

Dizel Motorlarında Alternatif Yakıt Olarak Bitkisel Yağ Kullanımının Deneysel İncelenmesi

Hüseyin Serdar YÜCESU

*Zonguldak Karaelmas Üniversitesi,
Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, 78100, Karabük-TÜRKİYE*

Recep ALTIN

*Milli Eğitim Bakanlığı, Projeler Koordinasyon Kurulu Başk.,
06500, Beşevler, Ankara-TÜRKİYE*

Selim ÇETİNKAYA

*Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi,
06500, Beşevler, Ankara-TÜRKİYE*

Geliş Tarihi 21.09.1999

Özet

Bu çalışmada, tek silindri bir dizel motorunda alternatif yakıt olarak bitkisel yağ kullanımının motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerde No 2-D dizel yakıtı ile birlikte dokuz değişik bitkisel yağ (ham ayçiçek yağı, ham pamuk yağı, ham soya yağı ve bunlardan elde edilen ayçiçek yağı metil esterleri, pamuk yağı metil esterleri, soya yağı metil esterleri ile rafine edilmiş haşhaş yağı, kanola yağı ve mısır yağı) kullanılmıştır. Motor performansı ve egzoz emisyon karakteristiklerini belirlemek amacıyla motor tam gaz-değişik devir ve sabit devir-değişik yük deneyine tabi tutulmuştur. Yapılan testler sonucunda bitkisel yağların performans değerlerinin dizel yakıtından daha düşük, duman koyuluğu bitkisel yağlarda daha yüksek, NO_x emisyonlarının ise No 2-D dizel yakıtından daha yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. Esterleştirme işlemi ile ham yağların fiziksel ve kimyasal özelliklerinde bir miktar iyileşme olduğu görülmüştür. Üretilen bitkisel yağ metil esteri esaslı yakıtların motor performansı değerlerinin ham yağlardan daha iyi ve dizel yakıtı performans değerlerine daha yakın olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Alternatif yakıtlar, Bitkisel yağlar, Bitkisel yağ metil esteri, Biyomotorin, Motor performansı

Experimental Investigation of Vegetable Oil Usage as Alternative Fuel in Diesel Engines

Abstract

In this experimental study, the effect of the usage of vegetable oils, as alternative fuels, on engine performance and exhaust emissions in a single cylinder diesel engine were investigated. No 2-D diesel fuel and nine different oils (raw sunflower oil, raw cottonseed oil, raw soybean oil, and sunflower methyl ester, cottonseed methyl ester, soybean methyl ester, obtained from the raw oils respectively and refined opium poppy oil, rapeseed and corn oil) were used. In order to determine emission and performance characteristics, the engine was tested with full load-varied speed and constant speed-varied load tests. Chemical and physical properties of the raw oils were improved by transesterification. Test results showed that, when

using vegetable oils, the engine performance and NO_x are lower, and smoke density is higher than the engine performance in which No 2-D diesel fuel is used. The engine performance with the methyl ester fuels is higher than that with the raw oils and are close to diesel fuel performance.

Key Words: Alternative fuels, Vegetable oils, Vegetable oil methyl ester, Biodiesel, Engine performance

Giriş

İçten yanmalı motorlar icadından sonra çok hızlı bir gelişme göstererek endüstride çok önemli bir yere sahip olmuşlardır. Enerji kaynağı olarak petrol ürünleri kullanılan bu makinalarda, petrolün sonlu bir enerji kaynağı olduğu ve yakın bir gelecekte tükeneyeceğinin ortaya çıkarılmasıyla yerlerini doldurabilecek başka makinalar ve alternatif yakıt arama çalışmaları başlatılmıştır. Esas olarak önceden beri var olan alternatif yakıt kullanma çalışmaları çeşitli zamanlarda ortaya çıkan petrol krizi dönemlerinde hız kazanmış ve kriz dönemleri sonrasında önemli ölçüde yavaşlama göstermiştir. İçten yanmalı motorlarda alternatif enerji kaynağı olarak gaz veya sıvı yakıtlar kullanılabilir. Gaz yakıt olarak LPG (Sıvılaştırılmış Petrol Gazı) ve doğal gaz, sıvı yakıt olarak etanol, metanol ve çeşitli bitkisel yağların (BY) motorlarda kullanımı ile ilgili bir çok araştırma yapılmaktadır. Buji ile ateşlemeli motorlarda LPG ve doğal gaz kullanımı yaygınlaşmakta, etanol ve metanolün ise ya yalnız başına ya da benzin ile çeşitli oranlarda karıştırılarak kullanımı ile ilgili çalışmalarda yürütülmektedir (Thring, 1983; Fleming ve O'Neal, 1985; Bayındır ve Yücesu, 1999; Karim ve Wierzba, 1983).

Dizel motorlarında ise gaz yakıt olarak doğal gaz pilot yakıt ile birlikte kullanılırken (Altın, 1991; Davies ve Sulatisky, 1989), BY'lar ve bunlardan elde edilen etil ve metil esterler ise ya yalnız başına, ya da çeşitli oranlarda dizel yakıtı (No 2-D) ile karıştırılarak test edilmektedirler (Vellguth, 1984; Rakopoulos, 1992; Peterson ve Moscow, 1993). Yapılan çalışmalarda motorun performans, emisyon karakteristikleri ve motorun dayanıklılığı ile motor parçaları üzerindeki etkileri araştırılmaktadır. Ventura ve arkadaşları (1982), saf BY'ların yanmaları sonucu motorun çeşitli parçalarında oluşturduğu karbon birikintilerinden dolayı DI (Direkt Enjeksiyonlu) motorlar için uygun bir yakıt olmadığını, fakat bu yağların alternatif yakıt olarak ümit verici olduklarını, uzun BY moleküllerini küçük moleküllere dönüştürecek işlemlerin geliştirildiğini, esterleştirme işlemi denilen bu işlemlerle BY asidi metil yada etil esterlerinin tipik No 2-D davranışı

gösterdiğini ve fazla karbon birikintilerini ortadan kaldırdığını, aynı zamanda duman miktarını da azalttığını belirtmektedirler. Karaosmanoğlu (1999), Türkiye'nin enerji kaynaklarını ve 2010 yılına kadar enerji talebini de dikkate alarak, BY'ların yakıt olarak kullanılabilirliğini araştırmış, BY'ların alternatif yakıt olarak kullanımının ekonomi, çevre ve enerji bakımından faydalı olacağını belirtmiştir.

Biyomotorin (mono alkil esterleri) temiz yanan bir dizel yakıtı olup, BY'lar gibi doğal ve yenilenebilir kaynaktır. Motorlarda kullanılırken herhangi bir değişiklik gerektirmez, biyomotorin kullanımı ile CO, HC ve partikül emisyonunda azalma olacağı, test ya da kullanım şekline göre NO_x emisyonlarında kısmen artma yada azalma olabileceği, içerisinde kükürtlü bileşikler olmadığından SO_x emisyonlarının oluşmayacağı belirtilmektedir. BY'ların bir alkol ile (genellikle etanol ya da metanol) reaksiyona girmesi sonucu elde edilen yeni yakıt biyomotorin olarak tanımlanmaktadır. BY'lardan biyomotorin elde etme işlemi ise "transesterifikasyon" olarak isimlendirilmektedir (Biodiesel General Information, 1999).

Tahir ve arkadaşları (1982) ayçiçek yağı (AY) ve ayçiçek yağı metil esterlerini (AME) bir dizel motorunda test etmiş ve sonuçları No 2-D ile karşılaştırmışlardır. Testlerde kullanılan AY'nın ısı değeri 39646 kJ/kg, alevlenme noktası 214 °C setan sayısı 34, viskozitesi (37 °C'de) 45 mm²/s, AME'nin ısı değeri 40000 kJ/kg, viskozitesi (37 °C'de) 5,7 mm²/s, No 2-D'nin ısı değeri 45676 kJ/kg, alevlenme noktası 68 °C setan sayısı 48, viskozitesi (37 °C'de) 2,4 mm²/s olduğu ve testler sonucunda güç farkı AY ve AME ile No 2-D'na oldukça yakın, maksimum güç devrinin % 60'ında özgül yakıt tüketiminin % 6 ve termik verimin % 2 kadar No 2-D'kinden daha yüksek olduğu, yüksek özgül yakıt tüketiminin AY'nın düşük ısı değerinden kaynaklandığı belirtilmektedir. Ayrıca AY ile ilk hareket problemi ve düşük setan sayısından dolayı vuruntu meydana geldiği belirtilmektedir.

Fort ve Blumberg (1982) pamuk yağı (PY), pamuk yağı metil esteri (PME), No 2-D ve bu BY'ların No 2-D ile karışımlarından oluşan sekiz adet yakıtı (% olarak 30/70, 50/50, 65/35, 80/20 PY/No 2-D ve PME/No 2-D karışımları) altı silindirli, sıra

tip bir turbo dizel motorunda test etmişlerdir. No 2-D'na alternatif olarak seçilen bu yakıtlar uzun (200 saat) ve kısa süreli performans ve emisyon testine tabi tutmuşlardır. Yapılan testlerde yakıt içerisinde PY oranının artmasıyla motor gücünün arttığı belirtilmektedir. Yalnızca No 2-D kullanıldığında motor gücü 127 kW iken yakıt içerisinde PY oranının % 80 olmasıyla motor gücü 130 kW olarak ölçülmüştür. PME ile yapılan testlerde ise, yakıt içerisinde PME miktarının artmasıyla motor gücü azalmış ve yalnızca PME kullanıldığında 118 kW olarak tespit edilmiştir. Yalnızca No 2-D kullanıldığında termik verim % 36 iken yakıt içerisinde PY oranının artmasıyla termik verimde çok az bir düşüş görüldüğü ve % 80/20 PY/No 2-D kullanıldığında ise termik verimin % 35 olarak tespit edildiği belirtilmiştir. PME ve karışımları kullanıldığında ise termik verimde önemli bir değişim olmadığı ve % 35 civarında olduğu belirtilmiştir. Yakıt içerisinde PY oranının artmasıyla NO_X miktarında artış, dumanda ise azalma görülmüştür. PME kullanımında ise NO_X miktarı No 2-D'na göre daha az olduğu belirtilmektedir. Motor performansı ve emisyonlar dikkate alındığında yapılan kısa süreli testlerden elde edilen sonuçların No 2-D yakın olduğu görülmüştür. Yağların yakıt olarak kullanıldığı uzun süreli testlerde ise özellikle karbon birikintileri, aşınma ve yakıt sistemindeki problemler nedeniyle iyi sonuç alınmadığı belirtilmektedir.

Soya yağı (SY) ve AY hacimsel olarak % 25/75 oranında No 2-D ile karıştırılarak 200 saatlik bir performans testine tutulmuştur. Testlerde kullanılan No 2-D'nın ısı değeri 45010 kJ/kg, SY'nın ısı değeri 39290 kJ/kg, ve AY'nın ısı değeri 39410 kJ/kg olup, yakıt karışımlarının ürettikleri motor momentinin No 2-D ile yapılan testlerde elde edilen motor momentinden daha yüksek, karışımlarda özgül yakıt tüketiminin daha düşük ve AY/No 2-D karışımının termik veriminin SY/No 2-D termik veriminden daha yüksek olduğu belirtilmektedir (Schlick ve arkadaşları, 1988).

Alternatif yakıt olarak soya yağı metil esteri SME altı adet traktör motorunda kullanılmış, No 2-D ile SME % olarak 0, 10, 20, 30, 40, 50 oranında karıştırılmış, yapılan testlerde;

- Yakıt içerisinde SME miktarının artmasıyla duman koyuluğunda azalma,
- Yakıt içerisinde SME miktarının artmasıyla CO emisyonunda azalma,
- Yakıt içerisinde SME'nin artmasıyla HC emisyonlarında azalma,

- Yakıt içerisinde SME'nin artmasıyla NO_X emisyonlarında artış,

- Yakıt içerisinde SME'nin artmasıyla motor momenti ve gücünde azalma,

- Yakıt içerisinde SME'nin artmasıyla yakıt tüketiminde artış olduğu belirtilmiştir (Schumacher, 1999).

SME ve No 2-D 4 silindirli, 4 zamanlı, normal emişli, sıkıştırma oranı 16,5:1 ve hacmi 3,06 litre olan bir dizel motorunda biri standart enjektör (meme çapı 0,279 mm) ve diğeri 0,229 mm meme çaplı enjektör olmak üzere iki farklı enjektör ile standart püskürtme başlangıcı ve püskürtme başlangıcı 5° krank mili açısı (KMA) geciktirilerek test edilmişlerdir. Testlerde kullanılan No 2-D'nın üst ısı değeri 45590 kJ/kg, alt ısı değeri 42780 kJ/kg, viskozitesi (40 °C'de) 2,8 mm²/s ve setan sayısı 51, yoğunluğu 0,845 kg/l, SME'nin üst ısı değeri 39750 kJ/kg, alt ısı değeri 37260 kJ/kg, viskozitesi (40 °C'de) 4,1 mm²/s, yoğunluğu 0,889 kg/l ve setan sayısı 46 olarak verilmektedir. Bir grup test, yanma sonu maksimum silindir basıncını ortaya çıkarmak amacıyla 1800 d/d'da yapılmış, ortalama fren efektif basıncı 50, 150, 300, 450 ve 600 kPa aralığında değiştirilmiş, 0,229 mm enjektör meme çapında ve standart püskürtme başlangıcında en yüksek silindir basıncı 600 kPa ortalama fren efektif basıncında SME ile yaklaşık 8500 kPa, No 2-D ile 8000 kPa olarak belirlenmiştir. Standart enjektör memesi kullanıldığında ise No 2-D ile maksimum silindir basıncı çok az yüksek ve yaklaşık 7800 kPa olarak belirlenmiştir. Püskürtme başlangıcı 5° KMA geciktirildiğinde her iki enjektör ile maksimum yanma sonu basıncının No 2-D'yla SME'den daha yüksek, fakat standart enjektör ile küçük delikli enjektörden daha düşük olduğu belirlenmiştir. SME ile yapılan testlerde optimum çalışma şartlarında daha düşük HC emisyonu ve duman sayısı tespit edilmiş, CO emisyonu ve is miktarında yükle orantılı olmayan artma ve azalmalar belirlenmiştir. NO_X emisyonu değişimi ise maksimum yanma sonu basıncı artışı ile önemli ölçüde artış gösterdiği belirtilmektedir. Küçük delikli enjektör memesi kullanıldığında daha yüksek yanma sonu basıncı, buna bağlı olarak daha yüksek NO_X emisyonu tespit edilmiştir. İndike termik verim, standart meme kullanıldığında 5° KMA püskürtme gecikmesi için her iki yakıtla yaklaşık % 44, 0,279 mm enjektör memesi kullanıldığında SME ile yaklaşık % 43 ve NO 2-D indike termik veriminin SME yakıtından çok az düşük olduğu belirlenmiştir (Scholl ve Sorenson, 1993).

SY'nın dizel motorlarında kullanımı ile ilgili yapılan araştırmada SY'nın viskozitesinin 60 °C'de No 2-D viskozitesinden 11 kez daha yüksek olduğu, yoğunluğunun No 2-D'ndan % 10 daha yüksek olduğu, ve % 14 daha az enerji içerdiğini belirtilmiş ve özgül yakıt tüketimi SY kullanıldığında hafif yük-yüksek hızlarda, hıza bağlı olarak %13-14 daha yüksek olduğu, soya yağı etil esteri (SEE) kullanıldığında ise % 11-13 daha yüksek olduğu, yüke ve hıza bağlı olarak termik verim SY kullanıldığında % 2-8 daha düşük, SEE kullanıldığında % 1-2 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Pryor ve arkadaşları, 1983).

SY'ndan elde edilen biyomotorin ($C_{19}H_{36}O_2$) yakıtının diğer metil ester yakıtlarından farklı olduğu, motor performansı ve dayanıklılığında bütün değişimleri minimize ettiği belirtilerek, alevlenme noktasının No 2-D'ndan yüksek olduğu için daha emniyetli olduğu ve daha kolay taşınabileceği, kısmen oksitlenmiş olduğu için emisyon profilinde azalma olacağı, % 20 No 2-D ilavesi elde edilen B20 yakıtının istenilen özellikte olduğu ve biyomotorinin yağlamaya da katkısı olduğu belirtilmektedir (Biodiesel Report, 1998).

Kolza yağı (KZY) ile yapılan bir çalışmada, KZY'nın fiziksel ve kimyasal özellikleri bakımından No 2-D'na benzediği ve dizel motorunda yakıt olarak sürekli kullanılabilmesi belirtilmektedir. Yapılan testlerde kullanılan KZY'nın yoğunluğu 0,920 kg/l, ısı değeri 37300 kJ/kg, viskozitesi 20 °C'de 75 mm²/s ve setan sayısının 41 olduğu belirtilmektedir. Motor gücü 40 kW'tan 274 kW'a kadar değişen 6 değişik motorda (1 adet 3 silindirli, 1 adet 4 silindirli, 4 adet 6 silindirli) yapılan testlerde; moment ve güç çıkışı beş motorda No 2-D'na denk birinde No 2-D daha iyi, enerji tüketimi 6 motorda da No 2-D'na denk, CO emisyonu bakımından No 2-D'nın daha iyi, NO_x emisyonlarında 5 motorda KZY No 2-D'ndan daha iyi, bir motorda denk, HC emisyonları bakımından 5 motorda No 2-D, bir motorda KZY daha iyi, dayanıklılık testinde ise 2 motorda denk dört motorda No 2-D'nın daha iyi olduğu ortaya çıkmıştır. 4 silindirli direkt enjeksiyonlu motorda yakıt sisteminde hiçbir değişiklik yapılmaksızın KZY ile yapılan testlerde motor gücünün ve momentinin No 2-D ile yapılan testlere oranla % 2 daha düşük, KZY'nın termik verimi ise No 2-D'dan % 2 daha yüksek ve 1500 d/d'da yaklaşık % 38 dolaylarında ve KZY'nın ısı değerinin No 2-D ısı değerinden yaklaşık % 7 daha düşük olduğu belirtilmektedir (Hemmerlein ve arkadaşları, 1991).

Kozla yağı metil ve etil esterleri (KZME, KZEE) ile yapılan bir çalışmada ise esterlerin depolanma şartları ile yeni üretilmiş ve depolanmış esterlerin motor performansına etkileri araştırılmış, iki yıl depolanmış esterlerin veriminin yeni üretilmiş esterlerden daha iyi olduğu fakat viskozitesinde yükselme meydana geldiği belirtilmektedir. Yeni üretilmiş ve depolanmış KZME ve KZEE ile yapılan testlerde motor moment ve gücünde yaklaşık % 2-3 arasında bir düşüş meydana geldiği ve duman koyuluğunda ise 1,7 ile 3,3 kat bir artış olduğu belirtilmektedir (Thompson ve arkadaşları, 1998).

Zubik ve arkadaşları (1984), Case 188 D marka, 4 silindirli, 4 zamanlı, hava soğutmalı bir dizel motorunda % 20/80 AY/No 2-D karışımı ve AME kullanarak egzoz emisyon değerlerini belirlemeye çalışmıştır. Egzoz emisyon değeri sürekli akışta kontrol edilmiş, 1800 d/d'da CO ve NO_x değerleri her üç yakıt için birbirlerine yakın olduğu, duman değeri ise AME'nde daha düşük olduğu, normal çalışma şartlarında HC değeri No 2-D ile en düşük olduğu, bununla birlikte hafif yüklerde de No 2-D'nın HC emisyon değeri diğer iki yakıtta göre daha düşük olduğu belirtilmektedir.

Mazed (1984), yaptığı araştırmada No 2-D, fıstık yağı (FY), SY ve PY'nı tek silindirli iki ayrı dizel motorunda test etmiş, testler sonucunda Lister LT1 motorunda 3000 d/d'da motor gücü No 2-D ile 2,98, FY ile 2,86, SY ile 2,98 ve PY ile 2,98 kW, Deutz FIL511W motoru ile 2500 d/d'da motor gücü No 2-D ile 8,43, FY ile 8,0, SY ile 8,24 ve PY ile 8,16 kW olarak belirlenmiştir. Lister LT1 motorunda FY ile elde edilen güç diğer üç yakıttan düşük ve üç yakıt ile elde edilen güç birbirine denk, Deutz FIL511W motoru ile en yüksek güç No 2-D ile elde edilmiş, BY'ların ürettikleri güçlerin bundan daha düşük olduğu belirtilmektedir. Termik verim Lister LT1 motorunda No 2-D ile 26,5, FY ile 23,9, SY ile 23,93 ve PY ile 23,93, Deutz FIL511W motoru ile No 2-D ile 28,73, FY ile 27,52, SY ile 28,03 ve PY ile 28,04 olarak belirlenmiştir. Her iki motor ile yapılan testlerde de BY'ların termik verimi No 2-D termik veriminden daha düşük, özgül yakıt tüketiminin No 2-D özgül yakıt tüketiminden daha yüksek olduğu belirtilmiştir.

Özakaş ve arkadaşları (1997), zeytin yağı (ZY), AY, SY ve MY'nı No 2-D ile hacimsel yüzde (20/80) karıştırarak test etmişler ve BY karışımlarının kısa süreli çalışmalarda dizel yakıtına önemli bir alternatif olabileceğini belirtmişlerdir. Cıgızoğlu ve arkadaşları (1997) yaptıkları araştırmada kullanılmış

AY'mı hacimsel yüzde olarak No 2-D ile (20/80) karıştırarak test etmişler, 2/3 ve tam yük testlerinde No 2-D ile elde edilen performansın kısmen yüksek olduğu, AY'nın ısıl değer olarak No 2-D'dan % 2,4 daha düşük olduğu vurgulanarak toplam değerlendirme sonucunda BY karışımlarının ancak kısa süreli çalışmalarda kullanılabilceğini vurgulamışlardır. Aynı yakıtların egzoz emisyonlarının incelendiği çalışmada ise No 2-D ile karşılaştırıldığında BY/No 2-D karışımlarında CO, CO₂ ve HC emisyonlarında azalma NO_X emisyonlarında ise artış gözlemlendiği belirlenmiştir (Ergeneman ve arkadaşları, 1997).

Genel olarak BY'ların dizel motorlarında kullanımıyla ilgili yapılan çeşitli çalışmalarda ham yağlarla yapılan testlerde, motor performansında az bir düşüş CO ve HC emisyonlarında kısmen artış, NO_X emisyonlarında kısmen azalma görüldüğü belirtilmektedir. Yüksek viskoziteden dolayı ham yağlarla yapılan çalışmalarda yakıt sisteminde çeşitli problemlerin ortaya çıktığı da belirtilmektedir. Ham yağlardan elde edilen yağ asidi metil ve etil esterlerinin motor performansı ve emisyonlar bakımından ham yağlara göre daha avantajlı olduğu ve esterlerle yapılan testlerden elde edilen sonuçların dizel yakıtı ile yapılan test sonuçlarına daha yakın olduğu, esterleştirme işlemiyle yakıtın hem fiziksel hem de kimyasal yönden daha iyi özelliklere sahip olduğu, özellikle viskozitesinde meydana gelen önemli düşüşle enjeksiyon karakteristiğinde çok önemli iyileştirmeler görüldüğü vurgulanmaktadır (Sinha ve Misra, 1997; Georing ve arkadaşları, 1982; Çetinkaya, 1994).

Testlerin amacı sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda BY'ların motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkilerini araştırmak ve farklılıkları ortaya çıkarmaktır. Bu amaçla; motor performansını belirlemek için tam yük-değişik devir ve emisyon karakteristiklerini belirlemek için sabit devir-değişik yük deneyleri yapılmıştır.

Deneysel Çalışma

Testler Superstar marka, tek silindirli, dört zamanlı, direkt püskürtmeli, normal emişli, toplam silindir hacmi 770 cm³ olan bir dizel motorunda yapılmıştır. Moment ölçümleri için elektrikli bir dinamometre, yakıt tüketimi ölçümü için 1 gram hassasiyetli dijital terazi egzoz emisyonları ölçümleri için Gaco-Sn marka ve VLT 200 model emisyon ölçüm cihazı kullanılmıştır.

Testlerde No 2-D ile birlikte dokuz BY yakıt

olarak kullanılmıştır. Testler ilk önce No 2-D ile yapılmış, motor performansı ve egzoz emisyonları belirlenmiş, daha sonra; BY'lar ve onlardan elde edilen metil esterler ile testlere devam edilmiştir.

Test yakıtlarından kanola (KY) ve mısır yağı (MY) rafine yemeklik yağ olup piyasada Paksoy ticari marka ile pazarlanmaktadır. Haşhaş yağı (HY) ise rafine edilmiş ham yağdır ve Afyon yöresinden temin edilmiştir. SY, PY ve AY Doysan Yağ Sanayii A.Ş.'den temin edilmiş olup, bu yağlardan metil esterleri üretilmiştir. Metil esterleri Gazi Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü laboratuvarlarında elde edilmiştir. Esterleştirme işlemi için 500 ml'lik rodajlı damıtma balonu kullanılmıştır. Isıtıcı (Elektromantle marka) on değişik sıcaklık kademesine sahiptir ve maksimum sıcaklık kapasitesi 450 °C olup, damıtma balonlarının ısıtılmasında kullanılmaktadır. Metanol Atabay marka olup kütleli ağırlığı 32,08 g/mol, yoğunluğu 0,8 kg/l, kaynama noktası 60 °C ve % 98 safıktadır. Katalizör olarak kütleli ağırlığı 98,08 g/mol, yoğunluğu 1,84 kg/l, kaynama noktası 330 °C olan Yimka marka sülfürik asit (H₂SO₄) kullanılmıştır. Vellguth (1983) tarafından yapılan ester üretme işleminde 100 kg etil ester elde etmek için 0,13 kg sodyum, 26,3 kg etanol ve 105 kg tam rafine edilmiş ham yağ kullanılması gerektiği ve karışımın 60-80 °C sıcaklıkta birkaç saat bekletildikten sonra soğutularak ester-alkol karışımından su-gliserin karışımını ayırabileceği belirtilmektedir. Romano (1982) tarafından yapılan çalışmada benzer bir yol izlenmiş olup, katalizör olarak sodyum hidroksil kullanılmış, ve en iyi reaksiyon sıcaklığının 70 °C olacağı belirtilmiştir. Karaosmanoğlu (1999), KZME elde etmek için benzer bir yöntem kullanmış, esterleştirme işleminde molar olarak 6/1 oranında alkol/BY, katalizör olarak NaOH kullanıldığında, sıcaklığın 65 °C±1 olduğunu ve esterleştirme süresini 38 dakika olacağını ve rafine işleminden sonra elde edilen metil esterinin % 99,01 safıkta olduğunu belirtmiştir. Ester elde etmek için her 1 kg BY için 0,2 kg metil alkol ve 0,05 kg sülfürik asit kullanılmıştır (Oskay, 1979). Belirtilen oranda karıştırılarak hazırlanan karışım, rodajlı cam balon, su soğutmalı geri soğutucu ve ısıtıcından oluşan deney düzeneğinde 65-80 °C sıcaklıkta yaklaşık 2 saat kimyasal reaksiyona sokulur. Kimyasal reaksiyon sonunda karışım dinlenmeye bırakılarak soğutulur. Dinlenmeye bırakılan karışım, cam ayırma kabında sodyum bikarbonat çözeltisi ile yıkanır. Karışım yıkandıktan sonra dinlenmeye bırakılır, bu esnada

ayırma kabının alt kısmında gliserin ve reaksiyona girmeyen sülfürik asit, üst kısmında ise ham yağ asitleri metil esteri toplanır. Sodyum bikarbonat çözeltisi ile yıkama işlemi birkaç defa yapılabilir. Üretim esnasında elde edilen karışım iki defa yıkama işlemine tabi tutulmuştur. Cam ayırma kabının altında toplanan ve reaksiyona girmeyen sülfürik asit ile gliserin ham esterden ayrılır. Ayrılan ham yağ asitleri metil esteri daha sonra damıtma düzeneğinde damıtma işlemine tabi tutulur. Bu şekilde bütün yağ asidi metil esterlerinin ayrı ayrı kaplara alınması mümkün olmaktadır. Fakat bu çalışmada tüm yağ asitleri metil esterleri aynı toplama kabına damıtılmıştır. Isıtma işlemi yaklaşık 330 °C'ye kadar sürdürülmüş, bu noktadan sonra kabın dibinde kalan sıvı atılmıştır.

Testlerde kullanılan yakıtların bir kısım fiziksel ve kimyasal özellikleri ise Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Mühendisliği laboratuvar-

larında belirlenmiştir. Viskozite tayini Engler marka viskozimetre ile yapılmış, 27, 50, 75 ve 95 °C sıcaklıkta dört tekrar sonucunda viskozite tayin edilmiştir. Alevlenme noktası, Herzog marka alevlenme noktası ölçüm cihazıyla yapılmıştır. Cihaz haznesi yakıt ile doldurulduktan sonra 2 °C aralıklarla sıcaklık artırılmış ve alev görüldüğü andaki sıcaklık alevlenme noktası olarak belirlenmiştir. Test yakıtlarının yoğunluğu ise 27 °C de tespit edilmiştir. Isıl değerler, H. Jünrgens & Co. Bremen marka kalorimetre ile ölçülmüştür. Test yakıtlarının kimyasal formülleri yağ asitlerinin kimyasal yüzdeleri belirlenerek hesaplama yöntemi ile tespit edilmiştir. Yağ asitlerinin kütleli yüzdeleri Varyian 3700 marka gaz kromatografisi kullanılarak Ankara Büyükşehir Belediyesi Sağlık ve Sosyal İşler Daire Başkanlığı laboratuvarlarında yapılmıştır. Test yakıtlarının çeşitli özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Test yakıtlarına ait fiziksel ve kimyasal özellikler.

Yakıt türü	Isıl değer kJ/kg	Yoğunluk kg/dm ³	Viskozite mm ² /s		Setan Sayısı	Alevlenme noktası °C	Kimyasal formülü
			27°C	75°C			
No 2-D	43350	0,815	4,3	1,5	47*	58	C ₁₆ H ₃₄
AY	39525	0,918	58	15	37,1*	220	C ₅₇ H ₁₀₃ O ₆
AME	40579	0,878	10	7,5	54-55**	85	C ₅₅ H ₁₀₅ O ₆
PY	39648	0,912	50	16	48,1*	210	C ₅₅ H ₁₀₂ O ₆
PME	40580	0,874	11	7,2	54-55**	70	C ₅₄ H ₁₀₁ O ₆
SY	39623	0,914	65	9	37,9*	230	C ₅₆ H ₁₀₂ O ₆
SME	39760	0,872	11	4,3	54-55**	69	C ₅₃ H ₁₀₁ O ₆
MY	37825	0,915	46	10,5	37,6*	190	C ₅₆ H ₁₀₃ O ₆
HY	38920	0,921	56	13	-	-	C ₅₇ H ₁₀₃ O ₆
KY***	37620	0,914	39,5	10,5	37,6*	275-290	C ₅₇ H ₁₀₅ O ₆

*(Georing ve arkadaşları, 1982), ** (Vellguth, 1984), *** (Paksoy A. Ş., 1998)

Testlere başlamadan önce motor boşa çalıştırılarak ısınması sağlanmış ve motor normal çalışma sıcaklığına ulaşınca (70 °C) testlere başlamıştır. Testler 900-1800 d/d aralığında 100 d/d'lık artışlarla yapılmıştır. Testler sırasında motorun harareti ve yağlama yağı sıcaklığı sürekli kontrol altında tutulmuştur. Motorun performans karakteristiklerini belirlemek amacıyla tam yük-değişik devir testi yapılmış bu test sırasında motor momenti, yakıt tüketimi, hava tüketimi miktarları ölçülmüş, motor gücü, özgül yakıt tüketimi ve termik verim bu büyüklüklerden hesaplanmıştır. Emisyon karakteristiklerini belirlemek amacıyla maksimum

moment devri olan 1300 d/d'da sabit hız-değişik yük testine tabi tutulmuştur. İlk ölçüm başta olmak üzere 5 Nm aralıklarla motor momenti artırılarak NO_x ve emisyonu ve duman koyuluğu miktarı ölçülmüştür.

Test Sonuçları

Motor momenti

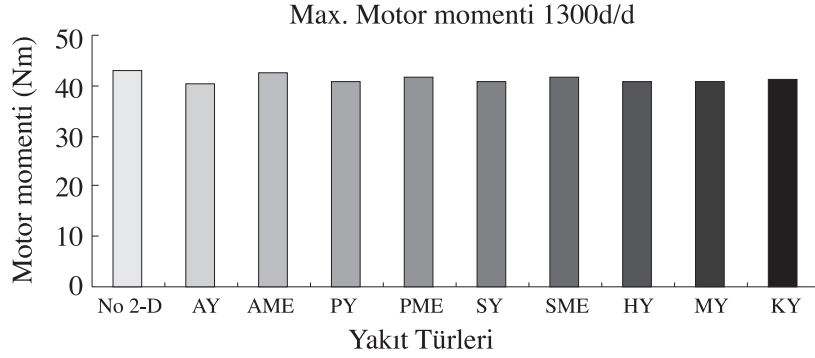
Bütün yakıtlarla yapılan testlerde maksimum motor momenti 1300 d/d'da elde edilmiştir. Bu devir aynı zamanda motorun kataloğunda verilen

maksimum moment devridir. En yüksek motor momenti No 2-D ile 43,1 Nm olarak belirlenmiş, bu devrin aşağısına ve yukarısına gidildikçe motor momenti azalma eğilimi göstermiştir. BY'ların tamamıyla elde edilen motor momenti No 2-D momentinden daha düşük olmuştur. Aradaki en büyük fark AY, PY ve HY ile % 6, en küçük fark ise yaklaşık AME ile % 2, SME ve PME ile % 3 olarak belirlenmiştir. Rafine edilmiş MY ve KY'nın momenti ham yağlardan daha yüksek fakat esterlerin momentinden daha düşüktür. Benzer düşüşler değişik oranlarda Schumacher, 1999; Thompson ve arkadaşları, 1998; Fort ve Blumberg, 1982; Hemmerlein ve arkadaşları, 1991; Cıgızoğlu ve arkadaşları, 1997; Schlick ve arkadaşları, 1988, yaptıkları çalışmalarda görüldüğü belirtilmektedir. BY/No 2-D karışımı ile yapılan bazı çalışmalarda motor momenti ve gücü kısmen No 2-D'ndan fazla olduğu, bunun ise BY'ların yüksek viskozitesinden dolayı pompa plancırı ve enjektör iğnesinde oluşan geri kaçakların azalmasından kaynaklandığı belirtilmektedir (Tahir ve arkadaşları, 1982; Fort ve Blumberg 1982). Şekil 1'de 1300 d/d'da NO 2-

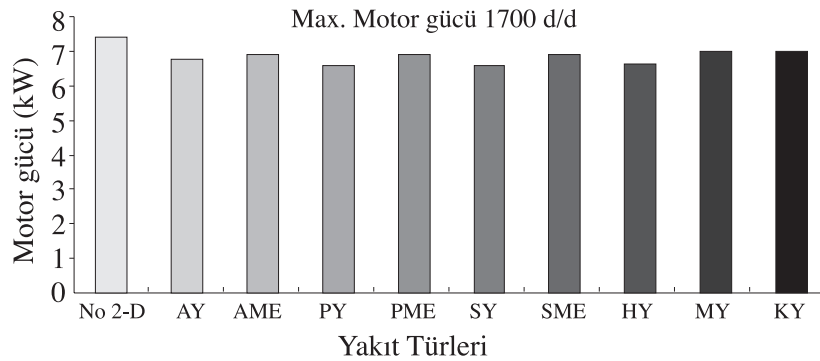
D ve BY'larla elde edilen motor momenti grafiği görülmektedir.

Motor gücü

Yapılan testlerde maksimum motor gücü bütün test yakıtları ile 1700 d/d'da elde edilmiştir. En yüksek motor gücü No 2-D ile yapılan testlerde elde edilmiş ve 7,41 kW olarak belirlenmiştir. BY'larla yapılan testlerden elde edilen motor gücü değerleri bu değer altında kalmıştır. Motor gücü, testler sırasında 1700 d/d'ya kadar sürekli artmış; bu devirden sonra genel olarak BY'larda çok küçük oranda bir azalma No 2-D'nda ise hemen hemen 1700 d/d'da elde edilen güç değerine denk bir güç elde edilmiştir. BY'larla elde edilen en büyük güç KY ile 7,1 kW, en düşük güç ise 6,58 kW ile PY ve SY ile elde edilmiştir. Güçteki düşüş Schumacher, 1999; Thompson ve arkadaşları, 1998; Mazed, 1984; Özaktaş ve arkadaşları, 1997; Fort ve Blumberg, 1982, yaptıkları çalışmalarda da değişik oranlarda görülmüştür. Şekil 2'de 1700 d/d'da No 2-D ve BY'larla yapılan testlerde elde edilen maksimum motor gücü grafiği görülmektedir.



Şekil 1. Yakıt türlerine göre motor momentinin değişimi.

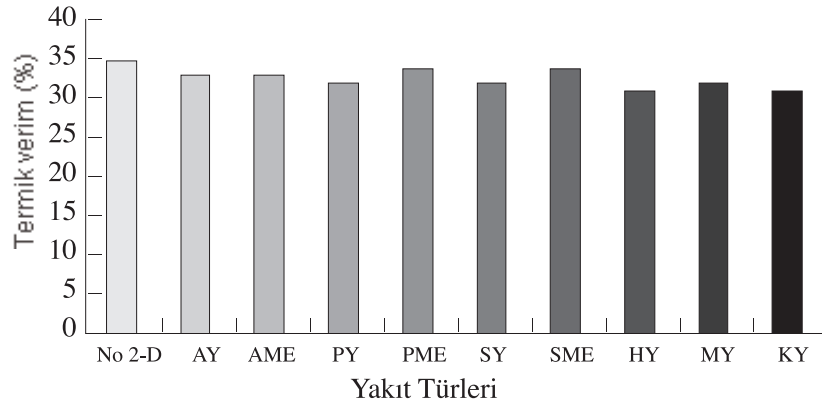


Şekil 2. Farklı yakıtlarla elde edilen maksimum motor güçleri.

Termik Verim

No 2-D ile yapılan testlerde termik verim 1500 d/d'da % 35 olarak belirlenmiştir. BY'larla yapılan testlerde termik verim 1300-1400 d/d aralığında elde edilmiştir. Yağ asidi metil esterleri ile elde edilen termik verimler ham yağlarla yapılan testlerde elde edilen termik verimlerden daha yüksektir. BY'larla yapılan testlerde elde edilen en yüksek termik verim PME ve SME ile % 34 olarak belirlenmiştir.

rafine edilmiş yağlarla yapılan testlerde de termik verimler ham yağlara oranla bir miktar yüksek olduğu belirlenmiştir. BY'larla yapılan testlerden elde edilen termik verimler No 2-D'na oranla % 1-9 daha düşük olmaktadır. Yapılan bazı çalışmalarda da termik verimlerde benzer düşüşler görülmüştür (Fort ve Blumberg, 1982; Pryor ve arkadaşları, 1983; Thompson ve arkadaşları, 1998; Mazed, 1984; Schumacher, 1999). Şekil 3'te test yakıtlarına ait termik verim grafiği görülmektedir.

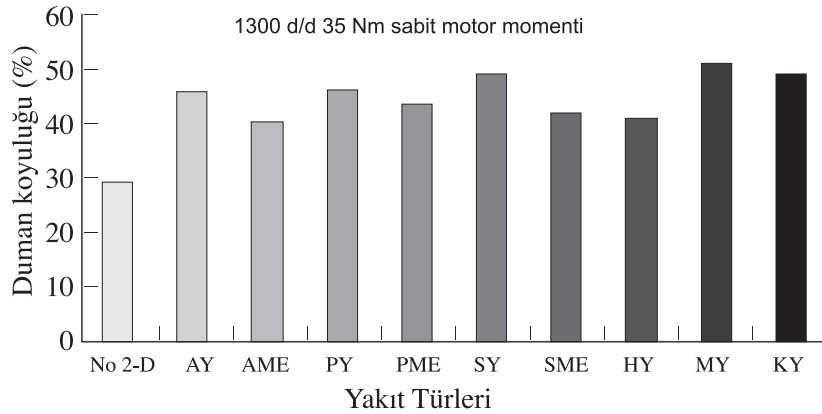


Şekil 3. Yakıt türlerine göre termik verim değişimleri.

Duman Koyuluğu

Şekil 4'te 1300 d/d sabit devride ve motor yükü değiştirilerek yapılan testlerde 35 Nm sabit motor momentinde duman koyuluğu % olarak verilmiştir. No 2-D ile yapılan testlerde 1300 d/d'da motor mo-

menti 43,1 Nm olarak ölçülmesine rağmen, BY'larla yapılan deneylerde bazı yağlarla elde edilen motor momentlerinin 40 Nm'nin altında kalmasından dolayı, karşılaştırma yapabilmek için 35 Nm sabit motor momentinde duman koyuluğu karşılaştırması yapılmıştır.



Şekil 4. Yakıt türlerine göre duman koyuluğu miktarının değişimi.

Yapılan testlerde No 2-D duman koyuluğu diğer yakıtların duman koyuluğundan daha düşük olmuştur. No 2-D ile 1300 d/d'da 35 Nm sabit motor momentinde duman koyuluğu % 29,3 olarak belirlenmiştir. BY'larla yapılan testlerde en düşük duman koyuluğu % 40,3 olarak AME ile en yüksek duman koyuluğu MY ile % 51 olarak ölçülmüştür. Yapılan testlerde duman koyuluğu BY ile No 2-D'nin 1,38 ile 1,74 katı olduğu belirlenmiştir. Thompson (1998), esterlerle yaptığı çalışmada duman koyuluğunun No 2-D'na oranla 1,7 ile 3,6 kat daha fazla olduğunu belirtmektedir. PME ile benzer bir durum Fort ve Blumberg (1982), tarafından belirlenmiştir.

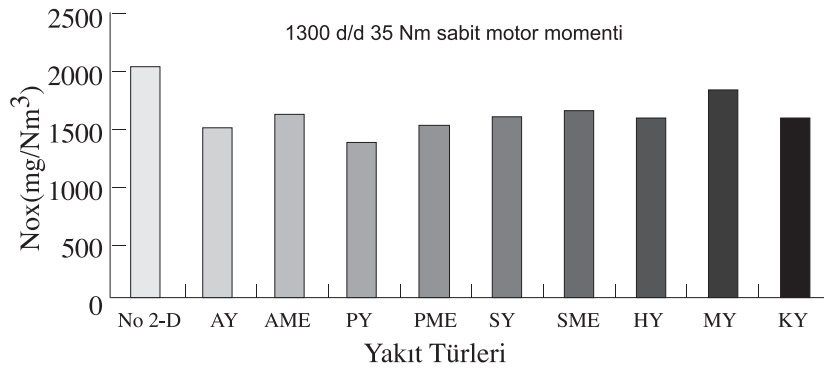
Yağ asidi metil esteri yakıtları ile yapılan testlerde ölçülen duman koyulukları NO 2-D'ndan daha yüksek, ham yağlarla yapılan testlerde elde edilen duman koyuluk miktarlarından ise daha düşük olmuştur.

Azot Oksitleri

Azot oksitler genel olarak motorlarda yakıtın

yüksek sıcaklıklarda yakılması sonucu elde edilir. Dizel motorlarında heterojen hava yakıt dağılımı NO_X emisyonunu etkileyen faktörlerin çoğalmasına, kontrolün zorlaşmasına sebep olmaktadır. Azot oksit oluşumu, alev sıcaklığının 1800 K'nin üzerinde kalma süresi, yeterli O_2 bulunan bölgelerdeki maksimum sıcaklık ve mevcut O_2 ve N_2 miktarlarından etkilenmektedir (Borat ve arkadaşları, 1992).

Yapılan testlerde 1300 d/d sabit motor devrinde ve 35 Nm sabit yük altında elde edilen NO_X emisyonu miktarları Şekil 5'te gösterilmektedir. Testlerde en yüksek NO_X miktarı No 2-D ile 2069 mg/Nm³ olarak belirlenmiştir. Yapılan bazı çalışmalarda da NO_X emisyonlarında benzer durumlar görülmüştür (Scholl ve Sorenson, 1993; Fort ve Blumberg, 1982; Sinha ve Misra, 1997; Hemmerlein ve arkadaşları, 1991). BY'larla yapılan testlerde ise metil esteri yakıtlarının yaydığı NO_X miktarlarının ham yağların yaydığı NO_X emisyonlarından daha yüksek olduğu görülmüştür. Rafine yağlarla yapılan testlerde ölçülen NO_X miktarlarının ise metil esterlerden daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5. Test yakıtlarının NO_X emisyon miktarlarının değişimi.

Tartışma ve Sonuç

- Esterleştirme işlemi ile ham yağların özelliklerinde iyileşmeler görülmüş, viskozitelerinin azaldığı, ısıl değerlerinde bir miktar artış olduğu ve yoğunluklarının azaldığı tespit edilmiştir. Bu özellikleri ile yağ asidi metil esterleri No 2-D'na daha yakın özellikler göstermişlerdir.
- BY ile yapılan çalışmada ilk harekete geçişte zorluklar meydana gelmektedir.
- BY kullanımı ile motor moment, gücü ve termik veriminde No 2-D'na kıyasla az da olsa

düşüşlerin meydana geldiği, yağ asidi metil esterleri kullanımı ile moment, güç ve termik verim ham BY'lara oranla daha yüksek olduğu ve No 2-D'na daha yakın olduğu tespit edilmiştir.

- BY ile yapılan testlerde duman koyuluğunun No 2-D'na oranla daha yüksek olduğu, fakat yağ asidi metil esterlerinin kullanımı ile duman yoğunluğu ham BY'lara oranla daha düşük olduğu tespit edilmiştir.
- NO_X emisyonlarının BY kullanıldığında önemli ölçüde azaldığı, yağ asidi metil esterleri kullanıldığında ham BY'lara oranla NO_X

emisyonlarında kısmen artış görüldüğü tespit edilmiştir.

- BY'ların ürettikleri efektif moment ve güç değerlerinin No 2-D efektif güç ve moment değerinden daha düşük olmasının en önemli sebebi BY'lar ve bunlarda elde edilen yağ asidi metil esterlerin ısı değerlerinin No 2-D'na göre daha düşük olmasıdır. Ayrıca yüksek viskozitelerinden dolayı BY'lar enjektörde püskürürken daha iri zerrelidir. Bu ise yakıtın buharlaşma ve yanma süresinin uzatarak, yanmanın daha çok genişleme periyodunda olmasına, motor momenti, gücü ve termik veriminin azalmasına neden olmaktadır.
- Ham BY'ların yerine yağ asidi metil esterlerinin kullanılmasıyla viskozitesinde azalma ve ısı değerinin bir miktar artış olmakta, dolayısıyla motor momenti, gücü ve termik veriminde kısmen artışlar görülmektedir.
- BY'lar ile yapılan testlerde ölçülen duman koyuluğu No 2-D ile yapılan testlerde ölçülen duman koyuluğundan daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu, BY'ların yüksek viskozitelerinden dolayı atomizasyon kalitesinin daha kötü olmasından, yani enjektörde daha iri zerrelere halinde

püskürtülmesinden kaynaklanmaktadır. Enjektörden iri zerrelere halinde püsküren yakıt hava içerisinde çabuk buharlaşmayarak yanma süresinin uzamasına ve egzozdan çıkan partikül madde miktarının da artmasına sebep olmaktadır.

- BY'lar ile yapılan testlerde NO_x emisyonlarının düşük çıkması, BY'ların ısı değerinin düşük olması ve iri zerrelere püskürmeleri sonucunda tutuşma gecikmesi periyodunun uzaması ve çevrimde maksimum basınç ve sıcaklığın düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Yağ asidi metil esterlerinin kullanımı ile kısmen yakıt kalitesi ve dolayısıyla NO_x emisyonlarında artmaktadır. No 2-D ile yapılan testlerde No 2-D'nin ısı değerinin yüksek olması ve enjektörden püskürtme karakteristiğinin daha iyi olması nedeniyle yanma sonucu basınç ve sıcaklığının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.
- Yapılan kısa süreli testlerde BY'lar dizel motorlarında kullanılmış, performans ve emisyon karakteristikleri belirlenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları üretim fazlası ham BY'ların hem yalnız başına hem de metil esterlerinin alternatif yakıt olarak dizel motorlarında kısa süreli kullanılabilirliğini göstermiştir.

Kaynaklar

Altın, R., "Dizel Motorlarında Yakıt Olarak Doğal Gazın Kullanılması Üzerine Bir Araştırma", Yüksek Lisans Tezi, G. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 1991.

Bayındır, H., Yücesu, H. S., "The Effects of Compression Ratio and Preheating on Engine Characteristics and Air Pollution in Gasoline Engines using Alternative Fuels", 11th International Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry, 273-278, Budapest, Hungary, 16-18 June, 1999.

Biodiesel General Information, Alternative Fuels Data Center, <http://www.afdc.nrel.gov/altfuel/bio-general.html>, 1999.

Biodiesel Report, Biodiesel First Alternative Fuel to Meet EPA Health Effects Requirement Positive Environmental and Health Effects Results for Biodiesel, US National Biodiesel Board, April, 1998.

Borat, O., Balcı, M., Sürmen, A., "Hava Kirlenmesi ve Kontrol Teknikleri", Ders Aletleri Yapım Merkezi Matbaası, Ankara, 1992.

Cıgızoğlu, K. B., Özaktaş T., Karaosmanoğlu, F., "Used Sunflower Oil as an Alternative Fuel for Diesel Engines", Energy Sources, 19 (6), 559-566, 1997.

Çetinkaya, S., "Ayçiçek Yağının Dizel Motoru Yakıtı Olarak Kullanılabilir Potansiyeli", G. Ü. Teknik Eğitim Fakültesi, Doçentlik Tez Taktimi, Ankara, 1994.

Davies, J. G., Sulatisky, M. T., "Natural Gas Fired Agricultural Tractors", SAE paper, 891669, 1989.

Ergeneman, M., Özaktaş, T., Cıgızoğlu, K. B., Karaosmanoğlu, F., Arslan, E., "Effect of Some Turkish Vegetable Oil-Diesel Fuel Blends on Exhaust Emission", Energy Sources, 19 (8), 879-885, 1997.

Fleming, R. D., O'Neal, G. B., "Potential for Improving the Efficiency of a Spark Ignition Engine for Natural Gas" SAE Paper, 852073, 461-471, 1985.

Fort, E. F., Blumberg, P. N., "Performance and Durability of a Turbocharged Diesel Fueled with

- Cottonseed Oil Blends”, Vegetable Oil Fuels Proceedings of The International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels, ASAE Publication 4.82, Michigan, 374-383, 1982.
- Goering, C. E., Schwab, A. W., Daugherty, M. J., Pryede, E. H., Heakin, A. J., “Fuel properties of Eleven Vegetable Oils”, Transactions of the ASAE, 1472-1483, 1982.
- Hemmerlein, M., Korte, V., Richter, H. Schröder, G., “Performance, Exhaust Emission and Durability of Modern Diesel Engines Running on Rapeseed Oil, SAE Paper, 910848, 400-415, 1991.
- Karaosmanoğlu, F., “Vegetable Oil Fuels: A Review”, Energy Sources, 19 (3), 221-231, 1997.
- Karim, G. A., Wierzba, I., “Comparative Studies of Methane and Propane as Fuels for Spark Ignition and Compression Ignition Engines”, SAE Paper, 831196, 676-688, 1983.
- Mazed, M. A., “Test of Vegetable Oil as Fuel in Direct and Indirect Injection Diesel Engine”, Ph.D. Thesis, Oklahoma State University, 1984.
- Oskay, E., “Genel Organik Kimya”, Hacettepe Üniversitesi Yayınları, Yayın No: A29, 1979.
- Özaktaş, A., Cıgızoğlu, B. K., Karaosmanoğlu, F., “Alternative Diesel Fuel Study on Four Different Types of Vegetable Oils of Turkish Origin”, Energy Sources, 19 (2), 173-181, 1997.
- Paksoy A. Ş. Teknik Dökiiman, 1998.
- Peterson, C. L., Moscow, R., “Potential of Vegetable Oils as a Transportation Fuel”, Pacific Rim Trans Tech Conference, 242-248, 1993.
- Pryor, R. W., Hanna, A. M., Schinstock, J. L., Bashford, L. L., “Soybean Oil Fuel in a Small Diesel Engine”, Transaction of the ASAE, 333-337, 1983.
- Rakopoulos, C. D., “Comparative Performance and Emission Studies When Using Olive Oil as a Fuel Supplement in DI and IDI Diesel Engines”, Technical Note, Renewable Energy, 2 (33), 327-331, 1992.
- Romano, S., “Vegetable Oils-A New Alternative”, Vegetable Oil Fuels Proceedings of The International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels, ASAE Publication 4.82, Michigan, 106-116, 1982.
- Schlick, M. L., Hanna, M. A., Schinstock, J. L., “Soybean and Sunflower Oil Performance in Diesel Engine, Transactions of the ASAE, 31 (5), 1345-1349, 1988.
- Schumacher, L., “Fueling Diesel Engines on Esterified Soybean Oil”, Soybean Research Documents Online, <http://stratsoy.ag.uiuc.edu/stratsoy/research/usb9.html>, internet, 1999.
- Sinha, S., Misra, N. C., “Diesel Fuel Alternative From Vegetable Oils”, Cew Bio-Med Expositions Publications, October 1997.
- Scholl, W. K., Sorenson, S. C., “Combustion of Soybean Oil Methyl Ester in a Direct Injection Diesel Engine”, New Developments in Alternative Fuels and Gasoline for SI and CI Engines, SAE Paper, 930934, 211-223, 1993.
- Tahir, A. R., Lapp, H. M., Buchanan, L. C., “Sunflower Oil as a Fuel for Compression Engines”, Vegetable Oil Fuels Proceedings of The International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels, ASAE Publication 4.82, Michigan, 82-91, 1982.
- Thompson, J. C., Peterson, C. L., Reece, D. L., Beck, S. M., “Two-Years Storage Study with Methyl and Ethyl Esters of Rapeseed Oil”, Transactions of the ASAE, 41 (4), 931-939, 1998.
- Thring, R. H., “Alternative Fuels for Spark Ignition Engines”, SAE paper, 831685, 715-725, 1983.
- Vellguth, G., “Performance of Vegetable Oils and Their Monoesters as Fuels for Diesel Engines”, SAE Paper, 831358, 1098-1108, 1984.
- Ventura, M. L., Nascimento, A. C., Bandel, W., “First Result with Mercedes Benz DI Diesel Engines Running on Monoesters of Vegetable Oils”, Vegetable Oil Fuels Proceedings of The International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels, ASAE Publication 4.82, Michigan, 394-400, 1982.
- Zubik, J. S, Sorenson, S. C., Goering, C. E., “Diesel Engine Combustion of Sunflower Oil Fuels”, Transactions of the ASAE, 27 (5), 1252-1256, 1984.