bağlı olarak yanma başlangıcının ve maksimum ısı salımının oluştuğu krank açısının üst ölü noktadan (ÜÖN) uzaklaştığını, silindir basıncının ve ısı salımı hızının yükseldiğini, HC ve CO emisyonlarının kötüleştiğini ortaya koymuşlardır. Yilmaz ve Atmanlı (2017a) yeni nesil ağır alkol olarak pentanolü %35 oranına kadar dizel yakıt ile harmanlamışlar ve bir dizel motorda deneysel olarak değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak, egzoz gazı sıcaklığını, CO ve NO_x emisyonlarını azaltması nedeniyle %5 pentanol içeren yakıt karışımının dizel motorlar için potansiyel bir alternatif yakıt adayı olduğunu bildirmişlerdir. Pan ve ark. (2019) dizel yakıtına %50 oranında n-pentanol ilavesinin atomizasyon karakteristiklerini iyileştirdiğini, duman koyuluğunu azalttığını, ancak özgül yakıt tüketimi ile HC emisyonlarını önemli ölçüde artırdığını bulmuşlardır. Sridhar ve ark. (2020) %20 1-pentanol/%80 atık kızartma yağı biyodizeli ve 20% 1-pentanol/%80 dizel yakıt karışımlarının performans ve emisyon sonuçlarını hem dizel yakıt ile hem de %100 biyodizel ile karşılaştırmışlardır. 1-pentanolün NO_x, HC ve CO emisyonlarını azaltırken FTV'de kötüleşmeye neden olduğunu ortaya koymuşlardır.

Heksanol, kimyasal zincirinde altı adet karbon atomu içeren organik bir ağır alkoldür. Kimyasal formülü CH₃(CH₂)₅OH'tir. Renksiz bir sıvıdır, suda az çözünür, ancak dietil eter ve etanol ile karışabilir. Endüstriyel olarak ekinlerden, mısırlardan, sebzelerden, tarımsal gıda ve içecek işlemeden kaynaklanan atıklar gibi diğer hammaddelerden elde edilebilen etil alkolün oligomerizasyonu ile üretilir. Bundan dolayı yenilenebilir bir katkı maddesi olarak motorlarda değerlendirilebilir (Sundar ve Saravanan, 2011). Literatürde heksanol ile ilgili sınırlı sayıda çalışma olduğu açıkça söylenebilir. Bunlardan bazıları özet olarak sunulmuştur. Aloko ve ark. (2007) heksanol/dizel yakıt karışımlarının yoğunluk, parlama noktası, viskozite gibi birçok yakıt özelliğini ölçmüş ve bir dizel motor için ASTM (American Society for Testing and Materials) standardında verilen sınırlar değerleri karşıladıklarını belirlemişlerdir. Araştırmacılar ayrıca, %5 heksanol/%95 dizel yakıt karışımının dizel yakıtına benzer özellikler sergilediğini ve anilin noktasının yüksek olduğunu, dolayısıyla yakıtın daha az emisyonla çevreyi çok fazla kirletmeyeceğini ortaya koymuşlardır. Zhang ve ark. (2008) zincir uzaması ile doğal olmayan bir metabolik süreç kullanarak heksanolün glikozdan biyosentez olasılığını göstermişlerdir. Machado ve ark. (2012) anaerobik büyüme seçimi için altı karbonlu ve sekiz karbonlu ağır alkollerin sentezini arttıran enzimlerin seçilmesine veya zenginleştirilmesine izin veren bir metot geliştirmişlerdir. Babu ve Anand (2017) bir dizel motorda %5 ve %10 oranlarında alkol ihtiva eden n-pentanol/biyodizel/dizel ve n-heksanol/biyodizel/dizel yakıt karışımlarını test etmişlerdir. Alkollerin ilave edilmesiyle performans ve yanma davranışlarının iyileştiğini, emisyonlarında azaldığını göstermişlerdir. De Pours ve ark. (2017) bir dizel motorda dizel ile %10, %20 ve %30 oranlarında 1-heksanol karışımlarını kullanmışlar ve karışım içerisindeki 1-heksanol konsantrasyonunun artışına bağlı olarak duman yoğunluğunun azaldığını ancak yüksek yüklerde NO_x emisyonlarının arttığını tespit etmişlerdir. Pandian ve ark. (2018) çalışmalarında, kaju yağından üretilen biyodizel %10 ve %20 oranlarında heksanol katmışlar ve bir dizel motorda deneyerek performans ve emisyon analizi gerçekleştirmişlerdir. Sonuçta, heksanolün CO, HC, NO_x ve duman emisyonlarını azaltıcı yönde etki yaptığını, FTV'yi düşürürken özgül yakıt tüketimini yükselttiğini belirlemişlerdir. Ashok ve ark. (2019b) *Calophyllum inophyllum* biyodizeli/dizel yakıt karışımına %30 ve %40 oranlarında heksanol ve dekanol ağır alkollerini ilave etmişler ve bir dizel motorda deneyerek sonuçları karşılaştırmışlardır. Ağır alkollerin kullanılmasıyla HC, CO, NO_x ve duman emisyonlarının azaldığını, ancak ticari boyutta bu alkollerin kullanılabilmesi için uzun süreli testlere ihtiyaç olduğunu vurgulamışlardır. Ramesh ve ark. (2019)

Calophyllum inophyllum biyodizeli/dizel yakıt karışımına hacimsel olarak %10, %15, %20, %30 ve %40 oranlarında hekzanol ilave ettikleri yakıt karışımlarında dizel yakıt miktarını (%50) sabit tutmuşlardır. Hekzanol ilavesinin HC, CO, NO_x ve duman emisyonlarını azalttığını, silindir basıncının ve ısı salımı oranı değerlerinin iyileştiğini ve bu nedenle %30 ve %40 hekzanol oranlarının ileride dizel yakıtının yerine potansiyel bir alternatif aday olabileceğini bildirmişlerdir.

Yukarıda da bahsedildiği gibi, literatürde çeşitli alkol/dizel karışım yakıtlarının kullanıldığı sıkıştırma ile ateşlemeli motorların performans ve emisyon karakteristiklerinin araştırıldığı bir çok çalışma mevcuttur. Fakat, alkol karışımlı yakıtların yanma davranışları ile ilgili literatürdeki çalışmalar performans ve emisyon çalışmalarıyla karşılaştırıldığında oldukça sınırlıdır. Kapsamlı bir analiz yürütmek için, farklı zincir uzunluklarına sahip ağır alkoller aynı motorda ve aynı test koşullarında deneyerek yanma karakteristikleri, egzoz emisyonları ve motor performansı üzerindeki etkilerini analiz etmek ve karşılaştırmak gereklidir.

Bu deneysel çalışmanın temel amacı, dizel yakıtı ile harmanlanan farklı ağır alkollerin yanma, emisyon ve performans davranışlarını sistematik olarak incelemek ve sonuçları güncel literatür ışığında tartışmaktır. Bu doğrultuda, dizel yakıtı hacimsel olarak %15 oranlarında 1-bütanol (4 karbonlu), 1-pentanol (5 karbonlu) ve 1-hekzanol (6 karbonlu) ağır alkoller ile harmanlanmışlar ve elde edilen yakıtların tamamı ve referans olarak kullanılan dizel yakıtı tek silindiri, dört zamanlı, su soğutmalı, direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda sabit devir (1500 d/d) ve farklı yük (%25, %50, %75 ve %100) koşulları altında test edilmiştir. Sonuçlar hem dizel yakıtı ile hem de birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

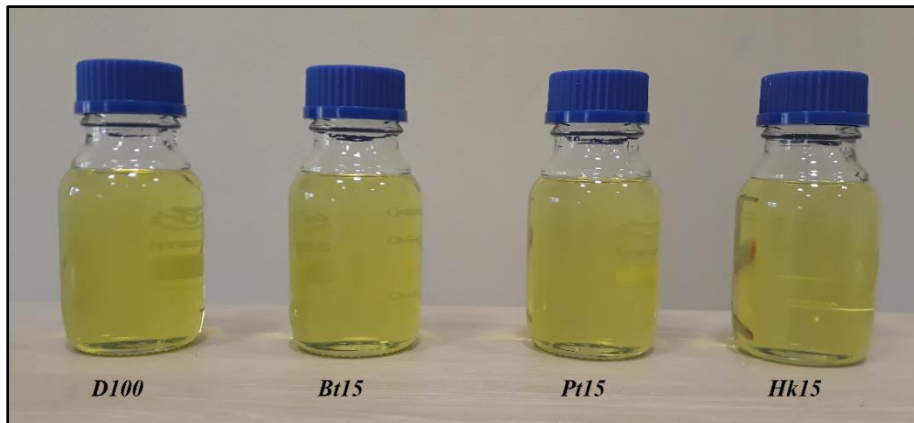
Bu çalışmada, farklı zincir uzunluklarına sahip ağır alkollerin motor performansı, egzoz emisyonları ve yanma karakteristikleri üzerine etkilerini anlayabilmek için 1-bütanol, 1-pentanol ve 1-hekzanol alkollerini petrol kökenli dizel yakıtı ile harmanlanmıştır. 1-bütanol (%99 saflıkta) Emir Kimya (Ankara, Türkiye) firmasından, 1-pentanol (%99 saflıkta) Acros Organics (New Jersey, ABD) firmasından ve 1-hekzanol (\geq %98 saflıkta) Merck (Darmstadt, Almanya) firmasından temin edilmiştir. Referans verilerini elde edebilmek için kullanılan dizel yakıtı (D100) ise Yozgat ilinde bulunan bir petrol istasyonundan satın alınmıştır.

Karışım yakıtları hazırlamak için 1-bütanol, 1-pentanol ve 1-hekzanol dizel yakıtı ile hacimsel olarak %15 oranında harmanlanmıştır. Bu karışım yakıtlar Bt15 (%15 1-bütanol + %85 dizel yakıtı), Pt15 (%15 1-pentanol + %85 dizel yakıtı) ve Hk15 (%15 1-hekzanol + %85 dizel yakıtı) olarak isimlendirilmiştir. Testlerde kullanılan yakıtların bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Alkollerin yüksek oksijen içeriğine sahip olmalarına rağmen, düşük setan sayısı ve ısıl değerleri nedeniyle zayıf yanma davranışlarını en aza indirebilmek için karışımlardaki alkol oranı %15 olarak tercih edilmiştir.

Tablo 1. Testlerde Kullanılan Yakıtların Bazı Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

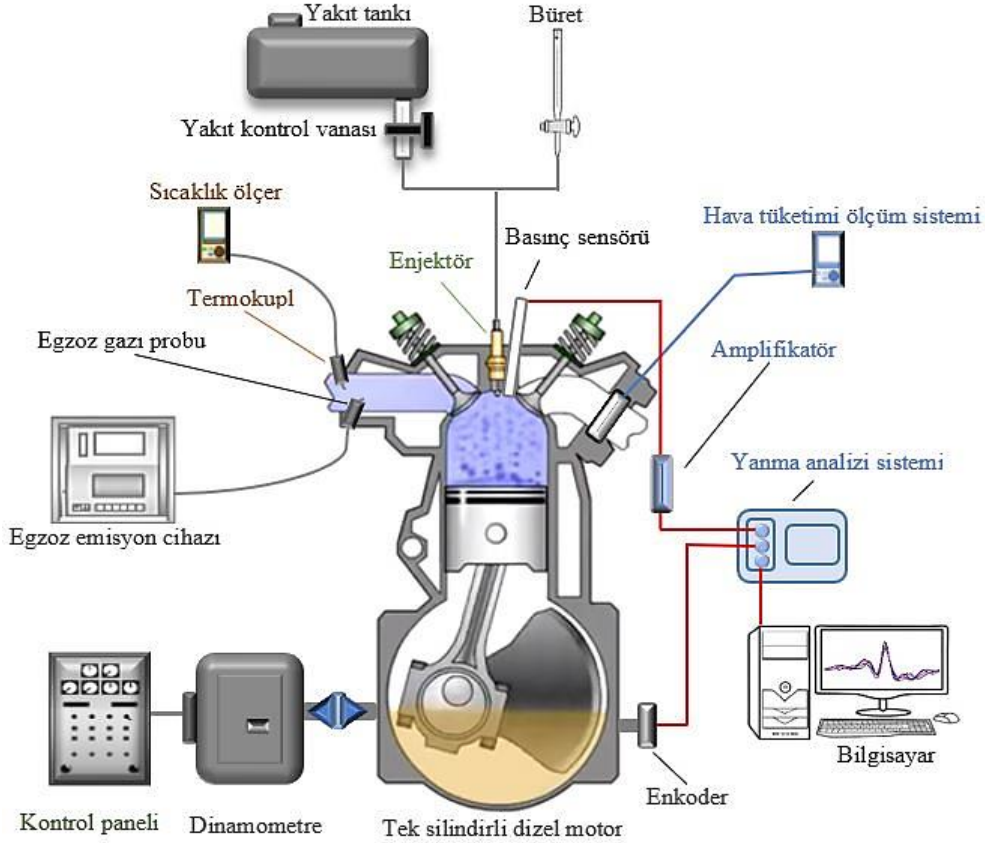
No	Özellik	Birim	D100	Bt15	Pt15	Hk15
1	Yoğunluk	g/cm ³	0,825	0,820	0,821	0,823
2	Parlama noktası	°C	59	38	49	59
3	Kinematik viskozite	mm ² /s	2,647	2,588	2,687	2,971
4	Alt ısısal değer	kJ/kg	42553	40972	41368	42035
5	Setan sayısı	-	55	49,30	49,75	50,2
6	Karbon	% m/m	87,05	83,72	84,21	84,57
7	Hidrojen	% m/m	12,95	13,03	13,05	13,06
8	Oksijen	% m/m	0	3,25	2,74	2,37
9	Karbon/hidrojen	-	6,722	6,425	6,453	6,476

Karışım yakıtlar hazırlandıktan sonra faz ayrışması oluşması ihtimaline karşı laboratuvar şartlarında Şekil 1'de gösterildiği gibi vida kapaklı cam şişelerde bir hafta boyunca bekletilmiştir. Bir haftanın sonunda herhangi bir faz ayrışmasının oluşmadığı gözlemlenmiştir. Yine de motor testlerinden önce de karışım yakıtlar tekrar karıştırılmıştır.



Şekil 1. Test Yakıtları

Motor deneyleri, motor üzerinde herhangi bir modifikasyon yapılmadan ve motorun tam yük koşulunda sabit çalışabileceği en düşük hız olan 1500 d/d motor hızında %25, %50, %75 ve %100 değişken motor yüklerinde gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan karışım yakıtlar, petrol kökenli dizel yakıt ile karşılaştırılabilmesi için aynı koşullar altında test edilmiştir. Motor test düzeneğinin şematik görünümü Şekil 2’de sunulmuştur.



Şekil 2. Motor Test Düzeneğinin Şematik Görünümü

Testler için; tek silindirli, dört zamanlı, doğal emişli, su soğutmalı, direkt püskürtmeli bir araştırma motoru kullanılmıştır. Test motorunun teknik özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Test Motorunun Teknik Özellikleri

Firma	Apex Innovations Pvt. Ltd
Marka	Kirloskar
Model	TV1
Ateşleme sistemi	Sıkıştırma ile ateşlemeli
Enjeksiyon sistemi	Direkt enjeksiyonlu
Yakıt püskürtme avansı	23° KMA
Yakıt püskürtme basıncı	210 bar
Silindir sayısı	1
Zaman sayısı	4
Silindir çapı	87.5 mm
Strok uzunluğu	110 mm
Silindir hacmi	661,45 cm ³
Sıkıştırma oranı	17.5
Maksimum motor gücü	3,5 kW
Motor hızı	1500 d/d
Soğutma sistemi	Su soğutmalı
Yakıt tankı kapasitesi	15 L
Enjektör delik sayısı	4

Motoru farklı yük koşullarında test edebilmek için krank miline su soğutmalı Baturalp Taylan marka bir eddy-current dinamometre monte edilmiştir. Yakıt tüketiminin ölçümünde standart büret düzeneği kullanılmıştır. Her bir test yakıtının 100 mL’lik tüketim süresi dijital kronometre ile bulunmuştur. Silindir içine emilen hava miktarının ölçümü bir orifismetre yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Motor suyu giriş-çıkış, motor yağı ve egzoz gazı sıcaklıklarının ölçümü için k tipi termokupllar kullanılmıştır.

Egzoz gazlarının (CO, CO₂, HC, O₂ ve NO_x) ölçümü için K-Test marka bir egzoz gazı analizörü kullanılmıştır. Bu cihaz yüzdesel ve ppm cinsinden ölçüm yapmaktadır. Egzoz gazı test cihazı; HC emisyonunu 0-4000 ppm aralığında 1 ppm hassasiyetle, CO emisyonunu 0-10 %vol aralığında 0,001 %vol hassasiyetle, CO₂ emisyonunu 0-20 %vol aralığında 0,01 %vol hassasiyetle, O₂ emisyonunu 0-25 %vol aralığında 0,01 %vol hassasiyetle ve son olarak NO_x emisyonunu 0-4000 ppm aralığında 1 ppm hassasiyetle ölçebilmektedir. Deneyler tamamlandıktan sonra ölçümü gerçekleştirilen emisyonlar literatürde önerilen eşitlikler kullanılarak g/kWh birimine dönüştürülmüştür (Pilusa ve ark., 2012; Ağbulut ve ark., 2019). Bu eşitlikler aşağıda sunulmuştur.

$$CO \left(\frac{g}{kWh} \right) = 3,591 \times 10^{-3} \times CO \text{ (ppm)} \quad (1)$$

$$NO_x \left(\frac{g}{kWh} \right) = 6,636 \times 10^{-3} \times NO_x \text{ (ppm)} \quad (2)$$

$$HC \left(\frac{g}{kWh} \right) = 2,002 \times 10^{-3} \times HC \text{ (ppm)} \quad (3)$$

$$O_2 \left(\frac{g}{kWh} \right) = 41,024 \times O_2 \text{ (% vol)} \quad (4)$$

$$CO_2 \left(\frac{g}{kWh} \right) = 63,470 \times CO_2 \text{ (% vol)} \quad (5)$$

Ayrıca silindir içinde meydana gelen yanma davranışlarını gözlemleyebilmek için silindir içi yanma analiz sistemi test motoruna eklenmiştir. Bu sistemde PCB Piezotronics marka S111A22 model 5000 psi'a kadar ölçüm yapabilen ve 1,0 mV/psi hassasiyete sahip olan bir basınçölçer kullanılmıştır. Silindir basıncı ölçümü sırasındaki hataları en aza indirebilmek için uygun kablolar tercih edilmiştir. Krank mili açısını (KMA) ve ÜÖN'yı belirleyebilmek için Kübler marka 8.KIS40.1361.0360 model enkoder kullanılmıştır. Tüm test yakıtları için elde edilen silindir basıncı ve KMA verileri National Instrument marka NI USB-6210 model bir veri işleme ünitesinde toplanmış ve net ısı salımı hızı, tutuşma gecikmesi, basınç artış oranı gibi değerler hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar bilgisayar tabanlı bir yanma analiz programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

Testlere başlamadan önce, kullanılacak olan tüm cihazların kalibrasyonları yapılmıştır. Test edilen motorun çalışma koşullarını gözlemlemek için ön testler gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, motorun kararlı bir şekilde çalışabilmesi için ihtiyacı olan çalışma süresi belirlenmiş ve böylece motor, test edilen tüm yakıt örneklerini aynı koşullarda deneyebilmek için kararlı hale getirilmiştir. Ana test süreci, ön test aşamalarında karşılaşılan tüm eksikliklerin giderilmesinden sonra başlatılmıştır. Deneyler boyunca ortam sıcaklığı 20-25 °C aralığında ve bağıl nem %60-65 aralığında ölçülmüştür. Tüm yakıt örnekleri %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde ve 1500 d/d sabit motor devrinde çalıştırılan bir dizel motorda test edilmiş ve motor performansı, egzoz gazı emisyonları ve yanma karakteristikleri belirlenmiştir. Dizel motorun silindir basıncı, yukarıda da belirtildiği gibi tüm motor yüklerinde ve her bir krank mili açısında kaydedilmiştir. Çevrimsel farklılıkları ortadan kaldırmak için en az 50 çevrimin ortalaması alınmış ve uygun bir filtreleme yöntemi kullanılarak değerler hesaplanmıştır. Ek olarak, doğru ve tatmin edici sonuçlar ortaya koyabilmek için denemeler üçer kez tekrar edilmiştir.

Test edilen tüm yakıtların net ısı salımı hızı (NISH) değerleri Eşitlik 6 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\frac{dQ_{net}}{d\theta} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\gamma - 1} V \frac{dP}{d\theta} \quad (6)$$

burada; Q_{net} yanma sonunda silindir duvarı ve yanma odası duvarına geçen enerji miktarını, θ krank mili açısını, γ özgül ısılar oranını, P silindir basıncını ve V silindir hacmini ifade etmektedir.

Enjeksiyon başlangıcı (EB) enjektörün püskürtme basıncına ulaştığı krank açısı olarak tanımlanmaktadır. Yanma başlangıcı (YB) ise NISH diyagramında eğrinin negatif bölgeden pozitif bölgeye çıktığı anda x eksenini kestiği krank açısı olarak belirlenebilmektedir (Alagumalai, 2015). EB ile YB arasındaki fark ise TG süresidir. Yakıtın enjektörde püskürtüldüğü andan itibaren silindir içerisinde ilk alev çekirdeğinin oluştuğu ana kadar geçen süreye TG denir (Acaroğlu ve ark., 2018).

Fren gücü, fren termal verimi (η_t), fren özgül yakıt tüketimi (FÖYT), fren özgül enerji tüketimi (FÖET) ve volümetrik verim (η_v) değerleri aşağıda verilen eşitlikler yarımıyla hesaplanmıştır (Doğan ve ark., 2017; Rocha ve ark., 2017; Nanthagopal ve ark., 2018).

$$P_e = \frac{2 \times \pi \times N \times T}{60 \times 1000} \quad (7)$$

$$T = m \times g \times l \quad (8)$$

$$\eta_t = \frac{P_e}{\dot{m}_{yakıt} \times Q_{AID}} \quad (9)$$

$$FÖYT = \frac{\dot{m}_{yakıt}}{P_e} \quad (10)$$

$$FÖET = FÖYT \times Q_{AID} \quad (11)$$

$$\eta_v = \frac{2 \times \dot{m}_h}{\rho_h \times V \times N} \quad (12)$$

burada; P_e efektif motor gücünü, n motor devrini, T motor torkunu, m motor yükünü, g yer çekimi ivmesini, l bağlantı kolu uzunluğunu, $\dot{m}_{yakıt}$ yakıtın kütleli debisini, Q_{AID} yakıtın alt ısı değerini, \dot{m}_h havanın kütleli debisini ve ρ_h havanın yoğunluğunu ifade etmektedir.

Deneyel çalışmalardan elde edilen sonuçlar kadar önemli bir başka parametrede, ölçülen değerlerin doğruluğudur. Bu durumu etkileyen en önemli faktör ise deneylerin yapılması sırasında ortaya çıkması muhtemel hatalardır. Burada gerçekleştirilen deneysel çalışmada kullanılan test cihazlarının hassasiyetleri, çevresel koşullar, vb. gibi parametreler dikkate alınarak test ekipmanlarının ve deneylerin toplam belirsizlikleri hesaplanmıştır. Belirsizlik analizinde Holman (2012) tarafından önerilen eşitlik uygulanmıştır. Bu eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

burada; R bağımsız değişkenlere bağlı faktörü, $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ bağımsız değişkenleri, w_R belirsizlik değerini ve w_1, w_2, \dots, w_n ise bağımsız değişkenlerin belirsizliklerini belirtmektedir.

Fren gücü, kütleli yakıt tüketimi, FTV ve FÖYT için belirsizlik değerlerinin hesaplanması Ek 1’de gösterilmiş ve sonuçlar Tablo 3’te sunulmuştur. Bu deneysel çalışmanın toplam belirsizliği ise Eşitlik 14 ile hesaplanmış ve %3,760 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak elde edilen belirsizlik değerinin izin verilen sınırlar içerisinde olduğu söylenebilir (Rajak ve ark., 2019; Shrivastava ve ark., 2020).

Tablo 3. Ölçülen ve hesaplanan parametrelerin belirsizlik değerleri

No	Parametre	Ölçüm aralığı	Hassasiyet	Belirsizlik (%)
1	Motor gücü	0-3.5 kW	$\pm 0,3$ kW	1,668
2	Motor hızı	0-9999 d/d	± 1 d/d	0,067
3	Motor yükü	0-12 kg	$\pm 0,1$ kg	1,67
4	Kütleli yakıt tüketimi	-	-	0,968
5	Egzoz gazı sıcaklığı (EGS)	-	$\pm 0,1$ °C	1,0
6	Dijital kronometre	-	$\pm 0,2$ s	0,2
7	Büret	0-100 cc	$\pm 0,1$ cc	1,0
8	Basınç sensörü	0-5000 psi	1,0 mV/psi	1,0
9	Enkoder	0-360°	$\pm 1^\circ$	0,2
10	η_t	-	-	1,929
11	FÖYT	-	-	1,929
12	Hava tüketimi	-	-	1,0
13	CO	0-10 % vol	$\pm 0,001$	1,0
14	HC	0-4000 ppm	± 1 ppm	1,5
15	CO ₂	0-20 % vol	$\pm 0,01$	0,9
16	NO _x	0-4000 ppm	± 1 ppm	0,8
17	O ₂	0-25 % vol	$\pm 0,01$	1,0

$$\text{Toplam belirsizlik} = \sqrt{\left\{ (w_{\dot{m}_{yakıt}})^2 + (w_{\eta_t})^2 + (w_{P_e})^2 + (w_{CO})^2 + (w_{NO_x})^2 + (w_{HC})^2 + (w_{O_2})^2 + (w_{CO_2})^2 + (w_{EGS})^2 \right\}} \quad (14)$$

$$= \sqrt{\{(0,968)^2 + (1,929)^2 + (1,668)^2 + (1,0)^2 + (0,8)^2 + (1,5)^2 + (1,0)^2 + (0,9)^2 + (1,0)^2\}} \quad (15)$$

$$= \sqrt{\{(0,968)^2 + (1,929)^2 + (1,668)^2 + (1,0)^2 + (0,8)^2 + (1,5)^2 + (1,0)^2 + (0,9)^2 + (1,0)^2\}} \quad (16)$$

$$= \%3,760 \quad (17)$$

3. Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde; D100, Bt15, Pt15 ve Hk15 test yakıtlarının bir dizel motorda test edilmesiyle ortaya çıkan yanma karakteristikleri, motor performans parametreleri ve egzoz emisyon değerleri sunulmuş ve güncel literatür dikkate alınarak detaylı bir şekilde tartışılmıştır.

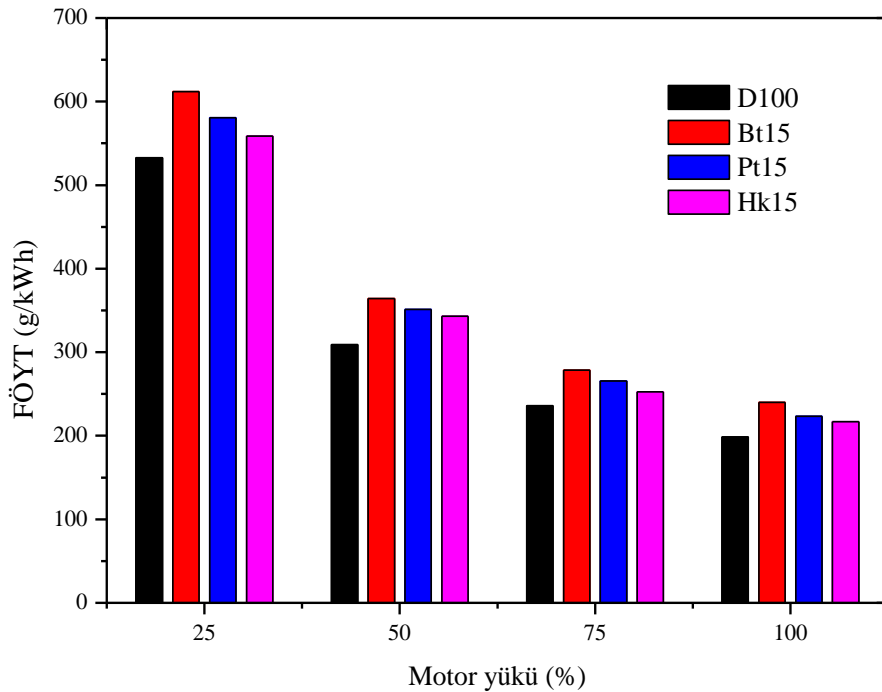
3.1. Performans sonuçları

Bu bölümde; D100, Bt15, Pt15 ve Hk15 test yakıtlarının bir dizel motorda sabit devirde ve farklı yüklemeye koşullarında elde edilen motor karakteristik sonuçları (fren özgül yakıt tüketimi, fren termal verimi, fren özgül enerji tüketimi, egzoz gazı sıcaklığı ve volümetrik verim) sunulmuştur.

3.1.1. Fren özgül yakıt tüketimi (FÖYT)

D100, Bt15, Pt15 ve Hk15 test yakıtlarının bir dizel motorda test edilmesiyle elde edilen fren özgül yakıt tüketimi (FÖYT) değerleri motor yüküne bağlı olarak Şekil 3’de gösterilmiştir. Denemelerde motor yükünün artışı ile birlikte FÖYT değerlerinin tüm test yakıtları için azaldığı ve en düşük FÖYT değerlerinin maksimum motor yükünde olduğu tespit edilmiştir. Düşük motor

yüklerinde, silindir içi türbülans olaylarının zayıflaması ve motorun hareketli parçalarındaki atalet kuvvetlerinin yükselmesi FÖYT değerlerini artırmıştır. Buna ek olarak, yüksek motor yüklerinde ise yanma için gereken zamanın yeterli olması, silindir içindeki türbülansın iyileşmesi ve hava/yakıt karışımının homojen bir şekilde silindir içinde dağılması yanma verimini artırmış ve böylece FÖYT değerlerinin azalmasına neden olmuştur. Dizel yakıtına farklı ağır alkollerin katılması sonucunda FÖYT değerleri artış göstermiştir. %100 motor yükünde; Bt15, Pt15 ve Hk15 karışım yakıtlarının FÖYT değerleri sırasıyla 239,92 g/kWh, 223,15 g/kWh ve 216,74 g/kWh olarak bulunurken bu değer D100 yakıtı için 198,71 g/kWh'tir. Dizel yakıtına %15 oranında 1-bütanol, 1-pentanol ve 1-hekzanol ağır alkollerinin katılması sonucunda elde edilen yakıtların enerji içerikleri Tablo 1'de verilmiştir. Bt15, Pt15 ve Hk15 karışım yakıtlarının alt ısıl değerleri dizel yakıtından sırasıyla %3,72, %2,81 ve %1,22 oranlarında düşüktür. Bu durum motorun aynı gücü üretebilmesi için daha fazla yakıt harcamasına neden olmaktadır. FÖYT'ü etkileyen en önemli parametrelerden biri de gizli buharlaşma ısısıdır. Bütanol, pentanol ve hekzanolün gizli buharlaşma ısıları sırasıyla 581,4 kJ/kg, 308,05 kJ/kg ve 486 kJ/kg iken dizel yakıtınınki ise 270-375 kJ/kg aralığında olduğu bilinmektedir (Kumar ve Saravanan, 2016). Görüldüğü üzere alkollerin gizli buharlaşma ısılarının dizel yakıtına göre daha yüksek olması sonucunda yanma kalitesi bozulmaktadır. Bu etkininde FÖYT değerleri üzerinde olumsuz sonuçları bulunmaktadır. Ayrıca, alkoller kendi aralarında karşılaştırıldığında en iyi sonucu 1-hekzanol katılı yakıt karışımında elde edildiği görülmektedir. Bu durumun temel sebebi 1-hekzanolün diğer alkollere göre daha yüksek kalori değerine ve daha düşük gizli buharlaşma ısısına sahip olmasıdır. Elde edilen sonuçlar diğer araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar ile büyük ölçüde benzerlik göstermektedir (Yao ve ark., 2010; Sayın ve ark., 2010; Campos-Fernandez ve ark., 2013; Zhang ve Balasubramanian, 2016). Örneğin, Karabektas ve Hosoz (2009) %5 isobütanol/%95 dizel yakıtı ve %20 isobütanol/%80 dizel yakıtı karışımlarının FÖYT değerlerinin dizel yakıtından sırasıyla ortalama %2,06 ve %8,55 oranlarında yüksek çıktığını rapor etmiştir. Aksoy ve Bayrakçeken (2010) dizel yakıtına hacimsel olarak %5 ve %10 oranlarında izopropil alkol eklendiğinde FÖYT değerlerinin dizel yakıtına göre sırasıyla %2,05 ve %4,5 oranlarında arttığını ve bu durumun izopropil alkolün ısıl değerinin dizel yakıtına kıyasla daha düşük olduğundan kaynaklandığını bildirmiştir. Yılmaz ve Atmanlı (2017a) dizel yakıtına %5-35 arasında değişen oranlarda pentanol ilave etmişler ve FÖYT değerlerinin dizel yakıtına göre %7,77-%12,71 oranlarında arttığını gözlemlemişlerdir. Bu durumun, pentanolün sahip olduğu yüksek gizli buharlaşma ısısından dolayı buharlaşma esnasında yanma odasından ısı çekmesi ve dolayısıyla soğutma etkisinde dolayı yanma veriminin düşmesinden kaynaklandığını bildirmişlerdir. Emiroğlu ve Şen (2018a) ise dizel yakıtına %10 oranlarında metanol, etanol ve bütanol eklendiğinde alkol ilaveli yakıtlar arasında en düşük FÖYT değerinin bütanol içeren yakıt ile oluştuğunu, en yüksek FÖYT değerinin ise metanol ihtiva eden yakıt ile gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Bunun temel nedeninin ise alkollerin kalori değerlerinin farklı olmasına ve en yüksek kalori değerinin bütanol karışımı yakıt ile elde edilmesine bağlamaktadırlar.

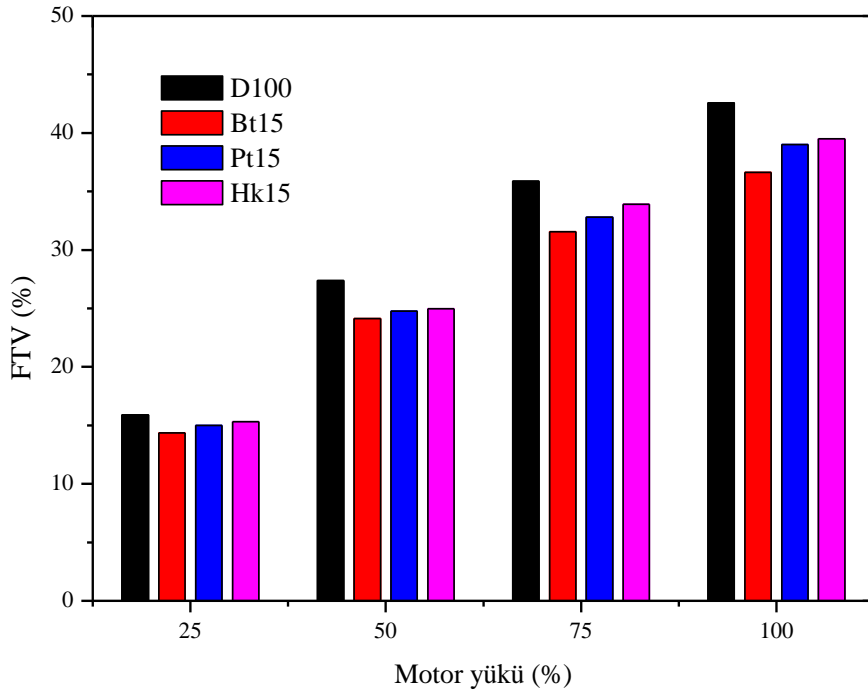


Şekil 3. Dizel yakıtına farklı alkol ilavelerinin FÖYT Üzerine Etkisi

3.1.2. Fren termal verimi (FTV)

FTV, alternatif yakıtlar ile yapılan çalışmaların sonuçlarının karşılaştırılması açısından önemli bir parametre olduğundan detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. D100, Bt15, Pt15 ve Hk15 test yakıtları ile yapılan denemeler sonucunda motor yüküne bağlı olarak elde edilen fren termal verim (FTV) sonuçları Şekil 4'de grafik halinde verilmiştir. Şekil 3 ve Şekil 4 birlikte değerlendirildiğinde FTV'nin FÖYT ile ters orantılı olduğu anlaşılmaktadır. Zaten bu durum Eşitlik 9 ve Eşitlik 10'a bakıldığı zamanda rahatlıkla görülebilir. Bu bakımdan, motor yükünün artışına bağlı olarak FTV değerlerinin arttığı ve en yüksek değerlerin tüm yakıtlar için %100 motor yükünde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bölüm 3.1.1.'de de bahsedildiği gibi yüksek motor yüklerinde hava/yakıt karışımının silindir içerisinde homojen bir şekilde dağılması ve tam yanma için yeterli sürenin bulunması FTV değerlerinin yüksek çıkmasına neden olmuştur. Maksimum motor yükünde, en yüksek FTV değeri %42,58 ile D100 yakıtı ile elde edilirken; Bt15, Pt15 ve Hk15 yakıtlarının FTV değerleri dizel yakıttan sırasıyla %14,00, %8,41 ve %7,19 oranlarında düşük çıkmıştır. Şekil 4'den de anlaşılacağı üzere tüm motor yüklerinde alkol ilaveli yakıtların FTV değerleri dizel yakıtından düşük

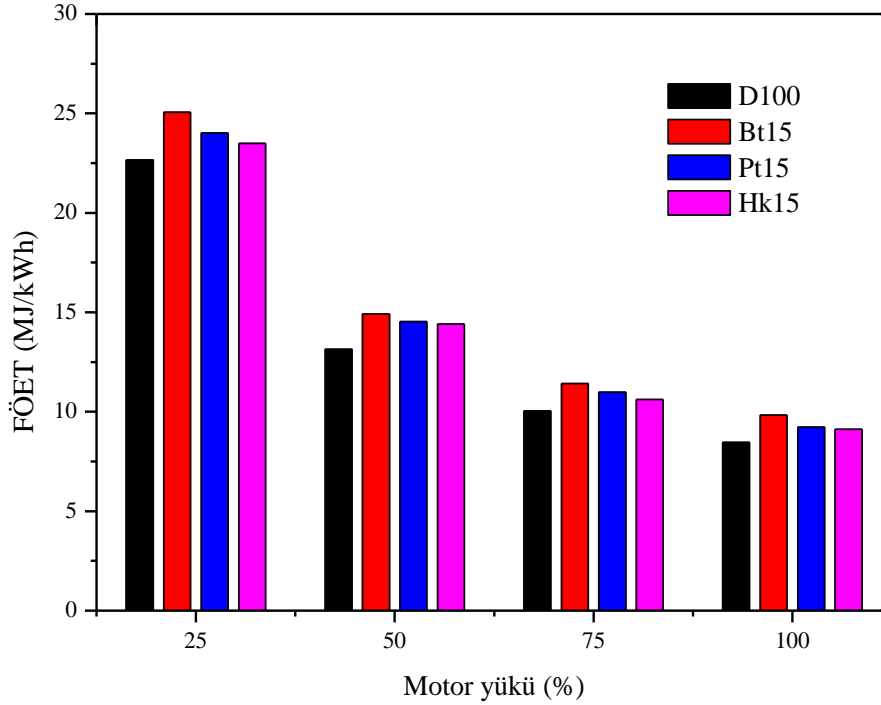
bulunmuştur. Bunun temel sebebi, alkollerin sahip olduğu düşük enerji içerikleridir. Silindir içerisine emilen yakıtın kalori değerinin azalmasının yanma sonu sıcaklığını düşürdüğü için FTV değerlerinin de azalacağı ifade edilebilir. Yanma sonu sıcaklığının Şekil 6 dikkate alınarak değerlendirilmesi yapıldığında alkol ilaveli yakıtların gerçekten de sıcaklığı azalttığı söylenebilir. Ek olarak, alkollerin dizel yakıtından daha düşük setan sayısına sahip olması TG süresini uzatmaktadır. Bu durum FTV değerlerinin azalmasına neden olmaktadır. Bütanol, pentanol ve hekzanol alkollerinin setan sayıları sırasıyla 17, 20 ve 23 olarak bulunmuştur (Kumar ve Saravanan, 2016). Alkoller kendi aralarında karşılaştırıldıklarında, 1-hekzanol katkılı yakıt örneğinin en yüksek sonucu verdiği gözlemlenmiştir. Çünkü 1-hekzanol diğer alkollere kıyasla daha yüksek ısı değere ve setan sayısına sahiptir. Yılmaz ve Atmanlı (2017b) tüm test yakıtları için en yüksek FTV değerlerinin motorun maksimum yükünde oluştuğunu ve karışımdaki pentanol oranının artışına bağlı olarak FTV değerlerinin azaldığını gözlemlemiştir. Babu ve Anand (2017) dizel/biyodizel karışımlarına %5 ve %10 oranlarında n-pentanol ve n-hekzanol katılmasının FTV değerlerini düşürdüğünü belirlemişlerdir. Yeşilyurt ve ark. (2018) sarı hardal yağı biyodizeli/dizel yakıt karışımlarına %5 ve %10 oranlarında 1-bütanol ve n-pentanol katılmasının dizel yakıtına göre FÖYT değerlerini artırırken FTV değerlerini azalttığını tespit etmişlerdir. Emiroğlu ve Şen (2018a) metanol/dizel, etanol/dizel ve bütanol/dizel yakıt karışımlarının dizel yakıtına kıyasla daha düşük FTV değerleri oluşturduğunu bildirmişlerdir. Ramalingam ve Mahalakshmi (2020) *Moringa oleifera* biyodizel/dizel yakıtı karışımlarına %5, %10 ve %15 oranlarında etanol ve hekzanol eklediklerinde FTV değerlerinin dizel yakıtına göre azaldığını ve karışım yakıt içerisindeki alkol oranının artışına bağlı olarak FTV değerlerinin daha da düştüğünü gözlemlemiştir. Pan ve ark. (2019) dizel yakıtına hacimsel olarak %25 ve %50 oranlarında n-pentanol ilavesinin, alkolün dizel yakıtına göre daha düşük kalori değerinden dolayı FTV değerlerini azalttığını tespit etmiş olmalarına rağmen, Kattela ve ark. (2019) dizel yakıtına hacimsel olarak %20'ye kadar bütanol katılmasının FTV değerlerini dizel yakıtına göre %4,5'e kadar artırdığını, %30 bütanol karışımında ise FTV'nin azaldığını belirlemişlerdir. Campos-Fernandez ve ark. (2013) dizel yakıtına pentanol ilavesinin FTV değerlerinin belli belirsiz artırdığını ve karışım oranları arasında herhangi önemli bir farkın olmadığını bulmuşlardır. Wei ve ark. (2014) dizel yakıtına pentanol ilavesinin FTV'yi olumsuz yönde etkilemediğini ortaya koymuşlardır.



Şekil 4. Dizel yakıtına farklı alkol ilavelerinin FTV üzerine etkisi

3.1.3. Fren özgül enerji tüketimi (FÖET)

Dizel yakıtına farklı zincir uzunluklarına sahip alkollerin eklenmesinin fren özgül enerji tüketimine (FÖET) etkileri Şekil 5'te görülmektedir. D100, Bt15, Pt15 ve Hk15 test yakıtlarının maksimum motor yükü koşulunda FÖET değerleri Eşitlik 11 kullanılarak sırasıyla 8,46 MJ/kWh, 9,83 MJ/kWh, 9,23 MJ/kWh ve 9,11 MJ/kWh olarak hesaplanmıştır. Grafikten de görüleceği üzere dizel yakıtına alkol ilavesinin FÖET'ni artırdığı ancak alkoller içerisinde en düşük sonuçların 1-hekzanol ilaveli yakıtta elde edildiği anlaşılmaktadır. Tüm test yakıtları içerisinde ise en düşük değerler tüm motor yüklerinde dizel yakıt ile meydana gelmiştir. Bunun temel sebebi, dizel yakıtın test yakıtları içerisinde en yüksek enerji içeriğine sahip olmasıdır. Test yakıtlarının alt ısı değerleri Tablo 1'de görülebilir. Alkoller içerisinde ise 1-hekzanol en yüksek kalori değerine sahiptir. 1-hekzanolü sırasıyla 1-pentanol ve 1-bütanol takip etmektedir. Benzer sonuçlar El-Seesy ve ark. (2017) tarafından da bulunmuştur. Bu araştırmacılar, biyodizel/dizel/alkol karışımları ile karşılaştırdıklarında dizel yakıtının minimum FÖET değerlerine sahip olduğunu, bu durumun ise dizel yakıtının yüksek kalori değerine sahip olmasından kaynaklandığını bildirmişlerdir. Babu ve Anand (2017) dizel/biyodizel yakıt karışımlarına n-pentanol ve n-hekzanol eklenmesinin FÖET değerlerini dizel yakıtına kıyasla artırdığını bulmuşlardır. Bu durumu ise yakıt harmanlarının düşük kalori değerlerine bağlamışlardır. Ramalingam ve Mahalakshmi (2020) karışım yakıtlar içerisinde en düşük FÖET'nin B90D5H5 (%90 biyodizel + %5 dizel yakıtı + %5 hekzanol) yakıtında oluştuğunu ve bu değer dizel yakıtından %2 oranında fazla olduğunu bildirmişlerdir.



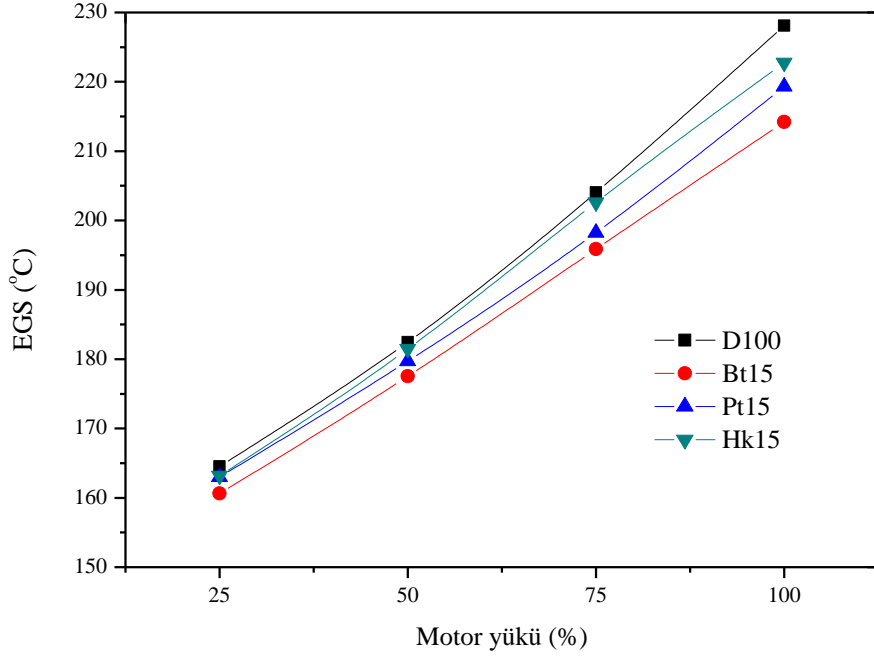
Şekil 5. Dizel yakıtına farklı alkol ilavelerinin FÖET üzerine etkisi

3.1.4. Egzoz gazı sıcaklığı (EGS)

D100, Bt15, Pt15 ve Hk15 test yakıtlarının tek silindirli bir dizel motorda sabit motor devri ve farklı yük koşullarında test edilmesiyle ortaya çıkan egzoz gazı sıcaklık (EGS) değerleri Şekil 6'da sunulmuştur. EGS, egzoz gazı emisyonlarını etkileyen önemli bir faktör olmasından dolayı motor denemelerinde ölçülmesi ve üzerinde durulması gerekli olan bir parametredir. EGS, test edilen yakıtın kalori değeri, setan sayısı, yoğunluk, viskozite vb. özelliklerine bağlı olduğu gibi aynı zamanda püskürtme basıncı, avans, devir, sıkıştırma oranı gibi motor işletme parametrelerine de bağlıdır. Bu çalışmada kullanılan test yakıtlarının EGS sonuçları değerlendirildiğinde, motor yükünün artmasına bağlı olarak EGS değerlerinin arttığı ve en yüksek sonuçların maksimum motor yükünde elde edildiği görülmektedir. Yılmaz ve Atmanlı (2017b)'ya göre, motor yükünün %0'dan %100'e kadar artırılması yanma odasına püskürtülen yakıt miktarının artmasına ve dolayısıyla silindir içerisindeki oksijen varlığının yükselmesine neden olduğundan silindir içi sıcaklığı artmaktadır. %100 motor yükünde, D100, Bt15, Pt15 ve Hk15 test yakıtlarının EGS değerleri sırasıyla 228,07 °C, 214,20 °C, 219,31 °C ve 222,75 °C olarak ölçülmüştür. Dizel yakıtına alkol eklenmesinin EGS'yi düşürdüğü görülmektedir. Bu durum alkollerin gizli buharlaşma ısılarından kaynaklanmaktadır. Çünkü alkollerin sahip yüksek gizli buharlaşma ısılarından dolayı silindir içerisinde buharlaşabilmek için ortamdan daha fazla ısı çekerek soğutma etkisine neden olmaktadır. Bu nedenle de yanma sonu sıcaklıkları, dolayısıyla EGS'ler azalmaktadır. EGS, yanma sonu sıcaklığının ve TG süresinin de bir göstergesidir. EGS'yi etkileyen bir diğer parametre ise yakıtların sahip olduğu düşük ısı değerleridir. Alkoller kendi aralarında karşılaştırıldıklarında, en yüksek EGS değerlerinin 1-hekzanol katkılı yakıt karışımında meydana geldiği görülmüştür. Bu durum, 1-hekzanolün diğer yakıtlara göre daha yüksek kalori değerine sahip olmasından dolayı olduğu söylenebilir.

Literatürde bulunan diğer çalışmalar incelendiğinde dizel ya da biyodizel yakıtlarına ilave edilen farklı alkollerin EGS değerlerini azalttığını belirleyen araştırmacıların olduğu göze çarpmaktadır. Cheung ve ark. (2009) metanolün sahip olduğu düşük enerji seviyesi ve yüksek gizli buharlaşma ısı nedeniyle biyodizel/dizel yakıt karışımına %5, %10 ve %15 oranlarında metanol eklenmesinin EGS değerlerini azalttığını, EGS'nin azalmasının da NO_x emisyonlarını düşüren önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Benzer şekilde Anand ve ark. (2011)'da biyodizel/metanol karışımlarının dizel yakıtına göre EGS değerlerini düşürdüğünü tespit etmişlerdir. Suhaimi ve ark. (2018) dizel yakıtına %5, %10 ve %20 oranlarında 2-ethyl 1-hexanol katılmasının EGS'yi azalttığını bulmuşlardır. Nour ve ark. (2019) dizel yakıtına %10 ve %20 oranlarında bütanol, oktanol ve heptanol ilave etmişler ve bu karışım yakıtları farklı motor yükü (%0-100) ve devirlerinde (900 d/d ve 1500 d/d) test etmişlerdir. Sonuç olarak, orta ve yüksek yüklerde alkol/dizel karışımlarının EGS değerlerinin dizel yakıtınınkinden az olduğunu göstermişlerdir. Emiroğlu (2019) dizel yakıtına bütanol ilavesinin EGS'nin azalmasına neden olduğunu ortaya koymuştur.

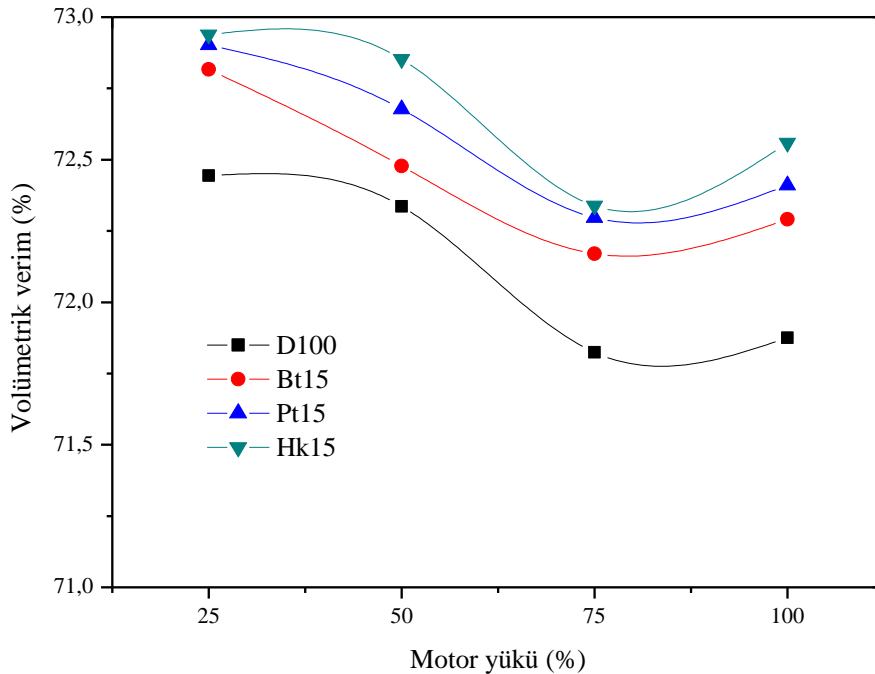
Fakat Atmanlı (2016) eşit oranda harmanlanan biyodizel/dizel yakıtı karışımına %20 oranlarında propanol, bütanol ve pentanol eklenmesinin EGS değerlerini artırdığını çalışmasında rapor etmiştir. Alkollerin sahip olduğu yüksek oksijen içeriğinin yanma odasında oksijence zengin bölgeler oluşturarak maksimum silindir basıncını ve sonuçta EGS'yi artırdığını belirtmektedir. Yılmaz ve Atmanlı (2017a) dizel yakıtına %5 ve %10 oranlarında pentanol ilavesinin dizel yakıtına kıyasla EGS'yi sırasıyla %8,65 ve %3,40 oranlarında azalttığını, ancak %20, %25 ve %35 oranlarında pentanolün EGS'yi sırasıyla %3,58, %14,65 ve %12,54 oranlarında artırdığını gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar, pentanolün sahip olduğu düşük setan sayısının TG'yi artırdığını aynı zamanda yüksek oksijen içeriğinin de yanma verimi üzerinde olumlu etki yaparak EGS'yi artırdığını bildirmişlerdir.



Şekil 6. Dizel yakıtına farklı alkol ilavelerinin EGS üzerine etkisi

3.1.5. Volümetrik verim

Dizel yakıtına farklı alkol ilavelerinin volümetrik verim üzerine etkisi Şekil 7'de gösterilmiştir. Volümetrik verim kısaca bir motorun nefes alma kabiliyeti olarak belirtilebilir. Volümetrik verim, bir motorda silindire alınan hava miktarının toplam silindir hacmine yani pistonun süpürdüğü hacme oranı olarak tanımlanabilir (Ramesh ve ark., 2019). Volümetrik verim; vuruntu, emme havası sıcaklığı, manifold basıncı, motor soğutma sisteminin verimi, yanma odasının sıcaklığı gibi birçok parametreden etkilenmektedir (Nanthagopal ve ark., 2019). Bu çalışmada volümetrik verim Eşitlik 12 kullanılarak hesaplanmıştır. Ortalama volümetrik verim D100 yakıtı için %72,11, Bt15 karışım yakıtı için %72,44, Pt15 karışım yakıtı için %72,57 ve Hk15 karışım yakıtı için %72,67 olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar göstermektedir ki, dizel yakıtına farklı ağır alkollerin ilave edilmesinin volümetrik verim üzerinde olumlu etkisi vardır. Volümetrik verimin iyileşmesi yanma veriminin de iyileşmesi anlamına gelmektedir. Ancak motor yükünün artışına bağlı olarak volümetrik verimin belirli bir yüke kadar düştüğü, bu yükten sonra ise bir miktar arttığı fark edilmiştir. Volümetrik verimi etkileyen bir diğer parametre ise EGS'dir. Diğer bir ifadeyle, EGS'nin artışı volümetrik verimi düşürmektedir (Rajak ve Verma, 2018). Bu durum, alkollerin gizli buharlaşma ısılarının yüksek olmasından dolayı sıkıştırma zamanı sonuna doğru püskürtülen yakıtın emilen havanın sıcaklığını düşürmesi ve daha fazla havanın silindire alınması olarak açıklanabilir (Wu ve ark., 2019). Appavu ve Venu (2019) dizel/biyodizel/bitkisel yağ karışımına farklı oranlarda pentanolün ilave edilmesi sonucunda volümetrik verimin arttığını ve bununla alkolün atomizasyon karakteristiklerini iyileştirerek hava/yakıt oranına olumlu katkı yapmasından dolayı olabileceğini belirtmişlerdir.



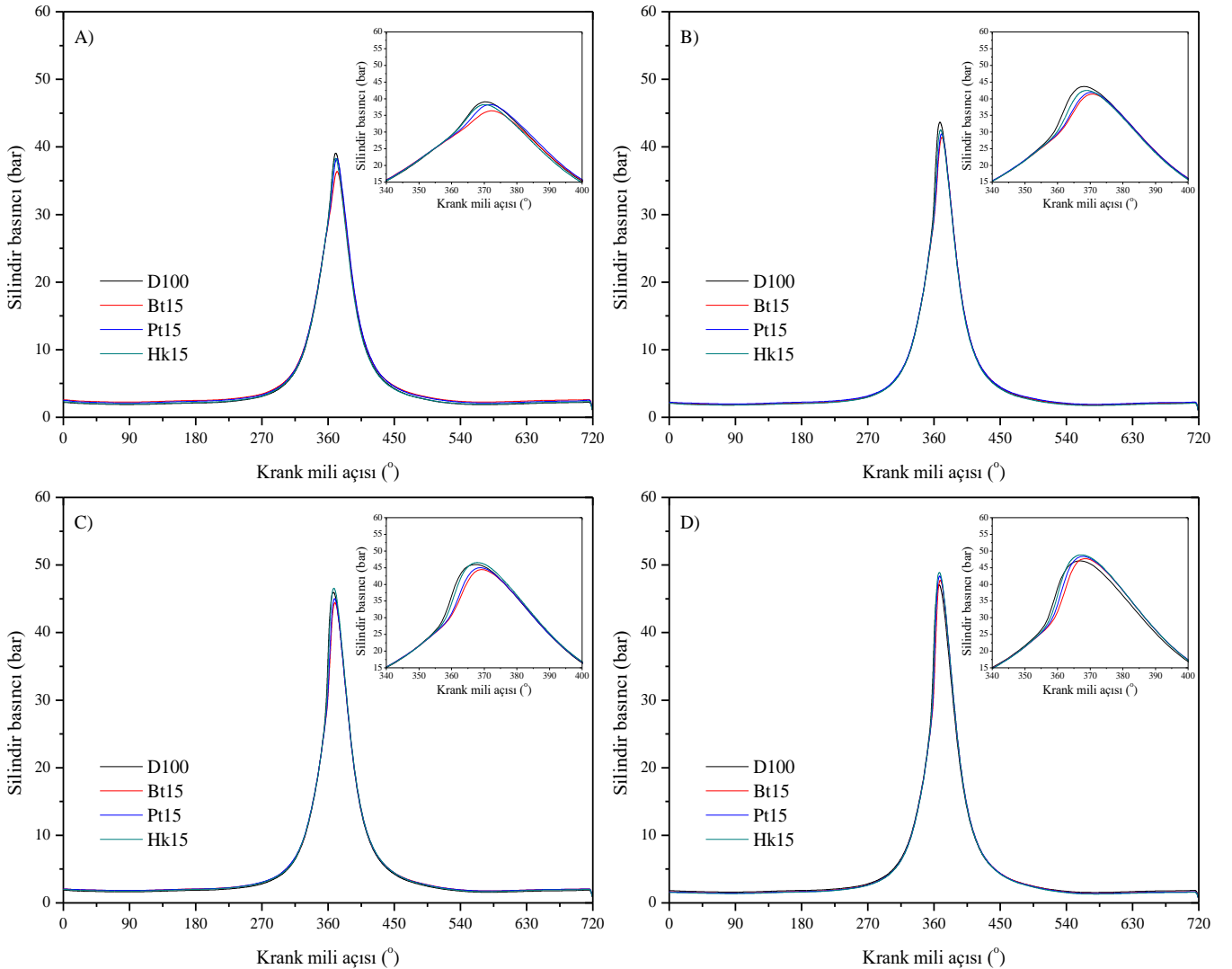
Şekil 7. Dizel yakıtına farklı alkol ilavelerinin volümetrik verim üzerine etkisi

3.2. Yanma analizi sonuçları

Farklı karbon atomlarına sahip ağır alkollerin (1-butanol, 1-pentanol ve 1-hekzanol) dizel yakıtına hacimsel olarak %15 oranlarında ilave edilmesiyle hazırlanan alternatif yakıt karışımlarının bir dizel motorda test edilmesiyle ortaya çıkan yanma karakteristiklerinin farklı motor yükü koşullarındaki etkileri (silindir basıncı, net ısı salımı hızı, kümülatif ısı salımı, basınç artışı oranı, tutuşma gecikmesi ve diğer yanma parametreleri) grafikler halinde aşağıdaki bölümlerde sunulmuş ve tartışılmıştır.

3.2.1. Silindir basıncı

D100, Bt15, Pt15 ve Hk15 test yakıtlarının farklı motor yüklerinde meydana gelen silindir basınçlarının KMA'nın bir fonksiyonu olarak değişimleri Şekil 8'de verilmiştir. Tablo 4'de ise maksimum silindir basınçları ve bunların meydana geldiği KMA'lar görülebilmektedir. Motor yükünün artışıyla bağlı olarak yakıtların silindir basınçlarının arttığı, bunların gözlemlendiği KMA'ların ise ÜÖN'ya yaklaştığı tespit edilmiştir. Silindir basıncının maksimumuna ulaştığı KMA; yakıtın karakterizasyonuna, motor yüküne ve yanmanın başladığı açığa bağlı olarak değişim göstermektedir. Yanmanın genel olarak dizel yakıtından daha sonra başladığı görülmektedir. Bunun nedeni alkollerin sahip olduğu düşük setan sayısıdır. Düşük setan sayısı TG süresini artırmaktadır. Maksimum motor yükünde, en yüksek silindir basınçları D100 için 368°'de 46,97 bar, Bt15 için 368°'de 47,76 bar, Pt15 için 368°'de 48,41 bar ve Hk15 için 367°'de 48,91 bar olarak bulunmuştur. Görüldüğü üzere, dizel yakıtına eklenen ağır alkoller silindir içi basınçlarını artırmış ve en fazla artış ise Hk15 yakıt karışımında meydana gelmiştir. Bu durum alkollerin sahip olduğu yüksek oksijen içeriği ile açıklanabilir. Oksijen miktarının alkollerde yüksek olması ve TG periyodunun uzun olması yanma odasında daha fazla yakıtın birikmesine neden olmakta ve bu biriken yakıtın da ani bir şekilde yanması sonucunda silindir içinde oluşan basınç artmaktadır (Qi ve ark., 2010a). Benzer sonuçlar ve nedenleri birçok araştırmacı tarafından da ifade edilmiştir. Emiroğlu ve Şen (2018a) 10 Nm maksimum motor yükünde dizel yakıtın en yüksek silindir basıncını 365,26°'de 81,03 bar olarak bulurken, metanol/dizel, etanol/dizel ve bütanol/dizel alternatif yakıt karışımlarınınkini ise sırasıyla 365,28°'de 83,41 bar, 365,31°'de 83,28 bar ve 365,19°'de 83,47 bar olarak tespit etmişlerdir. Wei ve ark. (2014) orta ve yüksek yüklerde, n-pentanol/dizel yakıt karışımlarının TG sürelerinin fazla olması nedeniyle hızlı yanma periyodunda yanan yakıt miktarının artarken, silindir içindeki sıcaklığın fazla olmasından dolayı n-pentanolün soğutma etkisinin azalabileceğini ve sonuçta silindir basıncının artacağını belirtmişlerdir. Zhu ve ark. (2016) biyodizel/pentanol karışım yakıtlarındaki pentanol oranının artmasının silindir içi basıncını biyodizel ile kıyasla artırdığını tespit etmişlerdir. Araştırmacılar bu durumu pentanolün sahip olduğu düşük viskozitesinden dolayı biyodizelin atomizasyon karakteristiklerini ve yakıt/hava karışımını iyileştirmesine bağlamışlardır.



Şekil 8. Test edilen yakıtların farklı motor yüklerindeki (A:%25, B:%50, C:%75, D:%100) silindir basıncı diyagramları

3.2.2. Net ısı salımı hızı (NISH)

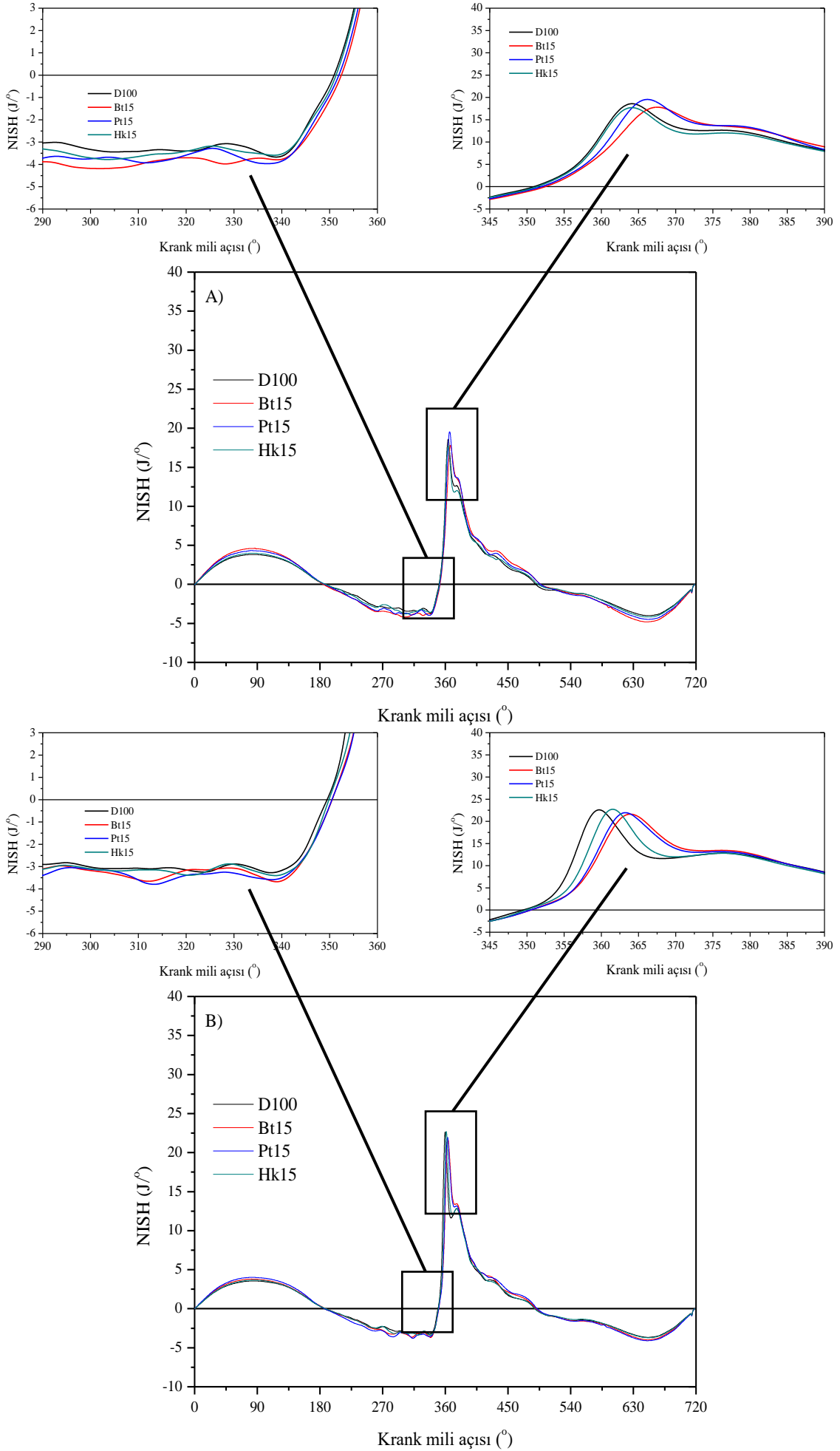
Isı salımı hızının analizi silindir içerisindeki yanma sürecinin daha iyi anlaşılabilmesi için önemli bir yaklaşımdır (Imdadul ve ark., 2016b). Test edilen yakıtların farklı motor yüklerinde meydana gelen net ısı salımı hızı (NISH) diyagramları Şekil 9'da verilmiştir. Yanma sürecinin başlangıcından önce, TG periyodunda yakıtın silindir içerisinde buharlaşarak hava ile homojen bir karışım oluşturmasından dolayı negatif NISH değerlerinin oluştuğu, ancak yanma başladığında bu değerlerin pozitif bölgesine çıktığı görülmektedir (Qi ve ark., 2010b). Motor yükünün artmasına bağlı olarak maksimum NISH değerlerinin de tüm yakıtlar için yükseldiği Tablo 4'e bakılarak görülebilir. Tüm yakıtlar için maksimum NISH değerleri maksimum motor yükünde görülmüştür. %100 motor yükünde maksimum NISH değerleri dizel yakıtında 357°'de 29,55 J/°, Bt15 yakıtında 361°'de 31,14 J/°, Pt15 yakıtında 359°'de 32,66 J/° ve Hk15 yakıtında 358°'de 33,80 J/° olarak gerçekleşmiştir. Alkol ilavesi yapılan yakıtların maksimum NISH değerleri incelendiğinde genel olarak artışların meydana geldiği söylenebilir. Bu durum, alkollerin yanma hızını artırmadaki etkisi ve ısı transferi hızının da azalması olarak açıklamak mümkün olabilir (Yeşilyurt ve ark., 2018). Ek olarak, alkollerin sahip olduğu düşük setan sayısı TG süresini artırarak silindir içerisinde daha fazla yakıtın birikmesine neden olmaktadır. Böylece yanma odasında biriken yakıtın ani bir şekilde yanması ve yine alkollerin kimyasal yapılarında bulunan fazla oksijen içeriğinin yanma hızını artırmadaki rolü sonucunda NISH değerlerinin arttığı düşünülebilir (Emiroğlu ve Şen, 2018a). Alkollerin dizel yakıtından daha düşük kalori değerlerine sahip olmalarına rağmen yapılarındaki oksijen muhtevası sayesinde maksimum NISH değerleri dizel yakıtından yüksek çıkmaktadır (Huang ve ark., 2004; Tutak ve ark., 2015). Zhu ve ark. (2016) biyodizel/pentanol karışım yakıtlarında ki pentanol oranının artışının maksimum NISH değerlerini artırdığını ve bu değerlerin oluştuğu KMA'ların ÜÖN'dan uzaklaştığını rapor etmişlerdir. Çünkü pentanolün düşük viskozite değeri silindir içerisindeki atomizasyon karakteristiklerini ve hava/yakıt oranını iyileştirmiştir. Tse ve ark. (2015) alkollerin sahip olduğu düşük setan sayısına bağlı uzun TG periyodu, iyi uçuculuk özelliği ve düşük viskozite ani yanma fazı için tutuşma gecikmesi süresince yanma odasında daha fazla yakıtın birikmesine neden olacağını ve böylece maksimum NISH değerlerinin artacağını belirtmişlerdir. Örs ve ark. (2017) aspir yağı biyodizeli/dizel yakıt karışımlarına bioetanol ilavesinin maksimum NISH değerlerini artırdığını tespit etmişlerdir. Nanthagopal ve ark. (2018) *Calophyllum inophyllum* biyodizeli/1-pentanol karışım yakıtlarının NISH değerlerinin biyodizel/1-bütanol karışım yakıtlarından fazla olduğunu, bunun da 1-pentanolün 1-bütanolden daha yüksek kalori değerine sahip olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir.

3.2.3. Kümülatif ısı salımı (KIS)

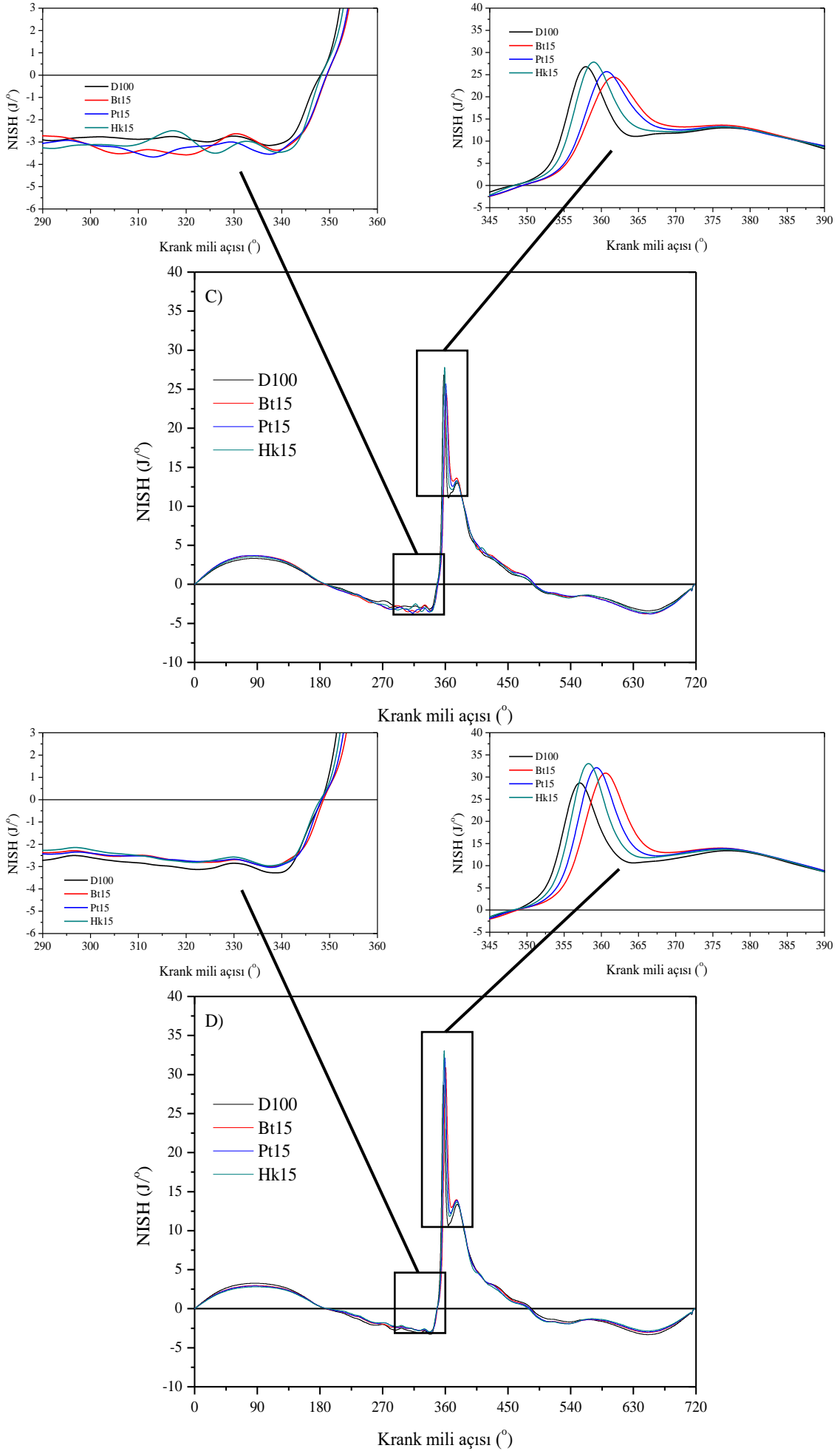
Dizel yakıtına çeşitli karbon atomlarına sahip alkollerin ilave edilmesi ile elde edilen yakıt harmanlarının bir dizel motordaki farklı motor yüklerinde meydana gelen kümülatif ısı salımı (KIS) değerlerinin karşılaştırılması Şekil 10'da gösterilmiştir. Ayrıca, maksimum KIS değerleri ve bunların oluştuğu KMA'lar da Tablo 4'de verilmiştir. Tahmin edildiği gibi motor yükünün artışına bağlı olarak KIS değerlerinin arttığı görülmektedir (Emiroğlu ve Şen, 2018b). Ancak maksimum KIS'ların oluştuğu KMA'ların ÜÖN'ya yaklaştığı görülmektedir. Alkol ilaveli yakıtların genel olarak dizel yakıtından daha yüksek KIS değerleri oluşturduğu tespit edilmiştir. D100, Bt15, Pt15 ve Hk15 yakıtlarının ortalama KIS değerleri sırasıyla 864,25 J, 896,49 J, 896,77 J ve 862,68 J olarak bulunmuştur. Hk15 karışım yakıtı hemen hemen dizel yakıtı ile aynı sonuçları göstermiştir. Tablo 1 incelendiğinde alt ısı değeri dizel yakıtına oldukça yakın olması, karbon ve hidrojen miktarlarının dizel yakıtının ki ile benzerlik göstermesi KIS değerlerinin de yakın olarak çıkmasına neden olmuştur. Ancak, Bt15 ve Pt 15 karışım yakıtları diğer iki yakıttan da yüksek KIS değerlerine sahiptirler. Bunun temel sebebi 1-bütanol ve 1-pentanol ilaveli yakıtların sahip olduğu yüksek oksijen içeriği nedeniyle yanma sürecini iyileştirmesidir. Ayrıca bu alkollerin setan sayılarının oldukça düşük olması TG periyodunda silindir içerisinde fazla miktarda yakıtın birikmesine neden olmuştur. Bu yakıtın da ani bir şekilde yanması sonucunda KIS değerlerinin yükseldiği sonucuna varılabilir. Bununla beraber alkollerin düşük kalori değerine sahip olması motorun aynı gücü üretebilmek için yanma odasına daha fazla yakıt göndermesine, bu durumda alkol katkılı yakıtların KIS değerlerinin artmasına neden olduğu söylenebilir (Geo ve ark., 2017). Balamurugan ve Nalini (2014) dizel yakıtı, %96 dizel yakıtı + %4 n-propanol, %92 dizel yakıtı + %8 n-propanol, %96 dizel yakıtı + %4 n-bütanol ve %92 dizel yakıtı + %8 n-bütanol test yakıtlarının %80 motor yükünde ki KIS değerlerini sırasıyla 978,585 kJ/m³, 1222,912 kJ/m³, 1249,827 kJ/m³, 1206,554 kJ/m³ ve 1249,595 kJ/m³ olarak bulmuşlardır. Araştırmacılar, dizel yakıtına alkol ilavesi ile viskozitenin azaldığını ve uçuculuğun artması ile püskürtme karakteristiklerinin iyileştiğini ve böylece yanma veriminin arttığını gözlemlemişlerdir. Bu doğrultuda düşünüldüğünde, mevcut çalışmada ki Hk15 karışım yakıtının viskozite değerinin dizel yakıttan çok yüksek olması da KIS değerlerini düşürmüş olabilir.

3.2.4. Basınç artış oranı

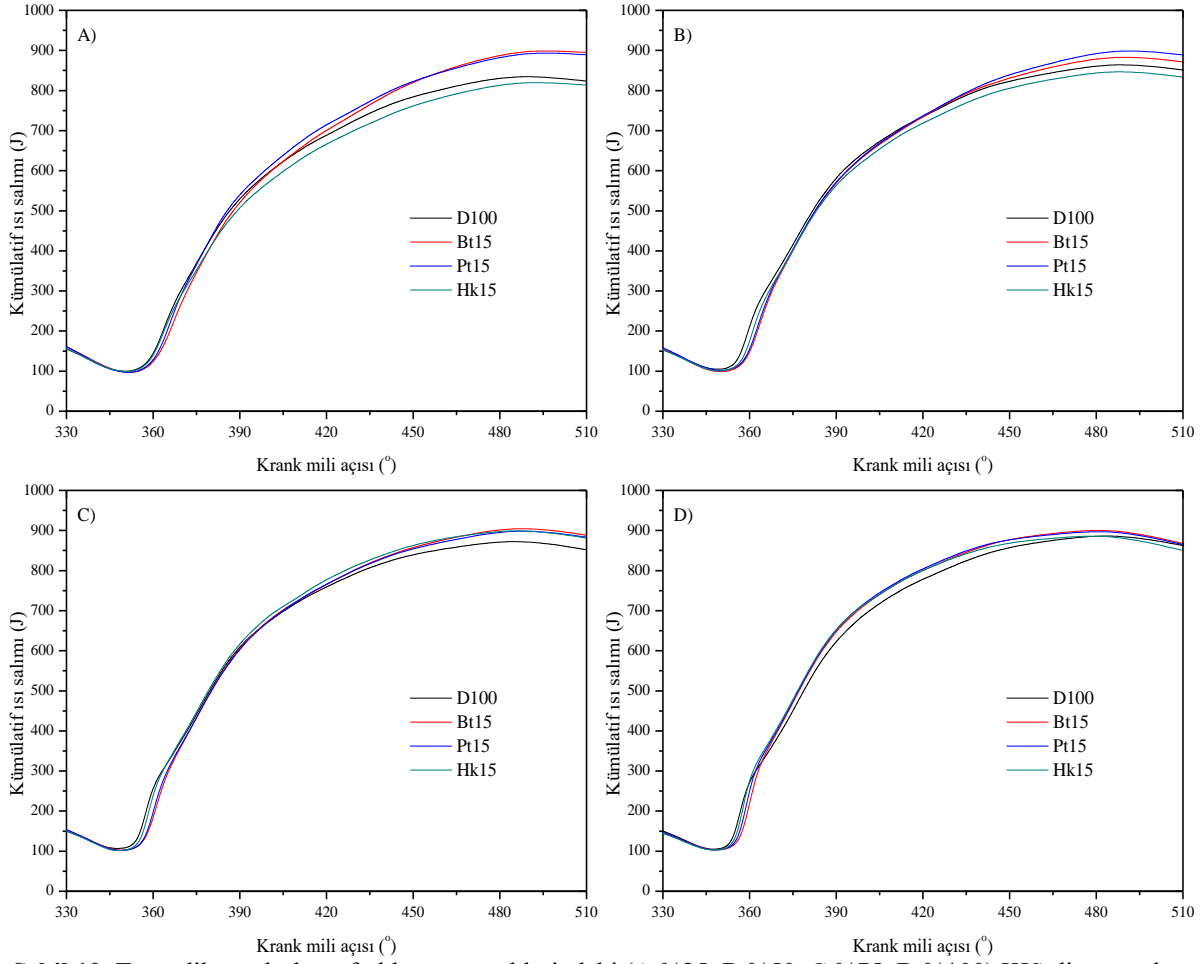
D100, Bt15, Pt15 ve Hk15 test yakıtlarının farklı motor yüklerinde meydana gelen basınç artış oranlarının KMA'ya göre değişimleri Şekil 11'de sunulmuştur. Şekil 11'den de görüleceği üzere, motor yükünün artışına bağlı olarak tüm test yakıtları için basınç artış oranlarının arttığı ve maksimum değerlerin ise %100 motor yükü koşullarında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Shrivastava ve ark. (2020)'da basınç artış oranının motor yükünün yanı sıra sıkıştırma oranının da artması ile yükseldiğini ifade etmişlerdir. Maksimum motor yükünde, D100, Bt15, Pt15 ve Hk15 test yakıtlarının en yüksek basınç artış oranları sırasıyla 3,3 bar/°, 3,09 bar/°, 3,40 bar/° ve 3,63 bar/° olarak bulunmuştur. Hem diğer yüklerdeki hem de maksimum motor yükünde oluşan maksimum basınç artış oranları dikkate alındığında önemli bir değişimin olmadığı hemen hemen dizel yakıtına yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Basınç artış oranı herhangi bir motordaki vuruntu oluşumunu gözlemlemek için çok önemli bir parametredir. Ayrıca basınç artış oranı, motorda yüksek orandaki NO_x oluşumunun açıklanmasına da yardımcı olmaktadır (Shrivastava ve Verma, 2019).



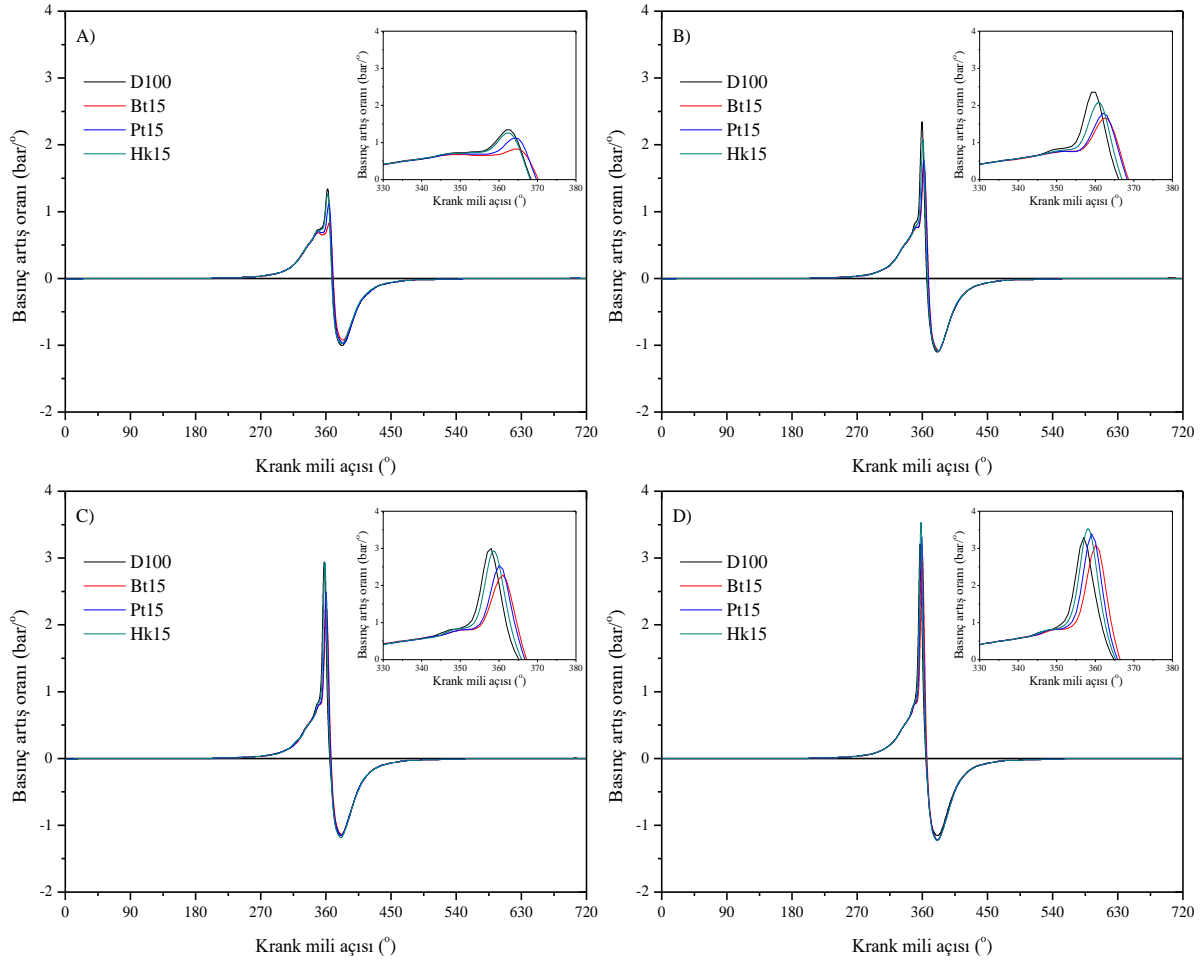
Şekil 9. Test edilen yakıtların farklı motor yüklerindeki (A:%25, B:%50, C:%75, D:%100) NISH diyagramları



Şekil 9. Devam



Şekil 10. Test edilen yakıtların farklı motor yüklerindeki (A:%25, B:%50, C:%75, D:%100) KIS diyagramları



Şekil 11. Test edilen yakıtların farklı motor yüklerindeki (A:%25, B:%50, C:%75, D:%100) basınç artış oranı diyagramları

3.2.5. Diğer yanma parametreleri

Dizel motorlarda yanma; TG, kontrolsüz (ön) yanma, kontrollü yanma ve gecikmiş (art) yanma safhalarından oluşmaktadır (Acaroğlu ve ark., 2018). TG sırasında, yanma odasına yakıt püskürtülür ve hava ile homojen bir karışım oluşturabilmek için yakıt buhar fazına geçer. TG periyodu, yukarıda da bahsedildiği gibi yakıtın silindire püskürtüldüğü andan yanma odasında ilk alev çekirdeğinin oluştuğu ana kadar geçen süre olarak ifade edilmektedir. Bir başka ifade ile TG, püskürtme başlangıcından silindir içerisinde ani basınç artışının görüldüğü noktaya kadar geçen süredir. Bu süre içerisinde, yakıtın yanmaya hazırlanabilmesi için gerekli fiziksel ve kimyasal süreçler devreye girmektedir. Yanma odasının sıcaklığı ile yanma odasına enjekte edilen yakıtın sıcaklığı arasında bir fark bulunmaktadır. Yakıtın sıcaklığı sıkıştırma periyodu boyunca artış gösterirken yakıtın buharlaşma eğilimi artmaktadır. Bu esnada yakıt silindir içerisindeki ısıyı absorbe ederek buharlaşır ve silindirdeki sıcaklık ve basınç artışını bir dereceye kadar yavaşlatır (Yardım, 2008). D100, Bt15, Pt15 ve Hk15 test yakıtlarının farklı motor yüklerinde gözlenen enjeksiyon başlangıcı, yanma başlangıcı ve TG gibi diğer yanma parametreleri Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4. Test edilen yakıt örneklerinin sabit devir ve farklı yüklerde meydana gelen yanma ve enjeksiyon karakteristikleri

No	Motor yükü (%)	Yakıt türü	EB (°)	YB (°)	TG (°)	MSBA (°)	MSB (bar)	MOGS (°C)	MOGSA (°)	MNISH (J/°)	MNISHA (°)	KIS (J)	MKISA (°)	MBAO (bar/°)	MBAOA (°)		
1	25	D100	336	351	15	370	39,11	884,30	385	18,74	364	834,52	489	1,35	362		
		Bt15	337	353	16	372	36,42	884,57	388	17,84	367	898,67	496	0,83	365		
		Pt15	336	352	16	372	38,30	910,68	387	19,69	366	893,34	496	1,13	364		
		Hk15	336	351	15	370	38,33	856,09	385	17,85	364	819,45	493	1,27	362		
		D100	336	349	13	368	43,71	953,36	385	22,85	360	864,03	488	2,36	360		
2	50	Bt15	338	351	13	371	41,44	938,54	385	21,80	364	882,87	490	1,66	363		
		Pt15	338	350	12	370	41,96	937,24	385	22,18	363	898,51	491	1,79	362		
		Hk15	336	349	13	369	42,56	922,52	385	22,80	362	846,63	488	2,12	361		
		D100	338	348	10	367	45,98	969,03	385	27,51	358	872,23	485	3,00	358		
		Bt15	338	350	12	369	44,46	975,07	385	24,64	362	904,41	488	2,28	361		
3	75	Pt15	338	349	11	369	45,07	969,94	384	26,00	361	898,40	488	2,54	360		
		Hk15	338	349	11	368	46,61	984,66	384	28,51	359	898,95	486	2,98	359		
		D100	338	348	10	368	46,97	986,73	385	29,55	357	886,22	483	3,30	357		
		Bt15	338	349	11	368	47,76	1022,89	384	31,14	361	900,02	481	3,09	360		
		Pt15	338	349	11	368	48,41	1024,72	384	32,66	359	896,84	481	3,40	359		
4	100	Hk15	337	348	11	367	48,91	1024,87	384	33,80	358	885,67	479	3,63	358		
		MSBA	Maksimum silindir basıncının oluştuğu krank mili açısı														
		MSB	Maksimum silindir basıncı														
		MOGS	Maksimum ortalama silindir gaz sıcaklığı														
		MOGSA	Maksimum ortalama silindir gaz sıcaklığının oluştuğu krank mili açısı														
MNISH	Maksimum net ısı salımı hızı																
MNISHA	Maksimum net ısı salımı hızının oluştuğu krank mili açısı																
MKIS	Kümülatif ısı salımı																
MKIS	Maksimum kümülatif ısı salımı																
MKISA	Maksimum kümülatif ısı salımının oluştuğu krank mili açısı																
MBAO	Maksimum basınç artış oranı																
MBAOA	Maksimum basıncı artış oranının oluştuğu krank mili açısı																

Dizel motorlarda yanma analizi sırasında gözlemlenen diğer önemli yanma parametreleri ise enjeksiyon başlangıcı, yanma başlangıcı, yanma sonu ve yanma süresidir. Enjeksiyon avansı ya da enjeksiyon başlangıcı yakıtın yanma odasına püskürtüldüğü KMA olarak tanımlanmaktadır. Yanma başlangıcı NISH diyagramında grafiğin negatif bölgeden pozitif bölgeye geçerken x eksenini kestiği noktadaki KMA olarak bilinirken, yanma sonu ise NISH'nin sıfıra tekrar ulaştığı KMA olarak bulunabilir. Yanma süresi yanmanın başlangıcı ile yanmanın sonu arasındaki farktır (İbrahim, 2016). Tablo 4 değerlendirildiğinde, motor yükünün artmasına bağlı olarak TG sürelerinin kısaldığı gözlemlenmektedir. Motor yükü artışı silindir içindeki sıcaklıkların da artmasına neden olmaktadır. Maksimum ortalama silindir içi gaz sıcaklıklarına bakıldığında da bu bilgi doğrulanabilir. Silindir sıcaklığının artmasının TG üzerine olumsuz etkisi bulunmaktadır.

Çelik ve ark. (2017) çalışmalarında motor hızının artmasına bağlı olarak silindir içi sıcaklıklarının arttığını ve böylece TG sürelerinin kısaldığını vurgulamışlardır. Qi ve ark. (2010c) ise motor yükünün artırılmasının silindir içinde yüksek sıcaklığa ulaşılmasında etkili olduğunu ve dolayısıyla TG süresinin kısaldığını belirtmişlerdir. Silindir içi sıcaklıklarının bir göstergesi olarak test yakıtlarının EGS değerleri de Şekil 6'da incelenebilir. Bu nedenle tüm parametreler değerlendirildiğinde, elde edilen sonuçların büyük ölçüde beklenen sonuçlara yakın olduğu görülmektedir. Test yakıtlarının TG süreleri incelendiğinde alkol ilave edilen yakıtların TG değerlerinin genel olarak yüksek olduğu ancak, Hk15 yakıtının TG periyodunun dizel yakıtına yakın olduğu görülmektedir. TG'yi etkileyen en önemli parametrelerden bir tanesi yakıtın setan sayısıdır (Zhong ve ark., 2016). Düşük setan sayısına sahip yakıtların kullanılması sonucunda yanma odasında daha fazla yakıtın birikmesi muhtemeldir. Bu da, yanma odasında daha yüksek miktarda ısı oluşumuna neden olmaktadır (Devan ve Mahalakshmi, 2009).

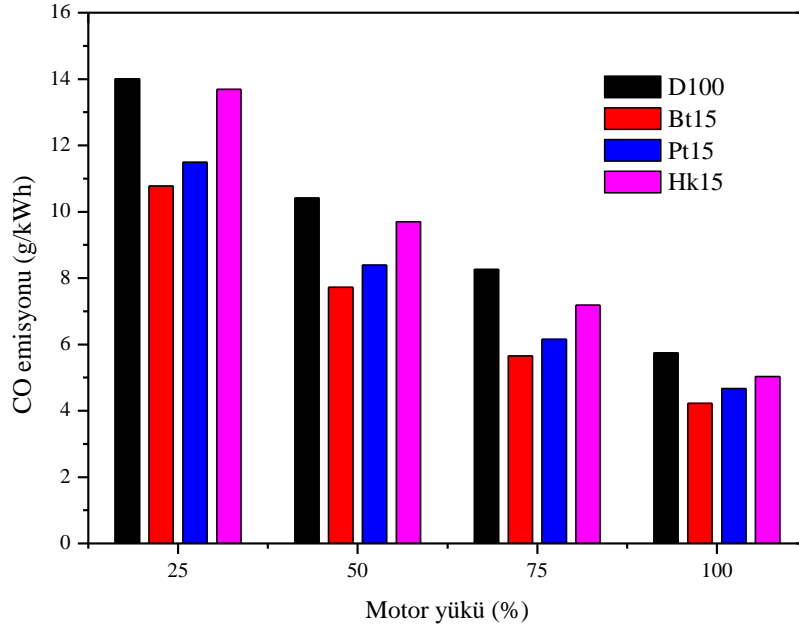
Elbette Şekil 6 göz önünde bulundurulduğunda alkol katkılı yakıtların EGS değerlerinin dizel yakıtından az olduğu sonucuna varılabilir. Ancak alkollerin yüksek gizli buharlaşma ısılarına sahip olduğunu ve bunun da silindir içinde soğutma etkisine neden olduğu unutulmaması gereken bir gerçektir. Alkollerin setan sayısı dizel yakıtından düşüktür. 1-hekzanol alkolünün setan sayısının diğer alkollere kıyasla yüksek olması TG sürelerini azaltmıştır. Dizel yakıtına ilave edilen alkol miktarının da hacimsel olarak %15 olması bu karışım yakıtın setan sayısını dizel yakıtına yaklaştırmıştır. Özener ve ark. (2014) yakıtın yüksek viskozite özelliğinin motorda zayıf atomizasyon özelliğine, hava/yakıt karışımının yavaş gerçekleşmesine ve yüksek penetrasyona neden olarak TG süresini uzattığını belirtmişlerdir. Öte yandan, alkol katkılı yakıtların viskozite ve yoğunluk değerlerinin düşük olması hava/yakıt karışımını iyileştirir ve böylece yanma odasında yüksek miktarda yakıtın kontrolsüz yanma aşamasında hızlı bir şekilde yanmasına neden olur. Ayrıca dizel yakıtına alkol ilave yüzey geriliminin azalmasına, sonuçta alkolün buharlaşması ve atomizasyon karakteristiğinden dolayı hava ile iyi bir karışım oluşturulmasında etkilidir (Hulwan ve Joshi, 2011). Tse ve ark. (2015) yakıttaki etanol oranının artırılmasının TG'yi uzattığını ve böylece yanmanın daha geç başladığını bulmuşlardır. Alptekin ve ark. (2015) püskürtme başlangıcının gecikmesinin de yanma başlangıcını uzatabileceğini bildirmişlerdir. Koivisto ve ark. (2015) TG süresinin moleküler yapısında 16'ya kadar karbon atomu bulunan ağır alkollerin kullanımıyla uzadığını belirtmişlerdir.

3.3. Egzoz emisyon sonuçları

Bu bölümde dizel yakıtına farklı zincir uzunluklarına sahip ağır alkollerin ilave edilmesi ile hazırlanan alternatif yakıtların tek silindirli bir dizel motorda farklı motor yüklerinde test edilmesi sonucunda elde edilen egzoz gazı emisyonları (CO, CO₂, HC, O₂ ve NO_x) tartışılmıştır.

3.3.1. CO emisyonu

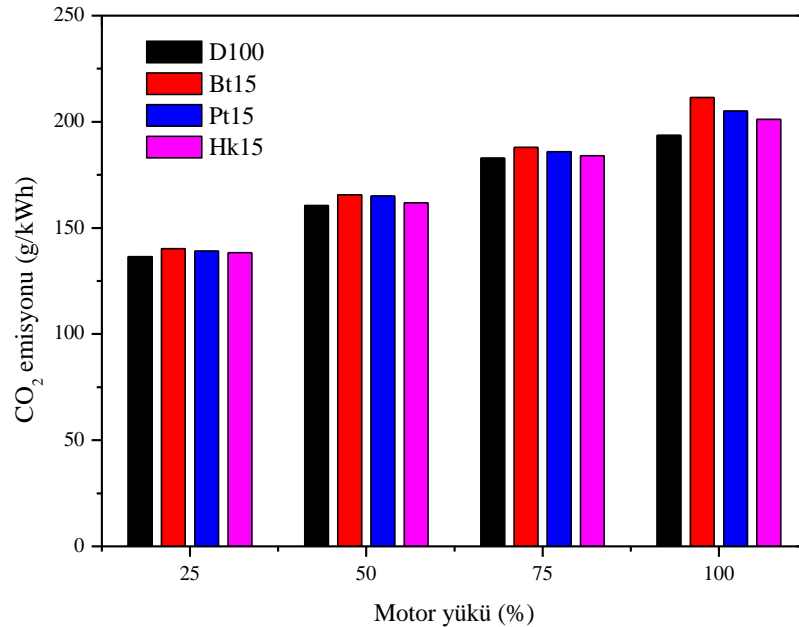
Karbon monoksit (CO), yoğunluğu atmosferde bulunan havadan yüksek olan ve insan vücudu için zehirli olan renksiz ve kokusuz bir gazdır. Şekil 12 dizel yakıtına farklı ağır alkollerin ilave edilmesinin CO emisyonu üzerine etkilerini göstermektedir. Test edilen tüm yakıt örnekleri için motor yükünün artmasına bağlı olarak CO emisyonlarının azaldığı görülmektedir. Yüksek yük koşullarında termal verimin fazla olması ve artan silindir içi basıncın etkisi ile erken alevlenme süresi gibi faktörler, CO emisyonlarında yukarıda bahsedilen azalmalara neden olmuştur. Şekil 12 incelendiğinde, saf dizel yakıtının düşük motor yüklerinde en yüksek CO emisyonunu ürettiği anlaşılmaktadır. Düşük yüklerde, silindir içindeki sıcaklığın artışı az olduğundan dolayı zayıf yanma karakteristikleri CO emisyonunun artmasına neden olmaktadır. Yüksek enerji içeriği ve silindir içi sıcaklık, motor veriminin artmasına ve dolayısıyla karbon oksit ve azot oksit emisyonlarının artmasına yol açmaktadır. Yanma odasında oksijen muhteviyatının yeterli olmaması CO emisyonunun oluşmasına önemli derecede katkı yapmakta ve CO'nun CO₂'ye dönüşümünü de önlemektedir. Bu sebeple alkollerin moleküler zincirlerinde bulunan oksijen, dizel yakıtına kıyasla daha az CO emisyonunun salımına yol açmaktadır. Üstelik yanma süreci boyunca oluşan kararlı olmayan ketonlar ve aldehidler, CO ve N₂ gazlarını oksitleyerek CO₂ ve NO_x oluşumlarına neden olur. CO emisyonunu kontrol edebilmek için giriş havası sıcaklığını artırmak önemli bir tekniktir. D100, Bt15, Pt15 ve Hk15 yakıtlarının %25 motor yükündeki CO emisyonları sırasıyla 14,01 g/kWh, 10,77 g/kWh, 11,49 g/kWh ve 13,69 g/kWh olarak ölçülmüştür. Yakıtların CO emisyon sonuçları değerlendirildiğinde 1-bütanol ilaveli yakıtların en iyi sonuçları ortaya koyduğunu, bu durumun da 1-bütanolün diğer alkollerden daha fazla oksijen içeriğine sahip olması ile açıklamak mümkün olmaktadır. Babu ve Anand (2017) n-pentanol ve n-hekzanolü CO emisyonları yönünden karşılaştırdıklarında, pentanolün sahip olduğu yüksek oksijen muhtevası nedeniyle daha düşük CO emisyonu salımı yaptığını bildirmişlerdir. Ullman ve ark. (1994) çalışmalarında, silindir içerisindeki oksijen konsantrasyonunun artmasının tam yükte atomizasyon özelliklerini ve volümetrik verimi iyileştirmesinden dolayı CO emisyonlarını azaltan bir etki gösterdiğini rapor etmişlerdir. Zhang ve Blasubramanian (2016) bir sıkıştırma ile ateşlemeli motorda 1-oktanol alkolünü katkı maddesi olarak kullandıkları çalışmalarında, duman ve CO emisyonlarının dizel yakıtına göre önemli ölçüde azaldığını, NO_x emisyonlarının ise artış gösterdiğini bulmuşlardır. Ramesh ve ark. (2019) hekzanolün dizel/biyodizel karışım yakıtına harmanlanmasının CO emisyonlarını tüm motor yüklerde önemli oranda azalttığını belirlemişlerdir.



Şekil 12. Dizel yakıtına farklı alkol ilavelerinin CO emisyonu üzerine etkisi

3.3.2. CO₂ emisyonu

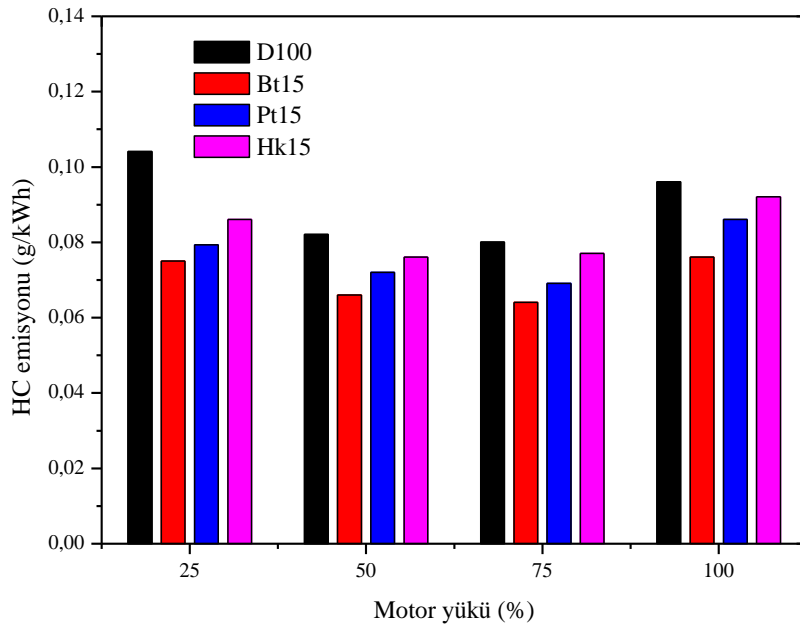
Test edilen tüm yakıtlar için motor yükünün bir fonksiyonu olarak CO₂ emisyonlarındaki değişim Şekil 13’de gösterilmiştir. Grafik, motor yükü ve silindir basıncı arttıkça CO₂ emisyonlarının arttığını göstermektedir. CO₂ emisyonlarındaki artış FTV’nin motor yükü ile artışı ile ilişkilendirilebilir. Test edilen yakıtlar arasında en yüksek CO₂ emisyonlarının Bt15 yakıtında üretildiğini, bu yakıtı sırasıyla Pt15 ve Hk15’nin izlediği belirlenmiştir. Tüm motor yüklerinde benzer sonuçlar elde edilmiştir. Dizel yakıtı yüksek enerji içeriği, yüksek FTV değeri ve hatta büyük damlacık boyutu ve atomizasyon karakteristikleri nedeniyle CO₂ emisyonlarının azalmasına neden olmuştur (Tesfa ve ark., 2010). Alkoller ise kimyasal zincirlerinde bulunan oksijen molekülleri yanma odasında CO gazı ile reaksiyona girer ve CO₂ gazının oluşumunu sağlar. Egzoz gazları içerisindeki CO₂ emisyonunun artışı silindir içerisindeki yanmanın tam yanmaya yakın olduğu anlamına gelmektedir (Doğan ve ark., 2017). Alkollerin yapısındaki oksijen miktarları incelendiğinde 1-bütanolün en fazla oksijene sahip olduğu 1-hekzanolünde en düşük oksijene sahip olduğu Tablo 1 dikkate alındığında görülebilir. Bu nedenle en yüksek CO₂ emisyonu salımı Bt15 yakıtında gerçekleşirken en düşük ise Hk15 karışım yakıtında olmuştur. %100 motor yükünde, D100, Bt15, Pt15 ve Hk15 test yakıtlarının CO₂ emisyonları sırasıyla 193,58 g/kWh, 211,36 g/kWh, 205,01 g/kWh ve 201,20 g/kWh olarak kaydedilmiştir. Cheung ve ark. (2008) etanol/dizel ve dodekanol/dizel karışımlarının bir dizel motorda kullanılmasıyla yukarıda verilen sonuçlara benzer eğilimler meydana geldiğini belirtmişlerdir. Babu ve Anand (2017) kinematik viskozite ve yoğunluk değerlerinin düşük olmasının yakıtın buharlaşmasını iyileştirdiğini, böylece CO₂ emisyonunun arttığını rapor etmişlerdir. Mevcut deneysel çalışmadaki yakıt örnekleri bu bağlamda değerlendirildiğinde yoğunluk ve viskozite açısından yine 1-bütanolün en düşük değerlere sahip olduğu görülmektedir. Fakat Alptekin (2017) dizel yakıtına eklenen %15 oranlarındaki etanol ve izopropanolün CO₂ emisyonları üzerinde önemli bir değişikliğe yol açmadığını tespit etmiştir.



Şekil 13. Dizel yakıtına farklı alkol ilavelerinin CO₂ emisyonu üzerine etkisi

3.3.3. HC emisyonu

Yanmamış HC emisyonu, yanma prosesinin kalitesinin değerlendirilmesi açısından önemli bir göstergedir (Babu ve Anand, 2017). Test yakıtlarının tek silindri bir dizel motorda kullanılmasıyla ortaya çıkan yanmamış HC emisyonlarının motor yükünün bir fonksiyonu olarak değişimi Şekil 14’de gösterilmiştir. Şekil 14 incelendiğinde, tüm test yakıtları için HC emisyonlarının, motor yükünün %0’dan %75’e yükselmesiyle azaldığı, bununla birlikte tam yükte volümetrik verimin artması nedeniyle HC emisyonlarında hafif bir artışın meydana geldiği görülebilir (Ramesh ve ark., 2019). Teorik olarak, dizel yakıtı moleküler yapısında hiç oksijen bulundurmadığı için en yüksek yanmamış HC emisyonlarına neden olmalıdır. Bu bilgi doğrultusunda grafik değerlendirildiğinde, gerçekten de katkısız dizel yakıtı tüm motor yüklerinde en fazla HC emisyonu salıyan yakıt olmuştur. Termodinamik verimin yüksek olması, düşük oksijen molekülü içeriği ve yüksek karbon muhtevası gibi faktörler HC emisyonunun artmasına neden olmaktadır. Dizel yakıtına ağır alkollerin ilavesi ile HC emisyonlarının azaldığı görülmektedir. D100, Bt15, Pt15 ve Hk15 test yakıtlarının %100 motor yükündeki HC emisyonları sırasıyla 0,096 g/kWh, 0,076 g/kWh, 0,086 g/kWh ve 0,092 g/kWh olarak ölçülmüştür. Alkoller kendi aralarında değerlendirildiğinde, en düşük sonuçların 1-bütanol alkolü ile gerçekleştiği, bunu sırasıyla 1-pentanol ve 1-heksanolün izlediği tespit edilmiştir. Bu durum, 1-bütanolün sahip olduğu yüksek oksijen içeriği ile ilişkilendirilebilir. Hazar ve Uyar (2015) dizel yakıtına %2, %8, %12 ve %16 oranlarında izopropil alkol ilavesinin HC emisyonlarını düşürdüğünü belirlemişlerdir.



Şekil 14. Dizel yakıtına farklı alkol ilavelerinin HC emisyonu üzerine etkisi

3.3.4. NO_x emisyonu

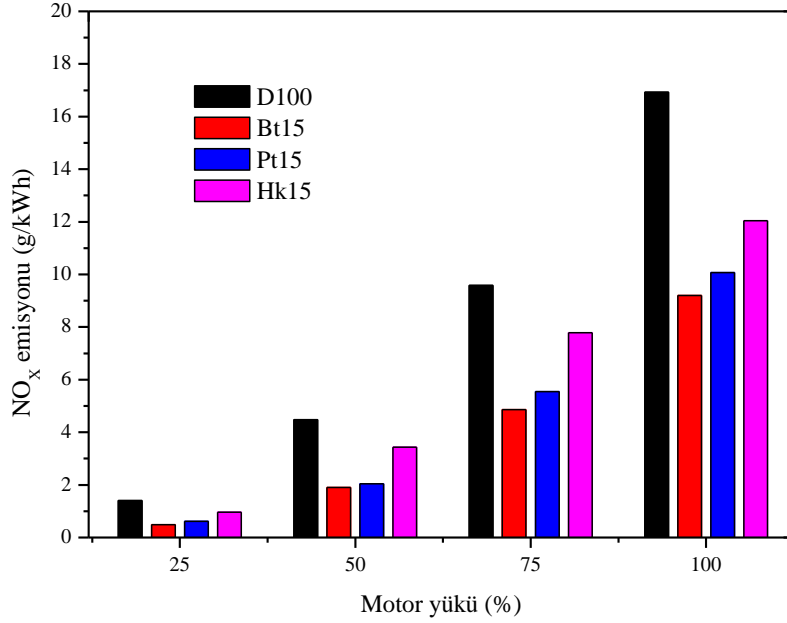
Hava yaklaşık olarak %78 oranında azot gazından oluşmaktadır. Bu gaz, normal şartlar altında yanma sırasında reaksiyona girmemekte ve yanma sonu ürünlerinde N₂ gazı olarak çıkmaktadır. Fakat içten yanmalı motorlarda silindir içerisindeki yanma sonucu ulaşılan yüksek sıcaklık neticesinde yanma odasına emilen hava içindeki N₂ gazı oksijen molekülleri ile reaksiyona girerek istenmeyen azot oksit gazları oluşturmaktadır. Azot oksitleri oluşturan en fazla gaz azot monoksit (NO)'tir. Bu gazın çevreye salınması sırasında NO gazının bir bölümü azot dioksit (NO₂) ve diğer NO_x gazlarına dönüşmektedir (Özsezen ve ark., 2006). Ancak N₂O, N₂O₅ ve NO₃ gazları çok düşük miktarlarda oluştuğu için genel olarak dikkate alınmamaktadır. Dizel motorlarda meydana gelen en zararlı emisyonlardan olan NO_x, insanlar ve çevre üzerinde olumsuz etkilere sebep olmaktadır. Çevre bilincinin giderek arttığı dönemde sıkı emisyon düzenlemelerini karşılamak için NO_x emisyonunun kontrol altında tutulması ve hatta azaltılması gereklidir (Atmanlı ve Yılmaz, 2020).

Shu ve ark. (2018) doğal gaz/dizel yakıt karışımı ile test edilen bir dizel motorunda pilot enjeksiyon açısının geciktirilmesinin NO_x emisyonlarını azaltmada efektif bir yol olabileceğini önermiştir. Oksijen moleküllerine sahip biyoyakıtların NO_x oluşum reaksiyonları oldukça karmaşıktır (Atmanlı ve Yılmaz, 2020). NO_x emisyonlarının oluşması açısından NO_x oluşum mekanizmalarının anlaşılması önem arz etmektedir. Dizel motorlarda yanma sırasında meydana gelen NO_x emisyonlarının oluşumunu açıklayan birçok mekanizma bulunmasına rağmen, en yaygın mekanizmalar Zeldovich ve Fenimore mekanizmalarıdır (Palash ve ark., 2013).

D100, Bt15, Pt15 ve Hk15 test yakıtlarının farklı motor yüklerinde NO_x emisyonlarında meydana gelen değişim Şekil 15’de sunulmuştur. Tüm test yakıtları için motor yükünün artışına bağlı olarak silindir içi sıcaklığının artması ile NO_x emisyonlarının arttığı görülmektedir (İleri, 2016). D100, Bt15, Pt15 ve Hk15 test yakıtlarının %100 motor yükündeki NO_x emisyonları sırasıyla 16,93 g/kWh, 9,20 g/kWh, 10,08 g/kWh ve 12,04 g/kWh olarak tespit edilmiştir. Dizel yakıtı test edilen yakıtlar içerisinde en yüksek NO_x emisyonlarına sahip yakıt olarak dikkat çekmektedir. Dizel yakıtına ağır alkollerin ilave edilmesi ile NO_x emisyonlarının azaldığı görülmektedir. NO_x emisyonlarının oluşmasındaki en önemli faktörler silindir içerisindeki sıcaklık, basınç, oksijen miktarı ve süredir. Alkollerin gizli buharlaşma ısılarının yüksek olması, moleküler yapılarında oksijen bulundurmaları ve dizel yakıtına göre kalori değerlerinin oldukça düşük olması silindir içi sıcaklığının azalmasına yol açmaktadır.

Şekil 6’da verilen test yakıtlarının EGS değerleri de göz önünde bulundurulduğunda, alkollerin dizel yakıtına katılmasının silindir içerisinde soğutma etkisi yaptığı anlaşılmakta ve dolayısıyla azot ve oksijen gazları tepkimeye girmesi zayıflamaktadır. Sonuç olarak bu durum NO_x emisyonlarının azalmasına neden olmaktadır.

Çelik ve ark. (2017)’de alkollerin yüksek gizli buharlaşma ısılarından dolayı yanma odası sıcaklığını azalttığını ve böylece NO_x emisyonlarının azalmasına neden olduğunu vurgulamışlardır. Babu ve Anand (2017) dizel/biyodizel yakıt karışımına n-pentanol ve n-hekzanol ilavelerinin NO emisyonlarını azalttığını ve bu duruma alkollerin sahip olduğu düşük kalori değeri ve yüksek gizli buharlaşma ısılarının neden olduğunu rapor etmişlerdir. Atmanlı ve Yılmaz (2018) dizel yakıtına %5, %25 ve %35 oranlarında n-bütanol ve n-pentanol ilave ettikleri yakıtların NO_x emisyonlarının dizel yakıtına kıyasla n-bütanol katkılı yakıtlarda ortalama %15,86 ve 1-pentanol katkılı yakıtlarda ortalama %12,67 oranlarında düşük çıktığını bulmuşlardır. Benzer sonuçlar ve nedenleri birçok araştırmacı tarafından da açıklanmıştır (Kumar ve Saravanan, 2015; Atmanlı, 2016; Zhu ve ark., 2016; Coughlin ve Hoxie, 2017; Yılmaz ve ark., 2017).

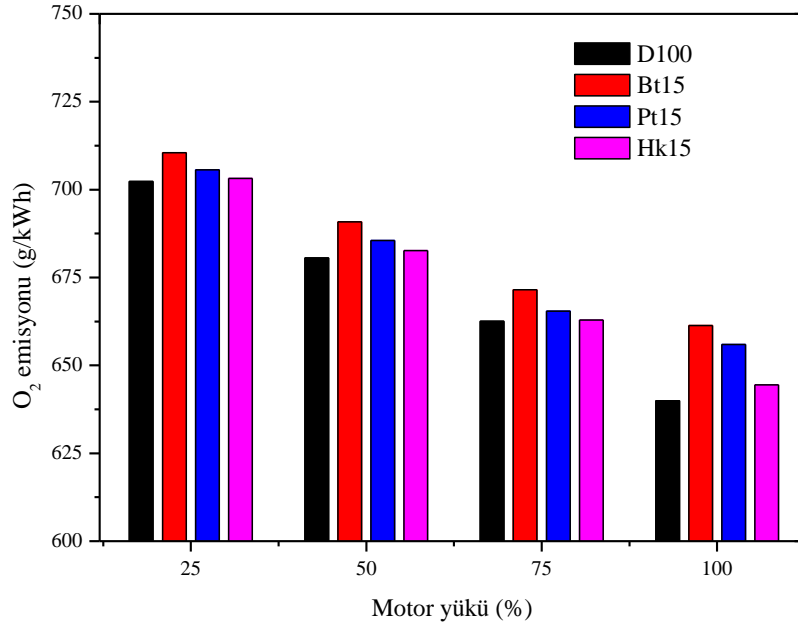


Şekil 15. Dizel yakıtına farklı alkol ilavelerinin NO_x emisyonu üzerine etkisi

3.3.5. O_2 emisyonu

Dizel yakıtına farklı alkol ilavelerinin O_2 emisyonu üzerine etkileri motor yükünün bir fonksiyonu olarak Şekil 16’da verilmiştir. Şekil 16 incelendiğinde, motor yükünün artmasına bağlı olarak O_2 emisyonlarının azaldığı ve minimum değerlerin maksimum motor yükünde elde edildiği görülmektedir. D100, Bt15, Pt15 ve Hk15 test yakıtlarının %100 motor yükündeki O_2 emisyonları sırasıyla 639,97 g/kWh, 661,31 g/kWh, 655,97 g/kWh ve 644,49 g/kWh olarak tespit edilmiştir. Dizel yakıtına alkol ilavesi ile O_2 emisyonlarının arttığı tespit edilirken, tüm motor yüklerinde en yüksek değerlerin ise 1-bütanol katkılı yakıt karışımında elde edildiği belirlenmiştir. 1-bütanol ilaveli yakıtı sırasıyla 1-pentanol ve 1-hekzanol katkılı yakıtlar takip etmiştir. Bu durum alkollerin bünyesinde bulunan yüksek orandaki oksijen molekülleri ile açıklanabilir. Dizel yakıtı moleküler yapısında oksijen barındırmadığı için en düşük O_2 emisyonlarına neden olmuştur (Ağbulut ve ark., 2019).

Düşük motor yüklerinde volümetrik verimin yüksek olması O_2 emisyonlarının artmasına neden olmuştur. Motor yükünün artması ile yanma odasında ideal karışım koşullarının sağlanması ve bundan dolayı yanma hızının da artış göstermesi yanma kalitesini iyileştirmiş ve daha az O_2 emisyonunun salımına neden olmuştur. Benzer sonuçlar Aydın ve Öğüt (2017) ve Yeşilyurt ve ark. (2018) tarafından yapılan çalışmalarda da elde edilmiştir.



Şekil 16. Dizel yakıtına farklı alkol ilavelerinin O₂ emisyonu üzerine etkisi

4. Sonuçlar

Bu çalışmada; tek silindirli, dört zamanlı, direkt püskürtmeli bir dizel motorda farklı yükler (%25, %50, %75 ve %100) altında dizel/1-bütanol, dizel/1-pentanol ve dizel/1-hekzanol karışım yakıtları test edilmiş ve motor performans, egzoz emisyon ve yanma karakteristik sonuçları referans dizel yakıtı ile karşılaştırılmıştır. Alkoller dizel yakıtına hacimsel olarak %15 oranında ilave edilmişlerdir. Test yakıtlarının dizel motorda çalıştırılması sırasında herhangi bir sorun ile karşılaşmamıştır. Bu çalışmadan elde edilen önemli sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- FTV değerleri tüm motor yüklerinde D100 yakıtı ile elde edilirken, alkol karışımlı yakıtlarda en yüksek sonuca Hk15 karışım yakıtı ile ulaşılmıştır. Çünkü alkoller içerisinde enerji içeriği en yüksek olan alkol 1-hekzanol olarak bulunmuştur.
- Alkol/dizel yakıt karışımlarının kalori değerlerinin dizel yakıtından düşük olması FÖYT ve FÖET değerlerinin dizel yakıtına kıyasla yüksek çıkmasına neden olmuştur.
- D100, Bt15, Pt15 ve Hk15 test yakıtları için ortalama volümetrik verim değerleri sırasıyla %72,11, %72,44, %72,57 ve %72,67 olarak bulunmuştur.
- Dizel yakıtına ağır alkollerin eklenmesi sonucunda EGS değerlerinin azaldığı, bu durumun alkollerin gizli buharlaşma ısılarından kaynaklandığı, çünkü alkollerin sahip olduğu yüksek gizli buharlaşma ısılarından dolayı silindir içerisinde buharlaşabilmek için ortamdan daha fazla ısı çekerek soğutma etkisine neden olduğu bulunmuştur.
- Motor yükünün artmasına bağlı olarak test yakıtlarının maksimum silindir içi basınçlarının arttığı ve en yüksek silindir içi basıncının 1-hekzanol katkılı yakıt karışımında meydana geldiği tespit edilmiştir.
- Test yakıtlarının NISH değerleri incelendiğinde, %100 motor yükünde maksimum NISH değerleri dizel yakıtında 357°'de 29,55 J/°, Bt15 yakıtında 361°'de 31,14 J/°, Pt15 yakıtında 359°'de 32,66 J/° ve Hk15 yakıtında 358°'de 33,80 J/° olarak belirlenmiştir. Düşük setan sayısına sahip alkollerin dizel yakıtına eklenmesi sonucunda TG periyodunun genel olarak uzadığı ve yanma odasında daha fazla yakıtın birikmesi ile bu yakıtın ani bir şekilde yanması ve alkollerin sahip olduğu yüksek oksijen içeriğinin yanma hızını artırması sonucunda NISH değerlerinin arttığı tespit edilmiştir.
- Ağır alkol/dizel yakıt karışımlarının egzoz emisyon davranışları değerlendirildiğinde, dizel yakıtına göre alkol içeren yakıtların CO, HC ve NO_x emisyonlarının azaldığı; CO₂ ve O₂ emisyonlarının ise arttığı belirlenmiştir. Alkoller kendi içerisinde karşılaştırıldıklarında; CO, HC ve NO_x emisyonları açısından Hk15 yakıtının en yüksek sonuçları verdiğini, CO₂ ve O₂ emisyonları açısından ise Bt15 karışım yakıtını en yüksek sonuçları verdiğini görülmüştür.

Tüm sonuçlar göz önünde bulundurularak; 1-bütanol, 1-pentanol ve 1-hekzanol ağır alkollerinin dizel yakıtına %15 oranında katılmasının egzoz emisyon ve yanma karakteristiklerini iyileştirdiği, bu alkoller içerisinde ise diğerlerine göre enerji seviyesinin yüksek olması nedeniyle 1-hekzanolün en iyi sonuçları verdiğini söylenebilir. Bu alkollerin ülkemizde üretimlerinin gerçekleştirilmesiyle dizel yakıtı için ucuz bir katkı maddesi olacağı gibi ekonomik olarak da dışa bağımlılık azalacaktır. Ancak bu çalışmada kullanılan yakıtlar farklı test motorlarında olduğu kadar taşıt motorlarında da kullanılarak elde edilen sonuçlar genelleştirilmeli hatta uzun süreli testler ile motor parçalarına olan etkileri araştırılmalıdır. Ayrıca; püskürtme avansı, püskürtme basıncı ve sıkıştırma oranı gibi motor işletme parametrelerinin değiştirilmesinin motor performansı, egzoz emisyonları ve yanma davranışları üzerine etkileri incelenerek ağır alkol/dizel yakıt karışımları için en ideal çalışma koşulları belirlenmelidir.

Ek 1

Motor yükünün (Δm) hassasiyet değeri $\pm 0,1$ kg ve motor hızının (ΔN) hassasiyet değeri 1 d/d olduğu bilinmektedir. Yakıt örnekleri için hacim (Δf) ve zaman (Δt) değişkenlerinin belirsizlik değerleri sırasıyla ± 0.1 cc ve ± 0.2 s olarak kabul edilmiştir. Bu çerçevede, dizel yakıtı için %50 motor yükü ve sabit 1500 d/d motor devrinde belirsizlik analizinin hesaplanması aşağıda sunulmuştur. %50 yük şartlarında ki motor parametreleri ve bunların değerleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Motor parametreleri ve değerleri

No	Parametre	Değer
1	Yük (m)	6 kg
2	Motor devri (N)	1500 d/d
3	Yakıt tüketimi zamanı (t)	60 s
4	Tüketilen yakıtın hacmi (f)	11 cc
5	Yoğunluk (ρ)	0,825 g/cm ³
6	Yakıtın alt ısıl değer (Q_{AID})	42553 kJ/kg

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{1}{1500} = \%0.0667 \quad (1)$$

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{0,1}{6} = \%1,6667 \quad (2)$$

- Fren gücü için belirsizlik analizi**

$$P_e = \frac{2\pi NT}{60 \times 1000} = \frac{2\pi Nmgl}{60000} = \frac{2 \times 3.14 \times 1500 \times 6 \times 9,81 \times 0.185}{60000} = 1,710 \text{ kW} \quad (3)$$

$$\frac{\partial P_e}{\partial N} = \frac{2\pi mgl}{60000} = \frac{2 \times 3.14 \times 6 \times 9,81 \times 0,185}{60000} = 0,001140304 \quad (4)$$

$$\frac{\partial P_e}{\partial m} = \frac{2\pi Ngl}{60000} = \frac{2 \times 3.14 \times 1500 \times 9,81 \times 0,185}{60000} = 0,28507597 \quad (5)$$

$$\Delta P_e = \sqrt{\left(\Delta N \frac{\partial P_e}{\partial N}\right)^2 + \left(\Delta m \frac{\partial P_e}{\partial m}\right)^2} \quad (6)$$

$$\Delta P_e = \sqrt{(1 \times 0,001140304)^2 + (0,1 \times 0,28507597)^2} \quad (7)$$

$$\Delta P_e = 0,028530393 \text{ kW} \quad (8)$$

$$\frac{\Delta P_e}{P_e} = \frac{0,028598676}{1,710} = 1,668 \% \quad (9)$$

- Kütlesel yakıt tüketimi için belirsizlik analizi**

$$\dot{m}_{yakıt} = \frac{f \times 3600 \times \rho}{t \times 1000} = \frac{11 \times 3600 \times 0,825}{60 \times 1000} = 0,5445 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \dot{m}_{yakıt}}{\partial t} = -\frac{f \times 3600 \times \rho}{(t)^2 \times 1000} = -\frac{11 \times 3600 \times 0,825}{60 \times 60 \times 1000} = -0,009075 \quad (11)$$

$$\frac{\partial \dot{m}_{yakıt}}{\partial f} = \frac{3600 \times \rho}{t \times 1000} = \frac{3600 \times 0,825}{60 \times 1000} = 0,0495 \quad (12)$$

$$\Delta \dot{m}_{yakıt} = \sqrt{\left(\Delta t \frac{\partial \dot{m}_{yakıt}}{\partial t}\right)^2 + \left(\Delta f \frac{\partial \dot{m}_{yakıt}}{\partial f}\right)^2} \quad (13)$$

$$\Delta \dot{m}_{yakıt} = \sqrt{(0,2 \times -0,009075)^2 + (0,1 \times 0,0495)^2} \quad (14)$$

$$\Delta \dot{m}_{yakıt} = 0,00527225995 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \quad (15)$$

$$\frac{\Delta \dot{m}_{yakıt}}{\dot{m}_{yakıt}} = \frac{0,00527225995}{0,5445} = \%0,968 \quad (16)$$

- Fren termal verimi için belirsizlik analizi**

$$\eta_t = \frac{P_e \times 3600 \times 100}{\dot{m}_{yakıt} \times Q_{AID}} = \frac{1,710 \times 3600 \times 100}{0,5445 \times 42553} = \%26,5687146 \quad (17)$$

$$\frac{\partial \eta_t}{\partial P_e} = \frac{3600 \times 100}{\dot{m}_{yakıt} \times Q_{AID}} = \frac{3600 \times 100}{0,5445 \times 42553} = 15,53726 \quad (18)$$

$$\frac{\partial \eta_t}{\partial \dot{m}_{yakıt}} = -\frac{P_e \times 3600 \times 100}{(\dot{m}_{yakıt})^2 \times Q_{AID}} = -\frac{1,710 \times 3600 \times 100}{(0,5445)^2 \times 42553} = -48,79470083 \quad (19)$$

$$\Delta\eta_t = \sqrt{\left(\Delta P_e \frac{\partial\eta_t}{\partial P_e}\right)^2 + \left(\Delta\dot{m}_{yakıt} \frac{\partial\eta_t}{\partial\dot{m}_{yakıt}}\right)^2} \quad (20)$$

$$\Delta\eta_t = \sqrt{(0,028530393 \times 15,53726)^2 + (0,00527225995 \times -48,79470083)^2} \quad (21)$$

$$\Delta\eta_t = \%0,512525785 \quad (22)$$

$$\frac{\Delta\eta_t}{\eta_t} = \frac{0,512525785}{26,5687146} = \%1,929 \quad (23)$$

• **Fren özgül yakıt tüketimi için belirsizlik analizi**

$$F\ddot{O}YT = \frac{\dot{m}_{yakıt}}{P_e} = \frac{0,5445}{1,710} = 0,31842 \frac{kg}{kWh} \quad (24)$$

$$\frac{\partial F\ddot{O}YT}{\partial P_e} = -\frac{\dot{m}_{yakıt}}{(P_e)^2} = -\frac{0,5445}{(1,710)^2} = -0,18621 \quad (25)$$

$$\frac{\partial F\ddot{O}YT}{\partial \dot{m}_{yakıt}} = \frac{1}{P_e} = \frac{1}{1,710} = 0,584795 \quad (26)$$

$$\Delta F\ddot{O}YT = \sqrt{\left(\Delta P_e \frac{\partial F\ddot{O}YT}{\partial P_e}\right)^2 + \left(\Delta\dot{m}_{yakıt} \frac{\partial F\ddot{O}YT}{\partial \dot{m}_{yakıt}}\right)^2} \quad (27)$$

$$\Delta F\ddot{O}YT = \sqrt{(0,028530393 \times -0,18621)^2 + (0,00527225995 \times 0,584795)^2} \quad (28)$$

$$\Delta F\ddot{O}YT = 0,00614249621 \frac{kg}{kWh} \quad (29)$$

$$\frac{\Delta F\ddot{O}YT}{F\ddot{O}YT} = \frac{0,00614249621}{0,31842} = \%1,929 \quad (30)$$

Kaynaklar

Acaroğlu, M., Aydoğan, H., Özçelik, A. E. (2018). Yakıtlar ve Yanma. Nobel Yayın Dağıtım Tic. Ltd. Şti., Yayın No: 2143, Teknik Bilimler: 177, Ostim, Ankara, 2. Basım. ISBN: 978-605-7928-52-8.

Ağbulut, Ü., Sarıdemir, S., Albayrak, S. (2019). Experimental investigation of combustion, performance and emission characteristics of a diesel engine fuelled with diesel–biodiesel–alcohol blends. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 41(9):389.

Aksoy, F., Bayrakçeken, H. (2010). Dizel Yakıtına% 5 ve % 10 İzopropil Alkol (IPA) İlavesinin Motor Performans ve Emisyonlarına Etkisi. Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi, 2(3):37-43.

Alagumalai, A. (2015). Combustion characteristics of lemongrass (*Cymbopogon flexuosus*) oil in a partial premixed charge compression ignition engine. Alexandria Engineering Journal, 54(3):405-413.

Aloko, D., Adebayo, G. A., Oke, O. E. (2007). Evaluation of diesel-hexanol blend as diesel fuel. Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 10(6):151-156.

Alptekin, E. (2017). Evaluation of ethanol and isopropanol as additives with diesel fuel in a CRDI diesel engine. Fuel, 205:161-172.

Alptekin, E., Canakci, M., Ozsezen, A. N., Turkcan, A., Sanli, H. (2015). Using waste animal fat based biodiesels–bioethanol–diesel fuel blends in a DI diesel engine. Fuel, 157:245-254.

Anand, K., Sharma, R. P., Mehta, P. S. (2011). Experimental investigations on combustion, performance and emissions characteristics of neat karanja biodiesel and its methanol blend in a diesel engine. Biomass and Bioenergy, 35(1):533-541.

Appavu, P., Venu, H. (2019). Quaternary blends of diesel/biodiesel/vegetable oil/pentanol as a potential alternative feedstock for existing unmodified diesel engine: Performance, combustion and emission characteristics. Energy, 186:115856.

Ashok, B., Nanthagopal, K., Saravanan, B., Azad, K., Patel, D., Sudarshan, B., Ramasamy, R. A. (2019a). Study on isobutanol and Calophyllum inophyllum biodiesel as a partial replacement in CI engine applications. Fuel, 235:984-994.

Ashok, B., Nanthagopal, K., Darla, S., Chyuan, O. H., Ramesh, A., Jacob, A., Sahil, G., Thiyagarajan, S., Geo, V. E. (2019b). Comparative assessment of hexanol and decanol as oxygenated additives with calophyllum inophyllum biodiesel. Energy, 173:494-510.

Atmanli, A. (2016). Comparative analyses of diesel–waste oil biodiesel and propanol, n-butanol or 1-pentanol blends in a diesel engine. Fuel, 176:209-215.

- Atmanli, A., Yilmaz, N. (2018). A comparative analysis of n-butanol/diesel and 1-pentanol/diesel blends in a compression ignition engine. *Fuel*, 234:161-169.
- Atmanli, A., Yilmaz, N. (2020). An experimental assessment on semi-low temperature combustion using waste oil biodiesel/C3-C5 alcohol blends in a diesel engine. *Fuel*, 260:116357.
- Aydın, F., Öğüt, H. (2017). Effects of using ethanol-biodiesel-diesel fuel in single cylinder diesel engine to engine performance and emissions. *Renewable Energy*, 103:688-694.
- Babu, D., Anand, R. (2017). Effect of biodiesel-diesel-n-pentanol and biodiesel-diesel-n-hexanol blends on diesel engine emission and combustion characteristics. *Energy*, 133:761-776.
- Balamurugan, T., Nalini, R. (2014). Experimental investigation on performance, combustion and emission characteristics of four stroke diesel engine using diesel blended with alcohol as fuel. *Energy*, 78:356-363.
- Campos-Fernández, J., Arnal, J. M., Gómez, J., Dorado, M. P. (2012). A comparison of performance of higher alcohols/diesel fuel blends in a diesel engine. *Applied Energy*, 95:267-275.
- Campos-Fernandez, J., Arnal, J. M., Gomez, J., Lacalle, N., Dorado, M. P. (2013). Performance tests of a diesel engine fueled with pentanol/diesel fuel blends. *Fuel*, 107:866-872.
- Chen, Z., Liu, J., Han, Z., Du, B., Liu, Y., Lee, C. (2013). Study on performance and emissions of a passenger-car diesel engine fueled with butanol–diesel blends. *Energy*, 55:638-646.
- Cheung, C. S., Di, Y., Huang, Z. (2008). Experimental investigation of regulated and unregulated emissions from a diesel engine fueled with ultralow-sulfur diesel fuel blended with ethanol and dodecanol. *Atmospheric Environment*, 42(39):8843-8851.
- Cheung, C. S., Zhu, L., Huang, Z. (2009). Regulated and unregulated emissions from a diesel engine fueled with biodiesel and biodiesel blended with methanol. *Atmospheric Environment*, 43(32):4865-4872.
- Coughlin, B., Hoxie, A. (2017). Combustion characteristics of ternary fuel Blends: Pentanol, butanol and vegetable oil. *Fuel*, 196:488-496.
- Çelik, M., Örs, İ., Bayindirli, C., Demiralp, M. (2017). Experimental investigation of impact of addition of bioethanol in different biodiesels, on performance, combustion and emission characteristics. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31(11):5581-5592.
- De Pours, M. V., Sathiyagnanam, A. P., Rana, D., Kumar, B. R., Saravanan, S. (2017). 1-Hexanol as a sustainable biofuel in DI diesel engines and its effect on combustion and emissions under the influence of injection timing and exhaust gas recirculation (EGR). *Applied Thermal Engineering*, 113:1505-1513.
- Devan, P. K., Mahalakshmi, N. V. (2009). A study of the performance, emission and combustion characteristics of a compression ignition engine using methyl ester of paradise oil–eucalyptus oil blends. *Applied Energy*, 86(5):675-680.
- Doğan, B., Erol, D., Yaman, H., Kodanlı, E. (2017). The effect of ethanol-gasoline blends on performance and exhaust emissions of a spark ignition engine through exergy analysis. *Applied Thermal Engineering*, 120:433-443.
- Doğan, O. (2011). The influence of n-butanol/diesel fuel blends utilization on a small diesel engine performance and emissions. *Fuel*, 90(7):2467-2472.
- Duraisamy, G., Rangasamy, M., Govindan, N. (2020). A comparative study on methanol/diesel and methanol/PODE dual fuel RCCI combustion in an automotive diesel engine. *Renewable Energy*, 145:542-556.
- El-Seesy, A. I., Abdel-Rahman, A. K., Bady, M., Ookawara, S. J. E. C. (2017). Performance, combustion, and emission characteristics of a diesel engine fueled by biodiesel-diesel mixtures with multi-walled carbon nanotubes additives. *Energy Conversion and Management*, 135:373-393.
- Emiroğlu, A. O. (2019). Effect of fuel injection pressure on the characteristics of single cylinder diesel engine powered by butanol-diesel blend. *Fuel*, 256:115928.
- Emiroğlu, A. O., Şen, M. (2018a). Combustion, performance and emission characteristics of various alcohol blends in a single cylinder diesel engine. *Fuel*, 212:34-40.

- Emiroğlu, A. O., Şen, M. (2018b). Combustion, performance and exhaust emission characterizations of a diesel engine operating with a ternary blend (alcohol-biodiesel-diesel fuel). *Applied Thermal Engineering*, 133:371-380.
- Geo, V. E., Sonthalia, A., Nagarajan, G., Nagalingam, B. (2017). Studies on performance, combustion and emission of a single cylinder diesel engine fuelled with rubber seed oil and its biodiesel along with ethanol as injected fuel. *Fuel*, 209:733-741.
- Hazar, H., Uyar, M. (2015). Experimental investigation of isopropyl alcohol (IPA)/diesel blends in a diesel engine for improved exhaust emissions. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 4(1):1-6.
- Holman, P. (2012). *Experimental Methods for Engineers*. Eighth ed. New York, USA: McGraw-Hill.
- Huang, Z., Lu, H., Jiang, D., Zeng, K., Liu, B., Zhang, J., Wang, X. (2004). Combustion behaviors of a compression-ignition engine fuelled with diesel/methanol blends under various fuel delivery advance angles. *Bioresource technology*, 95(3):331-341.
- Hulwan, D. B., Joshi, S. V. (2011). Performance, emission and combustion characteristic of a multicylinder DI diesel engine running on diesel–ethanol–biodiesel blends of high ethanol content. *Applied Energy*, 88(12):5042-5055.
- Ibrahim, A. (2016). Performance and combustion characteristics of a diesel engine fuelled by butanol–biodiesel–diesel blends. *Applied Thermal Engineering*, 103:651-659.
- Ileri, E. (2016). Experimental study of 2-ethylhexyl nitrate effects on engine performance and exhaust emissions of a diesel engine fueled with n-butanol or 1-pentanol diesel–sunflower oil blends. *Energy Conversion and Management*, 118:320-330.
- Imdadul, H. K., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Zulkifli, N. W. M., Alabdulkarem, A., Kamruzzaman, M., Rashed, M. M. (2016a). A comparative study of C4 and C5 alcohol treated diesel–biodiesel blends in terms of diesel engine performance and exhaust emission. *Fuel*, 179:281-288.
- Imdadul, H. K., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Zulkifli, N. W. M., Alabdulkarem, A., Rashed, M. M., Teoh, Y. H., How, H. G. (2016b). Higher alcohol–biodiesel–diesel blends: an approach for improving the performance, emission, and combustion of a light-duty diesel engine. *Energy Conversion and Management*, 111:174-185.
- Jamrozik, A., Tutak, W., Gnatowska, R., Nowak, Ł. (2019). Comparative analysis of the combustion stability of diesel-methanol and diesel-ethanol in a dual fuel engine. *Energies*, 12(6):971.
- Karabektas, M., Hosoz, M. (2009). Performance and emission characteristics of a diesel engine using isobutanol–diesel fuel blends. *Renewable Energy*, 34(6):1554-1559.
- Kattela, S. P., Vysyaraju, R. K. R., Surapaneni, S. R., Ganji, P. R. (2019). Effect of n-butanol/diesel blends and piston bowl geometry on combustion and emission characteristics of CI engine. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(2):1661-1674.
- Koivisto, E., Ladommatos, N., Gold, M. (2015). Systematic study of the effect of the hydroxyl functional group in alcohol molecules on compression ignition and exhaust gas emissions. *Fuel*, 153:650-663.
- Kumar, B. R., Saravanan, S. (2015). Effect of exhaust gas recirculation (EGR) on performance and emissions of a constant speed DI diesel engine fueled with pentanol/diesel blends. *Fuel*, 160:217-226.
- Kumar, B. R., Saravanan, S. (2016). Use of higher alcohol biofuels in diesel engines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60:84-115.
- Kumar, B. R., Saravanan, S., Rana, D., Nagendran, A. (2016). A comparative analysis on combustion and emissions of some next generation higher-alcohol/diesel blends in a direct-injection diesel engine. *Energy Conversion and Management*, 119:246-256.
- Kumar, S., Cho, J. H., Park, J., Moon, I. (2013). Advances in diesel–alcohol blends and their effects on the performance and emissions of diesel engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22:46-72.
- Li, L., Wang, J., Wang, Z., Xiao, J. (2015a) Combustion and emission characteristics of diesel engine fueled with diesel/biodiesel/pentanol fuel blends, *Fuel*, 156:211-218, 2015a.
- Li, L., Wang, J., Wang, Z., Liu, H. (2015b). Combustion and emissions of compression ignition in a direct injection diesel engine fueled with pentanol. *Energy*, 80:575-581.
- Li, F., Yi, B., Fu, W., Song, L., Liu, T., Hu, H., Lin, Q. (2019). Experimental study on spray characteristics of long-chain alcohol-diesel fuels in a constant volume chamber. *Journal of the Energy Institute*, 92(1):94-107.

- Ma, B., Yao, A., Yao, C., Wang, B., Gao, J., Chen, C., Wu, T. (2019). Experimental study on energy balance of different parameters in diesel methanol dual fuel engine. *Applied Thermal Engineering*, 159:113954.
- Ma, Y., Huang, S., Huang, R., Zhang, Y., Xu, S. (2017). Ignition and combustion characteristics of n-pentanol–diesel blends in a constant volume chamber. *Applied Energy*, 185:519-530.
- Machado, H. B., Dekishima, Y., Luo, H., Lan, E. I., Liao, J. C. (2012). A selection platform for carbon chain elongation using the CoA-dependent pathway to produce linear higher alcohols. *Metabolic engineering*, 14(5):504-511.
- Nabi, M. N., Zare, A., Hossain, F. M., Bodisco, T. A., Ristovski, Z. D., Brown, R. J. (2017). A parametric study on engine performance and emissions with neat diesel and diesel-butanol blends in the 13-Mode European Stationary Cycle. *Energy Conversion and Management*, 148:251-259.
- Nanthagopal, K., Ashok, B., Saravanan, B., Patel, D., Sudarshan, B., Ramasamy, R. A. (2018). An assessment on the effects of 1-pentanol and 1-butanol as additives with Calophyllum Inophyllum biodiesel. *Energy Conversion and Management*, 158:70-80.
- Nanthagopal, K., Ashok, B., Saravanan, B., Pathy, M. R., Sahil, G., Ramesh, A., Nabi, M. N., Rasul, M. G. (2019). Study on decanol and Calophyllum Inophyllum biodiesel as ternary blends in CI engine. *Fuel*, 239:862-873.
- Nour, M., Attia, A. M., Nada, S. A. (2019). Combustion, performance and emission analysis of diesel engine fuelled by higher alcohols (butanol, octanol and heptanol)/diesel blends. *Energy conversion and management*, 185:313-329.
- Ors, I., Kahraman, A., Ciniviz, M. (2017). Performance, emission and combustion analysis of a compression ignition engine using biofuel blends. *Thermal Science*, 21(1 Part B):511-522.
- Özener, O., Yüksek, L., Ergenç, A. T., Özkan, M. (2014). Effects of soybean biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics. *Fuel*, 115:875-883.
- Özer, S. (2010). Bütanol kullanımının dizel motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkilerinin deneysel olarak araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük, 2010.
- Özsezen, A.N., Çanakçı, M., Sayın, C. (2006). Atık kızartma yağı kökenli biyodizelin ön yanma odalı bir dizel motorun emisyonları üzerine etkisi. *Biyoyakıt (Biyodizel-Biyooetanol) Sempozyumu*, Bursa, 41-51, 29-30 Haziran.
- Palash, S. M., Kalam, M. A., Masjuki, H. H., Masum, B. M., Fattah, I. R., Mofijur, M. (2013). Impacts of biodiesel combustion on NOx emissions and their reduction approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23:473-490.
- Pan, M., Huang, R., Liao, J., Jia, C., Zhou, X., Huang, H., Huang, X. (2019). Experimental study of the spray, combustion, and emission performance of a diesel engine with high n-pentanol blending ratios. *Energy Conversion and Management*, 194:1-10.
- Pandian, A. K., Munuswamy, D. B., Radhakrishnan, S., Devarajan, Y., Ramakrishnan, R. B. B., Nagappan, B. (2018). Emission and performance analysis of a diesel engine burning cashew nut shell oil bio diesel mixed with hexanol. *Petroleum Science*, 15(1):176-184.
- Park, S. H., Cha, J., Lee, C. S. (2012). Impact of biodiesel in bioethanol blended diesel on the engine performance and emissions characteristics in compression ignition engine. *Applied Energy*, 99:334-343.
- Pilusa, T. J., Mollagee, M. M., Muzenda, E. (2012). Reduction of vehicle exhaust emissions from diesel engines using the whale concept filter. *Aerosol and Air Quality Research*, 12(5):994–1006.
- Qi, D. H., Chen, H., Lee, C. F., Geng, L. M., Bian, Y. Z. (2010a). Experimental studies of a naturally aspirated, DI diesel engine fuelled with ethanol–biodiesel–water microemulsions. *Energy & Fuels*, 24(1):652-663.
- Qi, D. H., Chen, H., Geng, L. M., Bian, Y. Z., Ren, X. C. (2010b). Performance and combustion characteristics of biodiesel–diesel–methanol blend fuelled engine. *Applied Energy*, 87(5):1679-1686.
- Qi, D. H., Chen, H., Geng, L. M., Bian, Y. Z. (2010c). Experimental studies on the combustion characteristics and performance of a direct injection engine fueled with biodiesel/diesel blends. *Energy Conversion and Management*, 51(12):2985-2992.
- Rajak, U., Nashine, P., Verma, T. N., Pugazhendhi, A. (2019). Alternating the environmental benefits of Aegle-diesel blends used in compression ignition. *Fuel*, 256:115835.
- Rajak, U., Verma, T. N. (2018). Spirulina microalgae biodiesel–A novel renewable alternative energy source for compression ignition engine. *Journal of Cleaner Production*, 201:343-357.

- Rakopoulos, D. C., Rakopoulos, C. D., Giakoumis, E. G., Dimaratos, A. M., Kyritsis, D. C. (2010). Effects of butanol–diesel fuel blends on the performance and emissions of a high-speed DI diesel engine. *Energy Conversion and Management*, 51(10):1989-1997.
- Ramalingam, S., Mahalakshmi, N. V. (2020). Influence of Moringa oleifera biodiesel–diesel–hexanol and biodiesel–diesel–ethanol blends on compression ignition engine performance, combustion and emission characteristics. *RSC Advances*, 10(8):4274-4285.
- Ramesh, A., Ashok, B., Nanthagopal, K., Pathy, M. R., Tambare, A., Mali, P., Phuke, P., Patil, S., Subbarao, R. (2019). Influence of hexanol as additive with Calophyllum Inophyllum biodiesel for CI engine applications. *Fuel*, 249:472-485.
- Rasskazchikova, T. V., Kapustin, V. M., Karpov, S. A. (2004). Ethanol as high–octane additive to automotive gasolines. production and use in russia and abroad. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 40(4):203-210.
- Rocha, H. M. Z., da Silva Pereira, R., Nogueira, M. F. M., Belchior, C. R. P., de Lima Tostes, M. E. (2017). Experimental investigation of hydrogen addition in the intake air of compressed ignition engines running on biodiesel blend. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(7):4530-4539.
- Sayin, C., Ozsezen, A. N., Canakci, M. (2010). The influence of operating parameters on the performance and emissions of a DI diesel engine using methanol-blended-diesel fuel. *Fuel*, 89(7):1407-1414.
- Shrivastava, P., Verma, T. N. (2019). An experimental investigation into engine characteristics fueled with Lal ambari biodiesel and its blends. *Thermal Science and Engineering Progress*, 100356.
- Shrivastava, P., Salam, S., Verma, T. N., Samuel, O. D. (2020). Experimental and empirical analysis of an IC engine operating with ternary blends of diesel, karanja and roselle biodiesel. *Fuel*, 262:116608.
- Shu, J., Fu, J., Liu, J., Zhang, L., Zhao, Z. (2018). Experimental and computational study on the effects of injection timing on thermodynamics, combustion and emission characteristics of a natural gas (NG)-diesel dual fuel engine at low speed and low load. *Energy conversion and management*, 160:426-438.
- Suhaimi, H., Adam, A., Mrwan, A. G., Abdullah, Z., Othman, M. F., Kamaruzzaman, M. K., Hagos, F. Y. (2018). Analysis of combustion characteristics, engine performances and emissions of long-chain alcohol-diesel fuel blends. *Fuel*, 220:682-691.
- Sridhar, R., Jeevahan, J., Chandrasekaran, M. (2020). Effect of the addition of 1-pentanol on engine performance and emission characteristics of diesel and biodiesel fuelled single cylinder diesel engine. *International Journal of Ambient Energy*, 41(1):58-63.
- Sundar, R. C., Saravanan, G. (2011). Influence of hexanol-diesel blends on constant speed diesel engine. *Thermal Science*, 15(4):1215-1222.
- Şahin, Z., Durgun, O., Aksu, O. N. (2015). Experimental investigation of n-butanol/diesel fuel blends and n-butanol fumigation–evaluation of engine performance, exhaust emissions, heat release and flammability analysis. *Energy Conversion and Management*, 103:778-789.
- Tesfa, B., Mishra, R., Gu, F., Powles, N. (2010). Prediction models for density and viscosity of biodiesel and their effects on fuel supply system in CI engines. *Renewable energy*, 35(12):2752-2760.
- Tse, H., Leung, C. W., Cheung, C. S. (2015). Investigation on the combustion characteristics and particulate emissions from a diesel engine fueled with diesel-biodiesel-ethanol blends. *Energy*, 83:343-350.
- Tutak, W., Lukacs, K., Szwaja, S., Bereczky, A. (2015). Alcohol–diesel fuel combustion in the compression ignition engine. *Fuel*, 154:196-206.
- Ullman, T. L., Spreen, K. B., Mason, R. L. (1994). Effects of cetane number, cetane improver, aromatics, and oxygenates on 1994 heavy-duty diesel engine emissions. *SAE transactions*:682-702.
- Wei, L., Cheung, C. S., Huang, Z. (2014). Effect of n-pentanol addition on the combustion, performance and emission characteristics of a direct-injection diesel engine. *Energy*, 70:172-180.
- Wu, F., Xu, B., Liu, Y., Wu, J. (2019). Performance and Emission Characteristics of a Diesel Engine Fueled with Alcohol–Diesel Fuel Blends Containing Low Ratio of Alcohols. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 38(3):e13035.
- Xingcai, L., Zhen, H., Wugao, Z., Degang, L. (2004). The influence of ethanol additives on the performance and combustion characteristics of diesel engines. *Combustion Science and Technology*, 176(8):1309-1329.
- Yao, M., Wang, H., Zheng, Z., Yue, Y. (2010). Experimental study of n-butanol additive and multi-injection on HD diesel engine performance and emissions. *Fuel*, 89(9):2191-2201.

Yardımcı, M. H. (2008). Motor Teknolojisi. Nobel Yayın Dağıtım Tic. Ltd. Şti., Yayın No: 1298, Teknik Bilimler: 101, Ostim, Ankara.

Yeşilyurt, M. K., Eryılmaz, T., Arslan, M. (2018). A comparative analysis of the engine performance, exhaust emissions and combustion behaviors of a compression ignition engine fuelled with biodiesel/diesel/1-butanol (C4 alcohol) and biodiesel/diesel/n-pentanol (C5 alcohol) fuel blends. *Energy*, 165:1332-1351.

Yılmaz, N., Atmanlı, A. (2017a). Experimental evaluation of a diesel engine running on the blends of diesel and pentanol as a next generation higher alcohol. *Fuel*, 210:75-82.

Yılmaz, N., Atmanlı, A. (2017b). Experimental assessment of a diesel engine fueled with diesel-biodiesel-1-pentanol blends. *Fuel*, 191:190-197.

Yılmaz, N., Vigil, F. M., Benalil, K., Davis, S. M., Calva, A. (2014). Effect of biodiesel-butanol fuel blends on emissions and performance characteristics of a diesel engine. *Fuel*, 135:46-50.

Yılmaz, N., Atmanlı, A., Trujillo, M. (2017). Influence of 1-pentanol additive on the performance of a diesel engine fueled with waste oil methyl ester and diesel fuel. *Fuel*, 207:461-469.

Zhang, K., Sawaya, M. R., Eisenberg, D. S., Liao, J. C. (2008). Expanding metabolism for biosynthesis of non-natural alcohols. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(52):20653-20658.

Zhang, Z. H., Balasubramanian, R. (2016). Investigation of particulate emission characteristics of a diesel engine fueled with higher alcohols/biodiesel blends. *Applied Energy*, 163:71-80.

Zhong, W., Xuan, T., He, Z., Wang, Q., Li, D., Zhang, X., Huang, Y. Y. (2016). Experimental study of combustion and emission characteristics of diesel engine with diesel/second-generation biodiesel blending fuels. *Energy Conversion and Management*, 121:241-250.

Zhu, L., Xiao, Y., Cheung, C. S., Guan, C., Huang, Z. (2016). Combustion, gaseous and particulate emission of a diesel engine fueled with n-pentanol (C5 alcohol) blended with waste cooking oil biodiesel. *Applied Thermal Engineering*, 102:73-79.