

Alternatif Yakıtlarla Seyreltilmiş Standart Bir Motor Yağının Viskozite
Değişiminin Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi

Sualp Bektaş

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül 2024

Investigation of Temperature Dependent Viscosity Change of a Standard Engine
Oil Diluted with Alternative Fuels

Sualp Bektaş

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mechanical Engineering

Eylül 2024

Alternatif Yakıtlarla Seyreltilmiş Standart Bir Motor Yağının Viskozite
Değişiminin Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi

Sualp Bektaş

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji-Termodinamik Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

Danışman: Prof. Dr. Mustafa Ertunç Tat

Eylül 2024

ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi **Sualp Bektaş**'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Alternatif Yakıtlarla Seyreltilmiş Standart Bir Motor Yağının Viskozite Değişiminin Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Mustafa Ertunç TAT

İkinci Danışman :

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Prof. Dr. Mustafa Ertunç TAT

Üye: Doç. Dr. Bahadır DOĞAN

Üye: Doç. Dr. Ömür AKBAYIR

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr.

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Mustafa Ertunç Tat danışmanlığında hazırlamış olduğum “Alternatif Yakıtlarla Seyreltilmiş Standart Bir Motor Yağının Viskozite Değişiminin Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi” başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 19.09.2024

Öğrenci Adı Soyadı

İmza

Sualp BEKTAŞ

ÖZET

Kestirimci bakım özellikle havacılık, savunma sanayii ve ağır endüstri motorlarında yaygın bir yer bulabilir. Alternatif ve yenilenebilir yakıtların kullanılması ile motor yağının hangi seviyede ve nasıl etkileneceği de araştırılmalıdır. Bu çalışmada ağır dizel motorlarında kullanılan motor yağı standart mazot, biyodizel ve 1-Dodecene (jet yakıtı yerine) yakıtlarıyla karıştırılarak (ağırlıkça %1-2-5-7-10) seyreltilecek, fiziko-kimyasal (ilgili standartta tanımlanan parametreler) değerleri kestirimci bakım parametreleri olarak değerlendirilecektir.

Sonuç olarak; standart (eurodizel), alternatif yakıt (biyodizel) ve askeri ve havacılık yakıtı kullanan tüm motorlar için motor yağının yakıtı karşı göstermiş olduğu kimyasal karakterizasyonu ortaya çıkarılmış olacaktır. Motor yağının hangi noktadan sonra kullanım performansının düştüğü, hangi oranda yakıt seyrelmesinin gerçekleşebildiği, yakıt sisteminin ve yanmanın durumu gerçek zamanlı olarak tespit etmemizi sağlayacak sistemin temelini oluşturacaktır. Bu veriler kestirimci bakım kapsamındaki algoritmalarda makine öğrenimi eğitiminde kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: kestirimci bakım, motor, makine yağı, seyreltme, karakterizasyon

SUMMARY

Predictive maintenance can be used heavily in aviation, defence industry and heavy industrial engines. How and to what degree the usage of alternative and renewable fuels effect the engine oil must be researched. In this paper engine oil used in heavy diesel engines will be diluted with diesel, biodiesel and 1-Dodecene (jet fuel substitute) fuels (1-2-5-7-10% in weight), physico-chemical (parameters from the standart values will be considered for predictive maintenance.

In conclusion; the effect of standart (eurodiesel), alternative (biodiesel) and military and aviation fuels on the chemical properties of the engine oil for every engine that uses these fuels will be revealed. In this data we can see at which point the oil becomes inadequate for use because of low performance, the condition of the fuel and ignition systems. This data will be the ground work for the development of predictive maintenance algorithms and machine learning.

Keywords: predictive maintenance, engine, engine oil, dilution, characterization

TEŞEKKÜR

Bu macerada bana gösterdikleri destek için aileme, sabırla beni eğiten ve yol gösteren danışman hocam Prof. Dr. Mustafa Ertunç TAT'a ve işlerimi aksatmayacağıma güvenerek sürekli seyahat izni veren müdürüm Nida TÜRKOĞLU'na teşekkürlerimi sunuyorum.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. TEMEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1. İçten Yanmalı Motorlar	3
2.2. Bakım Yöntemleri	5
2.3. Kestirimci Bakımda Makine Öğrenmesi	9
2.4. Literatürde Kestirimci Bakım	13
3.MATERYAL VE YÖNTEM	19
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	25
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	43
KAYNAKLAR DİZİNİ	45

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. İçten Yanmalı Motorların Güç Aktarım Prensipleri.....	3
2.2. SI Motorların Genel Elemanları.....	4
2.3. CI Motorların Genel Elemanları.....	4
2.4. Dolu Ağırlıklarına Göre Gruplandırılmış Dizel Araçlar.....	5
2.5. Küvet Eğrisini Gösteren Bozulma Oranı – Zaman Grafiği.....	6
2.6. Titreşim Analizi Yapılan Bir Motor.....	7
2.7. Ultrasonik Analiz Uygulanan Bir Motor Dişlisi.....	8
2.8. Termal Resimleme ile Muayene Edilen Bir Motor.....	8
2.9. Gözetlemeli Öğrenme Modeli.....	10
2.10. Gözetlemesiz Öğrenme Modeli.....	11
2.11. Güçlendirme Öğrenme Modeli.....	12
2.12. FLIR Termovision A40 Termal Resim Kamerası Düzenegi.....	13
2.13. Yapay Zekanın Doğru Tanı Koyduğu Termal Anomaliler.....	13
2.14. Conolius vd. Çalışmalarında Yaptıkları Ölçüm Düzenegi.....	18
2.15. Vesela vd. Yağın Fiziko-Kimyasal Özelliklerinin Yağlayıcılığa Etkisini Ölçtükları Düzenek.....	18
3.1. Anton Paar Automated Micro Viscometer AMVn.....	20
3.2. Castrol 10W-40 yarı sentetik motor yağı.....	21
3.3. AMVn kullanım klavuzu görüntüsü.....	22
3.4. Kapiler kullanım klavuzu görüntüsü.....	23
4.1. Dizel yakıtı seyrelmesi için dinamik viskozite – sıcaklık grafiği.....	26
4.2. Dizel yakıtı seyrelmesi için relatif viskozite bozulması grafiği.....	28
4.3. Dizel yakıtı seyrelmesi için logaritmik sonuç grafiği.....	29
4.4. Dizel yakıtı seyrelmesi için birinci türev grafiği.....	30
4.5. Biyodizel yakıtı seyrelmesi için dinamik viskozite – sıcaklık grafiği.....	31
4.6. Biyodizel yakıtı seyrelmesi için relatif viskozite bozulması grafiği.....	33
4.7. Biyodizel yakıtı seyrelmesi için logaritmik sonuç grafiği.....	34
4.8. Biyodizel yakıtı seyrelmesi için birinci türev grafiği.....	35

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.9. 1-Dodecene seyrelmesi için dinamik viskozite – sıcaklık grafiği.....	36
4.10. 1-Dodecene seyrelmesi için relatif viskozite bozulması grafiği.....	38
4.11. 1-Dodecene seyrelmesi için logaritmik sonuç grafiği.....	39
4.12. 1-Dodecene seyrelmesi için birinci türev grafiği.....	40
4.13. Kullanılan yakıtların viskozite değerleri.....	41
4.14. Kullanılan seyreltme yakıtlarının logaritmik sonuç grafiği.....	42
4.15. Kullanılan yakıtların birinci türev grafiği.....	42

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Kullanılan Castrol 10W-40 Motor Yağının Tipik Özellikleri.....	21
3.2. Numune Matrisi.....	24
4.1. Dizel Yakıtı Seyrelmesi ile Yapılan Viskozite Ölçümleri.....	25
4.2. Dizel Yakıtı Seyrelmesi için Yapılan Regresyon Sonuçları.....	26
4.3. Dizel Yakıtı Seyrelmesi için Hesaplanan Dinamik Viskozite Değerleri.....	27
4.4. Dizel Yakıtı Seyrelmesi için Relatif Bozulma.....	27
4.5. Dizel Yakıtı Seyrelmesi İçin Logaritmik Sonuç Çizelgesi.....	29
4.6. Dizel Yakıtı Seyrelmesi İçin Logaritmik Regresyon Sonuçları.....	30
4.7. Biyodizel Yakıtı Seyrelmesi ile Yapılan Viskozite Ölçümleri.....	31
4.8. Biyodizel Yakıtı Seyrelmesi için Yapılan Regresyon Sonuçları.....	32
4.9. Biyodizel Yakıtı Seyrelmesi için Hesaplanan Dinamik Viskozite Değerleri.....	32
4.10. Biyodizel Yakıtı Seyrelmesi için Relatif Bozulma.....	32
4.11. Biyodizel Yakıtı Seyrelmesi İçin Logaritmik Sonuç Çizelgesi.....	33
4.12. Biyodizel Yakıtı Seyrelmesi İçin Logaritmik Regresyon Sonuçları.....	34
4.13. 1-Dodecene Seyrelmesi için Yapılan Viskozite Ölçümleri.....	36
4.14. 1-Dodecene Seyrelmesi için Yapılan Regresyon Sonuçları.....	37
4.15. 1-Dodecene Seyrelmesi için Hesaplanan Dinamik Viskozite Değerleri.....	37
4.16. 1-Dodecene Seyrelmesi için Relatif Bozulma.....	37
4.17. 1-Dodecene Seyrelmesi İçin Logaritmik Sonuç Çizelgesi.....	38
4.18. 1-Dodecene Seyrelmesi İçin Logaritmik Regresyon Sonuçları.....	39
4.19. Seyrelmede Kullanılan Yakıtların Viskozite Değerleri.....	40

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**Simgeler**

V

Voltaj

I

Akım

R

Direnç

Kısaltmalar**Açıklama**

AB

Avrupa Birliği

SI

Spark Ignition

CI

Compression Ignition

MTTF

Mean-time-to-failure

PAG

Polialkalin glikol

ASTM

American Society for Testing and Materials

AMVn

Automated Micro Viscometer

FAME

Fatty acid methyl ester

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Makine güç kullanarak kuvvet uygulayan ve hareketi kontrol eden fiziksel sistemlere verilen isimdir. Genellikle yapay oluşumlara verilen bir isim olsa da organik makinelerde vardır. Makineler tarih boyunca çeşitli şekillerde kullanılmıştır, güç kaynağı olarak hayvanlar, insanlar veya rüzgar ve su gibi doğal kuvvetler ve kimyasal, termal ve elektriksel kaynaklar kullanılmıştır. Günümüzde basit makineler yerlerini karmaşık makine sistemlerine bırakmıştır, makine sistemleri birden çok makinenin bir araya gelerek karmaşık bir işi başından sonuna kadar yapan sistemlerdir.

Bu sistemlerin hemen her birinde vazgeçilmez olan makine motordur. Motorlar elektrik veya kimyasal enerjiyi hareket enerjisine dönüştüren makinelerdir. Günümüzde hayatın olmazsa olmazı olarak değerlendirilirler. En basit mutfak aletinden gemilere ve uçaklara kadar akla gelebilecek her tür makine sisteminde hareketin sağlanması için motorlar kullanılır. Motorlar çalışırken bazı kayıplarda yaşanır. Bu kayıplardan en önemlileri ısı ve sürtünmedir. Yapılan çalışmaların çoğu bu iki kaybı azaltmak üzerinedir.

Isı ve sürtünme olarak kaybolan enerjiyi en aza indirmek için motorlarda motor yağı kullanılır, motor yağları korozyonu önleyici, sürtünmeyi azaltıcı ve soğutucu olarak motorda görev yapar. Bunu yaparken motorun bütün sistemlerinden geçer ve motorun en alt bölümünde bulunan yağ karteri adı verilen haznede toplanır. Bu çalışma döngüsü sırasında aşınma ürünleri, yanmamış yakıt ve yanma ürünleri yağın içinde birikir. Bu birikinti yağın çalışma performansını etkiler ve bir süre sonra kullanılamaz hale gelir. Bu durumda yağın değişmesi gerekir.

Bu yağ değişimi motorlara uygulanan bakımlardan biridir. Arızalanan veya tam verimlilikle çalışmayan parçaların değişimi de bakımdır. Bu bakımın uygulanması için kullanılan çeşitli yöntemler vardır. Periyodik bakım, kestirimci bakım ve önleyici bakım bu yöntemlerdir.

Yağda biriken bu yabancı maddeler motorun sağlığı konusunda bize korelatif bilgi verir. Yağda biriken aşınma metallerini inceleyerek motorun hangi parçasının bakıma

ihtiyacı olduğunu tahmin edebiliriz veya yağın fiziko-kimyasal özelliklerinde değişimlerden yakıt sisteminin neresinde arıza olduğunu kestirebiliriz. Bu bakım felsefesine kestirimci bakım denir.

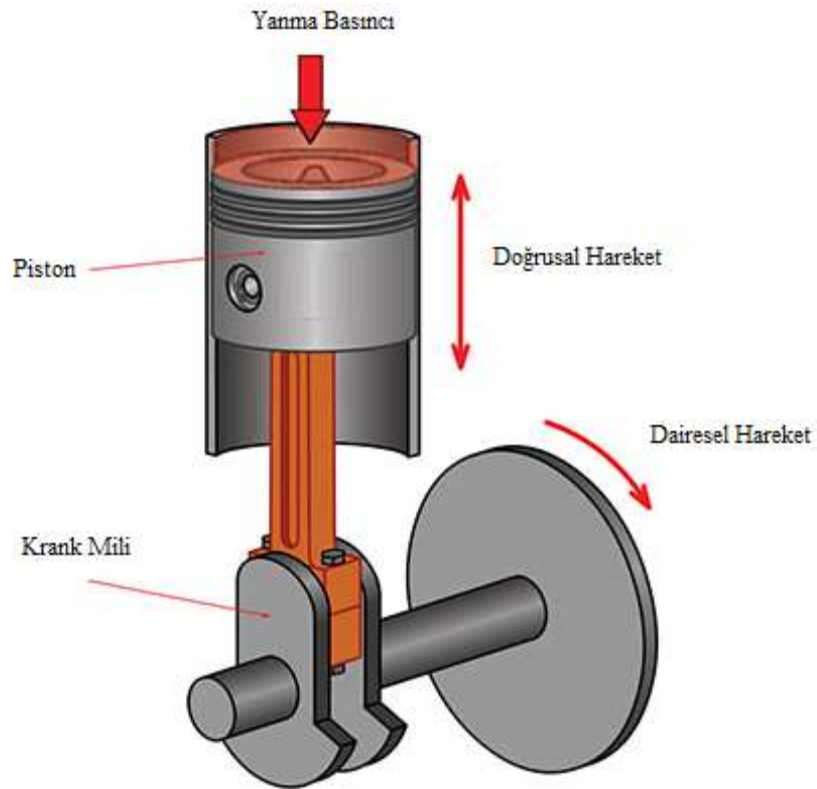
Kestirimci bakım motoru oluşturan parçaların sensörler yardımıyla çalışma sırasında izlenmesi ve büyük bir veri ağı kullanılarak elde edilen verinin işlenip motorun hangi parçasının ne zaman bakıma ihtiyacı olacağını kestirme çalışmasıdır. Bu amaç doğrultusunda titreşim analizi, performans takibi, sıcaklık takibi ve yağ analizi gibi yöntemler kullanılır.

Bu araştırmada motor yağından kestirimci bakım için kullanılacak yağ karakteristiklerinin belirlenmesi ve bu karakteristiklerin takip edilebilmesi için kullanılacak sensörler değerlendirilecek ve günümüzde gittikçe yaygınlaşan makine öğrenimi konseptinin bu amaçta kullanımı göz önünde bulundurulacaktır.

2. TEMEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

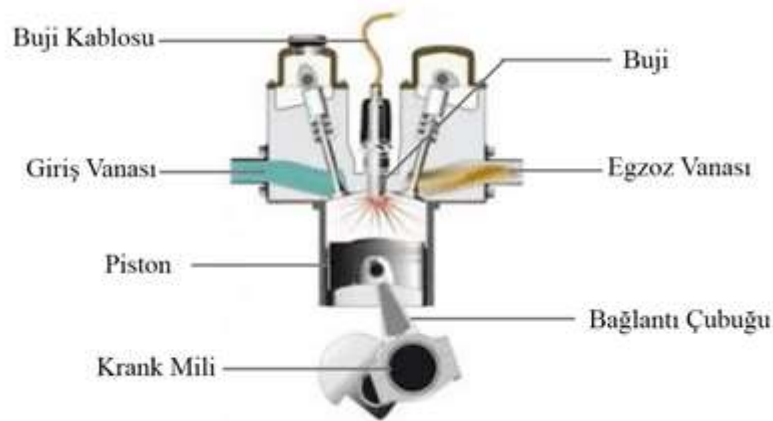
2.1. İçten Yanmalı Motorlar

İçten yanmalı motorların amacı yakıt içerisinde bulunan kimyasal enerjiyi mekanik güce dönüştürmektir. Bunu motorun içerisinde bulunan silindirlere hava ve yakıt karışımını yakarak yaparlar. Bu bağlamda içten yanmalı motorlar yakma tipine göre kıvılcımla (spark-ignition, SI) veya sıkıştırma ile (compression-ignition, CI) olarak ikiye ayrılır.



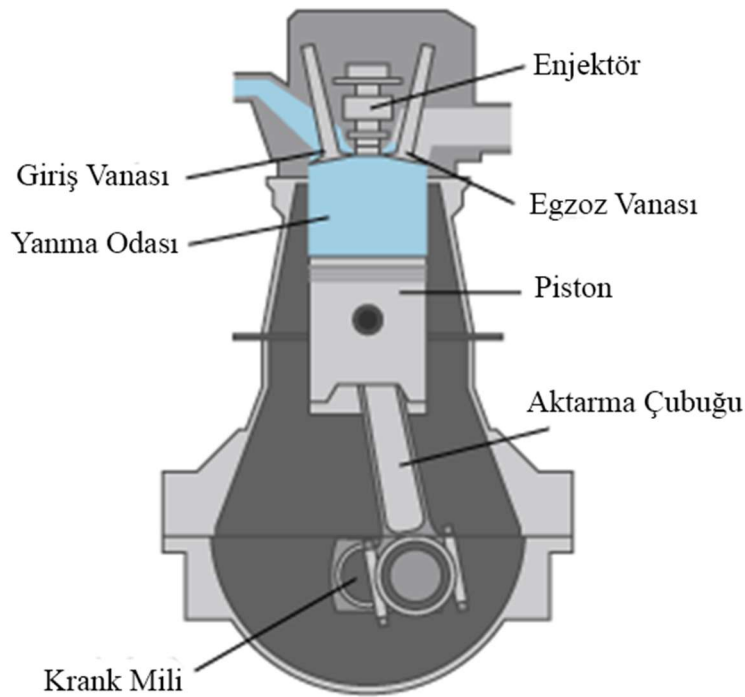
Şekil 2.1. İçten yanmalı motorların güç aktarım prensibi. (Wright, G., 2015)

SI motorlarda yanmadan önce yakıt buharlaştırılmalı ve silindire püskürtülen hava ile güzelce karıştırılmalıdır. Geçmişte yakıt akışı bir karbüratör ya da tek noktalı yakıt enjektörü kullanılarak yapılırdı ancak günümüzde bu yöntem yerini giriş portu yakıt enjektörü yöntemine bırakmıştır. Bu yöntemde sıvı yakıt püskürtmesi giriş vanasına doğru yönlendirilir. Artık vana yerine direkt silindirin içine yakıt püskürtülmesi yaygın olarak kullanılır.












































Şekil 2.2. SI motorların genel elemanları. (www.mechanicaleducation.com)

CI motorlarda giriş sırasında silindire sadece hava alınır. Yakıt ise yanma işlemi başlamadan hemen önce direkt olarak silindirin içine enjekte edilir. Yük kontrolü her çevrim sırasında farklı miktarlarda yakıt enjekte edilerek sağlanır. Giren hava ise direkt olarak kontrol edilmez ve doğal hava akışı kullanılan motorlarda hiç değişmez. Yakıt tüketimini arttırarak performansı arttırmak için turboşarj kullanılabilir. Turboşarj doğal hava akışı yerine sıkıştırılmış havayı silindire yollayarak yakıt akışını arttırır. (Heywood, 2018)



Şekil 2.3. CI motorların genel elemanları. (www.mechanicalbooster.com)

CI motorlar dizel yakıt kullanır ve bu motorların kullanıldığı araçları taşıdıkları ağırlığa göre sınıflandırmak mümkündür. Maryland eyaletinin (mde.maryland.gov) yaptığı sınıflandırma şekil 2.4'te gösterilmiştir. Bu tarz ağır taşıma işlemlerinde dizel motorların kullanılmasının sebebi dizel motorların sağlamlığı ve yüksek tork çıktısıdır. Dizel motorlar taşıma, inşaat, madencilik, itfaiye ve ambulans gibi acil servisler, savunma uygulamaları ve elektrik güç üretiminde yaygın olarak kullanılırlar.

Dizel Araç Sınıflandırması							
Hafif Hizmet			Orta Hizmet			Ağır Hizmet	
Class 1 (0-2722 kg)	Class 2 (2722-4536 kg)	Class 3 (4537-6350 kg)	Class 4 (6351-7257 kg)	Class 5 (7258-8845 kg)	Class 6 (8846-11793 kg)	Class 7 (11794-14969 kg)	Class 8 (14969 kg ve üstü)
 Mini-van	 Mini-van	 Mini-bus	 Conventional Van	 Bucket	 Rack	 Home Fuel	 Fuel
 Utility Van	 Utility Van	 Walk-in	 Large Walk-in	 Large Walk-in	 Single Axle Van	 Refuse	 Dump
 Multi-purpose	 Crew Compartment Pick-up	 City Delivery	 City Delivery	 City Delivery	 Beverage	 Tow	 Cement
 Mini Pick-up	 Full-size Pick-up		 Landscaping/Utility		 School Bus	 City Transit Bus	 Refrigerated Van
 Full-size Pick-up	 Mini-Bus				 Stake Body	 Furniture	 Intercity/Tour Bus
	 Step Van					 Medium Conventional	 Fire Engine
						 High Profile COE	 Heavy Conventional
							 COE Sleeper

Şekil 2.4. Dolu ağırlıklarına göre gruplandırılmış dizel araçlar (mde.maryland.gov)

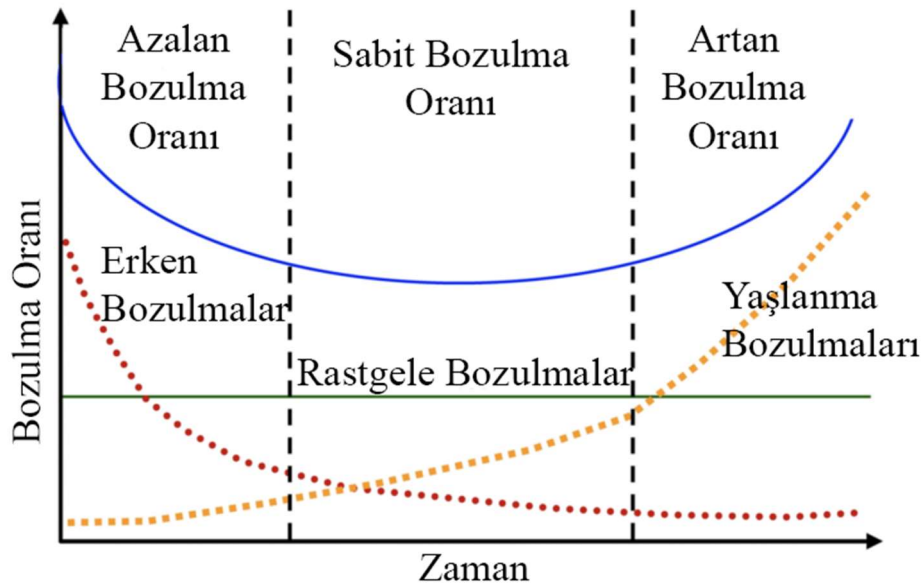
2.2. Bakım Yöntemleri

Endüstride kullanılan bakım yöntemleri genel olarak iki gruba ayrılır. Bunlardan birincisi ve en yaygın olarak kullanılanı önleyici bakımdır. İkincisi ise özellikle havacılık sektöründe yaygın kullanılan kestirimci bakımdır.

Önleyici bakım ekipman bozulmasını önlemek için çizelge bazlı bir bakım çalışmasıdır, hazırlanan çizelgeye göre düzenli olarak bakım yapılır, bu yaklaşım basit ve uygulanması kolaydır ancak bakım sonrası değiştirilen parça veya kullanılan yağ ayrıca analiz edilmeden hazır olan çizelgeye değişiklik yapılması mümkün değildir. Buna kıyasla kestirimci bakım sensörler ile gerçek zamanlı izleme ve veri elde etmeye dayanır, uygulanması daha zordur ancak çalışmaya başladıktan sonra gereksiz veya geç kalan bir bakım olması ihtimali çok düşüktür.

Önleyici bakımın pek çok tanımı vardır ancak hepsinin ortak noktası zaman odaklı olmalarıdır. Önleyici bakımda bakım işlemleri makinenin çalışma süresine göre belirlenir. Ortalama bozulma süresi (mean-time-to-failure, MTTF) çizelgesi bir kuvvet eğrisidir. Yani MTTF'ye göre yeni kullanıma başlayan bir makinenin kurulum sırasında yapılan hatalardan dolayı hayatının başında bozulması ihtimali yüksektir ve bu bozulma riski zaman geçtikçe büyük oranda azalır ve ömrünün sonuna geldiğinde tekrar aniden yükselir. Önleyici bakım çalışmalarında bakım zamanlaması MTTF istatistiğine göre belirlenir. (Mobley, 2002)

Kuvvet eğrisi grafiği Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Bu eğriye göre bir ürünün hayatının başında bir hata göstermesi ve bozulması ihtimali yüksektir. Başta gerçekleşen bu bozulmaların çoğunluğunun hatalı üretimden kaynaklanması beklenir. Zaman geçtikçe bozulmalar azalır ve bozulma oranı sabit bir seviyeye iner. Ürün ömrünün sonuna geldiğinde bozulma oranı tekrar artar bu artmanın sebebi yaşlanma bozulması olarak yorumlanır. (www.tl.nist.gov)



Şekil 2.5. Kuvvet eğrisini gösteren bozulma oranı – zaman grafiği (www.tl.nist.gov)

Kestirimci bakım çeşitli yöntemlerle bir makinenin sürekli olarak izlenmesi ve durum bazlı bakım yapılmasını içeren bakım çalışmasıdır. Bu bakım felsefesinin amacı bakımlar arasındaki zamanı mümkün olduğunca uzatmak ve makinenin durma süresini en aza indirmektir. Çeşitli sensörler yardımıyla toplanan veri işlenerek yeni bir bakım programının yapılmasında kullanılır.

Motorun çalışırken oluşturduğu titreşim çalışma zamanı ilerledikçe değişim gösterir. Bu değişimin analiz edilmesi motorun neresinin ne zaman bakıma ihtiyacı olduğunu bize söyleyebilir. Houston şehrinin atık su işleme tesisinde yapılan çalışmada titreşim analizine harcanan her 1\$ için 3.50\$'lık bir geri dönüş olduğu tespit edilmiş. Aynı çalışma özel bir şirketin bu sayıyı 5\$'a kadar çıkarabileceğini gösteriyor. Eğer titreşim frekansı 1000 Hz'in altında ise hız değeri titreşim ciddiyeti açısından en iyi göstergedir. Eğer titreşim frekansı 2000 Hz'den yüksek ise titreşim ciddiyetini en iyi ivme gösterir.



Şekil 2.6. Titreşim analizi yapılan bir motor (www.proeksper.net)

Titreşim karakteristikleri hangi parçanın arızalı olduğunu gösterebilir. Örneğin Yamuk bir şaft her zaman dönmenin hızının iki katı frekansta tepe yapar. Öte yandan arızalı bir bilyeli rulman dönmenin 20 katı kadar frekansta titreşim yapabilir. Titreşim analizi 1 Hz ile 30000 Hz arasındaki titreşimlerin analizinde kullanılır. 30000 Hz ve üzerindeki titreşimler için ultrasonik analiz kullanılır. Ultrasonik sesler genellikle yüksek basınçlı alanlarda gerçekleşen gaz ve hava kaçaklarının tespitinde kullanılır.



Şekil 2.7. Ultrasonik analiz uygulanan bir motor dişlisi (www.awacosmetics.com)

Motorun performansı çalışma süresi ilerledikçe değişir. Performansın değişimi takip ederek analiz etmek motorda oluşan hataları gerçekleşmeden tahmin etmemizi sağlar. Motorun farklı bölgelerinde farklı sıcaklık girdileri oluşur ve zaman ilerledikçe bu bölgelerdeki değişimlerde de farklılıklar söz konusudur. Motorun sıcaklığını takip etmek ve değişimlerini analiz etmek motorun ne zaman yağ değişimine ihtiyacı olduğunu bize söyleyebilir.



Şekil 2.8. Termal resimleme ile muayene edilen bir motor (www.stendustri.com.tr)

Motorlarda çalışma sırasında gerçekleşen bozulmaların %70'i yağın kirlenmesinden kaynaklanmaktadır. Bunların %50'si de aşınma problemidir. Motor yağı motorun çeşitli yerlerinde gezerek hem soğutma hem de kayganlaştırma sağlar ve bu işi yaparken geçtiği yerlerden aşınma ve sızıntı gibi faktörler sonucu pek çok yabancı maddeyi toplar. Motor yağının bileşenlerini gerçek zamanlı olarak izlemek ve analiz etmek motorun sağlık durumunu yakından takip etmemizi sağlar.

Kullanılan yöntemlerden biri yağın genel durumunu değerlendirmektir. Örneğin direkt sahada yapılabilecek kontrollerden biri yağın rengini ve berraklığını değerlendirmektir. Bulanık bir yağ genellikle yağa su karıştığı anlamına gelir ve yağ oksitlendikçe rengi kararmaya başlar.

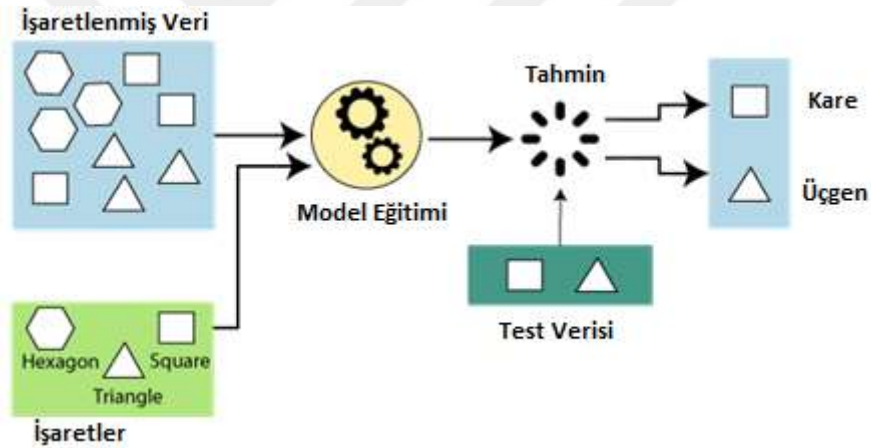
Diğer bir yöntem ise aşınma metali analizidir. Yağda biriktiği gözlenen metallerin elementine göre nerede fazla aşınma yaşandığı tahmin edilebilir. Örneğin demir elementinin tespit edilmesi dişlilerde bir arıza olduğunu düşündürür, kurşun elementinin fazla görülmesi ise rulmanlarda bir arıza olabileceğine işaret eder.

Kimyasal analiz yapılırken numunelerin nereden alındığı önemlidir. Dip numune alımı makinenin en dip noktasından numune alınmasıdır ve yanlış bir yaklaşımdır. Yağ karterinde bekleyen yağ motorun diğer noktalarına kıyasla daha fazla aşınma metali ve kirlenici barındırır. Analiz sırasında böyle bir birikmeyi göz önünde bulundurmak mümkün olmadığından alınan sonuçlar doğruyu yansıtmaz. (Levitt, 2011)

2.3. Kestirimci Bakımda Makine Öğrenmesi

Kestirimci bakım kapsamında toplanan bütün verilerin bir insan tarafından işlenmesi beklenemez. Bu rolü üstlenmesi için günümüzde gitgide yaygınlaşan makine öğrenmesi ve nöral ağ yapısı ile verilerin depolanması, ilişkilendirilmesi ve işlenmesi çok daha kolaydır. Günümüzde makine öğrenmesi bir veya daha fazla algoritmanın birlikte kullanılarak bir makinenin daha önce yapamadığı bir işlemi başarılı bir şekilde gerçekleştirmesidir. Bunu başarmak için pek çok eğitim yöntemi kullanılır.

Gözetlemeli öğrenme makine öğrenimi uygulamalarında en yaygın kullanılan yöntemdir. Bu teknikte kullanılan veri seti etiketlenmiştir. Etiketli veri seti verilerin özelliklerine isimlendirilmesidir. Bir veri birden fazla etikete sahip olabilir. Veri seti belirlendikten sonra problemin çözme yöntemi belirlenir. Burada yöntemler genel olarak iki kategoriye ayrılır. Regresyon yöntemi bir bağımlı veri ile bir veya birden çok bağımsız veri arasındaki ilişkiyi bulmak için kullanılır. Bilinen veriler algoritmaya verilerek bilinmeyen ara değerler tahmin edilir. İkinci yöntem ise sınıflandırmadır. Sınıflandırma yöntemi makine öğrenimi kapsamında en çok kullanılan eğitim yöntemidir. Bu yöntemde algoritmaya verilen etiketli veriler kullanılarak yeni giriş yapan bir verinin etiketlendirme sırasında sınıflandırılması istenir. Örneğin bu yöntemle bir grup öğrenciyi iyi, orta ve kötü olarak kendimiz sınıflandırdıktan sonra algoritmanın bu etiketlendirmeyi kullanarak yeni bir öğrenciyi sınıflandırması istenebilir.



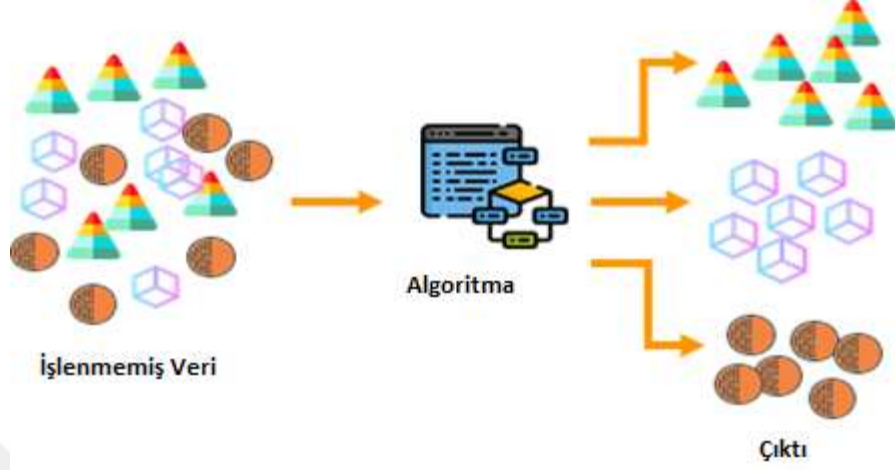
Şekil 2.9. Gözetlemeli öğrenme modeli (Karadağ, H., 2023)

Derin öğrenme bilgisayar donanımlarının gelişmesiyle ortaya çıkmış bir yapay zeka uygulamasıdır. Nöron ağları üzerine kurulan derin öğrenme resim tanıma, ses tanıma ve sağlık sektöründe yüksek performans gösterir.

Zaman serisi ön görme yöntemi zaman içerisinde periyodik olarak kayıt edilen verilerden oluşturulan bir modelin gelecek zaman verilerini tahmin etme çalışmasıdır. Elde edilen verilerin altında yatan sebebi bulmak ve anlamak için kullanılır.

Gözetlemesiz öğrenme yöntemi elde etiketlenmiş bir veri olmadığında kullanılır. Bu yöntemde etiketlenmemiş veri algoritmaya beslenir ve keşif yapmasına izin verilir. Otomatik

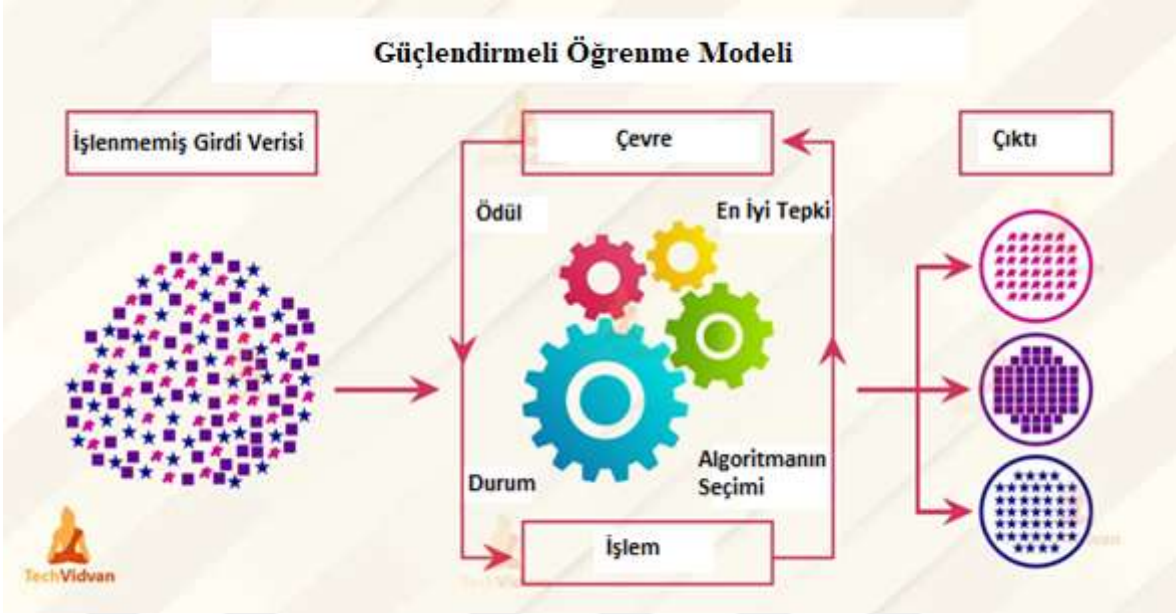
konuşma çevirisi, kendi kendini süren arabalar, öneri sistemleri gibi uygulamalarda kullanılır.



Şekil 2.10. Gözetlemesiz öğrenme modeli (Singh, T., 2021)

Yarı gözetlemeli öğrenme tamamına kıyasla etiketlenmiş veri miktarının çok az olduğu zaman kullanılır. Yüksek sayılı veri tabanlarında bütün veri tabanının etiketlenmesi aşırı pahalı ve zaman alıcı bir uygulamadır. Bu durumu azaltmak için tamamı yerine verinin bir kısmı etiketlenir. Yarı gözetlemeli öğrenme tam gözetlemeye kıyasla daha az isabetli sonuçlar verir ancak gözetlemesiz öğrenmeye kıyasla çok daha yüksektir ve tam gözetlemeye kıyasla çok daha ucuzdur. Web sayfası sınıflandırması, yazı bazlı resim aramaları gibi uygulamalarda kullanılır.

Güçlendirme öğreniminde algoritma çevre ile etkileşime girerek ilerler. Başlangıçta bir veri seti yoktur, veriler gerçek zamanlı olarak algoritmaya beslenir. Güçlendirme algoritmanın çevre ile etkileşimi sonucu ürettiği verinin değerlendirilmesi sırasında gerçekleşir. Olumlu olarak değerlendirilen veri algoritmanın bu veriyi tekrarlamak istemesine sebep olur. Yeni veriler sisteme girdiğinde algoritma eski tecrübelerinden yararlanarak ne yapacağına karar verir. Robotik, sağlık ve otomasyon gibi gerçek çevre ile etkileşime giren uygulamalarda kullanılır. (Hossain, 2024)

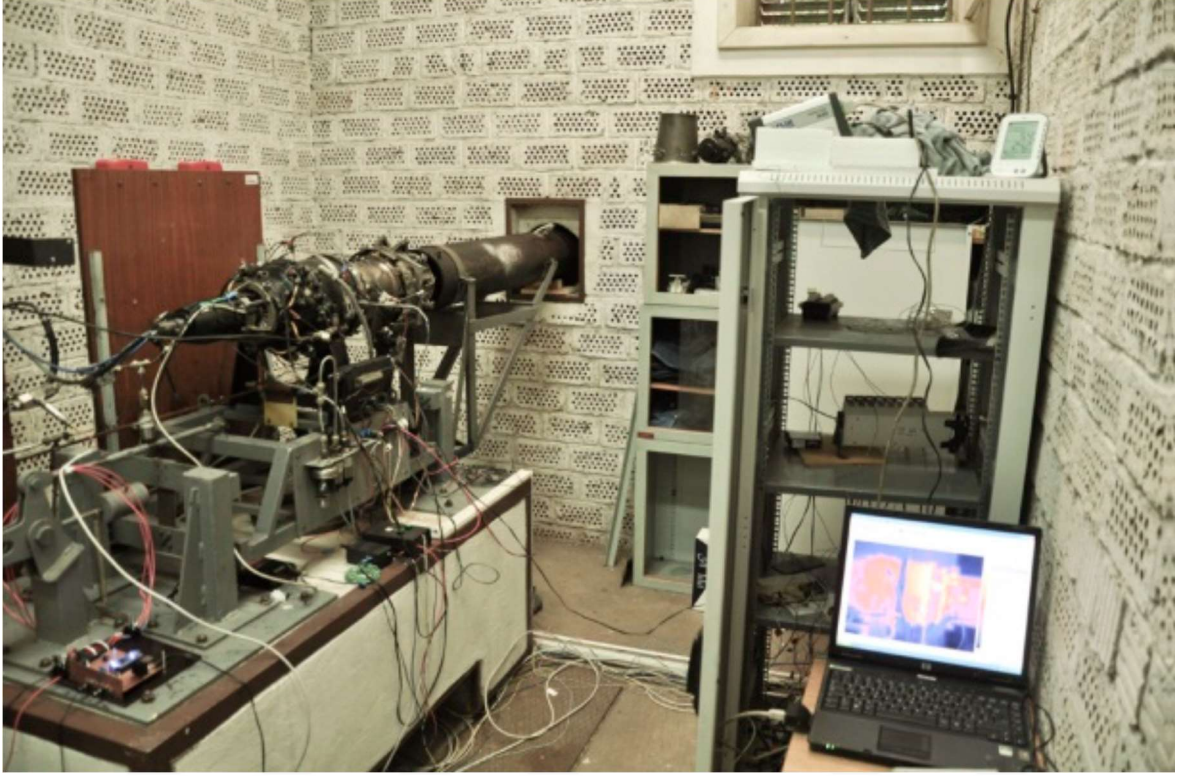


Şekil 2.11. Güçlendirmeli öğrenme modeli (Tafralı, S., 2023)

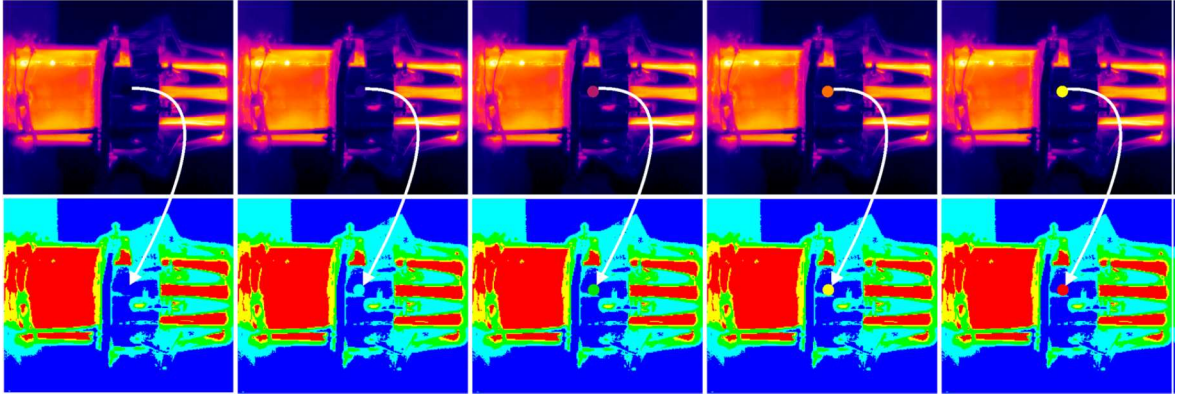
Örneğin Peter Whidden yaptığı çalışmada yapay zekaya Pokemon Red oyununu oynamayı öğretmiştir. Bunu başarmak için yaptığı iterasyonlarda çeşitli ödüller ekleyerek yapay zekayı oyunu oynamaya ve başarılı olmaya teşvik etmiştir. Eklediği ödüllerden biri ekranda oluşan her yeni görüntü için yapay zekaya bir puan vermektir. Bu sayede oyuncu yeni yerler keşfetmeye teşvik edilir. Yeni görüntüleri tespit etmek için eski görüntülerle karşılaştırma yapan farklı bir algoritma kullanmıştır. Bunun bir yan etkisi olarak yapay zeka animasyonlu su ve ağaçlı bölgelere takıntılı hale gelmiştir. Bunun sebebi bu bölgelerin sürekli yeni görüntüler üretmesidir. Bu sorunu aşmak için Whidden yeni görüntüleri kategorize eden algoritmayı güçlendirmiş ve yeni görüntü elde etme ölçütlerini zorlaştırmıştır.

Çalışmanın sonucunda yapay zeka oyunda ilerlemeyi başarmıştır. Bakım çalışmaları arasında henüz buna benzer bir yapay zeka kullanımı bulunmamaktadır. Ancak teorik çalışmalar mevcuttur. Örneğin Andoga ve takım arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2019) 500 N itki üreten bir turbojet motoru laboratuvar koşullarında çalıştırılmıştır. Bakım yöntemi olarak termal resimlere kullanmışlardır. Yapay zeka eğitim yöntemi olarak gözetlemesiz öğrenme kullanılmıştır. Bu yöntemde hasarsız olduğu bilinen bir motorun termal resimleri ile bakımı yapılan motorun termal resimleri işlenerek basitleştirildikten sonra karşılaştırılarak hatalı bölge tespit edilmiştir. Bölge tespit edildikten sonra hatanın türünü belirlemek için şekil tanıma algoritması kullanılmıştır. Sonuç olarak %91,8 oranda isabetli

tanı koyma başarısına ulaşmışlardır. Kullandıkları test düzeneği Şekil 2.12 ve elde ettikleri görüntüler Şekil 2.13'te görülmektedir.



Şekil 2.12. FLIR Thermovision A40 Termal resim kamerası düzeneği (Andoga, vd.,2019)



Şekil 2.13. Yapay zekanın doğru tanı koyduğu termal anomaliler (Andoga, vd.,2019)

2.4. Literatürde Kestirimci Bakım

Malezya Pahang Üniversitesinde yapılan araştırmada farklı yaşlandırma evrelerindeki motor yağı numunelerinin çeşitli voltaj uygulamalarında ilettiği akım ölçülmüştür. Örnek olarak yağlar bir motosiklet ve bir araba motorundan alınmıştır. Numuneler motosikletten 0-1500 km arasında yaşlandırılarak ve araba motorundan 0-9000

km yaşlandırılarak alınmıştır. Devrenin uygulanması için elektrotlar 1 mm boşluk olacak şekilde bir devre kartına yazdırılmıştır. Akım 0,2-1,0 kV voltaj altında ölçülmüştür. Ohm yasasına göre ($V=IR$) V sabit iken yapılan ölçümlerde I'nın düşüşü yağın R'sinin yükseldiğini gösterir, bu yükselme motor aktivitesi sebebiyle yağda oluşan oksitlerden kaynaklanıyor olabilir, oksitler motor çalışmasında oluşan direnç elementlerinden biridir. Sonuçlardan yağın yaşı yükseldikçe akımın düştüğü anlaşılmıştır ve motosiklet yağının araba motoruna kıyasla daha hızlı yaşlandığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar daha sonra yapılan testlerde gösterge olarak motor yağının durumunu tespit etmek için kullanılabilir. Araştırmanın ilerletilebilmesi ve motor yağının davranışının daha iyi anlaşılabilmesi için sonraki aşamalarda kimyasal deneyler de yapılabilir. (Connolius vd., 2019)

Normal bir çalışma ömrünün garantilenebilmesi için, motor yağı birkaç gerekliliği sağlamalıdır. Güney Ural Üniversitesinde yapılan araştırmada ana yağ parametreleri ile içten yanmalı motorun teknik durumu arasındaki ilişki gösterilmiş. Değişken termal ve mekanik yükler altındayken motor yağı da kimyasal yapısını değiştirir, çalışma durumundayken içinde biriken aşınma malzemeleri, yakıt, nem ve daha pek çok parça ve parametrelerinin sınırlarına ulaşması çalışma özelliklerinin değişmesine sebep olur ve yağın özelliklerini kaybetmesine sebep olur. Motor yağının zamanında değiştirilmesi için kalitesinin yakından izlenmesi gerekir. Bununla birlikte motor yağı kalitesi sadece yağın ömrünü değil aynı zamanda motor parçalarının ve motor montajının bütünlüğünü de belirler ve dolayısıyla çalışma sırasında ani donanım bozulmasının da önüne geçer. Yazılan makale elektro-fiziksel yöntemler kullanılarak motor yağı durumunun belirlenmesi için yapılan çalışmaların sonuçlarını sunuyor, deney olarak motor yağının özelliklerini ölçmek için düz bir kapasitör hazırlanmış ve örnek yağın içine batırılmıştır. Sonuç olarak yağın dielektrik geçirgenliği %3,9 isabet oranı ile ölçülmüştür. Bu yeni yöntemler sadece motor yağının durumunu değil, gelecekte genel olarak motorun durumunu da montajı bozmadan belirlemek için kullanılabilir. (Vozmilov vd., 2018)

AB biyoyakıt kullanımını artırmak için çalışmalar yapmakta. Biyoyakıtlar fosil yakıtların yerini tamamen alamadı. En çok kullanılan biyoyakıt E85, %85 etanol ve %15 gazolin içerir. Kullanılan yakıtın biyoyakıt miktarı ne kadar fazla ise motor yağına etkisi de o kadar fazla olur. Yapılan araştırmada bu etkinin E85 biyoyakıt ile BA95 fosil yakıtı arasındaki farklar değerlendirilmiştir. Deney ortamı olarak Saab 95 yolcu arabasından

sökülen B235 R motoru kullanılmıştır. Motordan 5 adet E85 ile çalışırken ve 5 adet BA95 ile çalışırken toplam 10 yağ örneği alınmıştır. Yağ olarak Mobil 1 0W-40 yağı kullanılmıştır. Analiz yapılırken sonuçlar viskozite, yoğunluk ve yağlayıcılığına odaklanmıştır. Deney sonuçları Stabinger viskometre ve Reichert test düzeneği kullanılmıştır. Sonuç olarak motor yağına karışan E85'in viskozite ve yoğunluğu düşürdüğü ve aşınma yüzey alanını $2,61 \text{ mm}^2$ kadar arttırarak yağlayıcılığını düşürdüğü görülmüştür bunun yanında yağa karışan BA95 aşınma yüzey alanını $1,43 \text{ mm}^2$ azaltarak yeni yağa kıyasla daha yüksek performans göstermiştir. Yani önemli parçaların yüzeylerinde aşınmayı önlemek ve ani bozulmalardan kaçınmak için biyoyakıt kullanan bir aracın normal gazoline kıyasla daha sık yağ değiştirmesi gerekmektedir. Biyoyakıtın çevre dostu olması asıl kullanım sebebi olduğundan yağ kullanımını arttırmak yerine güzel bir alternatif yağ kirlenmesinin önüne geçilmesi olabilir. (Veselá vd., 2014)

Yakıt ekonomisi kazancı için geleneksel mineral yağı yerine polialkalin glikol (PAG) kullanılması araştırılmıştır. Üretim için çeşitli PAG kimyasalları değerlendirilmiştir. Biri hariç bütün formülasyonların ek içeriği aynıdır. Yağların sürtünme performansı tek silindri bir motorda güncel motor parçaları kullanılarak 500-2500 RPM hız aralığında test edilmiştir. PAG formülleri sıcaklığa bağlı olarak 5W-20 yağına kıyasla sürtünmede %50'ye kadar azalma göstermiştir. Yürütmeli I-4 motorundaki deneylerde GF-5 yağına kıyasla 40-100 C sıcaklık aralığında sürtünmede %11'e kadar azalma görülmüştür. Veriler oluşan sürtünme yarasının büyüklüğü ölçülerek toplanmıştır. (Cuthbert vd., 2016)

Motor yağına karışan malzemenin yağın etkinliğine ve özellikle motorun çalışma koşullarına etkisinin öngörülmesinde laboratuvar yöntemleri çok önemlidir. Farklı performans seviyelerindeki yağların yaşlandırılmasından elde edilen veriler bu araştırma yazısında sunulmuştur. Gazolin ve dizel motorlarda antioksidan eklenmesi açıklanmıştır. Yazıda ekli ve referans yağların kızılötesi spektroskopik yönteminden elde edilen verileri var. Tek ve çok silindri motorların test sonuçları tartışılmış. Sonuç olarak farklı motor yağlarının antioksidan özelliklerinin değerlendirilmesini sağlayan testler yapılabildi. Laboratuvar koşullarında, motor koşullarında oluşanlar ile aynı miktarda ve aynı özelliklerde oksitlenmeye rastlandı. Oksitlenme sonucu oluşan ürünlerin motor yağının antioksidan özelliklerini değerlendirmede büyük etkisi olduğu tespit edilmiştir. Bu etkiler kızılötesi spektrumda karakterize edilebilir olduğu savunulmuştur. (Vipper vd., 2002)

Yapılan araştırmada bir dizel motor, dizel + doğalgaz motora dđnüřtürölerek kullanılan yağın yaşlanma etkisi ölçülmüştür. Ölçüm yöntemi olarak yaşlanma etkisi olarak kabul edilen elementlerin yağda bulunma oranı karşılaştırılmış. Sonuç olarak 200 saat yaşlandırmanın ardından gaz motorunda görölen yaşlanma etkilerinin dizel motora göre daha düşük olduğu görölmüştür. Viskozite artışı %5,1'e kıyasla %12,4 olarak ölçülmüştür. (Boikov vd., 2007)

Motor yağı sürtünmeyi azaltmanın yanı sıra motorun soğumasında da rol oynar. Yapılan araştırmada farklı motor yağlarının termal özellikleri ölçölüp karşılaştırılmıştır. Araştırma için mineral yağı bazlı kayganlaştırıcılar, V grubu bazlı kayganlaştırıcılar ve etilen glikölün ısı iletimi ve öz ısı özellikleri ölçölerek üreticinin tipik ısı transferi sınırlarına ait verileri ile karşılaştırılmış. Ölçüm yöntemi olarak ASTM D2717'de belirtilen sıcak tel yöntemi kullanılmış. Sonuç olarak V bazlı motor yağının mineral bazlıya kıyasla biraz daha iyi özelliklere sahip olduğu ancak iki yağın da yüksek sıcaklık ısı transferi sınırlarıyla kıyaslanabilecek özellikleri olduğu tespit edilmiş. (Wrenick vd., 2005)

Modern motor yağlarının içinde antioksidan, pas önleyici ve sürtünme değiştirici gibi pek çok ek madde vardır. Ancak bu maddelerin motor bloğu içinde yaptıkları henüz tam olarak anlaşılamamıştır. Yapılan çalışmada bu ek maddelerin motor içinde ne gibi tepkiler verdiği yüzey kimyası bazında araştırılmıştır. Sonuç olarak metalik deterjanlar ve çinko ditiyofosfat arasında etkileşim tespit edilmemiş ancak külsüz uzaklaştırıcılar ile metalik deterjanlar ve çinko ditiyofosfat arasında güçlü etkileşimler tespit edilmiştir. (Inoue ve Watanabe, 1983)

Yapılan çalışmada motor yağı yaşlandırılmasının viskozite ve yağlayıcılık üzerine etkisi araştırılmıştır. Motor yağının yaşlanmasındaki asıl etken sürtünmeden dolayı yüzeyin aşınarak yağa karışması olduğu tespit edilmiş. Bu karışım yağın viskozitesini değiştirdiği ve kayganlaştırma etkisini yitirmesine sebep olduğu tespit edilmiştir. Özellikleri düşen yağın daha fazla sürtünmeye sebep olduğu tespit edilmiştir. Yaşlanma işlemi yağın fizikokimyasal yapısını değiştirdiğinden geri dđnüřtürülemez bir işlem olduğu söylenir. Sonuçlar Spectroil Q100 spektrometresi kullanılarak elde edilmiştir. Sonuç olarak yağa karışan yakıtın yağda kesilmeye sebep olduğu ve viskoziteyi düşürdüğü görölmüştür. Bu düşüş soğuk yağda (-10

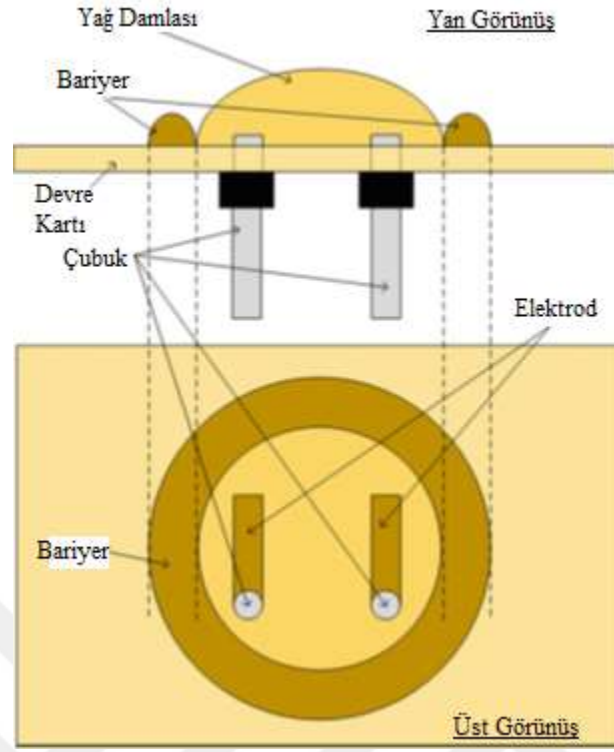
°C) %22 ve sıcak yağda (110 °C) %13,5 olarak kayıtlara geçmiştir. (Sikora ve Miszczak, 2013)

Yapılan çalışmada kullanılmış motor yağının viskozitesi analiz edilip yeni yağ ile karşılaştırılarak bir sonraki yağ değişiminin ön görülmesinin yararlı olup olmayacağı araştırılmış. Sonuçları değerlendirmek için viskozite değişimindeki limitler +%15 ve -%10 olarak ayarlanmış ve sonuç olarak yağların fazla kullanıldığı ve zamanında değiştirilmemesinin araçlara zarar verdiği tespit edilmiştir. Bu tarz bir cihazın motor tasarımına dahil edilmesi hasarı önlemede çok önemli bir rol oynayabilir olduğu tartışılmıştır. (İbrahim vd., 2019)

Düşük viskoziteli motor yağları motor parçaları arasındaki sürtünmeyi azaltarak yakıt ekonomisini iyileştirebilir olduğu yapılan araştırmalar sonucunda bulunmuştur. Düşük viskoziteli yağ kullanıldığında motor yağı keçesindeki sürtünme torkunda düşüş görülmüştür. Araştırmada en düşük sürtünme torkunu 5W-20 yağı ile görmüştür. 90 °C sıcaklık ve 1000 rpm shaft hızında sürtünme torkunun yarıya kadar düştüğü gözlenmiştir. (Kim ve Jeon, 2008)

Yapılan literatür araştırması sonucunda makine öğrenimi kullanarak kestirimci bakım uygulaması yapılabilmesi için gerekli olan veride büyük bir açıklık olduğu tespit edilmiştir. Yapılacak kapsamlı bir laboratuvar çalışmasında alternatif yakıtlara yer verilmeli ve çeşitli durumları kapsayacak bir problem tanımı yapılmalıdır.

Elektriksel iletkenlik üzerine yapılan çalışmalarda yağ kullanıldıkça akımın düştüğü ve yağ elektriksel direncinin arttığı tespit edilmiştir. Bu düşüş kestirimci bakım çalışmalarında kullanılabilir bir parametredir. Motorun belirli yerlerine yerleştirilen sensörler yağın iletkenliğini periyodik olarak ölçerek veri elde eder. Elde edilen veri yağın ömrünü belirtir.



Şekil 2.14. Conolius vd. çalışmalarında yaptıkları ölçüm düzeneği

Yağın fiziko-kimyasal özelliklerinin ölçüldüğü çalışmalarda yağın yaşlanmasının viskoziteyi düşürdüğü görülmüştür. Yağa karışan kirletici katkılar yağın viskozitesini ve yoğunluğunu düşürmüştür. Yapılan başka bir çalışmada düşük viskozitenin sürtünmeyi azalttığı tespit edilmiştir. Ancak bu düşük viskozite kullanılarak ömrünü doldurmuş bir yağda işimize yaramaz. Yağın viskozitesi ve yoğunluğundaki değişimler kestirimci bakım çalışmaları kapsamında kullanılabilir parametrelerdir.



Şekil 2.15. Vesela vd. yağın fiziko-kimyasal özelliklerinin yağlayıcılığa etkisini ölçtükleri düzenek

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Viskozite bir akışkanın akışa karşı gösterdiği dirençtir. Akışkanın molekülleri arasındaki sürtünme olarak da tanımlanabilir. Yani akışkanın molekülleri arasındaki sürtünme akış için hız kazanmasını engeller. Bu durum sıvılarda sıcaklık değişimiyle gözlemlenebilir, sıcaklık arttıkça bir sıvının viskozitesi hızlı bir şekilde düşer. Bu durum gazlarda tam tersidir, sıcaklık artışı basıncın yükselmesine sebep olduğu için moleküller arası sürtünme artarak viskoziteyi artırır. Bu kurala uyan akışkanlara Newton tipi akışkan denir.

Viskozite dinamik ve kinematik olarak ikiye ayrılır. Kinematik viskozite bir akışkanın dinamik viskozitesinin yoğunluğa bölünmüş halidir. Kinematik viskozite mm^2/s ve dinamik viskozite $\text{mPa}\cdot\text{s}$ olarak gösterilir.

Viskozite yağlama uygulamalarında yağ sürekli hareket halinde olduğu için çok önemlidir ve sadece viskozitenin değişimi bir yağın artık kullanılamaz hale geldiğini gösterebilir. Çünkü viskozitenin aşırı düşüşü yağın hızlı süzülmesine ve yağlayıcılığını kaybetmesine sebep olurken aşırı artışı da birikerek aşınmaya sebep olmasına yol açar.

Uluslararası dizel yakıtı standardı olan EN-590 (2022)'ye göre dizel yakıtın 15 °C'deki yoğunluğu en az 820 kg/m^3 ve en çok 845 kg/m^3 'tür. Aynı standarda göre kinematik viskozitesi 40 °C'de en az $2 \text{ mm}^2/\text{s}$ ve en çok $4,5 \text{ mm}^2/\text{s}$ 'dir. Yanmayı desteklemesi için organik yağlar (FAME) eklenebilir ancak hacimsel olarak %7'yi geçmemelidir.

Biyodizel yakıtı için kullanılan uluslararası standart EN-14214 (2019)'tür. Bu standarda göre yakıtın 15 °C'deki yoğunluğu 860 kg/m^3 ile 900 kg/m^3 arasında olmalıdır. Kinematik viskozite değeri ise 40 °C'de $3,5 \text{ mm}^2/\text{s}$ ile $5 \text{ mm}^2/\text{s}$ arasında olmalıdır. Dizel motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılırlar. FAME içeriği kütleli olarak %96,5'in üzerinde olmalıdır.

Sigma-Aldrich'in web sayfasında satışa sunduğu 1-Dodecene'in 20 °C'deki 760 kg/m^3 'tür. 100 °C'deki kinematik viskozitesi $0,68 \text{ mm}^2/\text{s}$ 'dir. Jet yakıtı elde etmesi ve

güvenli çalışması zor olan bir madde olduğu için özellikle sivil araştırmalarda 1-Dodecene gibi hidrokarbonlar kullanılır.

Bu çalışmada ağır dizel motorlarda kullanılan 10W-40 (Şekil 3.2) motor yağını ağırlıkça %1, 2, 5, 7, 10 oranında dizel yakıtı, biyodizel yakıtı ve 1-Dodecene kullanarak ve 100 °C karıştırılarak seyrelterek viskozitelerindeki sıcaklığa bağlı değişimleri kayıt altına alınmıştır. Karışımlar 100 ml'lik şişelere doldurularak 100 °C sıcaklıkta 10 dakika boyunca karıştırılmıştır. Ardından karışımların viskoziteleri 40 °C, 60 °C, 80 °C ve 90 °C'de ölçülerek kaydedilmiştir. Ölçümlerin yapılmasında viskozite ölçümü için Anton Paar Automated Micro Viscometer (Şekil 3.1) kullanılmıştır.



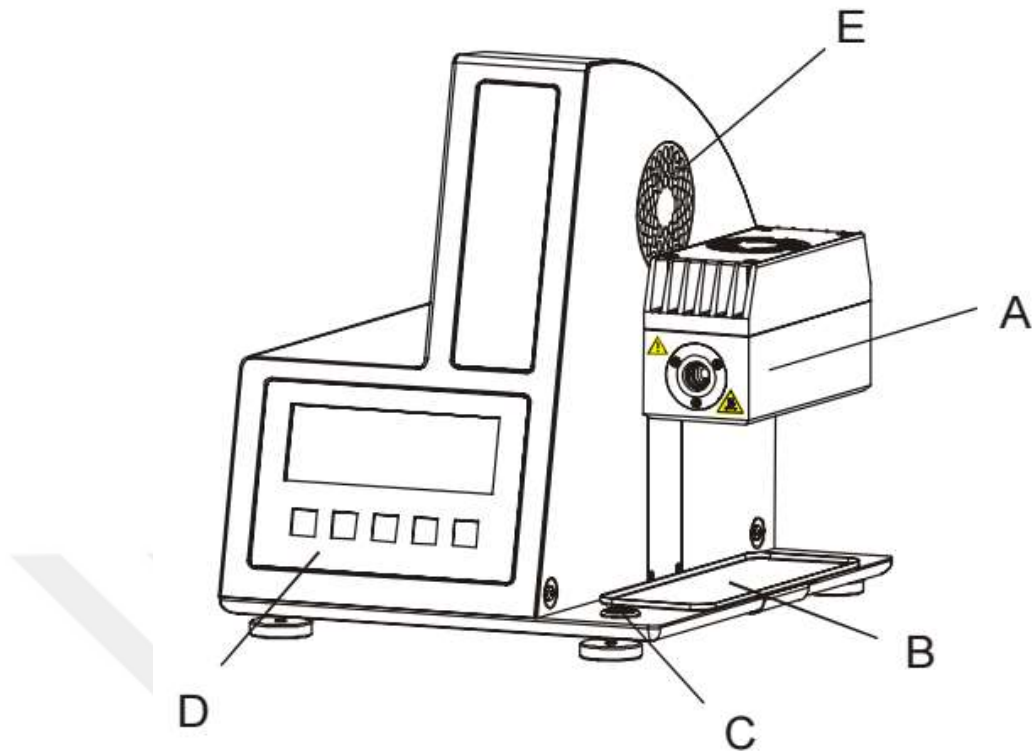
Şekil 3.1. Anton Paar Automated Micro Viscometer AMVn



Şekil 3.2. Castrol 10W-40 yarı sentetik motor yağı

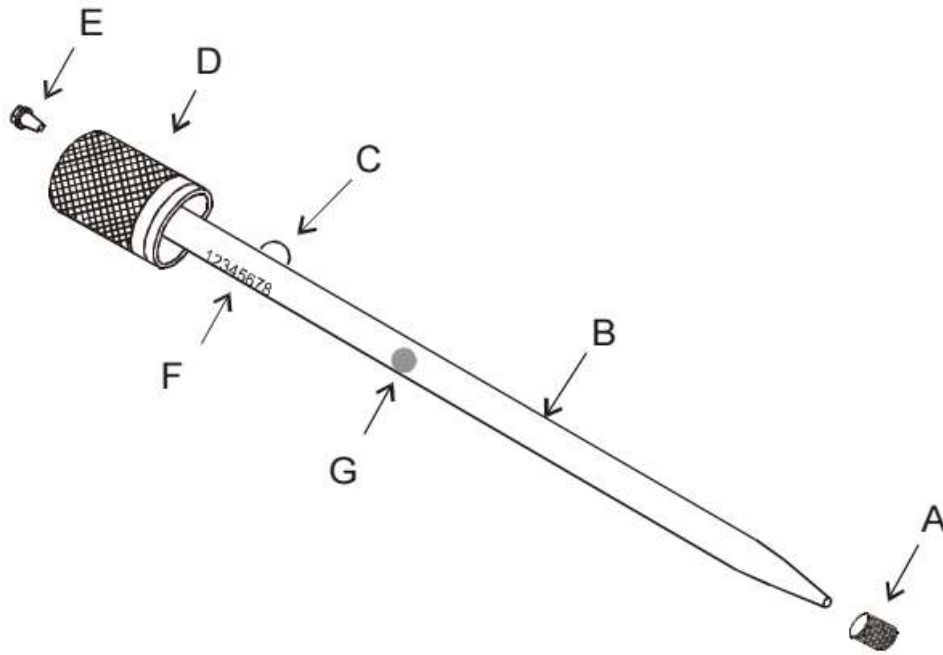
Çizelge 3.1. Kullanılan Castrol 10W-40 Motor Yağının Tipik Özellikleri (Castrol Ürün Bilgisi)

İsim	Method	Sembol	Castrol MAGNATEC 10W-40 A3/B4
Yoğunluk @ 10 °C, Bağıl	ASTM D4052	g/ml	0,868
Viskozite, Kinematik 100 °C	ASTM D445	mm ² /s	14,5
Viskozite, CCS -25 °C (10W)	ASTM D5293	mPa.s (cP)	6300
Viskozite, Kinematik 40 °C	ASTM D445	mm ² /s	100
Viskozite Katsayısı	ASTM D2270	N/A	150
Akma Noktası	ASTM D97	°C	-42
Parlama Noktası, PMCC	ASTM D93	°C	204
Kül, Sülfat	ASTM D874	% ağırlık	1,2



Şekil 3.3. AMVn görüntüsü (Cihaz kullanım klavuzu)

Şekil 3.3'te verilen çizimde ölçüm cihazı görülmektedir. A harfi ile gösterilen kısım kapiler bloğudur. Kapiler doldurulduktan sonra buraya yerleştirilir. Isıtıcı bloğun içindedir ve soğutma fanıda üstünde yer alır. B harfi ile gösterilen kısım damlama plakasıdır. Test sonrasında blok açıldığında kapilerin kendi kendine açılma ihtimali vardır, damlama plakası bu durumda numunenin etrafa dağılmasını engeller. C ile belirtilen kısım terazidir, kapilerin yerçekimi vektörü ile yaptığı açı kapiler katsayısını değiştirdiğinden test cihazının terazide olması doğru sonuçlar elde etmek için önemlidir. D ile belirtilen kısım tuşlu ekrandır. Eğer sonuçlar bir bilgisayar yardımıyla yazdırılmayacak ise ekrandan okunarak tek tek kaydedilmesi gerekir. Eğer bilgisayar yok ise kalibrasyon işlemi de buradan yapılır. E harfi ile gösterilen kısım kabin soğutma fanıdır. Ölçüm cihazının içinde bulunan işletim sistemini soğutma görevini yerine getirir.



Şekil 3.4. Kapiler görüntüsü (Cihaz kullanım klavuzu)

Şekil 3.4'te verilen çizim numuna kapileri içindir. A harfi ile belirtilen kısım kapatma şapkasıdır, camdır. B harfi ile belirtilen kısım kapiler gövdesidir. C harfi ile gösterilen kısım kapiler gövdesindeki işaret noktasıdır, test cihazındaki kapiler bloğundaki boşluğa gelmesi gerekir, doğru yerleşim olmazsa kapiler bloğu kapanmaz ve ölçüm yapılamaz. D harfi ile gösterilen dolum adaptörüdür, kapilerin içindeki 3 mm'lik boşluğa dolum yapılması zor olduğundan şırınganın iğnesiz yerleşebilmesi için kullanılır. E harfi ile gösterilen kısım tıpadır, şırınga ile dolum yapıldıktan sonra delik kapatılır. F 8 haneli seri koddur, her bir kapilerin farklı bir kalibrasyon diskini ve bunları eşleştirmek için farklı bir seri numarası vardır. G harfi ile gösterilen kısım düşüşü izlenen toptur.

AMVn ölçüm cihazında kullanılan ölçüm prensibi yuvarlanan/düşen top prensibidir. Bu yöntem DIN 53015 ve ISO 12058 numaralı standartlara uygundur. Ölçümün içeriği diyagonal olarak yerleştirilmiş cam kapilerin içindeki topun numune içerisinde düşme süresinin ölçülmesidir. Farklı kapilerlerin farklı çaplarda topları ve farklı katsayıları vardır. Kapiler çapı değiştirilerek düşme süresi değiştirilebilir. Düşme süresi aynı zamanda kapilerin yerleştirilme açısına da bağlıdır. En doğru ölçüm için düşme süresinin 10 saniyenin altına düşmemesi gerekir. Ölçüm düzeneği farklı sıcaklıklarda ölçüm yapma olanağı sağlamaktadır. Bunun için bir ısıtıcı, fan ve Pt100 sıcaklık sensörü kullanılır.

Bu araştırma kapsamında 3 numaralı kapiler ve 2,5 mm çapındaki toplar kullanılmıştır. Her numune 40, 60, 80, 90 °C’de ölçülmüş ve her numune değişiminde kapiler öncelikle numuneyi uzaklaştırmak için trisolvent (Toluen + Aseton + IPA) ve sonra trisolventi uzaklaştırmak için etanol ile yıkanmıştır. Yıkama işleminin ardından kapiler sıcak hava ile kurutulmuştur. Temiz kapilerin içine yeni numune yeni bir şırınga kullanılarak aktarılmıştır. Cihaza yerleştirilen kapiler sıcaklık kalibrasyonu için 4 kere çevirilip top düşürülür. Kalibrasyonun ardından 4 kere daha düşürülerek ölçüm yapılır. Bulgular kısmında verilen değerler bu 4 ölçümün ortalamasıdır.

Çizelge 3.2. Numune Matrisi

	%0	%1	%2	%5	%7	%10	%100
Dizel Yakıtı	D	B1	B2	B3	B4	B5	B6
Biyodizel Yakıtı		A1	A2	A3	A4	A5	A6
1-Dodecene		C1	C2	C3	C4	C5	C6

Çizelge 3.2’de gösterilen toplam 19 adet numune hassas tartı kullanılarak hazırlanmış ve sıcak halde karıştırılarak şişelenmiştir. Şişeden kapilere herbiri farklı şırınga kullanılarak doldurulmuş ve ölçümler özenle yapılmış ve baloncuk oluşumu sonrasında ölçüm tekrarlanmıştır.

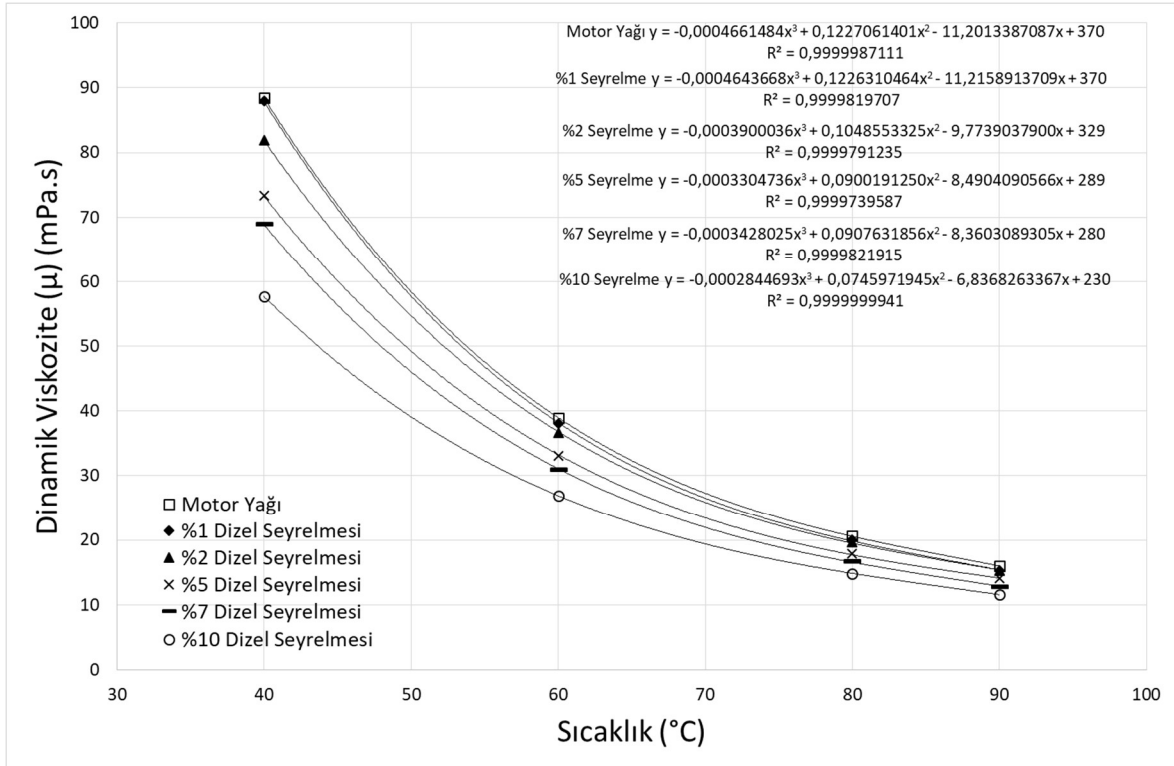
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılan viskozite ölçümlerinde etkili sonuçlar bulunmuştur. Sonuçlar dört grup halinde sunulacaktır. Birinci grupta motor yağına standart dizel yakıtının karışması durumu incelenmiştir. İkinci grupta biyodizel yakıtının karışma durumu, üçüncü grupta jet yakıtı karışması durumu incelenmiştir. Son olarak ayrı ayrı dizel, biyodizel ve jet yakıtları birbirleriyle kıyaslanarak incelenmiştir. Jet yakıtı yerine 1-Dodecane saf hidrokarbon kullanılmıştır.

Çizelge 4.1. Dizel Yakıtı Seyrelmesi ile Yapılan Viskozite Ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Dinamik Viskozite (mPa.s)					
	Motor Yağı	%1 Dizel Seyrelmesi	%2 Dizel Seyrelmesi	%5 Dizel Seyrelmesi	%7 Dizel Seyrelmesi	%10 Dizel Seyrelmesi
40	88,46	87,92	81,92	73,33	68,92	57,68
60	38,93	38,07	36,66	33,12	30,97	26,89
80	20,59	19,98	19,64	17,85	16,67	14,83
90	15,96	15,28	15,29	14,03	12,79	11,54

Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1'den anlaşılacağı üzere, Motor yağının dinamik viskozitesi 40 °C 88,5 mPa.s iken 90 °C 16,0 mPa.s' ye, yaklaşık %82 hızlı bir düşüş göstermiştir. Bu davranış yakıtlarda ve hidrokarbonlarda gözlemlenen genel bir davranıştır. Diğer karışımlarda sıcaklıkla benzer davranış gösterirken yakıt seyrelmesi arttıkça seyrelme oranıyla orantılı olarak dinamik viskozitenin her bir sıcaklıkta düştüğü de gözlemlenmiştir. Seyrelme oranı %10'a ulaştığında 40 °C'deki dinamik viskozite 88,5 mPa.s'den 57,7 mPa.s'ye ye %35 düştüğü ve 90 °C'de ise 15,96 mPa.s'den 11.54 mPa.s'ye ye yaklaşık %27 düştüğü ortaya konmuştur. Düşük sıcaklıklarda yakıt seyrelmesinin etkisi daha net olarak gözlemlenmektedir.



Şekil 4.1. Dizel yakıtı seyrelmesi için dinamik viskozite – sıcaklık grafiği

Bu grafik kullanılarak elde edilen regresyon denklemleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Grafik üçüncü derece polinom olarak çizilmiş ve regresyon için 4.1 denklemi kullanılmıştır.

$$y = Ax^3 + Bx^2 + Cx + D \quad (4.1)$$

Çizelge 4.2. Dizel Yakıtı Seyrelmesi için Yapılan Regresyon Sonuçları

Regresyon Sonuçları						
Sabit	Motor Yağı	%1 Dizel Seyrelmesi	%2 Dizel Seyrelmesi	%5 Dizel Seyrelmesi	%7 Dizel Seyrelmesi	%10 Dizel Seyrelmesi
A	-0,0004661	-0,0004644	-0,0003900	-0,0003305	-0,0003428	-0,0002845
B	0,1227061	0,1226310	0,1048553	0,0900191	0,0907632	0,0745972
C	-11,201338	-11,2158914	-9,7739038	-8,4904091	-8,3603089	-6,8368263
D	370	370	329	289	280	230
R ²	0,9999987	0,9999820	0,9999791	0,9999740	0,9999822	0,9999999

Bu denklemler kullanılarak her bir deneyin sonucu tekrar hesaplanmıştır. Hesaplanan dinamik viskozite değerleri Çizelge 4.3’te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Dizel Yakıtı Seyrelmesi için Hesaplanan Dinamik Viskozite Değerleri

Sıcaklık (°C)	Hesaplanan Dinamik Viskozite (mPa.s)					
	Motor Yağı	%1 Dizel Seyrelmesi	%2 Dizel Seyrelmesi	%5 Dizel Seyrelmesi	%7 Dizel Seyrelmesi	%10 Dizel Seyrelmesi
40	88,4428	87,8545	80,8522	72,2639	68,8694	57,6764
60	38,9737	38,2151	35,8042	32,2620	31,0836	26,8950
80	20,5442	19,8116	18,4800	16,6872	16,5448	14,8277
90	15,9771	15,3579	14,3642	13,1028	12,8510	11,5448

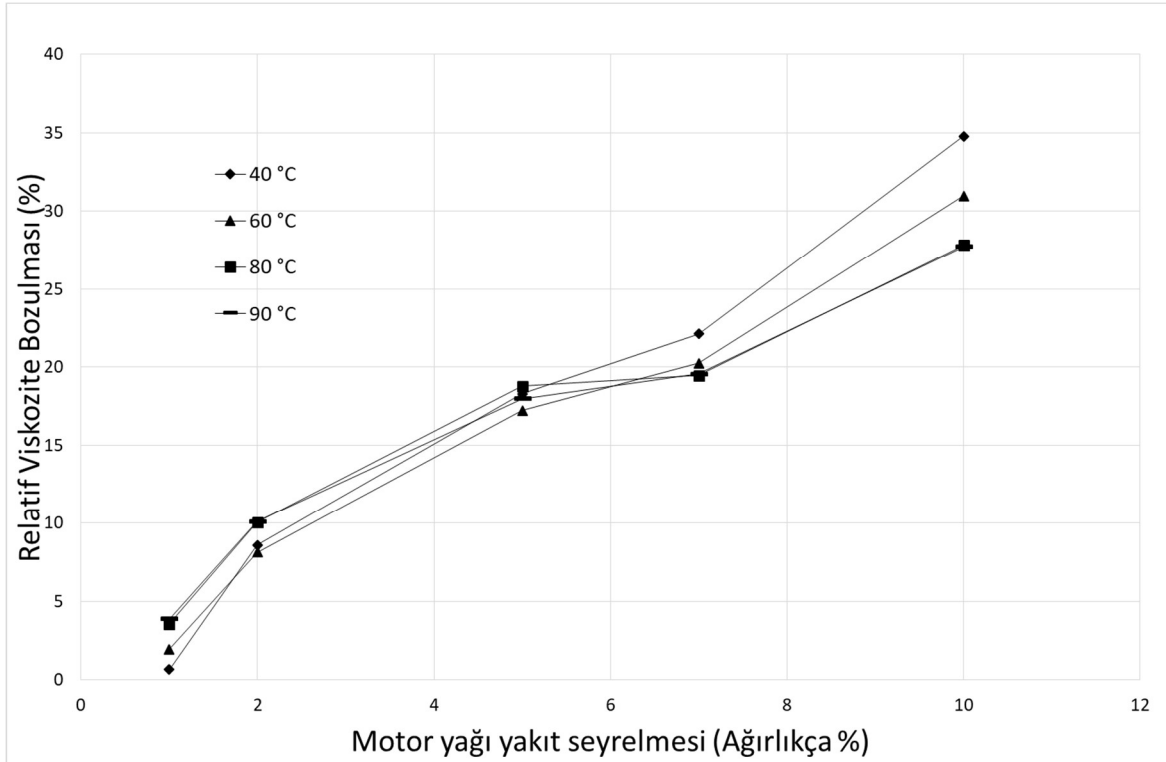
Hesaplanan viskozite değerleri kullanılarak seyrelme ve sıcaklık artışına göre gerçekleşen viskozite düşüşü relatif bozulma olarak değerlendirilmiş ve Çizelge 4.4'te verilmiştir. Relatif bozulmanın hesaplanması için 4.2 denklemini kullanılmıştır. Burada A seyreltilmiş viskoziteyi B motor yağının viskozitesini temsil eder.

$$y=[1-(A/B)]*100 \quad (4.2)$$

Çizelge 4.4. Dizel Yakıtı Seyrelmesi için Relatif Bozulma

Sıcaklık (°C)	Dinamik Viskozite için Relatif Bozulma (%)					
	Motor Yağı (μ)	%1 Dizel Seyrelmesi	%2 Dizel Seyrelmesi	%5 Dizel Seyrelmesi	%7 Dizel Seyrelmesi	%10 Dizel Seyrelmesi
40	88,4428	0,6651	8,5825	18,2930	22,1311	34,7867
60	38,9737	1,9466	8,1325	17,2211	20,2448	30,9921
80	20,5442	3,5661	10,0478	18,7743	19,4674	27,8257
90	15,9771	3,8756	10,0947	17,9897	19,5661	27,7415

Hesaplanan relatif bozulma Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Dizel yakıtı seyrelmesi için relatif viskozite bozulması grafiği

Sonuçları değerlendirmek için motor yağ standardı TS 12330'u dikkate alabiliriz. İlgili yağ standardına baktığımızda araştırmada kullandığımız 10W-40 numaralı yağ için verilen minimum ve maksimum kinematik viskozite değerleri 100 °C'de 12,5 ve 16,3 mm²/s'dir. Ortalama olarak kabul edilebilir değer 14,4 mm²/s'dir ve bizim kullandığımız yeni motor yağının kinematik viskozite değeri de bu değere yakındır. Ortalama değer ile en düşük değer karşılaştırıldığında viskozitede yaklaşık %13'lük bir düşüşün motor yağını kullanılamaz hale getirebileceği yorumlanabilir. Şekil 4.2'ye baktığımızda dizel yakıtı seyrelmesi için bu durum ağırlıkça %4 dizel yakıtı seyrelme yakınlarında gerçekleşir.

Relatif bozulma grafiklerine bakarak motor yağı içerisinde dizel yakıtı arttıkça bozulmanın da arttığı gözlemlenmektedir. Yakıt miktarının %1-2 oranında dahi artması viskoziteyi %10 gibi çok ciddi oranda düşürmektedir ve bu her sıcaklık seviyesinde yaklaşık aynı seviyede gözlemlenmektedir. Yakıt miktarı %10 a ulaştığında bozulma oranı %30-35 civarına çıkmıştır. Farklı sıcaklıklarda %10 seyrelme oranında kısmen farklı sonuçlar gözlemlenmesine rağmen, genel olarak grafiklerden sıcaklığa bağlı olarak farklı bir davranış gözlemlenmemiştir. Bu durumu teyit etmek için 4.1 numaralı denklemde 4.3 ve 4.4 numaralı yerleştirmeleri yaptığımızda logaritmik skalada Çizelge 4.5'teki sonuçları elde ederiz.

$$y=\ln(\mu) \quad (4.3)$$

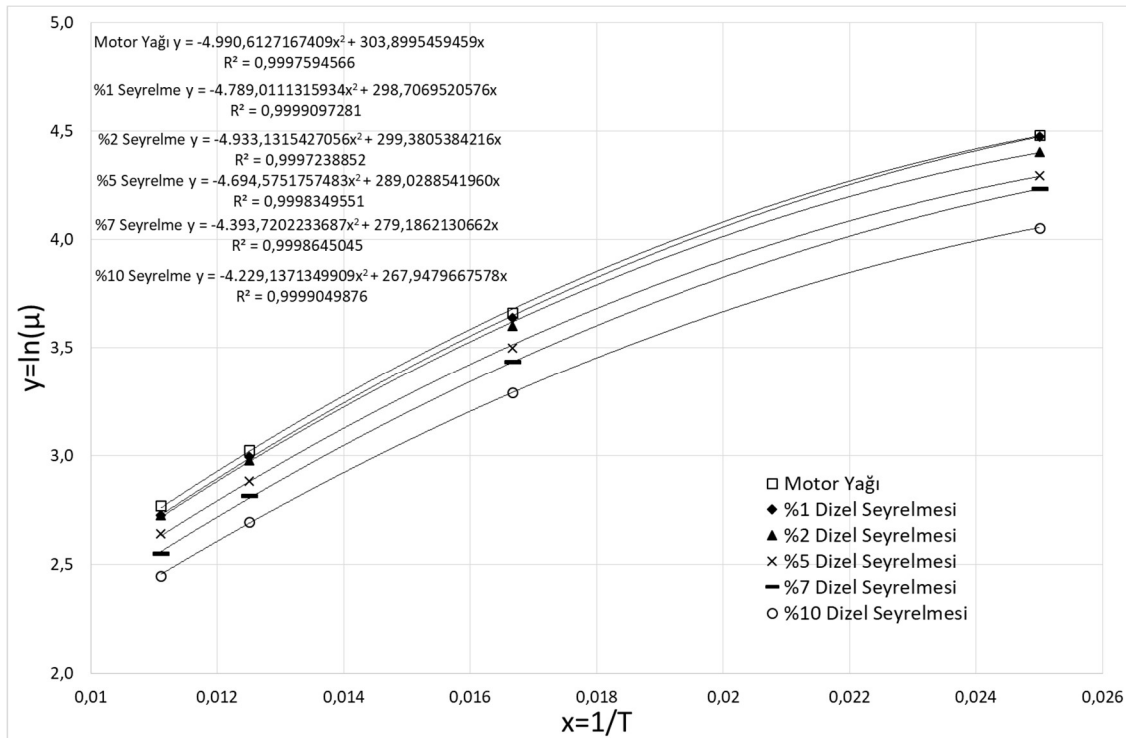
$$x=1/T \quad (4.4)$$

Çizelge 4.5. Dizel Yakıtı Logaritmik Sonuç Çizelgesi

Sıcaklık ⁻¹ (°C ⁻¹)	ln(Dinamik Viskozite (mPa.s))					
	Motor Yağı	%1 Dizel Seyrelmesi	%2 Dizel Seyrelmesi	%5 Dizel Seyrelmesi	%7 Dizel Seyrelmesi	%10 Dizel Seyrelmesi
0,025	4,48	4,48	4,41	4,29	4,23	4,06
0,016667	3,66	3,64	3,60	3,50	3,43	3,29
0,0125	3,03	2,99	2,98	2,88	2,81	2,70
0,011111	2,77	2,73	2,73	2,64	2,55	2,45

Logaritmik sonuçların polinom eğrileri çizilerek denklemleri 4.5 numaralı denkleme göre hazırlanmıştır. Regresyon sonuçları 4.6 numaralı çizelgededir.

$$y=Ax^2+Bx+C \quad (4.5)$$

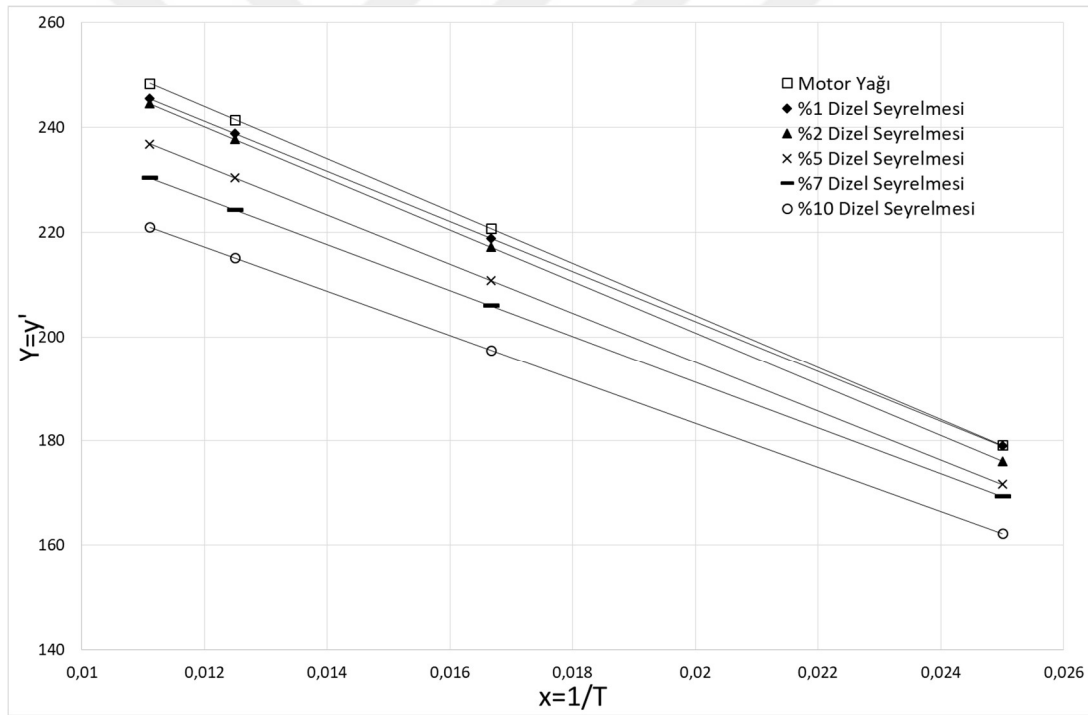


Şekil 4.3. Dizel yakıtı seyrelmesi için logaritmik sonuç grafiği

Çizelge 4.6. Dizel Yakıtı Seyrelmesi İçin Logaritmik Regresyon Sonuçları

Logaritmik Regresyon Sonuçları						
Sabit	Motor Yağı	%1 Dizel Seyrelmesi	%2 Dizel Seyrelmesi	%5 Dizel Seyrelmesi	%7 Dizel Seyrelmesi	%10 Dizel Seyrelmesi
A	-4990,6127	-4789,0111	-4933,1315	-4694,5752	-4393,7202	-4229,1371
B	303,8995	298,7070	299,3805	289,0289	279,1862	267,9480
C	0	0	0	0	0	0
R ²	0,9998	0,9999	0,9997	0,9998	0,9999	0,9999

Bu denklemlerin ölçüm yapılan sıcaklık değerlerindeki birinci türevlerini alarak 4.4 numaralı şekildeki doğrusal çizgiler elde edilir. Görüleceği üzere eğim değerleri aynıdır, dolayısıyla sıcaklığa bağlı yakıt seyrelme miktarlarında değişiklik yoktur. Yani yakıt seyrelmesi tüm sıcaklık aralığında ölçülebilir.

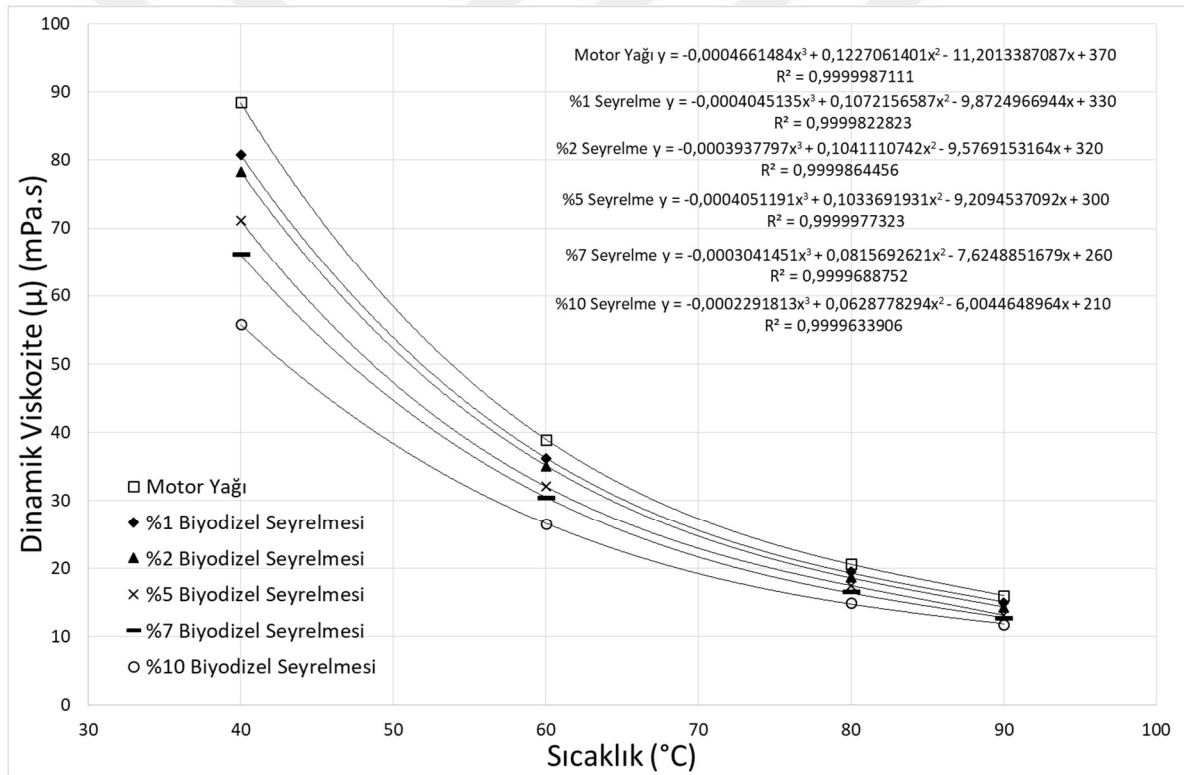
**Şekil 4.4.** Dizel yakıtı seyrelmesi için birinci türev grafiği

Biyodizel yakıtı ve 1-Dodecene seyrelmeleri için yapılan ölçümler ve hesaplar aşağıdadır.

İkinci ve üçüncü grup çalışma numuneleri dikkate alınarak motor yağının biyodizel ve jet (1-Dodecene) yakıtlarıyla seyrelmesi sonuçları aşağıda incelenmiştir, ölçümler ve ölçüm sonuçlarının regresyon ve logaritmik hesap sonuçları aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.7. Biyodizel Yakıtı Seyrelmesi ile Yapılan Dinamik Viskozite Ölçümleri

Dinamik Viskozite (mPa.s)						
Sıcaklık (°C)	Motor Yağı	%1 Biyodizel Seyrelmesi	%2 Biyodizel Seyrelmesi	%5 Biyodizel Seyrelmesi	%7 Biyodizel Seyrelmesi	%10 Biyodizel Seyrelmesi
40	88,46	80,82	78,35	71,10	66,11	55,82
60	38,93	36,12	35,02	32,02	30,32	26,46
80	20,59	19,42	18,67	17,43	16,49	14,86
90	15,96	14,96	14,25	13,09	12,67	11,77



Şekil 4.5. Biyodizel yakıtı seyrelmesi için dinamik viskozite – sıcaklık grafiği

Çizelge 4.8. Biyodizel Yakıtı Seyrelmesi için Yapılan Regresyon Sonuçları

Regresyon Sonuçları						
Sabit	Motor Yağı	%1 Biyodizel Seyrelmesi	%2 Biyodizel Seyrelmesi	%5 Biyodizel Seyrelmesi	%7 Biyodizel Seyrelmesi	%10 Biyodizel Seyrelmesi
A	-0,0004661	-0,0004045	-0,0003938	-0,0004051	-0,0003041	-0,0002292
B	0,1227061	0,1072157	0,1041111	0,1033692	0,0815693	0,0628778
C	-11,2013387	-9,8724967	-9,5769153	-9,2094537	-7,6248852	-6,0044649
D	370	330	320	300	260	210
R ²	0,9999987	0,9999823	0,9999864	0,9999689	0,9999689	0,9999634

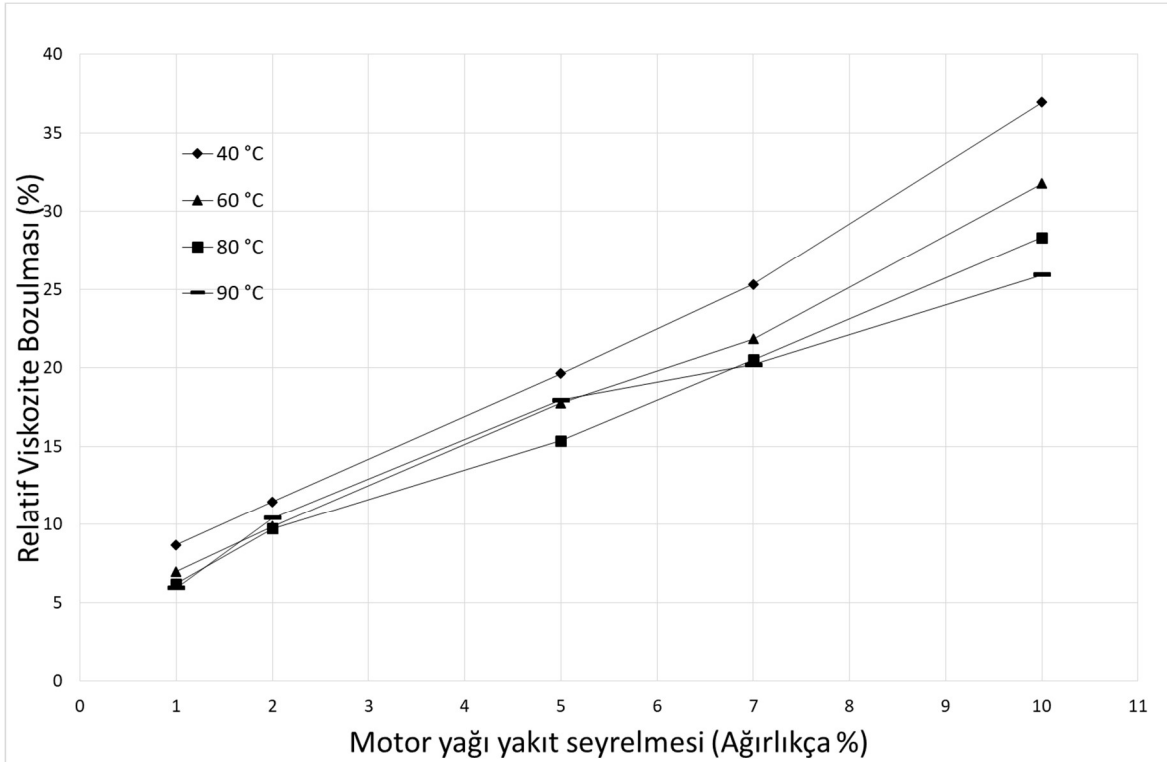
Çizelge 4.9. Biyodizel Yakıtı Seyrelmesi için Hesaplanan Dinamik Viskozite Değerleri

Hesaplanan Dinamik Viskozite (mPa.s)						
Sıcaklık (°C)	Motor Yağı	%1 Biyodizel Seyrelmesi	%2 Biyodizel Seyrelmesi	%5 Biyodizel Seyrelmesi	%7 Biyodizel Seyrelmesi	%10 Biyodizel Seyrelmesi
40	88,4428	80,7563	78,2992	71,0849	66,0501	55,7583
60	38,9737	36,2517	35,1285	32,0561	30,4609	26,5891
80	20,5442	19,2696	18,5424	17,3856	16,3302	14,7201
90	15,9771	15,0318	14,3119	13,1078	12,7496	11,8354

Şekil 4.5 incelendiğinde biyodizel yakıtıyla motor yağının seyrelmesi sonucunda dinamik viskozite davranışı yaklaşık olarak dizel yakıtı seyrelmesiyle gerçekleşen davranışa eşdeğerdir. Biyodizel yakıtının viskozitesi dizel yakıtın viskozitesinden daha yüksek olmasına rağmen etkisi dizel yakıtının etkisine eşdeğerdir. Sıcaklığa bağlı davranışta aynen dizel yakıtın davranışına benzerdir. Motor yağının içerisine %10 oranında biyodizel karışması sonucu dinamik viskozite 40 °C’de 88.5 mPa.s’den 55.8 mPa.s’ye %37 oranında ve 90 °C’de ise 15,96 mPa.s’den 11.77 mPa.s’ye ye %26 oranında düşürmüştür. Şekil 4.6’da saf motor yağına oranla biyodizel yakıtı karıştırılarak seyreltilmiş motor yağlarının oransal olarak sapmaları verilmiştir.

Çizelge 4.10. Biyodizel Yakıtı Seyrelmesi için Relatif Bozulma

Dinamik Viskozite için Relatif Bozulma						
Sıcaklık (°C)	Motor Yağı (μ)	%1 Biyodizel Seyrelmesi	%2 Biyodizel Seyrelmesi	%5 Biyodizel Seyrelmesi	%7 Biyodizel Seyrelmesi	%10 Biyodizel Seyrelmesi
40	88,4428	0,9131	0,8853	0,8037	0,7468	0,6304
60	38,9737	0,9302	0,9013	0,8225	0,7816	0,6822
80	20,5442	0,9380	0,9026	0,8463	0,7949	0,7165
90	15,9771	0,9408	0,8958	0,8204	0,7980	0,7408

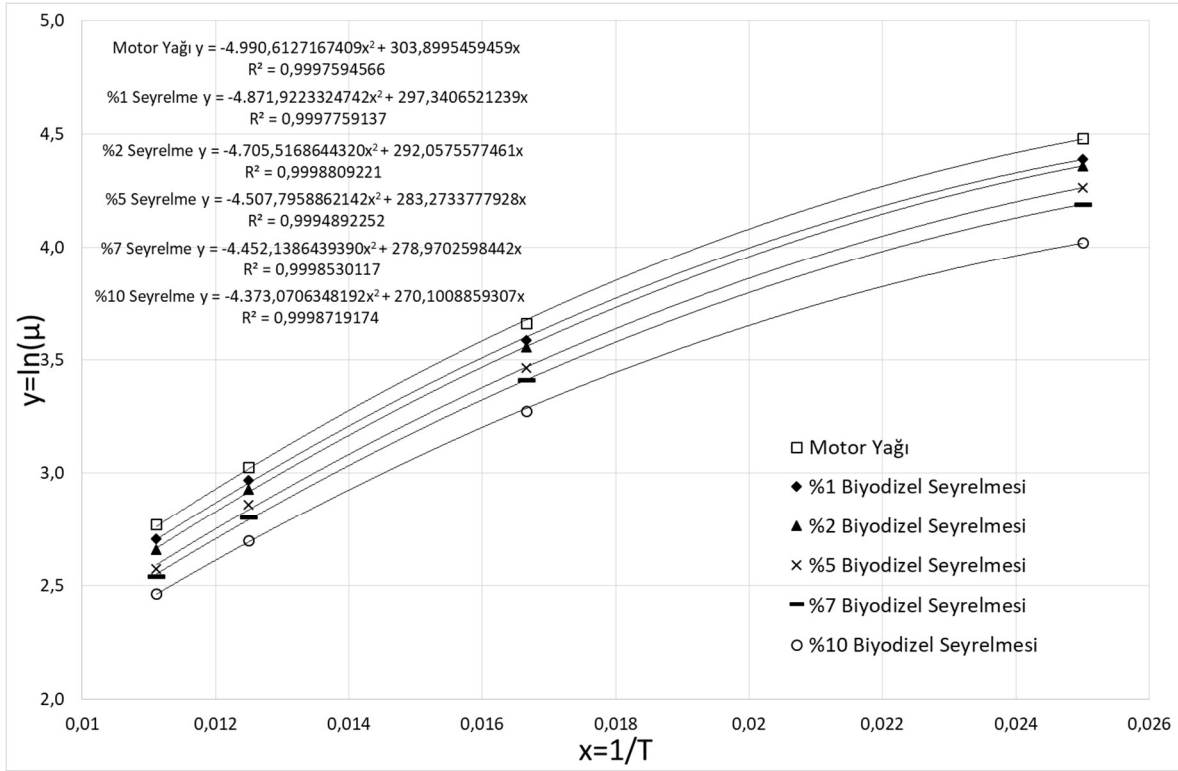


Şekil 4.6. Biyodizel yakıtı seyrelmesi için relatif viskozite bozulması grafiği

Şekil 4.6 incelendiğinde ve yaklaşık %13 -15 oranında bir viskozite değişiminin motor yağının bozulması sınırı olarak kabul ettiğimizde, yaklaşık olarak %3-4 arasında biyodizel yakıtının karışması motor yağı performansını etkileyecektir. Seyrelmenin %5 oranına yükselmesi motor yağının kabul edilebilir standartların dışına çıkaracaktır.

Çizelge 4.11. Biyodizel Yakıtı Seyrelmesi İçin Logaritmik Sonuç Çizelgesi

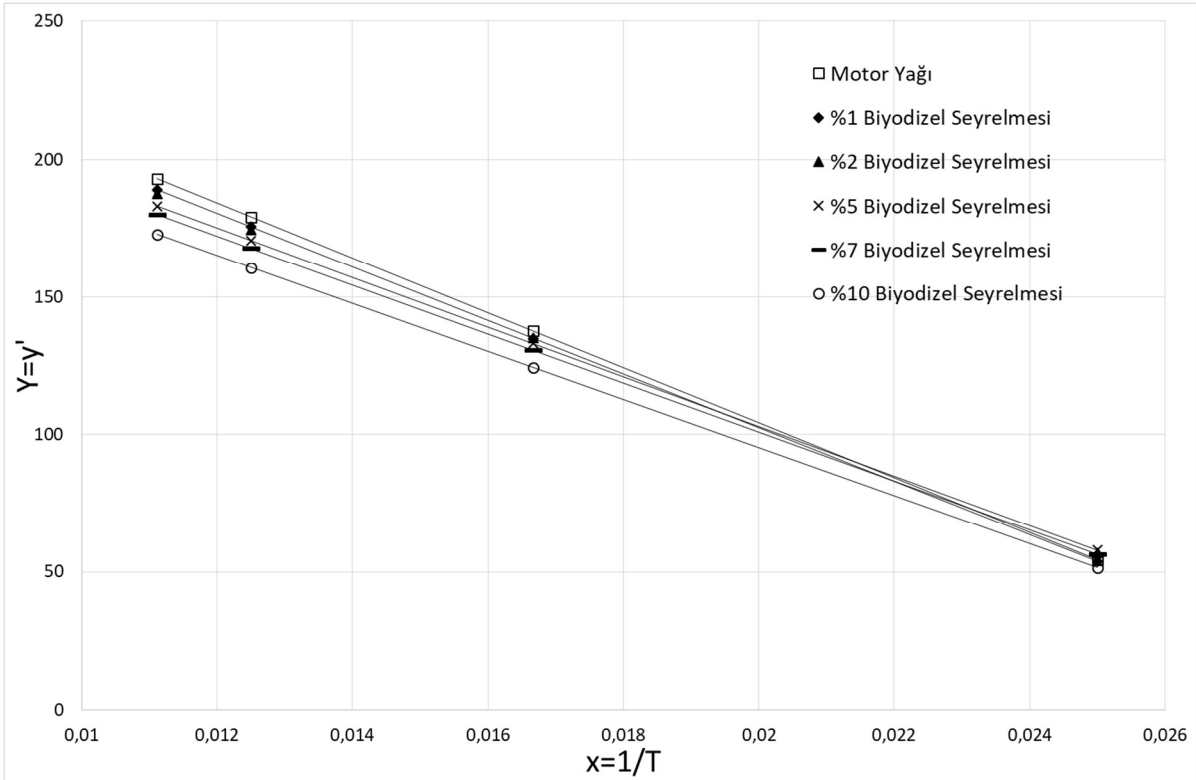
Sıcaklık ⁻¹ (°C ⁻¹)	ln(Dinamik Viskozite (mPa.s))					
	Motor Yağı	%1 Biyodizel Seyrelmesi	%2 Biyodizel Seyrelmesi	%5 Biyodizel Seyrelmesi	%7 Biyodizel Seyrelmesi	%10 Biyodizel Seyrelmesi
0,025	4,4826	4,3922	4,3612	4,2641	4,1914	4,0221
0,0166667	3,6619	3,5868	3,5558	3,4662	3,4118	3,2757
0,0125	3,0247	2,9662	2,9269	2,8583	2,8027	2,6989
0,0111111	2,7698	2,7055	2,6569	2,5715	2,5395	2,4654



Şekil 4.7. Biyodizel yakıtı seyrelmesi için logaritmik sonuç grafiği

Çizelge 4.12. Biyodizel Yakıtı Seyrelmesi İçin Logaritmik Regresyon Sonuçları

Logaritmik Regresyon Sonuçları ($y=Ax^2+Bx+C$)						
Sabit	Motor Yağı	%1 Biyodizel Seyrelmesi	%2 Biyodizel Seyrelmesi	%5 Biyodizel Seyrelmesi	%7 Biyodizel Seyrelmesi	%10 Biyodizel Seyrelmesi
A	-4990,6127	-4871,9223	-4705,5169	-4507,7959	-4452,1386	-4373,0706
B	303,8995	297,3407	292,0576	283,2734	278,9703	270,1009
C	0	0	0	0	0	0
R ²	0,9998	0,9998	0,9999	0,9995	0,9999	0,9999



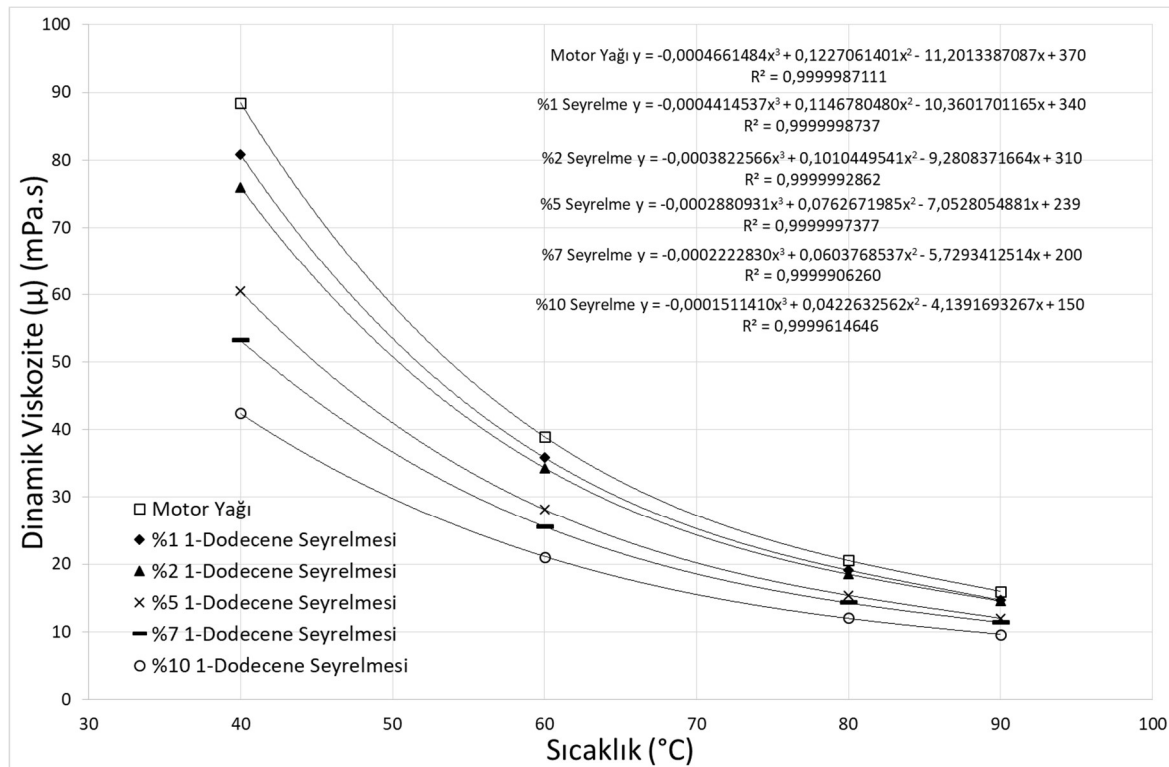
Şekil 4.8. Biyodizel yakıtı seyrelmesi için birinci türev grafiği

Şekil 4.7 incelendiğinde verilerin çok iyi bir şekilde korale edildiği görülmektedir. Bu yaklaşımla viskozite değişim miktarı sıcaklığa ve seyrelme miktarına bağlı olarak hesaplanabilir. Şekil 4.8 incelendiğinde sıcaklık arttıkça değerler sapma gösterse de sıcaklıkla her bir seyrelme miktarı ortak davranış göstermektedir. Grafiklerin eğimlerinin aynı olduğu görülmektedir. Yani sıcaklığın değişimiyle gözlemlenen davranış değişikliği farklı seyrelme miktarlarında aynıdır, yani her sıcaklık seviyesinde yakıt seyrelmesi eşdeğer olarak gözlemlenebilir.

Bir başka alternatif yakıt olarak jet yakıtı esas alınmıştır. Jet yakıtının yerine motor yağını seyreltmek için 1-Dodecane kullanılmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.13 ten 4.18'e kadar ve Şekil 4.9'dan 4.12'ye kadar sunulmuştur. Jet yakıtı olarak 1-Dodecane in viskozite değerinin dizel ve biyodizel yakıtlarına göre düşük olduğu açıktır ve sıcaklığa bağlı farklı bir davranışta göstermiş beklenilir.

Çizelge 4.13. 1-Dodecene Seyrelmesi için Yapılan Dinamik Viskozite Ölçümleri

Sıcaklık (°C)	Dinamik Viskozite (mPa.s)					
	Motor Yağı	%1 1-Dodecene Seyrelmesi	%2 1-Dodecene Seyrelmesi	%5 1-Dodecene Seyrelmesi	%7 1-Dodecene Seyrelmesi	%10 1-Dodecene Seyrelmesi
40	88,46	80,83	75,99	60,48	53,23	42,43
60	38,93	35,87	34,32	28,15	25,52	21,05
80	20,59	19,11	18,53	15,40	14,32	12,08
90	15,96	14,65	14,51	11,99	11,34	9,57

**Şekil 4.9.** 1-Dodecene seyrelmesi için dinamik vikoizite – sıcaklık grafiği

Şekil 4.9 incelendiğinde jet yakıtıyla motor yağının seyrelmesi sonucunda dinamik viskozite davranışı dizel ve biyodizel seyrelmesiyle gerçekleşen davranıştan farklı daha şiddetlidir.

Jet yakıtı olarak kullanılan 1-Dodecene'in viskozitesi dizel yakıtın viskozitesinden çok daha düşük olması bu sonucu çıkarmıştır. Sıcaklığa bağlı davranışta farklılık gösterebilir. Motor yağının içerisine %10 oranında 1-Dodecene karışması sonucu dinamik viskozite 40 °C'de 88,5 mPa.s'den 42,4 mPa.s'ye %52 oranında ve 90 °C'de ise 15,96 mPa.s'den 9,57

mPa.s'ye ye %40 oranında düşürmüştür. Şekil 4.10'da saf motor yağına oranla 1-Dodecane karıştırılarak seyreltilmiş motor yağlarının oransal sapmaları incelenmiştir.

Çizelge 4.14. 1-Dodecane Seyrelmesi için Yapılan Regresyon Sonuçları

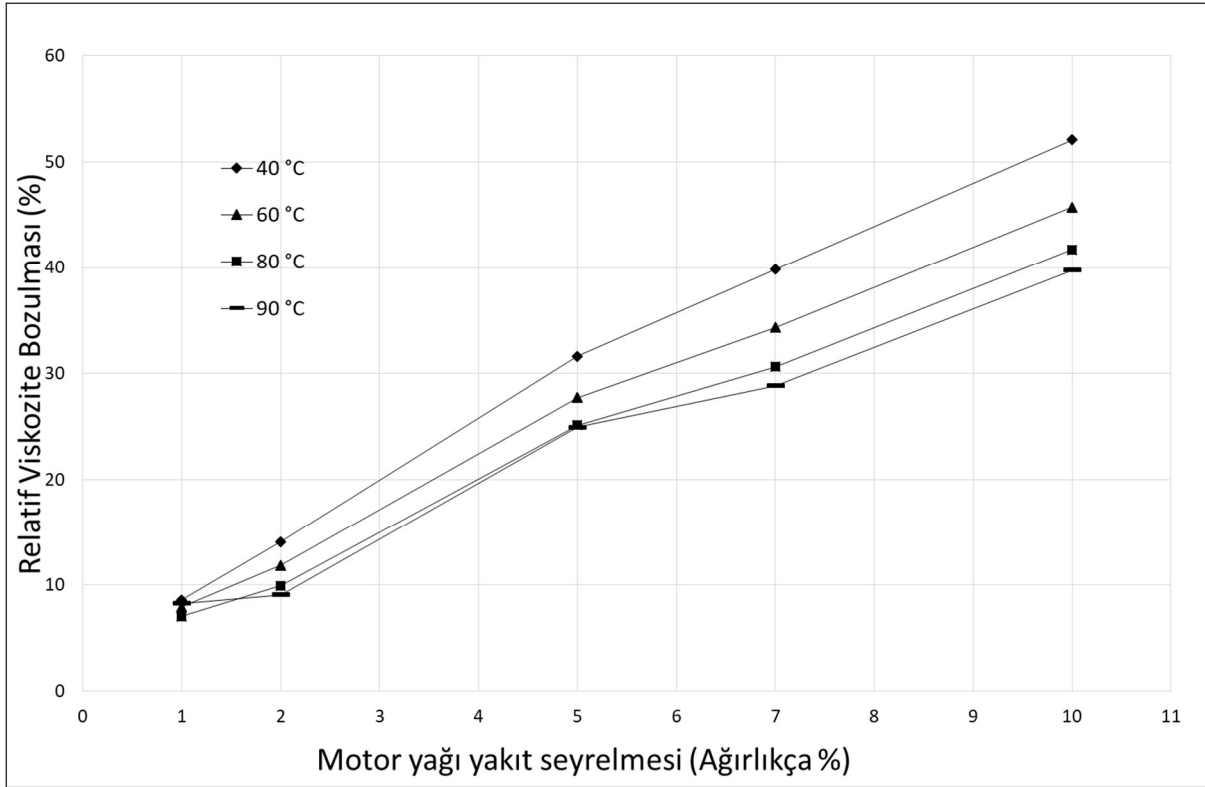
Regresyon Sonuçları						
Sabit	Motor Yağı	%1 1-Dodecane Seyrelmesi	%2 1-Dodecane Seyrelmesi	%5 1-Dodecane Seyrelmesi	%7 1-Dodecane Seyrelmesi	%10 1-Dodecane Seyrelmesi
A	-0,0004661	-0,0004415	-0,000382	-0,000288	-0,000222	-0,000151
B	0,1227061	0,1146780	0,1010450	0,0762672	0,0603769	0,0422633
C	-11,201338	-10,360170	-9,280837	-7,052805	-5,729341	-4,139169
D	370	340	310	239	200	150
R ²	0,9999987	0,9999999	0,9999993	0,9999997	0,9999906	0,9999615

Çizelge 4.15. 1-Dodecane Seyrelmesi için Hesaplanan Dinamik Viskozite Değerleri

Hesaplanan Dinamik Viskozite (mPa.s)						
Sıcaklık (°C)	Motor Yağı (μ)	%1 1-Dodecane Seyrelmesi	%2 1-Dodecane Seyrelmesi	%5 1-Dodecane Seyrelmesi	%7 1-Dodecane Seyrelmesi	%10 1-Dodecane Seyrelmesi
40	88,4428	80,8250	75,9740	60,4773	53,2032	42,3814
60	38,9737	35,8768	34,3442	28,1655	25,5831	21,1511
80	20,5442	19,1016	18,5054	15,3820	14,2557	11,9671
90	15,9771	14,6571	14,5237	11,9919	11,3675	9,6253

Çizelge 4.16. 1-Dodecane Seyrelmesi için Relatif Bozulma

Dinamik Viskozite için Relatif Bozulma						
Sıcaklık (°C)	Motor Yağı (μ)	%1 1-Dodecane Seyrelmesi	%2 1-Dodecane Seyrelmesi	%5 1-Dodecane Seyrelmesi	%7 1-Dodecane Seyrelmesi	%10 1-Dodecane Seyrelmesi
40	88,4428	0,9139	0,8590	0,6838	0,6016	0,4792
60	38,9737	0,9205	0,8812	0,7227	0,6564	0,5427
80	20,5442	0,9298	0,9008	0,7487	0,6939	0,5825
90	15,9771	0,9174	0,9090	0,7506	0,7115	0,6024

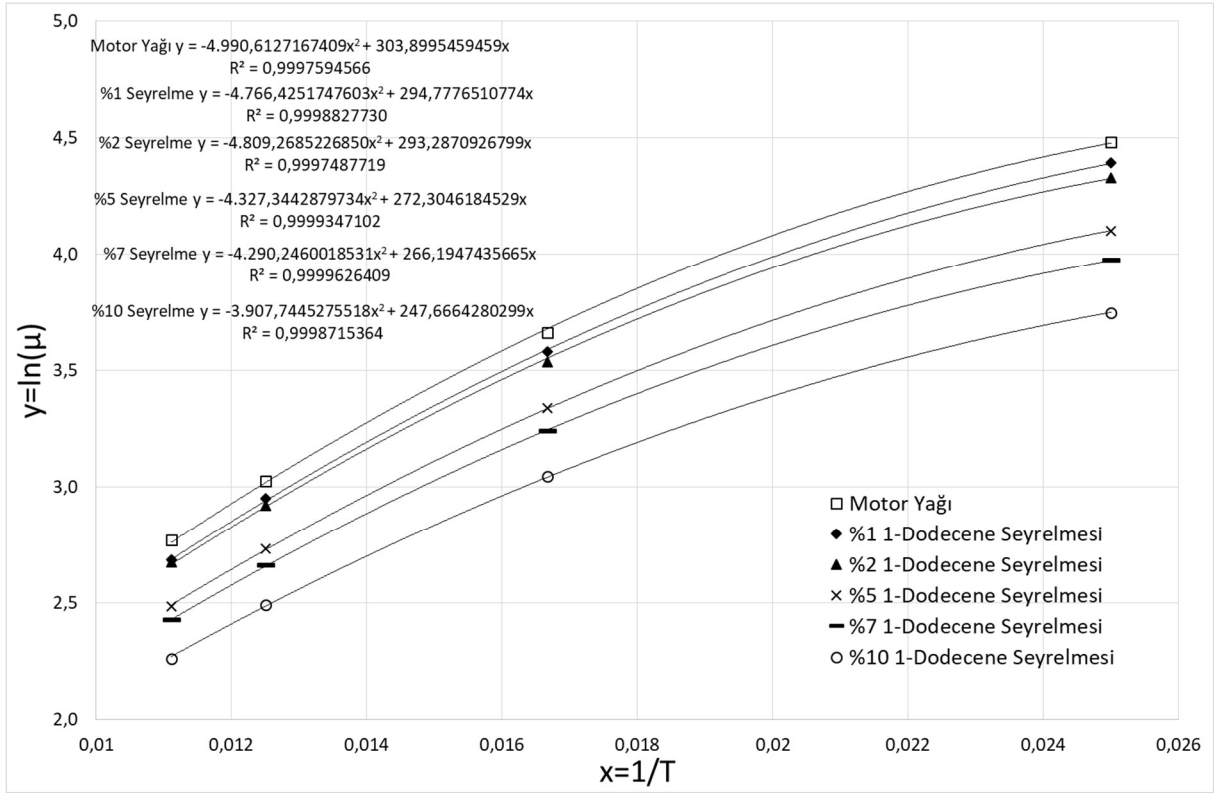


Şekil 4.10. 1-Dodecene seyrelmesi için relatif viskozite bozulması grafiği

Şekil 4.10 incelendiğinde ve %15 oranında bir viskozite değişiminin motor yağının bozulması sınırı olarak kabul ederek, %2 oranında motor yağına jet yakıtı karışmasının yeterli olduğu görülmektedir. Seyrelmenin %5 oranına yükselmesi motor yağının kabul edilebilir standartların çok dışına çıkarmakta, dinamik viskozite düşme oranı %25 ile %32 arasında olmaktadır. Ayrıca sıcaklığın jet yakıtı kirlenmesi üzerinde farklı bir etki gösterdiği anlaşılabilir. Düşük sıcaklıklarda viskozite düşmesi çok daha etkin olmaktadır. Elde edilen değerlerin logaritmik skalada ifadesi Çizelge 4.17-18 ve Şekil 4.11 de verilmiştir.

Çizelge 4.17. 1-Dodecene Seyrelmesi İçin Logaritmik Sonuç Çizelgesi

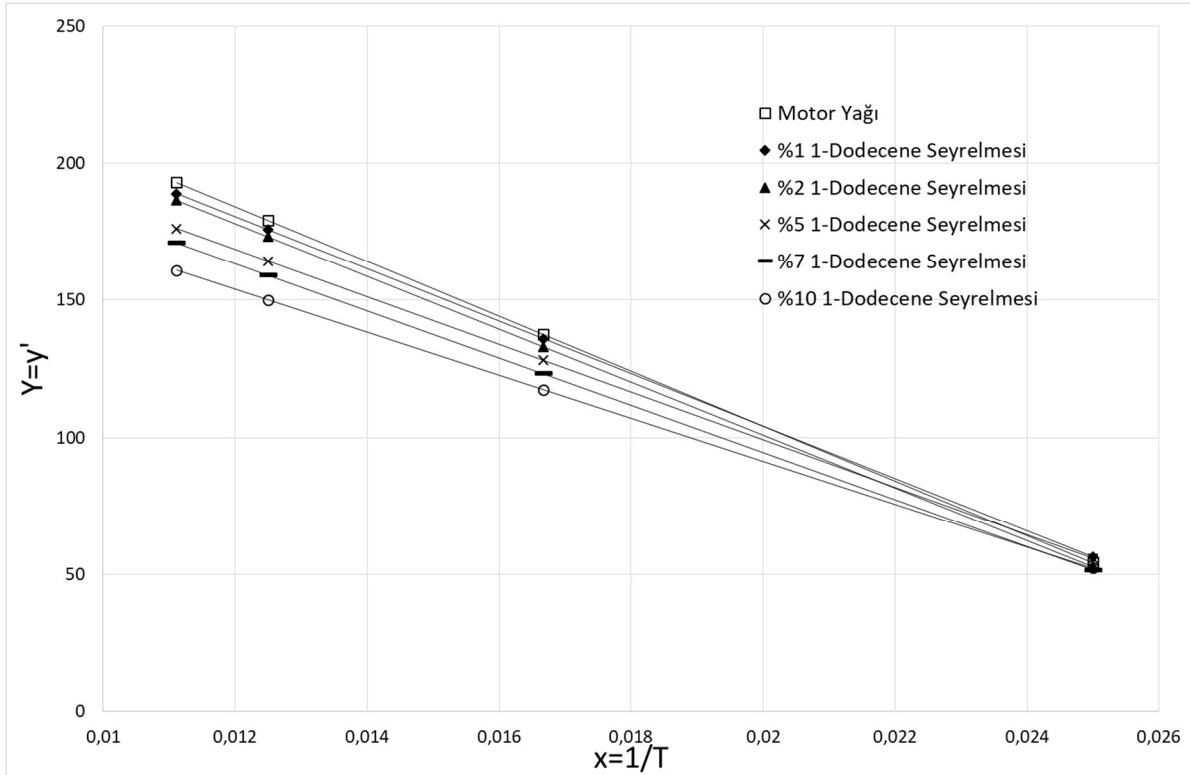
Sıcaklık ⁻¹ (°C ⁻¹)	ln(Dinamik Viskozite (mPa.s))					
	Motor Yağı	%1 1-Dodecene Seyrelmesi	%2 1-Dodecene Seyrelmesi	%5 1-Dodecene Seyrelmesi	%7 1-Dodecene Seyrelmesi	%10 1-Dodecene Seyrelmesi
0,025	4,48	4,39	4,33	4,10	3,98	3,75
0,016667	3,66	3,58	3,53	3,34	3,24	3,05
0,0125	3,03	2,95	2,92	2,73	2,66	2,49
0,011111	2,77	2,69	2,68	2,48	2,43	2,26



Şekil 4.11. 1-Dodecene seyrelmesi için logaritmik sonuç grafiği

Çizelge 4.18. 1-Dodecene Seyrelmesi İçin Logaritmik Regresyon Sonuçları

Logaritmik Regresyon Sonuçları						
Sabit	Motor Yağı	%1 1-Dodecene Seyrelmesi	%2 1-Dodecene Seyrelmesi	%5 1-Dodecene Seyrelmesi	%7 1-Dodecene Seyrelmesi	%10 1-Dodecene Seyrelmesi
A	-4990,6127	-4766,4252	-4809,2685	-4327,3443	-4290,2460	-3907,7445
B	303,8995	294,7777	293,2871	272,3046	266,1947	247,6664
C	0	0	0	0	0	0
R ²	0,9998	0,9999	0,9997	0,9999	0,9999	0,9999

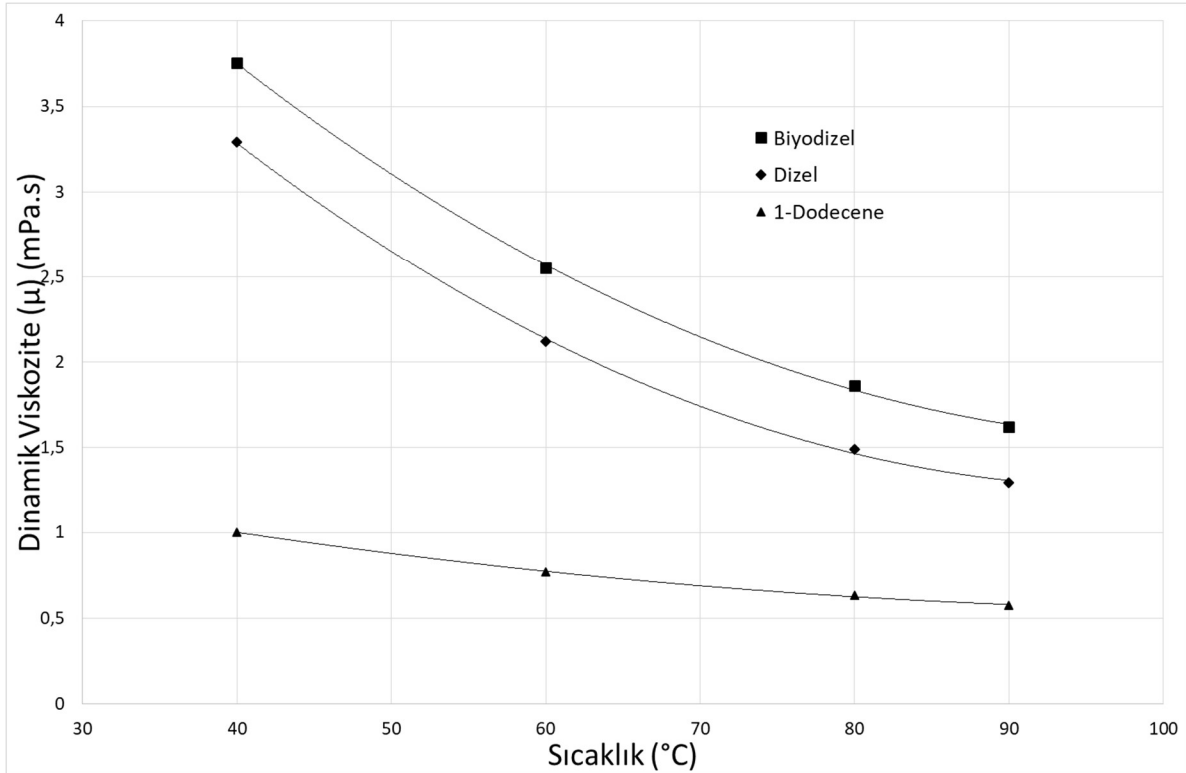


Şekil 4.12. 1-Dodecene seyrelmesi için birinci türev grafiği

Şekil 4.12 incelendiğinde dizel ve biyodizel yakıt seyrelmesi davranışlarından farklı bir davranış görülmektedir. Sıcaklık arttıkça farklı oranlardaki seyreltilmiş motor yağı numuneleri farklı eğimler göstermektedir. Yüksek sıcaklıklarda jet yakıtı kirlenmesinin etkisi daha belirgin hale gelmektedir. Bu üç gruba ek olarak saf yakıtlarında dinamik viskozitesi ölçülmüş ve Çizelge 4.19 ve Şekil 4.13 te regresyon denklemleriyle beraber verilmiştir.

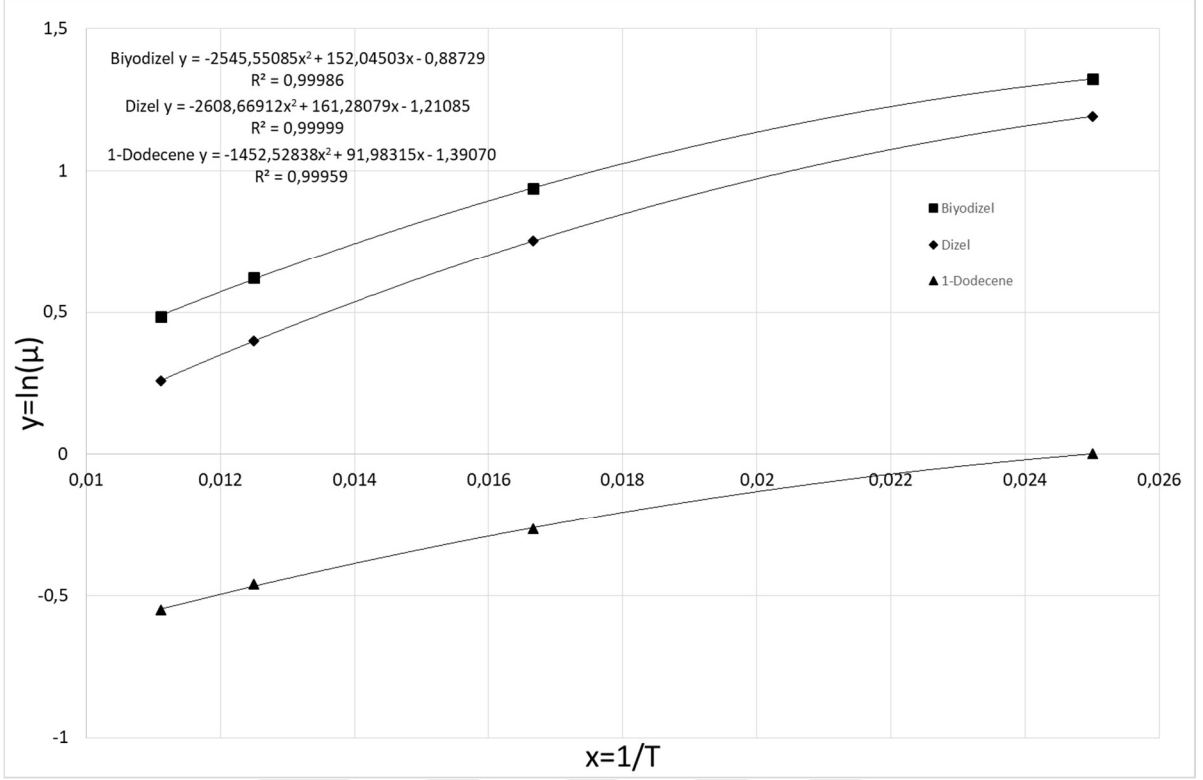
Çizelge 4.19. Seyreltmede Kullanılan Yakıtların Viskozite Değerleri

Sıcaklık (°C)	Dinamik Viskozite (μ) (mPa.s)		
	Biyodizel Yakıtı	Dizel Yakıtı	1-Dodecene
40	3,76	3,29	1,00
60	2,56	2,12	0,77
80	1,86	1,49	0,63
90	1,62	1,30	0,58

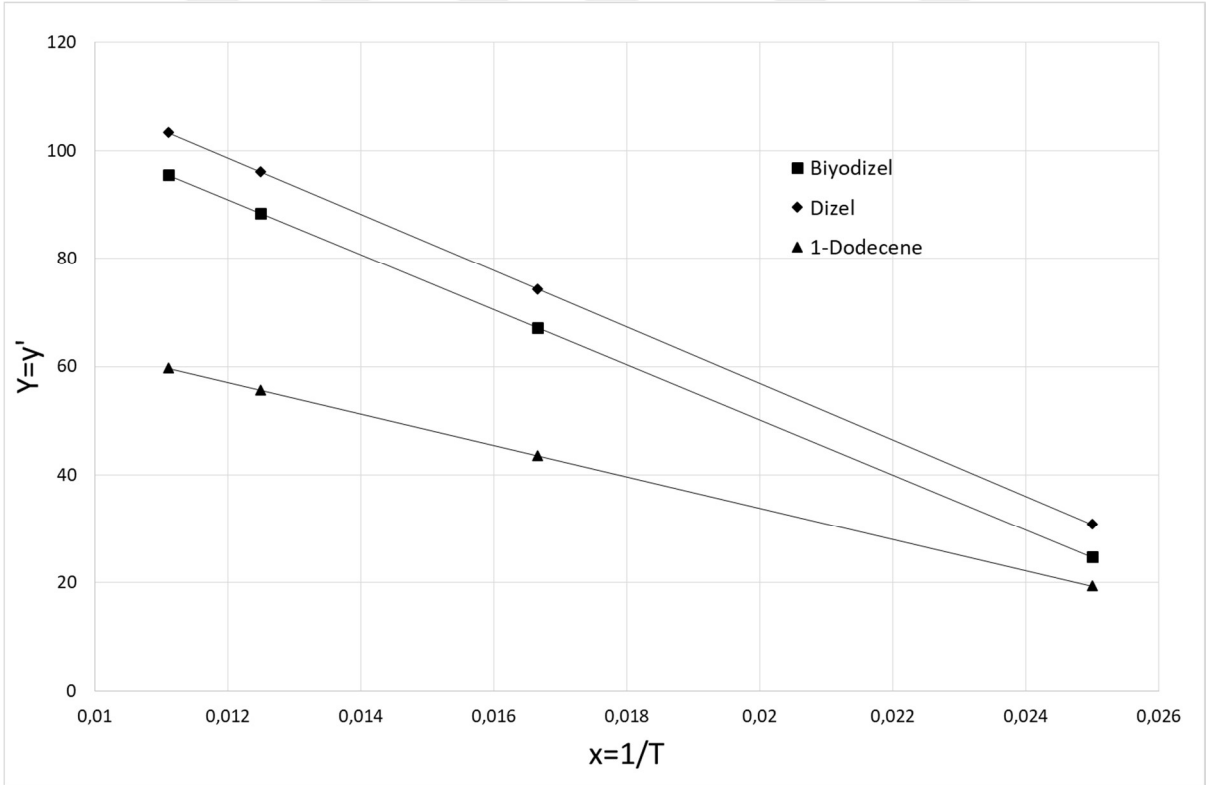


Şekil 4.13. Kullanılan yakıtların viskozite değerleri

Seyrelme için kullanılan farklı üç yakıtın dinamik viskoziteleri karşılaştırıldığında, biyodizel yakıtının viskozitesinin dizel ve jet yakıtına göre yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Biyodizel yakıtının 40 °C'deki dinamik viskozitesi 3,76 mPa.s iken dizel yakıtının 3,29 mPa.s ve 1-Dodecene'in dinamik viskozitesi 1,00 mPa.s dir. Jet yakıtının viskozitesi yaklaşık dizel yakıtının üçte biri oranındadır. Ayrıca 1-Dodecene in sıcaklığa bağlı viskozite davranışı dizel ve biyodizel yakıtlarının davranışından farklı bir davranış göstermektedir. Sıcaklığın artmasıyla viskozitenin düşmesi diğer yakıtlarda olduğu gibi şiddetli olmamaktadır. Yakıtlar arasındaki bu fark Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te daha açık görülmektedir.



Şekil 4.14. Kullanılan seyreltme yakıtlarının logaritmik sonuç grafiği



Şekil 4.15. Kullanılan yakıtların birinci türev grafiği

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bir motorun beklenmeyen bir şekilde çalışmayı bırakması ve bozulması hem operatörün hayatını riske sokar hem de beklenmeyen bir duraksamaya sebep olarak maddi zarar ortaya çıkarır. Bu durumların önlenmesi için günümüzde çokça kullanılmaya başlayan kestirimci bakım çalışmaları için yapılan araştırmalar kısıtlı ve azdır.

TS 12330 standardı göz önünde bulundurulduğunda 100 C°'de ki viskozitesinde %13,19 oranında bir düşüş görülen 10W-40 kodlu bir yağın artık kullanılamaz hale geldiği kabul edilebilir. Bu durumda yapılan araştırmaya göre seyrelme oranı %5'in üzerinde olan bir yağ bozulmuş kabul edilir. Grafiklere ayrı ayrı bakıldığında görüldüğü üzere motor yağı %5 seyrelmeye kadar tahmin edilebilir lineer bir yol izlemiştir ve %5'ten sonra sonuçlar bir dağılım göstererek 90 °C'de daha az ve 40 °C'de daha çok bozulmaya uğramıştır. Bu durumu %5'ten sonra motor yağının tahmin edilebilirliğini kaybetmesi olarak yorumlayabiliriz.

Logaritmik eğrilere baktığımızda farklı seyrelme oranlarının viskoziteye etkisi daha iyi ortaya çıkmıştır ancak nümerik olarak eğriler farklı yerlerde olsa da birbirlerine benzerlik göstermektedir. Bu durumu ortaya çıkartmak için logaritmik eğrilerin birinci türevine bakabiliriz. Bu grafikler seyrelmenin etkisinin sıcaklıkla nasıl değiştiğini gösterir. Türev grafiklerinden anlaşıldığı üzere seyrelme sıcaklığa bağlı olarak ekstra bir bozulmaya sebep olmamaktadır.

Grafikler birbiri ile karşılaştırıldığında viskoziteyi en çok etkileyen yakıtın 1-Dodecene olduğu görülmektedir. Ölçümü yapılan saf yakıt numunelerinin viskozitelerine baktığımızda bu durumun sebebi açıkça ortadadır. Bunun yanında en az etki gösterende dizel yakıttır, kullanılan motor yağı da dizel motorlar için olduğundan birbirlerine böyle bir uyum göstermeleri beklenen bir davranıştır.

Kestirimci bakım çalışmalarının yaygınlaşması ve her gün kullandığımız vazgeçilmez taşıtların iyileştirilmesinde kullanılması için kapsamlı çalışmalara ihtiyaç vardır. Bu çalışmalardan bir kaç laboratuvar ortamında kontrollü olarak yaşlandırılmış

yağların mümkün olan bütün karakteristiklerinin ortaya çıkarılması ve ölçümü için sensörlerin tasarlanması olabilir.

Bu sensörlerin yapacağı ölçümlerin işlenmesinden ve değerlendirilmesinden sorumlu olacak programın kullanacağı algoritmanın tasarlanması ve parametrelerinin belirlenmesi gelecek projelerden biridir.

Bütün bunlarla birlikte gelecekte yapılacak bir kapsam genişletme çalışmasında dikkat edilmesi gereken en önemli konu ölçüm süresidir. Ölçüm süresinin kısa olması kapiler içerisinde türbülansa sebep olduğundan viskoziteyi olduğundan daha yüksek göstermektedir. Bu duruma engel olmak için özellikle yüksek sıcaklıklarda kapilerin daha küçük seçilmesi gerekir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Andoga, R.; Fözö, L.; Schrötter, M.; Češkovič, M.; Szabo, S.; Bréda, R.; Schreiner, M. Intelligent Thermal Imaging-Based Diagnostics of Turbojet Engines. *Appl. Sci.* **2019**, *9*, 2253. <https://doi.org/10.3390/app9112253>
- Boikov, D.V., Bugai, T.B. & Mal'kov, Y.P. Features of aging of engine oil in a gas engine. *Chem Technol Fuels Oils* **43**, 299–304 (2007). <https://doi.org/10.1007/s10553-007-0053-3>
- Cuthbert, J., Gangopadhyay, A., Elie, L., Liu, Z. et al., "Engine Friction and Wear Performances with Polyalkylene Glycol Engine Oils," SAE Technical Paper 2016-01-2271, 2016, <https://doi.org/10.4271/2016-01-2271>
- Conolius, B., Pauzi, N., Sulaiman, M.H., Daud, M.R., Kazunori, K., Mohamed, A.I. (2019). Current Measurement of Engine Oils Under Various Voltage Application. In: Md Zain, Z., et al. Proceedings of the 10th National Technical Seminar on Underwater System Technology 2018 . Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 538. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3708-6_55
- D Ibrahim et al 2019 *J. Phys.: Conf. Ser.* **1349** 012018
- Fluke Kaynak Merkezi (2013). *Termal görüntüleme cihazıyla motor inceleme*. Erişim: <https://www.fluke.com/tr-tr/bilgi-edinin/blog/termal-goruntuleme/termal-goruntuleme-cihazıyla-motor-inceleme>, Erişim Tarihi: 13.04.2024
- Heywood, J. B. (2018). *Internal Combustion Engine Fundamentals* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.
- Hossain, E. (2024). *Machine Learning Crash Course for Engineers*. Springer.
- Kim, H.G., Jeon, S.I. Effect on friction of engine oil seal with engine oil viscosity. *Int.J Automot. Technol.* **9**, 601–606 (2008). <https://doi.org/10.1007/s12239-008-0071-0>
- Kiyoshi Inoue & Harumichi Watanabe (1983) Interactions of Engine Oil Additives, *A S L E Transactions*, **26:2**, 189-199, DOI: 10.1080/05698198308981493
- Levitt, J. (2011). *Complete Guide to Preventive and Predictive Maintenance* (2nd ed.). Industrial Press Inc..
- Mobley, R. K. (2002). *An Introduction to Predictive Maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- NTT Training Inc. (2017). *What is Vibration Analysis in Mechanical Maintenance?*. Erişim: <https://nttinc.com/blog/vibration-analysis-mechanical/>, Erişim Tarihi: 11.04.2024
- Shepherd, T. (2023). *Medium and Heavy-Duty Trucks An Emerging Area to Achive Significant Emission Reductions*. Erişim: <https://mde.maryland.gov/programs/workwithmde/Documents/AQCAC/2023Meeti ngMaterials/AQCAC%20ACT-Omnibus%202023.pdf>, Erişim Tarihi: 10.04.2024

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Sikora, G., & Mischczak, A. (2013). The Influence of Oil Ageing on the Change of Viscosity and Lubricity of Engine Oil. *Solid State Phenomena*, 199, 182–187. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.199.182>
- Veselá, K., Pexa, M., Mařík, J., & Valášek, P. (2014). Effect of Biofuels on Quality of Engine Oil. In *Advanced Materials Research (Vols. 1030–1032, pp. 414–417)*. Trans Tech Publications, Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1030-1032.414>
- Victor Aviation (2016). *Ultrasonic EMAT Inspection*. Erişim: <https://www.victor-aviation.com/NDT-Production-Services/Ultrasonic-EMAT-Inspection.php>, Erişim Tarihi: 12.04.2024
- Vipper, A.B., Zadko, I.I., Ermolaev, M.V. and Oleinik, J.Y. (2002), Engine oil ageing under laboratory conditions. *Lubrication Science*, 14: 363-375. <https://doi.org/10.1002/ls.3010140307>
- Vozmilov, A.G. & Ilimbetov, Rafael & Korobkov, D.S. & Faizulloev, N.L. & Astafev, D.V. & Андреев, Леонид. (2018). Diagnostics of Engine oil of Internal Combustion Engine by Electrophysical Method of Control. 1-5. [10.1109/GloSIC.2018.8570137](https://doi.org/10.1109/GloSIC.2018.8570137).
- Wrenick, S, Sutor, P, Pangilinan, H, & Schwarz, EE. "Heat Transfer Properties of Engine Oils." *Proceedings of the World Tribology Congress III. World Tribology Congress III, Volume 1. Washington, D.C., USA. September 12–16, 2005. pp. 595-596. ASME.* <https://doi.org/10.1115/WTC2005-64316>
- Wright, G. (2015). *Fundamentals of Medium_Heavy Duty Diesel Engines* (2nd ed.). Jones & Bartlett Learning.
- <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/apr/section1/apr124.htm>
- [https://msdspds.castrol.com/bpqlis/FusionPDS.nsf/Files/2A2A5EA25F6E704E80258408003E5D7E/\\$File/bpxe-bcm5k9.pdf](https://msdspds.castrol.com/bpqlis/FusionPDS.nsf/Files/2A2A5EA25F6E704E80258408003E5D7E/$File/bpxe-bcm5k9.pdf)
- <https://www.sigmaaldrich.com/TR/en/product/mm/822048>