

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ÇEŞİTLİ ÜRETİM PARAMETRELERİNİN MISIR ve FINDIK YAĞINDAN  
ÜRETİLEN BİYODİZELLERİN ÖNEMLİ YAKIT ÖZELLİKLERİNE  
ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mak. Müh. Mert GÜLÜM**

**MAYIS 2014  
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ÇEŞİTLİ ÜRETİM PARAMETRELERİNİN MISIR ve FINDIK YAĞINDAN  
ÜRETİLEN BİYODİZELLERİN ÖNEMLİ YAKIT ÖZELLİKLERİNE  
ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

**Mak. Müh. Mert GÜLÜM**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
"MAKİNA YÜKSEK MÜHENDİSİ"  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05.05.2014  
Tezin Savunma Tarihi : 22.05.2014**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Atilla BİLGİN**

**Trabzon 2014**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**  
**Makina Mühendisliği Anabilim Dalında**  
**Mert GÜLÜM tarafından hazırlanan**

**ÇEŞİTLİ ÜRETİM PARAMETRELERİNİN MISIR ve FINDIK YAĞINDAN  
ÜRETİLEN BİYODİZELLERİN ÖNEMLİ YAKIT ÖZELLİKLERİNE  
ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 06 / 05 / 2014 gün ve 1552 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**olarak kabul edilmiştir.**

**Jüri Üyeleri**

**Başkan: Prof. Dr. Atilla BİLGİN** .....

**Üye: Prof. Dr. Orhan DURGUN** .....

**Üye: Yrd. Doç. Dr. İsmail ALTIN** .....

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**  
**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Petrol kökenli yakıtların uzak olmayan bir gelecekte tükenecek olması ve bu yakıtların içten yanmalı motorlarda kullanılmaları durumunda çevreye zararlı eksoz emisyonlarının yayılması, bilim insanlarını temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları üzerinde çalışmalar yapmaya yönlendirmiştir. En yüksek termik verime sahip içten yanmalı termik makineler olan dizel motorları için kısa ve orta vadede fosil kökenli dizel yakıtına alternatif olabilecek en uygun yakıtın biyodizel olduğu düşünülmektedir. Ancak biyodizelin viskozitesinin yüksek olması nedeniyle saf olarak değil de dizel yakıtıyla harmanlanarak kullanılması daha uygundur. Bu nedenle bu tezde, bölgesel tarım ürünleri olan mısır ve fındık yağından üretilebilecek en düşük viskoziteye sahip biyodizelin üretim parametreleri tespit edilmiştir. Ayrıca, üretilen biyodizellerin ticari dizel yakıtıyla belirli hacimsel oranlarda harmanlanmasıyla elde edilen karışımların viskozite ve yoğunluk değerleri belirlenmiştir.

Tez çalışmalarım boyunca, bana bilgi ve tecrübeleriyle yol gösteren, her konuda maddi ve manevi desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Atilla BİLGİN'e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, görüş ve önerilerinden yararlandığım Kimya Bölümü Başkanı Sayın Prof. Dr. Halit KANTEKİN'e, yakıtların bazı kimyasal analizlerinin yapıldığı Prof. Dr. Saadettin Güner Yakıt Uygulama ve Araştırma Merkezi'nin müdürü Sayın Doç. Dr. Celal DURAN'a ve çalışanlarına, laboratuvar malzemeleri ve cihazlarının alımında desteklerini esirgemeyen K.T.Ü Mühendislik Fakültesi Dekanlığı'na ve K.T.Ü BAP Birimi'ne katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım. Deneylerim sırasında bana yardım eden Abdulvahap ÇAKMAK'a ayrıca teşekkür ederim. Son olarak, beni bugünlere getiren ve hayatım boyunca her konuda desteklerini benden hiç esirgemeyen aileme saygı ve şükranlarımı sunarım.

Bu tezi, 05.02.2014 tarihinde elim bir kaza sonucu hayatını kaybeden kuzenim Hande ALIN'ın kıymetli anısına ithaf ediyorum.

Mert GÜLÜM  
Trabzon 2014

## TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Çeşitli Üretim Parametrelerinin Mısır ve Fındık Yağından Üretilen Biyodizellerin Önemli Yakıt Özelliklerine Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Atilla BİLGİN’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri ve analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurullara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 05/05/2014

Mert GÜLÜM

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa No

ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	IX
SUMMARY.....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
TABLolar DİZİNİ.....	XXV
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XXVII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. İçten Yanmalı Motorlarda Kullanılan Yakıtlar.....	2
1.2.1. Fosil Kökenli Geleneksel İçten Yanmalı Motor Yakıtları.....	3
1.2.1.1. Benzinin Başlıca Özellikleri.....	3
1.2.1.2. Dizel Yakıtının Başlıca Özellikleri.....	3
1.2.2. Alternatif İçten Yanmalı Motor Yakıtları.....	4
1.3. Biyodizel.....	4
1.3.1. Biyodizelin Özellikleri.....	5
1.3.1.1. Yoğunluk.....	5
1.3.1.2. Kinematik Viskozite.....	5
1.3.1.3. Setan Sayısı.....	6
1.3.1.4. Isıl Değer.....	8
1.3.1.5. Düşük Sıcaklıkta Akış Özellikleri.....	8
1.3.1.6. Parlama Noktası Sıcaklığı.....	9
1.3.1.7. Yağlayıcılık.....	9
1.3.1.8. Biyobozunabilirlik.....	10
1.3.1.9. Toksik Etki.....	10
1.3.1.10. Depolama.....	10
1.3.1.11. Su İçeriği.....	10
1.3.1.12. İyot Sayısı.....	11
1.3.1.13. Karbon Artığı.....	11
1.3.1.14. Yağlama Yağının Seyrelmesi.....	11

1.3.1.15.	Distilasyon Sıcaklığı .....	12
1.3.1.16.	Oksidasyon Kararlılığı .....	12
1.3.1.17.	Asit Sayısı .....	12
1.3.2.	Biyodizelin Standartları .....	12
1.3.3.	Biyodizelin Üstünlükleri .....	15
1.3.4.	Biyodizelin Yetersizlikleri .....	16
1.3.5.	Türkiye’de Biyodizelin Durumu .....	17
1.3.6.	Dünyada Biyodizelin Durumu .....	18
1.3.7.	Biyodizel Üretimi .....	19
1.3.7.1.	Seyreltme .....	19
1.3.7.2.	Mikroemülsiyon Oluşturma .....	19
1.3.7.3.	Piroliz (Ayrıştırma) .....	20
1.3.7.4.	Transesterifikasyon .....	20
1.3.7.5.	Süper Kritik Alkol .....	24
1.3.8.	Transesterifikasyon Reaksiyonuna Etki Eden Faktörler .....	25
1.4.	Literatür Araştırması .....	25
1.5.	Tez Çalışmasının Amacı ve Kapsamı .....	58
2.	DENEYSEL ÇALIŞMA .....	60
2.1.	Deneylerde Kullanılan Cihazlar .....	60
2.2.	Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri .....	63
2.3.	Deneylerin Yapılışı .....	67
2.4.	İncelenen Parametreler .....	76
2.5.	Deneylerde Ölçülen Büyüklükler, Ölçüm ve Hesap Yöntemleri .....	77
2.5.1.	Yoğunluk Ölçümü .....	77
2.5.2.	Viskozite Ölçümü .....	79
2.6.	Belirsizlik Analizi .....	84
2.6.1.	Yoğunluk Ölçümü İçin Belirsizlik Analizi .....	85
2.6.2.	Dinamik Viskozite Ölçümü İçin Belirsizlik Analizi .....	86
2.6.3.	Kinematik Viskozite Belirlenmesindeki Belirsizlik Analizi .....	87
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA .....	89
3.1.	Mısır Yağından Biyodizel Üretimi .....	89
3.1.1.	Katalizör Olarak Sodyum Hidroksit (NaOH) Kullanımı .....	89
3.1.2.	Katalizör Olarak Potasyum Hidroksit (KOH) Kullanımı .....	104
3.2.	Fındık Yağından Biyodizel Üretimi .....	118
3.2.1.	Katalizör Olarak Sodyum Hidroksit (NaOH) Kullanımı .....	118
3.2.2.	Katalizör Olarak Potasyum Hidroksit (KOH) Kullanımı .....	132

3.3.	Farklı Yağ ve Katalizörler Kullanılarak Üretilen Biyodizellerin Karşılaştırılması .....	146
3.3.1.	Katalizör Oranına Göre Değişimler .....	146
3.3.2.	Reaksiyon Sıcaklığına Göre Değişimler .....	150
3.3.3.	Reaksiyon Süresine Göre Değişimler .....	153
3.3.4.	Alkol/Yağ Mol Oranına Göre Değişimler .....	157
3.4.	Mısır Yağı Biyodizeli-Dizel Yakıtı Karışımlarının Dinamik Viskozite, Yoğunluk ve Kinematik Viskozitelerinin Belirlenmesi.....	161
3.4.1.	Sodyum Hidroksit Kullanılarak Üretilen Mısır Yağı Biyodizeli-Dizel Yakıtı Karışımları .....	161
3.4.1.1.	En Düşük Viskoziteye Sahip Biyodizel İçin Değişimler .....	161
3.4.1.1.1.	Sıcaklığa Göre Değişimler .....	162
3.4.1.1.2.	Karışımdaki Hacimsel Biyodizel Oranına Göre Değişimler .....	166
3.4.1.1.3.	Karışımdaki Hacimsel Biyodizel Oranı ve Sıcaklığa Göre Değişimler.....	171
3.4.1.2.	Teorik Olarak En Yüksek Metil Ester Verimine Sahip Biyodizel İçin Değişimler.....	180
3.4.1.2.1.	Sıcaklığa Göre Değişimler .....	181
3.4.1.2.2.	Karışımdaki Hacimsel Biyodizel Oranına Göre Değişimler .....	185
3.4.1.2.3.	Karışımdaki Hacimsel Biyodizel Oranı ve Sıcaklığa Göre Değişimler.....	190
3.4.2.	Potasyum Hidroksit Kullanılarak Üretilen Mısır Yağı Biyodizeli-Dizel Yakıtı Karışımları .....	199
3.4.2.1.	En Düşük Viskoziteye Sahip Biyodizel İçin Değişimler .....	199
3.4.2.1.1.	Sıcaklığa Göre Değişimler .....	200
3.4.2.1.2.	Karışımdaki Hacimsel Biyodizel Oranına Göre Değişimler .....	204
3.4.2.1.3.	Karışımdaki Hacimsel Biyodizel Oranı ve Sıcaklığa Göre Değişimler.....	209
3.4.2.2.	Teorik Olarak En Yüksek Metil Ester Verimine Sahip Biyodizel İçin Değişimler.....	218
3.4.2.2.1.	Sıcaklığa Göre Değişimler .....	219
3.4.2.2.2.	Karışımdaki Hacimsel Biyodizel Oranına Göre Değişimler .....	223
3.4.2.2.3.	Karışımdaki Hacimsel Biyodizel Oranı ve Sıcaklığa Göre Değişimler.....	228
3.5.	Fındık Yağı Biyodizeli-Dizel Yakıtı Karışımlarının Dinamik Viskozite, Yoğunluk ve Kinematik Viskozitelerinin Belirlenmesi.....	237
3.5.1.	Sodyum Hidroksit Kullanılarak Üretilen Fındık Yağı Biyodizeli-Dizel Yakıtı Karışımları .....	237
3.5.1.1.	En Düşük Viskoziteye Sahip Biyodizel İçin Değişimler .....	237
3.5.1.1.1.	Sıcaklığa Göre Değişimler .....	238
3.5.1.1.2.	Karışımdaki Hacimsel Biyodizel Oranına Göre Değişimler .....	242
3.5.1.1.3.	Karışımdaki Hacimsel Biyodizel Oranı ve Sıcaklığa Göre Değişimler.....	247



3.5.1.2.	Teorik Olarak En Yüksek Metil Ester Verimine Sahip Biyodizel İçin Değişimler.....	256
3.5.1.2.1.	Sıcaklığa Göre Değişimler.....	257
3.5.1.2.2.	Karışımdaki Hacimsel Biyodizel Oranına Göre Değişimler.....	261
3.5.1.2.3.	Karışımdaki Hacimsel Biyodizel Oranı ve Sıcaklığa Göre Değişimler.....	266
3.5.2.	Potasyum Hidroksit Kullanılarak Üretilen Fındık Yağı Biyodizeli-Dizel Yakıtı Karışımları.....	275
3.5.2.1.	En Düşük Viskoziteye Sahip Biyodizel İçin Değişimler.....	275
3.5.2.1.1.	Sıcaklığa Göre Değişimler.....	276
3.5.2.1.2.	Karışımdaki Hacimsel Biyodizel Oranına Göre Değişimler.....	280
3.5.2.1.3.	Karışımdaki Hacimsel Biyodizel Oranı ve Sıcaklığa Göre Değişimler.....	285
3.5.2.2.	Teorik Olarak En Yüksek Metil Ester Verimine Sahip Biyodizel İçin Değişimler.....	294
3.5.2.2.1.	Sıcaklığa Göre Değişimler.....	295
3.5.2.2.2.	Karışımdaki Hacimsel Biyodizel Oranına Göre Değişimler.....	299
3.5.2.2.3.	Karışımdaki Hacimsel Biyodizel Oranı ve Sıcaklığa Göre Değişimler.....	304
3.6.	Maliyet Analizi.....	313
4.	SONUÇLAR.....	317
5.	ÖNERİLER.....	326
6.	KAYNAKLAR.....	327
7.	EKLER.....	334
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

ÇEŞİTLİ ÜRETİM PARAMETRELERİNİN MISIR ve FINDIK YAĞINDAN  
ÜRETİLEN BİYODİZELLERİN ÖNEMLİ YAKIT ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN  
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Mert GÜLÜM

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Atilla BİLGİN  
2014, 333 Tez Sayfası, 2 Ek Sayfa

Bu tez çalışması iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada, bölgesel ürün olarak sayılabilecek mısır ve fındık yağından, transesterifikasyon reaksiyonu ile üretilebilecek en düşük viskoziteye sahip biyodizellerin optimum üretim parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, transesterifikasyon reaksiyonuna etki eden parametreler sırasıyla katalizör oranı %0,25-1,50, reaksiyon sıcaklığı 40-70°C, reaksiyon süresi 30-120 dakika ve alkol/yağ mol oranı 3:1-12:1 aralıklarında değiştirilerek, bu parametrik değişimlerin üretilen biyodizellerin dinamik ve kinematik viskozitelerine etkileri incelenmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise, her bir yağ ve katalizör türü için ayrı ayrı olmak üzere, en düşük viskoziteli biyodizeller ile teorik olarak en yüksek metil ester verimine sahip biyodizellerin, belirli hacimsel oranlarda (%0, 5, 10, 15 ve 20) ticari dizel yakıtı ile harmanlanmasıyla elde edilen karışımların farklı sıcaklıklardaki (10, 20, 30 ve 40°C) dinamik ve kinematik viskoziteleri ile yoğunlukları ölçülmüş; daha sonra en küçük kareler yöntemi ile viskozite ve yoğunlukların, sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri için bir- ve iki-boyutlu fonksiyonlar uyumlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Biyodizel, Yağ asidi metil esteri, Alternatif yakıtlar, Yenilenebilir enerji kaynakları, Transesterifikasyon, Sodyum hidroksit, Potasyum hidroksit, Metil alkol, Biyodizel-dizel yakıtı karışımları, En küçük kareler regresyonu.

Master Thesis

## SUMMARY

### EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF VARIOUS PRODUCTION PARAMETERS ON THE SOME FUEL PROPERTIES OF PRODUCED BIODIESELS FROM CORN AND HAZELNUT OILS

Mert GÜLÜM

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Mechanical Engineering Graduate Program  
Supervisor: Prof. Dr. Atilla BİLGİN  
2014, 333 Pages, 2 Appendix Pages

This thesis consists of two main parts. In the first part, determination of the optimum production parameters of the lowest viscosity biodiesels, which can be produced with transesterification reaction from corn and hazelnut oils which can be considered as regional products, were aimed. For this purpose, parameters, which influence the transesterification reaction, such as catalyst concentration, reaction temperature and time and alcohol/oil molar ratio were varied within the range of 0,25-1,50%, 40-70°C, 30-120 minutes, 3:1-12:1, respectively, and then the effects of these parametric changes on dynamic and kinematic viscosities of produced biodiesels were investigated.

In the second part, the blends were prepared by mixing commercial diesel fuel with the biodiesels both having the lowest viscosities and theoretical maximum methyl ester yield for each oil and catalyst type at different volume ratios (0, 5, 10, 15 and 20%). Then, the dynamic and kinematic viscosities of these blends were measured at different temperatures (10, 20, 30 and 40°C). Also one- and two-dimensional functions were fitted to the measured values for variations of viscosities and densities of blends with respect to temperature and biodiesel fraction in the blends by using the least squares regression.

**Key Words:** Biodiesel, Fatty acid methyl ester, Alternative fuels, Renewable energy sources, Transesterification, Sodium hydroxide, Potassium hydroxide, Methyl alcohol, Biodiesel-diesel blends, The least squares method.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1.1.	Normal setanın kimyasal yapısı .....	7
Şekil 1.2.	$\alpha$ -metil naftalinin kimyasal yapısı.....	7
Şekil 1.3.	Transesterifikasyon reaksiyonunun genel denklemi .....	21
Şekil 1.4.	Transesterifikasyon reaksiyonunun basamakları .....	22
Şekil 2.1.	Manyetik karıştırıcı ısıtıcı .....	60
Şekil 2.2.	Hassas terazi.....	61
Şekil 2.3.	Piknometre .....	61
Şekil 2.4.	Viskozimetre ve bilyeler .....	62
Şekil 2.5.	Kronometre .....	63
Şekil 2.6.	Su banyosu .....	63
Şekil 2.7.	Kullanılan mısır ve fındık yağı .....	64
Şekil 2.8.	Kullanılan metil alkol .....	65
Şekil 2.9.	Kullanılan sodyum hidroksit.....	66
Şekil 2.10.	Kullanılan potasyum hidroksit.....	67
Şekil 2.11.	Biyodizel üretimi akış şeması .....	67
Şekil 2.12.	Yağın tartılması.....	68
Şekil 2.13.	Yağın ısıtılması .....	68
Şekil 2.14.	Sodyum (veya potasyum) hidroksitin tartılması .....	69
Şekil 2.15.	Metil alkolün tartılması.....	69
Şekil 2.16.	Metoksit karışımının oluşturulması .....	70
Şekil 2.17.	Yağın üstüne metoksit çözeltisinin eklenmesi .....	71
Şekil 2.18.	Transesterifikasyon reaksiyonunun başlatılması .....	71
Şekil 2.19.	Reaksiyon sonunda meydana gelen karışımının ayırma hunisine alınması ve biyodizel ile gliserin fazının meydana gelmesi .....	72
Şekil 2.20.	Gliserin fazının uzaklaştırılması .....	73
Şekil 2.21.	Biyodizelin yıkanması .....	74
Şekil 2.22.	Yıkanan biyodizelin ısıtılması .....	75
Şekil 2.23.	Biyodizelin süzülmesi.....	75
Şekil 2.24.	Kullanıma hazır biyodizel.....	76
Şekil 2.25.	Viskozimetre tüpünün boyutları .....	80
Şekil 3.1.	Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin katalizör oranına göre değişim .....	92

Şekil 3.2.	Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin yoğunluğunun katalizör oranına göre değişimi.....	92
Şekil 3.3.	Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin katalizör oranına göre değişimi .....	93
Şekil 3.4.	Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimi .....	95
Şekil 3.5.	Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin yoğunluğunun reaksiyon sıcaklığına göre değişimi.....	95
Şekil 3.6.	Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimi.....	96
Şekil 3.7.	Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin reaksiyon süresine göre değişimi.....	98
Şekil 3.8.	Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin yoğunluğunun reaksiyon süresine göre değişimi.....	98
Şekil 3.9.	Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin reaksiyon süresine göre değişimi.....	99
Şekil 3.10.	Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi .....	101
Şekil 3.11.	Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin yoğunluğunun metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi .....	102
Şekil 3.12.	Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi .....	102
Şekil 3.13.	Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin katalizör oranına göre değişimi .....	106
Şekil 3.14.	Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin yoğunluğunun katalizör oranına göre değişimi.....	106
Şekil 3.15.	Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin katalizör oranına göre değişimi .....	107
Şekil 3.16.	Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimi .....	109
Şekil 3.17.	Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin yoğunluğunun reaksiyon sıcaklığına göre değişimi.....	109
Şekil 3.18.	Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimi.....	110
Şekil 3.19.	Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin reaksiyon süresine göre değişimi.....	112
Şekil 3.20.	Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin yoğunluğunun reaksiyon süresine göre değişimi.....	112
Şekil 3.21.	Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin reaksiyon süresine göre değişimi.....	113
Şekil 3.22.	Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi .....	115

Şekil 3.23.	Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin yoğunluğunun metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi .....	115
Şekil 3.24.	Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi .....	116
Şekil 3.25.	Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin katalizör oranına göre değişimi .....	120
Şekil 3.26.	Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin yoğunluğunun katalizör oranı göre değişimi .....	120
Şekil 3.27.	Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin katalizör oranına göre değişimi .....	121
Şekil 3.28.	Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimi .....	123
Şekil 3.29.	Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin yoğunluğunun reaksiyon sıcaklığına göre değişimi.....	123
Şekil 3.30.	Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimi.....	124
Şekil 3.31.	Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin reaksiyon süresine göre değişimi.....	126
Şekil 3.32.	Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin yoğunluğunun reaksiyon süresine göre değişimi.....	126
Şekil 3.33.	Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin reaksiyon süresine göre değişimi.....	127
Şekil 3.34.	Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi .....	129
Şekil 3.35.	Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin yoğunluğunun metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi .....	129
Şekil 3.36.	Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi .....	130
Şekil 3.37.	Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin katalizör oranına göre değişimi .....	134
Şekil 3.38.	Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin yoğunluğunun katalizör oranına göre değişimi.....	134
Şekil 3.39.	Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin katalizör oranına göre değişimi .....	135
Şekil 3.40.	Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimi .....	137
Şekil 3.41.	Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin yoğunluğunun reaksiyon sıcaklığına göre değişimi.....	137
Şekil 3.42.	Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimi.....	138
Şekil 3.43.	Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin reaksiyon süresine göre değişimi.....	140

Şekil 3.44.	Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin yoğunluğunun reaksiyon süresine göre değişimi.....	140
Şekil 3.45.	Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin reaksiyon süresine göre değişimi.....	141
Şekil 3.46.	Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi.....	143
Şekil 3.47.	Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin yoğunluğunun metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi.....	143
Şekil 3.48.	Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi.....	144
Şekil 3.49.	Farklı yağ ve katalizör kullanılarak üretilen biyodizellerin dinamik viskozitelerinin katalizör oranına göre değişimleri.....	149
Şekil 3.50.	Farklı yağ ve katalizör kullanılarak üretilen biyodizellerin yoğunluklarının katalizör oranına göre değişimleri.....	149
Şekil 3.51.	Farklı yağ ve katalizör kullanılarak üretilen biyodizellerin kinematik viskozitelerinin katalizör oranına göre değişimleri.....	150
Şekil 3.52.	Farklı yağ ve katalizör kullanılarak üretilen biyodizellerin dinamik viskozitelerinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri.....	152
Şekil 3.53.	Farklı yağ ve katalizör kullanılarak üretilen biyodizellerin yoğunluklarının reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri.....	153
Şekil 3.54.	Farklı yağ ve katalizör kullanılarak üretilen biyodizellerin kinematik viskozitelerinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri.....	153
Şekil 3.55.	Farklı yağ ve katalizör kullanılarak üretilen biyodizellerin dinamik viskozitelerinin reaksiyon süresine göre değişimleri.....	156
Şekil 3.56.	Farklı yağ ve katalizör kullanılarak üretilen biyodizellerin yoğunluklarının reaksiyon süresine göre değişimleri.....	156
Şekil 3.57.	Farklı yağ ve katalizör kullanılarak üretilen biyodizellerin kinematik viskozitelerinin reaksiyon süresine göre değişimleri.....	157
Şekil 3.58.	Farklı yağ ve katalizör kullanılarak üretilen biyodizellerin dinamik viskozitelerinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimleri.....	160
Şekil 3.59.	Farklı yağ ve katalizörler kullanılarak üretilen biyodizellerin yoğunluklarının metil alkol/yağ mol oranına göre değişimleri.....	160
Şekil 3.60.	Farklı yağ ve katalizör kullanılarak üretilen biyodizellerin kinematik viskozitelerinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimleri.....	161
Şekil 3.61.	Sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri.....	164
Şekil 3.62.	Sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklığa göre değişimleri.....	165

Şekil 3.63.	Sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri .....	166
Şekil 3.64.	Sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için dinamik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri.....	169
Şekil 3.65.	Sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için yoğunluklarının karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri .....	170
Şekil 3.66.	Sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için kinematik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri.....	171
Şekil 3.67.	Ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri.....	173
Şekil 3.68.	Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri .....	174
Şekil 3.69.	Ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri .....	176
Şekil 3.70.	Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri.....	177
Şekil 3.71.	Ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri.....	179
Şekil 3.72.	Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri .....	180



Şekil 3.73.	Sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri .....	183
Şekil 3.74.	Sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklığa göre değişimleri.....	184
Şekil 3.75.	Sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri .....	185
Şekil 3.76.	Sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için dinamik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri.....	188
Şekil 3.77.	Sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için yoğunluklarının karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri .....	189
Şekil 3.78.	Sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için kinematik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri.....	190
Şekil 3.79.	Ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri.....	192
Şekil 3.80.	Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri .....	193
Şekil 3.81.	Ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri .....	195
Şekil 3.82.	Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri.....	196
Şekil 3.83.	Ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri.....	198

Şekil 3.84.	Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri .....	199
Şekil 3.85.	Potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri .....	202
Şekil 3.86.	Potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklığa göre değişimleri.....	203
Şekil 3.87.	Potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri .....	204
Şekil 3.88.	Potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için dinamik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri.....	207
Şekil 3.89.	Potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için yoğunluklarının karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri .....	208
Şekil 3.90.	Potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için kinematik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri.....	209
Şekil 3.91.	Ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri.....	211
Şekil 3.92.	Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri .....	212
Şekil 3.93.	Ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri .....	214

Şekil 3.94.	Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri.....	215
Şekil 3.95.	Ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri.....	217
Şekil 3.96.	Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri .....	218
Şekil 3.97.	Potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri .....	221
Şekil 3.98.	Potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklığa göre değişimleri.....	222
Şekil 3.99.	Potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri .....	223
Şekil 3.100.	Potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için dinamik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri.....	226
Şekil 3.101.	Potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için yoğunluklarının karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri .....	227
Şekil 3.102.	Potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için kinematik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri.....	228
Şekil 3.103.	Ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri.....	230

Şekil 3.104.	Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri .....	231
Şekil 3.105.	Ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri .....	233
Şekil 3.106.	Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri.....	234
Şekil 3.107.	Ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri.....	236
Şekil 3.108.	Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri .....	237
Şekil 3.109.	Sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri .....	240
Şekil 3.110.	Sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklığa göre değişimleri.....	241
Şekil 3.111.	Sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri .....	242
Şekil 3.112.	Sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için dinamik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri.....	245
Şekil 3.113.	Sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için yoğunluklarının karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri .....	246

Şekil 3.114.	Sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için kinematik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri.....	247
Şekil 3.115.	Ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri.....	249
Şekil 3.116.	Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri .....	250
Şekil 3.117.	Ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri .....	252
Şekil 3.118.	Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri.....	253
Şekil 3.119.	Ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri.....	255
Şekil 3.120.	Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri .....	256
Şekil 3.121.	Sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri .....	259
Şekil 3.122.	Sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklığa göre değişimleri.....	260
Şekil 3.123.	Sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri .....	261

Şekil 3.124.	Sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için dinamik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri.....	264
Şekil 3.125.	Sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için yoğunluklarının karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri .....	265
Şekil 3.126.	Sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için kinematik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri.....	266
Şekil 3.127.	Ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri.....	268
Şekil 3.128.	Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri .....	269
Şekil 3.129.	Ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri .....	271
Şekil 3.130.	Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri.....	272
Şekil 3.131.	Ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri.....	274
Şekil 3.132.	Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri .....	275
Şekil 3.133.	Potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri .....	278

Şekil 3.134.	Potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklığa göre değişimleri.....	279
Şekil 3.135.	Potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri .....	280
Şekil 3.136.	Potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için dinamik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri.....	283
Şekil 3.137.	Potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için yoğunluklarının karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri .....	284
Şekil 3.138.	Potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için kinematik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri.....	285
Şekil 3.139.	Ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri.....	287
Şekil 3.140.	Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri .....	288
Şekil 3.141.	Ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri .....	290
Şekil 3.142.	Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri.....	291
Şekil 3.143.	Ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri.....	293

Şekil 3.144.	Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri .....	294
Şekil 3.145.	Potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri .....	297
Şekil 3.146.	Potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklığa göre değişimleri.....	298
Şekil 3.147.	Potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri .....	299
Şekil 3.148.	Potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için dinamik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri.....	302
Şekil 3.149.	Potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için yoğunluklarının karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri .....	303
Şekil 3.150.	Potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için kinematik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri.....	304
Şekil 3.151.	Ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri.....	306
Şekil 3.152.	Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri .....	307
Şekil 3.153.	Ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri .....	309



- Şekil 3.154. Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri..... 310
- Şekil 3.155. Ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri..... 312
- Şekil 3.156. Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri ..... 313

## TABLolar DİZİNİ

### Sayfa No

Tablo 1.1.	EN 14214 Biyodizel Avrupa Standartları .....	14
Tablo 1.2.	ASTM D6751 Biyodizel Standardı.....	15
Tablo 1.3.	Avrupa Birliği Ülkelerinin 2012 yılı biyodizel üretim miktarları .....	18
Tablo 1.4.	Biyodizel üretim yöntemlerinin karşılaştırılması.....	23
Tablo 1.5.	Bazı yağlar ve metil esterleri ile dizel yakıtının bazı yakıt özellikleri .....	24
Tablo 1.6.	Sadece bazik katalizör kullanılarak gerçekleştirilen transesterifikasyon reaksiyonunun optimum parametreleri ve üretilen biyodizellerin bazı yakıt özellikleri .....	56
Tablo 1.7.	Asit ve bazik katalizör kullanılarak gerçekleştirilen esterleştirme ve transesterifikasyon reaksiyonunun optimum parametreleri ve üretilen biyodizellerin bazı yakıt özellikleri .....	57
Tablo 2.1.	Kullanılan metil alkolün bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	65
Tablo 2.2.	Kullanılan sodyum ve potasyum hidroksitin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri .....	66
Tablo 3.1.	Ticari dizel yakıtının ve belirlenen optimum şartlarda mısır yağı ve sodyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri ve ilgili standart değerler.....	103
Tablo 3.2.	Belirlenen optimum şartlarda mısır yağı ve sodyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin ortalama molekül kütlesi, kapalı formülü ile yapısındaki yağ asitlerinin türü ve yağ asidi metil esterlerinin kütleli yüzdeleri .....	104
Tablo 3.3.	Ticari dizel yakıtının ve belirlenen optimum şartlarda mısır yağı ve potasyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri ve ilgili standart değerler.....	117
Tablo 3.4.	Belirlenen optimum şartlarda mısır yağı ve potasyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin ortalama molekül kütlesi, kapalı formülü ile yapısındaki yağ asitlerinin türü ve yağ asidi metil esterlerinin kütleli yüzdeleri .....	117
Tablo 3.5.	Ticari dizel yakıtının ve belirlenen optimum şartlarda fındık yağı ve sodyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri ve ilgili standart değerler.....	131
Tablo 3.6.	Belirlenen optimum şartlarda fındık yağı ve sodyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin ortalama molekül kütlesi, kapalı formülü ile yapısındaki yağ asitlerinin türü ve yağ asidi metil esterlerinin kütleli yüzdeleri .....	131

Tablo 3.7.	Ticari dizel yakıtının ve belirlenen optimum şartlarda fındık yağı ve potasyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri ve ilgili standart değerler.....	145
Tablo 3.8.	Belirlenen optimum şartlarda fındık yağı ve potasyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin ortalama molekül kütlesi, kapalı formülü ile yapısındaki yağ asitlerinin türü ve yağ asidi metil esterlerinin kütleli yüzdeleri .....	145
Tablo 3.9.	Mısır yağı biyodizeli üretiminde kullanılan malzemelerin miktarı ve fiyatları.....	314
Tablo 3.10.	Fındık yağı biyodizeli üretiminde kullanılan malzemelerin miktarı ve fiyatları.....	314
Tablo 3.11.	Manyetik karıştırıcı ısıtıcının harcadığı elektrik miktarı ve tutarı.....	315
Tablo 3.12.	Üretilen biyodizellerin ve ticari dizel yakıtının litre fiyatları .....	316

## SEMBOLLER DİZİNİ

B05, B10, B15, B20	: Hacimsel olarak %5, 10, 15 ve 20 oranlarında biyodizel içeren biyodizel-dizel yakıtı karışımları
F	: Birim biyodizel fiyatı [TL/L]
K	: Viskozimetre bilyesinin sabit katsayısı [ $\text{mPa} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^3/\text{g} \cdot \text{s}$ ]
m	: Kütle [g]
$r^2$	: Korelasyon katsayısı
t	: Viskozimetre bilyesinin viskozimetre tüpü üzerinde işaretli yatay iki çizgi boyunca limit hızla düşme süresi [s]
T	: Sıcaklık [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$y_0, a, b, \dots, k$	: Regresyon katsayıları
$\rho$	: Yoğunluk [ $\text{kg}/\text{m}^3 \equiv \text{g}/\text{L}$ ], [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]
$\mu$	: Dinamik viskozite [ $\text{cP} \equiv \text{g}/\text{m} \cdot \text{s}$ ]
$\nu$	: Kinematik viskozite [ $\text{cSt} \equiv \text{mm}^2/\text{s}$ ]
w	: Belirsizlik [%]
X	: Karışımdaki hacimsel biyodizel oranı [%]

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Enerji, en yalın biçimiyle cisimlerin iş yapabilme kabiliyeti olarak tanımlanır. Ekonomik ve sosyal kalkınma için temel girdilerden olan enerjinin tüketimi, artan nüfus, şehirleşme, sanayileşme ve teknolojinin yaygınlaşmasına paralel olarak sürekli artış göstermektedir [1].

Enerji kaynakları, esas olarak yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynakları şeklinde ikiye ayrılabilir [1]. Yenilenemez enerji kaynakları, uzak olmayan bir gelecekte tükeneyeceği öngörülen enerji kaynaklarını, yenilenebilir enerji kaynakları ise oldukça uzun sayılabilecek bir gelecekte dahi tükenmeden kalabilecek ve kendisini yenileyebilen kaynakları ifade etmektedir [2]. Yenilenemez enerji kaynaklarına örnek olarak; kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil kökenli enerji kaynakları ile nükleer enerji; yenilenebilir enerji kaynaklarına örnek olarak ise güneş, rüzgâr, hidrolik, jeotermal, dalga-gelgit ve biyokütle enerjisi verilebilir.

Dünya enerji ihtiyacının büyük bir kısmının petrolden karşılanması nedeniyle petrol fiyatları sürekli artış göstermektedir. 1974 petrol krizi ve 1991 Körfez Savaşı, dünya petrol fiyatlarının artmasına neden olmuş ve özellikle ekonomisi zayıf olan ülkeleri derinden sarsmıştır. Ülkemiz de petrol fiyatlarındaki dalgalanmalardan en çok etkilenen ülkeler arasındadır [3].

Ayrıca dünyadaki fosil yakıt rezervlerinin miktarları kesin olarak bilinmemekle beraber, günümüzdeki tüketim oranları dikkate alındığında yaklaşık olarak doğalgazın 64 yıllık, ham petrolün 54 yıllık ve kömürün 112 yıllık bir rezerve sahip olduğu tahmin edilmektedir [2]. Bu tahmini süreler bir miktar artabilir veya azalabilir. Ancak bu durum fosil yakıt kaynaklarının yakın bir gelecekte tükeneyeceği gerçeğini ortadan kaldırmamaktadır. Göz önünde bulundurulması gereken başka bir durum da fosil kökenli yakıtlardan petrol ürünlerinin yaklaşık 1/3'ünün karayolu taşıtlarında tüketilmesi ve trafiğe çıkan taşıt sayısının her geçen yıl daha hızlı artmasıdır [3].

Diğer taraftan fosil kökenli yakıtların kullanımı durumunda ortaya çıkan karbonmonoksit (CO), karbondioksit (CO<sub>2</sub>), kükürt oksitler (SO<sub>x</sub>), yarıyanmış ve yanmamış hidrokarbonlar (H<sub>x</sub>C<sub>y</sub>), azot oksitler (NO<sub>x</sub>), kurşun (Pb) ve is gibi zararlı

emisyonlar çevre ve insan sağlığını olumsuz yönde etkilemektedir [3]. Bunların arasından özellikle karbondioksit sera etkisine neden olurken, kükürt oksitler havadaki su buharı ile reaksiyona girerek asit yağmurlarına neden olmaktadır.

Fosil kökenli yakıtlar hakkında yukarıda bahsedilen sorunlardan ötürü, bilim insanları, özellikle içten yanmalı motorlarda kullanılabilir yeni, ekonomik ve yenilenebilir enerji kaynaklarını araştırmaya devam etmektedirler. Ülkemizin tarım potansiyeli dikkate alındığında biyokütleden elde edilecek sıvı yakıtlar cazip hale gelmektedir. Sıvı yakıtlar içerisinde, termik verimi en yüksek içten yanmalı motor olan sıkıştırma-ateşlemeli motorlar (dizel motorları) için, bitkisel yağlardan üretilen biyodizel son yıllarda en önemli alternatif enerji kaynaklarından biri olarak büyük bir ilgi görmektedir. Bu çalışmada, tüm dünyada kullanılmaya başlanan ve Avrupa Birliği'nde dizel yakıtına belli oranlarda karıştırılması zorunlu hale gelen biyodizelin üretimi ve bazı yakıt özellikleri incelenmiştir.

## 1.2. İçten Yanmalı Motorlarda Kullanılan Yakıtlar

Motorlarda mekanik işi üretmek için gerekli olan ısı enerjisi, silindir içinde yakıt ile havanın oksijeni arasındaki yanma işlemi sonunda elde edilir. Motorların devir sayılarına bağlı olarak bu yanma reaksiyonları için ancak  $1/100 \div 1/1000$  saniye zaman ayrılmaktadır [4, 5]. Motorlarda kullanılan yakıtlar, bu kadar kısa süre içinde hava ile karışarak etkin bir biçimde yanabilmeli ve ekonomiklik açısından birçok özellikleri sağlayabilmelidir. Bu özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir [4, 5]:

- Yakıt-hava karışımının yanma odası dışında (karbüratörde veya supap gerisine püskürtme yapılarak) hazırlandığı veya emme stroğu sırasında direkt silindir içine püskürtmenin yapıldığı buji-ateşlemeli motorlarda (benzinli motorlar), yakıt kolaylıkla buharlaşabilmeli ve hava ile homojen bir karışım oluşturmalıdır. Silindir içinde yakıt-hava karışımının yanmadan hemen önce hazırlandığı sıkıştırma-ateşlemeli motorlarda (dizel motorlar) ise, basınçlı hava içine püskürtülen yakıtın çok ince parçacıklara ayrılabilmesi ve hava ile etkin bir şekilde karışabilmesi gerekir.
- Motor her ortam koşulunda kolaylıkla ilk harekete geçebilmelidir.
- Yakıtlar, yanma için ayrılan süre içinde kolaylıkla yanabilmelidir.

- Yanma sonunda, yanma odası çeperlerine yapışan karbon ve zift gibi artıklar oluşmamalıdır.
- Yanma ürünleri, yanma odası çeperleri ve supaplar gibi motor elemanlarında korozyona neden olmamalıdır.
- Yakıtın ısıl değeri yüksek olmalıdır.
- Kullanılan yakıt bol miktarda ve ucuz şekilde sağlanabilmeli ve kolaylıkla depolanabilmelidir [4, 5].

Yukarıda sıralanan özellikleri sağlamak üzere içten yanmalı motorlarda fosil kökenli geleneksel (benzin ve dizel) ve alternatif yakıtlar (hidrojen, etanol, metanol, biyodizel vb.) kullanılmaktadır.

### **1.2.1. Fosil Kökenli Geleneksel İçten Yanmalı Motor Yakıtları**

Buji-ateşlemeli ve sıkıştırma-ateşlemeli motorlarda geleneksel olarak sırasıyla fosil kökenli benzin ve dizel yakıtı kullanılmaktadır. Aşağıda bu yakıtların başlıca özellikleri özetlenmiştir.

#### **1.2.1.1. Benzinin Başlıca Özellikleri**

Buji-ateşlemeli motorlarda kullanılan benzin, kendiliğinden tutuşmaya karşı direnci (vuruntu dayanımı veya oktan sayısı) ve ısıl değeri yüksek, her hava koşulunda yakıt-hava karışımının oluşabilmesi için yüksek buharlaşabilirlik özelliğine sahip, bir kıvılcım ile kolayca tutuşabilen, zehirli olmayan, temiz ve kararlı bir yakıttır. Ek Tablo A-1'de benzinin bazı yakıt özellikleri verilmiştir.

#### **1.2.1.2. Dizel Yakıtının Başlıca Özellikleri**

Sıkıştırma-ateşlemeli motorlarda kullanılan dizel yakıtının, benzinin aksine kendiliğinden kolayca tutuşabilme özelliği (setan sayısı) yüksektir. Benzine kıyaslandığında, dizel yakıtının yoğunluğu yüksek, ısıl değeri ise biraz düşüktür. Soğukta akış özelliği, yağlayıcılığı ve viskozitesi motorun ve özellikle yakıt püskürtme sisteminin

güvenle çalışmasını sağlayacak niteliktedir. Dizel yakıtının buharlaşma özelliği benzinin aksine burada pek önemli değildir. Ek Tablo A-1’de dizel yakıtının bazı yakıt özellikleri verilmiştir.

### 1.2.2. Alternatif İçten Yanmalı Motor Yakıtları

İçten yanmalı motorlarda kullanılabilen alternatif yakıtlar gaz ve sıvı yakıtlar olarak aşağıdaki gibi sınıflandırılabilirler [3]:

#### A- Gaz Yakıtlar

1. Doğal Gaz (Sıvılaştırılmış Doğal Gaz (Liquefied Natural Gas (LNG)) veya Sıkıştırılmış Doğal Gaz (Compressed Natural Gas (CNG))
2. Sıvılaştırılmış Petrol Gazı (Liquefied Petroleum Gas (LPG))
3. Hidrojen
4. Biyogaz (Metan ( $CH_4$ ), Karbondioksit ( $CO_2$ ) ve diğer gazların karışımı)

#### B- Sıvı Yakıtlar

1. Alkoller (Metanol (Metil Alkol ( $CH_3OH$ )), Etanol (Etil Alkol ( $C_2H_5OH$ )) vb.)
2. Bitkisel Yağlar
3. Biyodizel

Yapısal özelliklerine bağlı olarak bu yakıtların her biri buji-ateşlemeli motorlarda, sıkıştırma- ateşlemeli motorlarda veya her ikisinde de kullanılmaya elverişli olabilir [3]. Her bir yakıtın kimyasal ve fiziksel özelliklerinden kaynaklanan üstün veya yetersiz yönleri bulunmaktadır [3]. Bu yakıtlar içerisinde, hidrojen, etanol, bitkisel yağlar ve biyodizel yenilenebilir niteliktedir. Ek Tablo A-1’de etanol, metanol, doğalgaz (metan), LPG (propan) ve hidrojen gibi alternatif yakıtların bazı yakıt özellikleri verilmiştir. Yapılan tez çalışmasının esas konusu olan biyodizel ve üretimi hakkındaki ayrıntılı bilgiler ise aşağıda verilmiştir.

### 1.3. Biyodizel

Biyodizel, “bitkisel ve hayvansal yağların yeni ya da kullanılmışlarından kimyasal yöntemler yardımıyla üretilen biyoyakıtlar kapsamında olan, çevre dostu, yenilenebilir sıvı



bir yakıttır” [1]. Bir başka anlatımla biyodizel, “orta uzunluktaki C16-C18 yağ asidi zincirlerini içeren metil veya etil ester tipi bir yakıttır” [6]. Uygulamada biyodizel, yeşil enerji, yeşil dizel, süper dizel, ya da halk deyimiyile yağ mazotu isimleriyle de anılmaktadır [1].

### **1.3.1. Biyodizelin Özellikleri**

#### **1.3.1.1. Yoğunluk**

Yoğunluk veya özkütle, bir maddenin birim hacminin kütlesi olarak tanımlanmaktadır. 15°C’de sırasıyla dizel yakıtının, bitkisel yağların ve biyodizellerin yoğunlukları genel olarak 830-840 kg/m<sup>3</sup>, 880-920 kg/m<sup>3</sup>, 860-900 kg/m<sup>3</sup> aralığındadır [7, 8, 9]. Biyodizelin yoğunluğu üretildiği yağın cinsine göre değişmektedir. Yoğunluk ölçümü genel olarak DIN EN ISO 3675 veya DIN EN ISO 12185 standartlarına uygun olarak yapılmaktadır. Biyodizelin yapısındaki hidrokarbon zincirinin uzunluğu kısalarak dallanma artarsa daha kompakt bir molekül yapısı elde edileceğinden biyodizelin yoğunluğu artar. Ayrıca transesterifikasyon reaksiyonu sonunda elde edilen biyodizelden gliserin yeterince uzaklaştırılmazsa yine biyodizelin yoğunluğu artar [10].

#### **1.3.1.2. Kinematik Viskozite**

Viskozite genel olarak sıvıların akmaya karşı gösterdiği iç direnç olarak tanımlanmaktadır. Biyodizelin kinematik viskozite standartları 40°C’de ASTM D6751 için 1,9-6,0 mm<sup>2</sup>/s, EN 14214 ve TSE 14214 için 3,5-5,0 mm<sup>2</sup>/s olarak belirlenmiştir [11]. Viskozitesi yüksek yakıt enjektörden püskürtüldükten sonra iyi bir şekilde atomize olamaz ve yanma kötüleşir. Bu durum motor performansını ve eksoz emisyonlarını olumsuz yönde etkiler. Ayrıca yine viskozitenin yüksek olması enjektörlerin tıkanmasına, segmanlarda karbon birikmesine ve yağlama yağının bozulmasına (seyrelmesine) sebep olmaktadır [12, 13]. Diğer akışkanlar gibi biyodizelin sıcaklığı artırıldığında moleküllerinin kinetik enerjileri artacağı için birbirleri üzerinden hızla kayalar ve viskoziteleri azalır [14]. Ayrıca biyodizelin viskozitesi dizel yakıtınıninkine göre daha yüksek olduğundan, biyodizel-dizel yakıtı karışımındaki biyodizel oranı arttıkça karışımın viskozitesi de artar. Biyodizelin

viskozitesi; yapısındaki hidrokarbonun çift bağ (doymamışlık) sayısı arttıkça azalırken hidrokarbon zincirinin uzunluğu arttıkça molekül bağ kuvveti de arttığı için artar [10, 12]. Biyodizelin viskozitesinin yüksek olması transesterifikasyon reaksiyonunun tam olarak başarıya ulaşmadığının göstergesidir [12]. Monogliseritlerin varlığı da biyodizelin viskozitesini belirgin şekilde artırmaktadır [10].

### 1.3.1.3. Setan Sayısı

Setan sayısı, yakıtın kendiliğinden tutuşabilirliğinin bir ölçüsüdür ve motor performansı, eksoz emisyonları ile motorun gürültü seviyesini etkileyen önemli bir karakteristik özelliktir. Yüksek setan sayılı yakıtların kendiliğinden tutuşma kabiliyetleri daha iyi olduğundan dizel motorlarında kullanılmaları durumunda motor performansı ve eksoz emisyon değerleri iyileşir. Bunun tersine, setan sayısı düşük olan bir yakıtın dizel motorlarda kullanımında tutuşma gecikmesi süresi uzayacağından dizel vuruntusu problemi meydana gelmektedir. Dizel vuruntusu, motor performansı ve eksoz emisyonlarını olumsuz etkilediği gibi motor elemanlarına zarar verir ve motor gürültüsünü de artırır [15]. Kullanılan yakıtın setan sayısının çok yüksek olması da yanmayı dolayısıyla motor performansı ve eksoz emisyonlarını olumsuz yönde etkilemektedir [13]. Setan sayısının belirlenmesi için dünya çapında standartlar hazırlanmıştır. Bu standartlara Amerika’da ASTM D613, uluslararası olarak da ISO 5165 örnek verilebilir [10]. Standartlara uygun olarak setan sayısı özel motorlar (CFR veya sıkıştırma oranı değiştirilebilir motor) yardımıyla belirlenmektedir. Fakat, setan indeksi olarak tanımlanan ampirik bir eşitlik yardımıyla da setan sayısı daha kolay ve ucuz bir şekilde belirlenebilir. Bu eşitlik:

$$\begin{aligned} \text{Setan İndeksi} = & 454,74 - 1641,416D + 774,74D^2 - 0.554T_{50} \\ & + 97,803[\log(T_{50})]^2 \end{aligned} \quad (1.1)$$

şeklindedir. Burada:

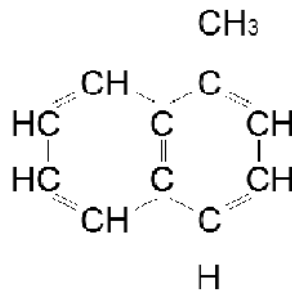
D: gr/mL cinsinden 15°C’deki yakıtın yoğunluğunu,

T<sub>50</sub>: Damıtma eğrisinde yakıtın %50’sinin damıtıldığı noktadaki °C cinsinden sıcaklık değerini temsil etmektedir [1].

Biyodizelin yapısında kütlece yaklaşık %10 oranında oksijen bulunduğundan setan sayıları dizel yakıtına göre daha yüksektir [16]. ASTM D975 standardında göre dizel yakıtının setan sayısı en az 40 olması gerekirken ASTM D6751 biyodizel standardına göre bu değer en az 47, EN 14214 standardına göre ise en az 51 olmalıdır [13]. Diğer yakıtlarda olduğu gibi biyodizelin setan sayısının belirlenmesinde de karşılaştırma yakıtları olarak düz zincirli bir hidrokarbon (normal parafin) olan normal setan ( $C_{16}H_{34}$ ) ve halka şeklinde molekül yapısına sahip aromatik bir hidrokarbon olan  $\alpha$ -metil naftalin ( $C_{10}H_7CH_3$ ) kullanılmaktadır [4]. Söz konusu hidrokarbonların molekül yapısı sırasıyla Şekil 1.1 ve Şekil 1.2’de verilmiştir. Bu iki hidrokarbon referans alındığında, hidrokarbonun daha derli toplu (kompakt) olması durumunda (hidrokarbon zincirinin kısalması, dallanmanın veya çift bağ sayısının artması veya halka şeklindeki molekül yapısına sahip hidrokarbonların artmasıyla) setan sayısının azaldığı söylenebilir. Örneğin, yapısında uzun zincirli doymuş hidrokarbonlar bulunan palm ve hayvansal yağ biyodizellerinin setan sayıları sırasıyla 62 ve 58 iken yapısında doymamış hidrokarbon bulunan soya ve ayçiçeği yağı biyodizellerinin setan sayıları sırasıyla 37 ve 45-52’dir [1]. Ayrıca, biyodizelin çeşitli nedenlerden dolayı oksidasyonu sonucunda oluşan peroksitler biyodizelin setan sayısını artırırken [12], propil veya bütül alkol gibi uzun zincirli alkoller kullanılarak üretilen biyodizellerin setan sayıları metil veya etil alkol kullanılarak üretilen biyodizellerinkine göre daha yüksektir.



Şekil 1.1. Normal setanın molekül yapısı [17]



Şekil 1.2.  $\alpha$ -metil naftalinin molekül yapısı [18]

#### 1.3.1.4. Isıl Değer

Bir yakıtın birim kütesinin veya hacminin tam yanması sonucunda ortaya çıkan enerjidir. Ağırlık sınırlaması olan taşıtlar için ısı değer çok önemlidir. Yakıtın ısı değerinin düşük olması durumunda motordan istenilen performansın elde edilebilmesi için daha fazla yakıtın tüketilmesi gerekir.

Hidrokarbonların zincir uzunluğu ve doymamışlık arttıkça (hidrojen/karbon oranı azaldıkça) ısı değer azalır. Biyodizelin ısı değeri oksijen içeriğinden dolayı (kütlesel olarak yaklaşık %10) dizel yakıtına göre daha düşüktür. Bu yüzden, aynı motor çalışma şartları altında dizel yakıtına göre biyodizel kullanımında motorun döndürme momenti ve gücü azalmaktadır. Genellikle biyodizelin ısı değeri 35 MJ/kg'dan daha büyüktür. Isıl değer DIN 51900-3 test metoduna göre belirlenmektedir [1].

#### 1.3.1.5. Düşük Sıcaklıkta Akış Özellikleri

Bulutlanma noktası, akma noktası ve soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklıkları yakıtların kış şartları için en temel akış özellikleridir. Bulutlanma noktası sıcaklığı, yakıt soğutulduğunda puslanmaya başladığı ve mumsu bir hal aldığı sıcaklıktır [10]. Akma noktası sıcaklığı, yakıtın akıcılığının devam ettiği en düşük sıcaklıktır [10]. Soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığı ise standart şartlarda soğutulan belirli hacimdeki bir yakıtın belirli bir zamanda standart filtre cihazından akmadığı en yüksek sıcaklıktır [11]. Akma noktası sıcaklığı, bulutlanma noktası sıcaklığından daima daha düşüktür. Bulutlanma noktası sıcaklığı genellikle akış iyileştiriciler olarak tanımlanan katkılardan etkilenmez. Akış özelliklerini iyileştirici katkılar düşük sıcaklıklarda yakıtın yapısında meydana gelen mumsu kristal yapıların küçülmesini sağlar veya oluşmasını engeller. Akma noktası katkıları yakıtın düşük sıcaklıkta jelleşmesini önler [10]. Biyodizel ve biyodizel-dizel karışımları dizel yakıtından daha yüksek akma ve bulutlanma noktası sıcaklığına sahiptir. Bu yüzden biyodizel kullanımında özellikle soğuk iklim koşullarında yakıt besleme elemanlarında ve motorun ilk hareketinde problemler meydana gelebilir. Bu sorunların önüne geçebilmek için ya biyodizele akış iyileştirici katkıları ilave edilmeli ya da biyodizel motora gönderilmeden önce çeşitli düzenekler yardımıyla ısıtılmalıdır [15]. Biyodizelin soğukta akış özelliklerini belirleyen kimyasal yapısal özellikleri, yapısında bulunan hidrokarbon zincirindeki dallanmalar, zincirin uzunluğu ve doymamışlık derecesidir [10].

Doymuş esterlere göre doymamış esterlerin moleküller arası etkileşimleri daha zayıf olduğundan daha düşük sıcaklıklarda kristalleşir [9]. Örneğin, doymamış yapıdaki kanola ve soya yağı metil esterlerinin bulutlanma noktası sıcaklıkları sırasıyla  $-5^{\circ}\text{C}$  ve  $0^{\circ}\text{C}$ , akma noktası sıcaklıkları  $-4^{\circ}\text{C}$  ve  $-10^{\circ}\text{C}$  iken, doymuş yapıdaki don yağı metil esterinin bulutlanma noktası sıcaklığı  $14^{\circ}\text{C}$  ve akma noktası sıcaklığı  $10^{\circ}\text{C}$ 'dir [10]. Yani soğukta akış özelliği dikkate alındığında doymamış yağlardan üretilen biyodizeller daha uygundur. Zincir uzunluğunun kısalması veya dallanmadaki artış da akış özelliklerinin iyileşmesine katkıda bulunur. Örneğin, izopropil alkol ( $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$ ) kullanılarak üretilen esterlerin (biyodizel), metil ( $\text{CH}_3$ ) veya etil ( $\text{C}_2\text{H}_5$ ) kullanılarak üretilen esterlere göre soğukta akış özellikleri daha iyidir [10].

#### **1.3.1.6. Parlama Noktası Sıcaklığı**

Parlama noktası sıcaklığı, yakıt buharının hava ile yanıcı bir karışım meydana getirebilmesi için yakıtın ulaşması gereken en düşük sıcaklık olarak ifade edilebilir [10]. Yanma noktası sıcaklığı ise, yakıt buharı tutuştuktan sonra alevin beş saniye devam etmesi için gereken sıcaklıktır [16]. Dizel yakıtın parlama noktası sıcaklığı  $55^{\circ}\text{C}$  olmasına rağmen bitkisel yağların parlama noktası sıcaklığı  $250-280^{\circ}\text{C}$ 'den daha fazla, biyodizellerin parlama noktası sıcaklığı ise  $120-220^{\circ}\text{C}$  civarındadır [1, 19]. Biyodizelin parlama noktası sıcaklığı dizel yakıtına göre daha yüksek olmasından dolayı biyodizel depolanması ve taşınması daha güvenlidir [16]. Fakat biyodizelin yapısında metanol bulunması halinde parlama noktası sıcaklığı azalır [10]. Genellikle benzin gibi kaynama noktası sıcaklığı düşük yakıtların parlama noktası sıcaklığı düşüktür. Bu yüzden benzin açık havada oldukça düşük atmosferik sıcaklıklarda alevlenebilir [16].

#### **1.3.1.7. Yağlayıcılık**

Motor elemanlarının (piston-segman bölgeleri, yakıt pompaları, enjektörler vb.) sürtünme ve aşınma problemlerinin giderilmesi için yağlanmaya ihtiyacı vardır. Günümüzde çevresel sorunlar nedeniyle dizel yakıtlarındaki kükürt miktarı düşürülmüştür. Kükürt miktarı düşürülmüş dizel yakıtlarının yağlayıcılık özelliği azaldığından, bu yakıtlar için yağlama özelliğini artıran katkılar kullanılmaktadır. Ancak bu katkılar yakıt besleme

elemanlarında tortular oluşmaktadır [12]. Biyodizelin viskozitesi yüksek olduğundan yağlayıcılık özelliği dizel yakıtına göre çok iyidir [14].

#### **1.3.1.8. Biyobozunabilirlik**

Biyodizeli oluşturan metil esterler doğada kolayca ve hızla parçalanarak bozunur. Yapılan biyolojik ayrışabilirlik testlerinde yaklaşık olarak, biyodizelin suda 28 günde %95'inin, dizel yakıtının ise %40'ının ayrışabildiği tespit edilmiştir. Biyodizelin %100 biyolojik ayrımı şekere benzer ve zehirli değildir [1, 14].

#### **1.3.1.9. Toksik Etki**

Biyodizelin olumsuz bir toksik etkisi bulunmamaktadır. Ağızdan alınmada biyodizel için öldürücü doz 17,40 g biyodizel/kg vücut ağırlığı iken sofr tuzu için bu değer 1,75 g tuz/kg vücut ağırlığı'dır. Yani tuz biyodizelden 10 kat daha yüksek öldürücü etkiye sahiptir [16].

#### **1.3.1.10. Depolama**

Dizel yakıtı için gerekli depolama yöntemi ve kuralları biyodizel için de geçerlidir. Biyodizel temiz, kuru, karanlık bir ortamda depolanmalı ve aşırı sıcaktan kaçınılmalıdır. Depo tankı malzemesi olarak yumuşak çelik, paslanmaz çelik, florlanmış polietilen ve florlanmış polipropilen seçilebilir [13].

#### **1.3.1.11. Su İçeriği**

Yakıtın belli oranlarda su içermesi, ısıl değerinin azalmasına neden olarak yanmayı olumsuz yönde etkilediği gibi yakıtın soğuğa karşı dayanıklılığını da azaltır [20]. Ayrıca, yüksek basınçlı enjeksiyon sistemlerinde su yakıttan ayrılarak enjektör sisteminde bölgesel çürümelere sebep olabilir [1]. Fakat su/yakıt emülsiyon oranının uygun olması durumunda yanma sıcaklığı azalır ve özellikle azotoksit (NO<sub>x</sub>) emisyonları azaltılabilir [20]. TS EN 14214 standardına göre biyodizelin su içeriği en fazla 500 mg/kg olmalıdır [1].

### **1.3.1.12. İyot Sayısı**

Biyodizelin üretildiği yağın yapısındaki çift bağ sayısına göre değişen iyot sayısı toplam doymamışlığın bir ölçüsüdür. Soya ve kanola yağı metil esterleri (biyodizel) yaklaşık olarak 133 ve 97 iyot sayısına sahiptir [10]. Biyodizelin iyot sayısının yüksek olması enjektör deliklerinde tıkanmalara ve yanma odasında polimerleşmeye sebep olmaktadır [1]. TS EN 14214 standardına göre biyodizelin iyot sayısı en fazla 120 olabilir. Amerikan biyodizel standardı olan ASTM D 6751’de iyot sayısına yer verilmemektedir [1]. Biyodizelin hidrokarbon zincirindeki çift bağ sayısını (doymamışlığı) hidrojenlemeyle azaltarak iyot sayısı azaltılabilir. Fakat bu durumda biyodizelin soğukta akış özellikleri kötüleşir. Bu nedenle araştırmacılar doymamış bağları hidrojenleme yapmaksızın kararlı kılacak katkıları üzerinde çalışmaktadır [10].

### **1.3.1.13. Karbon Artığı**

Karbon artığı enjektör deliklerinde veya yanma odasında karbon birikintisine sebep olmaktadır. Deneyle, biyodizelin pratikte yok denecek kadar az karbon artığı bıraktığını göstermiştir [1].

### **1.3.1.14. Yağlama Yağının Seyrelmesi**

Biyodizelin dizel motorlarında kullanımında yağlama yağının seyrelmesi problemi ortaya çıkmaktadır. Motor yağı ve biyodizelin motor içindeki direkt ilişkisi, yakıt enjeksiyon pompasında ve silindir içerisindeki yanma işlemi süresince olmaktadır. Araştırmalar, biyodizel kullanımında yağlama yağının seyrelmesinin % 4-5 oranında olduğunu göstermiştir. Piston-silindir arasındaki aşınmanın artması ile daha fazla yakıt (biyodizel veya biyodizel-dizel karışımı) yağlama yağına karışır ve sonuçta yağı bozar. Dizel yakıtı kullanımında, yağlama yağına karışan yakıtın büyük kısmı kısa sürede buharlaşırken, biyodizel kullanımında yakıtı oluşturan ester moleküllerinin kaynama noktası sıcaklıklarının yüksek ve birbirlerine yakın olması nedeniyle buharlaşma olmaz ve motor yağı kısa sürede bozulur [12].

### **1.3.1.15. Distilasyon Sıcaklığı**

Hayvansal ve bitkisel yağ esterleri nispeten benzer yapılu bileşikler oldukları için dizel yakıtına göre daha dar bir kaynama aralığına sahiptir ve bu aralık 325-350°C'dir. Bu değerler dizel yakıt için tespit edilen aralığın üst sınırına yakındır [10].

### **1.3.1.16. Oksidasyon Kararlılığı**

Biyodizelin kimyasal yapısı itibari ile oksidasyon kararlılığı dizel yakıtına göre çok daha düşüktür. Yağın kimyasal yapısı biyodizelin oksidasyon kararlılığını etkilemektedir. Özellikle ayçiçeği ve soya yağı gibi yapısında çoklu doymamış yağ asitleri bulunan yağların dolayısıyla bu yağlardan üretilen biyodizellerin oksidasyon kararlılığı düşüktür. Fakat palm yağı gibi yapısında doymuş yağ asitleri bulunan yağların oksidasyon kararlılığı ise yüksektir [12].

Oksidasyon kararlılığı depolama açısından çok büyük bir öneme sahiptir. Biyodizel içindeki oksidasyon ürünleri yakıtın depolama ömrünü etkilediği gibi tank, filtre ve yakıt sisteminde tortuların oluşmasına neden olur. Oksidasyon özelliği biyodizelin kalitesini etkiler. Oksidasyonu etkileyen parametreler olarak hava, sıcaklık, ışık, antioksidanların varlığı, hidroperoksit ve metal katalistler sayılabilir [14].

### **1.3.1.17. Asit Sayısı**

Asit sayısı biyodizelde bulunan serbest yağ asidinin bir ölçüsüdür. Asit sayısının fazla olması yakıt hattında ve enjektörlerde korozyona neden olur. Ham ya da rafineri yağların asit değerleri, kullanılmış atık yağlara oranla daha düşüktür [14].

## **1.3.2. Biyodizelin Standartları**

Biyodizelin dizel yakıtına alternatif olabilmesi için, kalite değerleri dizel yakıtının ki ile rekabet edebilmelidir. Önceleri biyodizel için belli bir standardın olmaması ve üretiminin şimdiki tekniklere göre ilkel sayılabilecek şekilde yapılması sonucunda kaliteli olmayan biyodizeller üretilmiştir. Bu da biyodizelin kötü bir yakıt olarak tanınmasına



sebepler olmuştur. Fakat biyodizel kullanımının yaygınlaşması bunlarla ilgili standartları da beraberinde getirmiştir [6].

Biyodizel için EN 590, EN 14214, EN 14213 Avrupa Birliği standartları, DIN 51606 Alman standardı ve ASTM D 6751 Amerikan standardı yürürlükte. Ülkemizde ise EN standartları temel alınarak hazırlanmış olan TS EN 14214 (Otobiyodizel için) ve TS EN 14213 (Yakıt biyodizeli için) standartları yürürlükte. Tablo 1.1'de EN 14214 Biyodizel Avrupa Standardı, Tablo 1.2'de ise ASTM D 6751 Biyodizel Amerikan Standardı verilmiştir.

Biyodizel saf ve dizel-biyodizel karışımları şeklinde yakıt olarak kullanılmaktadır. Bu yakıtlar aşağıdaki gibi adlandırılmaktadır [21].

B5 : %5 Biyodizel + %95 Dizel yakıtı

B20 : %20 Biyodizel + %80 Dizel yakıtı

B50 : %50 Biyodizel + %50 Dizel yakıtı

B100 : %100 Biyodizel

Tablo 1.1. EN 14214 Biyodizel Avrupa Standartları [6]

Yakıt özellikleri	Test metodu	Biyodizel
Yoğunluk, 15°C, kg/m <sup>3</sup>	EN ISO 3675	860-900
Kinematik viskozite, 40°C, cSt	EN ISO 3104	3,5-5,0
Alevlenme noktası, °C, min.	ISO/CD 3679	101
Soğukta filtre tıkanma Noktası, °C	DIN EN 116	0
15 Nisan-30 Eylül		-10
1 Ekim-15 Kasım		-20
16 Kasım-28 Şubat		
Karbon bakiye, Ağır. %'si, maks.	EN ISO 10370	0,3
Bakır korozyon testi, min.	EN ISO 2160	No:1
Oksidasyon stabilitesi, 110°C, saat, min.	EN 14112	6
Setan sayısı, min.	EN ISO 5165	51
Asit indisi, mg/kg, maks.	EN 14104	0,5
İyot indisi, maks.	EN 14111	120
Ester içeriği ağır. %'si, min.	EN 14103	96,5
Kükürt içeriği, mg/kg, maks.	EN ISO 14596	10
Su içeriği, mg/kg, maks.	EN ISO 12937	500
Sediment içeriği, mg/kg, maks.	EN 12662	24
Kül içeriği, Ağır. %'si, maks.	ISO 3987	0,02
Serbest gliserin içeriği, Ağır. %'si, maks.	EN 14105	0,02
Toplam gliserin içeriği, Ağır. %'si, maks.	EN 14105	0,25
Fosfor içeriği, mg/kg, maks.	EN 14107	10
Metanol içeriği, Ağır. %'si, maks.	EN 14110	0,2
Trigliserit içeriği, Ağır. %'si, maks.	EN 14105	0,2
Digliserit içeriği, Ağır. %'si, maks.	EN 14105	0,2
Monogliserit içeriği, Ağır. %'si, maks.	EN 14105	0,8
Alkali içeriği (Na, K), mg/kg, maks.	EN 14108	5
Linoleik asit metil esteri miktarı, Ağır. %'si, maks.	EN 14103	12

Tablo 1.2 ASTM D6751 Biyodizel Standardı [6]

Yakıt özellikleri	Test metodu	Biyodizel
Kinematik viskozite, 40°C, cSt	D 445	1,9-6,0
Alevlenme noktası, °C, min.	D 90	130
Bulutlanma Noktası, °C	D 2500	(-3)-(-12)
Karbon bakiye, Ağır. %'si, maks.	D 4530	0,05
Bakır korozyon testi, min.	D 130	No:3
Setan sayısı, min.	D 613	47
%90 Distilat Toplanma Sıcaklığı, °C, mak.	D 1160	360
Asit indisi, mg/kg, maks.	D 664	0,8
Kükürt içeriği, mg/kg, maks.	D 5453	0,05
Su ve sediment içeriği, Hac. %'si, maks.	D 2709	0,05
Sülfatlanmış kül içeriği, Ağır. %'si, maks.	D 874	0,02
Serbest gliserin içeriği, Ağır. %'si, maks.	EN 14105	0,02
Toplam gliserin içeriği, Ağır. %'si, maks.	EN 14105	0,25
Fosfor içeriği, mg/kg, maks.	EN 14107	10

### 1.3.3. Biyodizelin Üstünlükleri

Biyodizelin bazı üstün özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Dünyanın sadece bazı bölgelerindeki kaynaklara bağlı olmadığı ve üretimi için gerekli ağaçlar ile bitkiler tekrar yetiştirilebildiği (yenilenebilir) için ekonomik ve ulusal çıkarlara çok uygundur.
- Bitkisel hammaddelerden (tohumdan) üretildiği için kırsal kesimde sosyo-ekonomik yapının gelişmesine katkıda bulunur. Ayrıca, işsizliğin önemli boyutlara ulaştığı günümüzde yeni iş imkânlarının doğmasını sağlar ve göçün önlenmesine katkıda bulunur.
- Atık bitkisel ve hayvansal yağlardan bile kolayca üretilebilir.
- Biyolojik olarak ayrışabilir ve zehirli değildir.

- Biyodizel saf olarak veya dizel yakıtıyla her oranda karıştırılarak mevcut dizel motorunun yakıt enjeksiyon sisteminde ve yakıt dağıtım hattında herhangi bir değişiklik yapılmadan kullanılabilir.
- Biyodizelin setan sayısı dizel yakıtının setan sayısından daha yüksek olduğu için motor daha az vuruntulu çalışır.
- Biyodizel kütlece yaklaşık %10 oranında oksijen içerdiğinden yanma verimi daha yüksektir. Bu yüzden karbonmonoksit, partikül madde, yanmamış hidrokarbon emisyonları daha azdır.
- Yapısında aromatik bileşikler, kanserojen maddeler ve kükürt hemen hemen hiç yoktur.
- Dizel yakıtıyla karşılaştırıldığında biyodizel karbondioksitin atmosferde birikmesi sonucunda meydana gelen sera etkisine neden olmaz. Çünkü biyodizelin yanması sonucu oluşan karbondioksit, biyodizelin elde edildiği bitkiler tarafından fotosentez için tekrar kullanılır.
- Biyodizelin yağlayıcılık özelliği dizel yakıtına göre daha yüksek olduğundan motor ömrünü uzatır.
- Parlama noktası dizel yakıtına göre daha yüksektir. Bu yüzden biyodizelin taşınması ve depolanması daha güvenlidir.
- Dizel yakıtının depolanma koşullarında depolanabilir [1, 8, 15, 21, 22].

#### 1.3.4. Biyodizelin Yetersizlikleri

Biyodizelin bazı dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Isıl değeri dizel yakıtıninkine göre az da olsa düşüktür. Bu durum motor performansının azalmasına ve özgül yakıt tüketiminin artmasına neden olur.
- Viskozitesi dizel yakıtına göre daha yüksektir. Bu durum biyodizelin motorlarda soğuk iklim bölgelerinde ve saf olarak kullanımını sınırlandırıcı bir faktördür.
- Biyodizel kullanımında azotoksit emisyonları dizel yakıtı kullanımına göre artar. Ancak bu sorun yanma sıcaklığını azaltarak (yanmanın 1-3°KMA geciktirilmesi ile veya katalitik konvertör kullanılarak) aşılabılır.
- Saf (B100) kullanım durumunda özellikle yakıt donanımındaki hortum, bağlantı elemanı ve contaların uygun malzemeler ile değiştirilmesi gerekir [1].

### 1.3.5. Türkiye’de Biyodizelin Durumu

Türkiye biyodizelle ilgili ilk çalışmasını AB’den önce 1934 yılında “Bitkisel Yağların Tarım Traktörlerinde Kullanımı” adı altında Atatürk Orman Çiftliği’nde yapmıştır. Fakat 1934’ten sonra çeşitli nedenlerden dolayı biyodizel üretimi beklenen ilgiyi görememiştir. Tam anlamıyla Türkiye’deki biyodizel üretimi ilk olarak 2001 yılında, The Alternative Fuel Technologies Corp. tarafından Bursa’da gerçekleştirilmiştir. Şirket üretime 300 ton/ay’lık bir kapasite ile başlamıştır. Aynı yıl Sanayi ve Ticaret Bakanlığı’nda “Biyodizel Çalışma Grubu” oluşturulmuştur. Daha sonra 2003 Şubat’ında, PROKEM-Gebze/İstanbul, ilk olarak soya yağından biyodizel üretmiştir ve dizel yakıtı için öngörülen EN 14214 standardı sağlanmıştır. Konya’da “DUYSAK Otomotiv için Petrol Ürünleri” şirketi bir kısım çiftçiyle bir pilot bölge oluşturup biyodizel üretimi için girişimde bulunmuşlardır ve üretilen biyodizel tarım makinelerinde kullanılmıştır. Bursa’daki BURÇEV adlı şirketi 2003’ün sonunda kullanılmış yağdan biyodizel üretmiş ve üretim amaçlı ilk ruhsatnameyi almıştır [16]. Günümüzde 34 lisanslı biyodizel üreten şirket bulunmaktadır [23].

Biyodizel yasal olarak ilk kez 4.12.2003 tarihinde 5015 Sayılı Petrol Piyasası Kanunu’nda harmanlanan ürünler arasında yer almıştır. Kanunda biyodizelin ÖTV (Özel tüketim vergisi) dışında tutulması nedeniyle yatırımlar dünyaya paralel biçimde hızla artmıştır. 10.09.2004 tarihli ve 25579 sayılı Resmi Gazetede “Petrol Piyasasında Uygulanacak Teknik Kriterler Hakkında Yönetmelik” ve 17.06.2004 tarihli Petrol Piyasası Lisans Yönetmeliği ile “biyodizel” akaryakıt olarak kabul edilmiş ve ithalatı, dağıtımı, taşınması ve son kullanıcıya satışı lisans kapsamına alınmıştır. Fakat daha sonra Petrol Piyasasında haksız rekabet oluşturduğu iddialarının sonucunda 30.03.2006 tarihinde 5479 Sayılı Gelir Vergisi Kanunu’nda değişiklik yapılarak 3824.90.99.90.54 GTİP (Gümrük Tarife İstatistik Pozisyonu) numaralı biyodizele (Otobiyodizel) litrede 0,6498 YTL Özel Tüketim Vergisi getirilmiştir. 08.12.2006 tarihinde 26370 Sayılı Resmi Gazetede yayınlanan 05.06.2007 tarihli Bakanlar Kurulu Kararı ile 4760 sayılı Özel Tüketim Vergisi Kanunu’na Ekli 1 Sayılı listede yer alan mallarda uygulanan ÖTV ile yerli tarım ürünlerinden elde edilen otobiyodizelin, dizel yakıtına % 2 oranında harmanlanması ÖTV’den muaf tutulmuştur [24]. 27 Eylül 2010 tarihinde ise EPDK (Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu) tarafından yayınlanan tebliğe göre, 1 Ocak 2014’e kadar pazardaki dizel yakıtında hacimce %1 oranında yerel tarım ürünlerinden üretilmiş yağ asidi metil

esterinin (biyodizel) bulunması, bu miktarın 1 Ocak 2015'te %2'ye, 1 Ocak 2016'da en az %3'e çıkarılması önerilmektedir. Bu düzenlemeler, biyodizel üretimini teşvik ederek yakıt ithalatı gereksinimini azaltmayı amaçlamaktadır [25].

### 1.3.6. Dünyada Biyodizelin Durumu

Son yıllarda hızla artan biyodizel kullanımı, birçok gelişmiş ülkenin enerji politikası içinde yerini almıştır. 1988 yılında küçük bir çiftçi kooperatifinin Avusturya'da 500 ton/yıl kapasiteyle kurduğu tesiste başlayan biyodizel üretimi, 2010 yılı itibarıyla tüm dünyada toplam 17,01 milyon tona ulaşmıştır. Şu an Batı Avrupa'da 44 tesiste, Doğu Avrupa'da 29 tesiste, Amerika'da yaklaşık 35 tesiste biyodizel üretilmektedir [16]. Avrupa'da petrol ürünü yakıtlara uygulanan yüksek vergilerin biyodizele uygulanmaması 1994 Şubatında Avrupa Parlamentosu'nda kabul edilmiştir. Böylece biyodizelin dizel yakıtına alternatif olabilme şansı artmıştır [15]. Tablo 1.3'te Avrupa Birliği Ülkelerinin 2012 yılı sonu itibari ile biyodizel üretim miktarları verilmiştir:

Tablo 1.3. Avrupa Birliği Ülkelerinin 2012 yılı biyodizel üretim miktarları [26]

AB Biyodizel Üretimi (bin ton)			
Ülke	Üretim miktar	Ülke	Üretim miktar
Almanya	4968	Çek Cumhuriyeti	437
İspanya	4391	Finlandiya	340
Hollanda	2517	Romanya	277
Fransa	2456	Danimarka	250
İtalya	2310	İsveç	182
Polonya	884	Macaristan	158
Yunanistan	812	Slovakya	156
Belçika	770	Litvanya	156
İngiltere	574	Letonya	130
Avusturya	535	Slovenya	113
Portekiz	483	Toplam	22899

### 1.3.7. Biyodizel Üretimi

Bitkisel yağların yakıt olarak kullanımında karşılaşılan yüksek viskozite probleminin çözümü için dört yöntem önerilmektedir. Bunlar:

1. Seyreltme
2. Mikroemülsiyon oluşturma
3. Piroliz (Ayrıştırma)
4. Transesterifikasyon reaksiyonu (Yeniden esterleştirme)
5. Süper kritik alkol

yöntemleridir [6].

#### 1.3.7.1. Seyreltme

Seyreltme yönteminde bitkisel yağlar dizel yakıtı ile belirli oranlarda karıştırılır. Böylece hem yağın viskozitesi düşürülür hem de dizel yakıtı kullanımı azaltılmış olur [27]. Ayçiçeği, soya, aspir, kanola, yer fıstığı yağı ve kullanılmış atık yağlar seyreltme yönteminde sıklıkla kullanılan bitkisel yağlardır [1]. Oğuz vd. [28] tarafından yapılan çalışmada, hacimsel olarak %20, 50, 70 oranlarında ayçiçeği yağı içeren yağ-dizel yakıtı karışımları hazırlanmış ve 38 °C 'de 120,90 Redwood saniye olan ayçiçeği yağının viskozitesinin bu karışım oranlarında sırasıyla 35,50, 48,80 ve 64,70 Redwood saniyeye düştüğü görülmüştür. Viskozitesi azaltılan karışımlar daha sonra dizel motorda rahatlıkla kullanılmıştır [29]. Bu yöndeki bir başka çalışmada, dizel yakıtına kütlece %10 oranında kanola yağı ilave edilerek oluşturulan karışımın dizel motorda kullanılması durumunda olumlu sonuçların alındığı ve eksoz emisyonlarında bazı iyileşmelerin olduğu görülmüştür [19].

#### 1.3.7.2. Mikroemülsiyon Oluşturma

Genel olarak mikroemülsiyon, normalde karışmayan iki sıvı ile bir veya daha fazla amfifilin bir araya gelmesiyle oluşur. Biyodizel üretimi için mikroemülsiyon oluşturma yönteminde, metanol, etanol veya 1-bütanol ( $C_4H_9OH$ ) gibi kısa zincirli alkollerle bitkisel

yağ mikroemülsiyon haline getirilir [15, 30]. Bu yöntemle yağın viskozitesinin azalmasına rağmen, elde edilen emülsiyonun bünyesinde alkol bulunmasına nedeniyle setan sayısı ve ısı değeri azalır ki bu durum emülsiyonun motorlarda kullanımı sırasında motor performansı ve eksoz emisyonlarını olumsuz yönde etkiler [15]. Ayrıca yine alkol içeriğinden dolayı emülsiyon düşük sıcaklıkta ayrışma eğilimi gösterir [30].

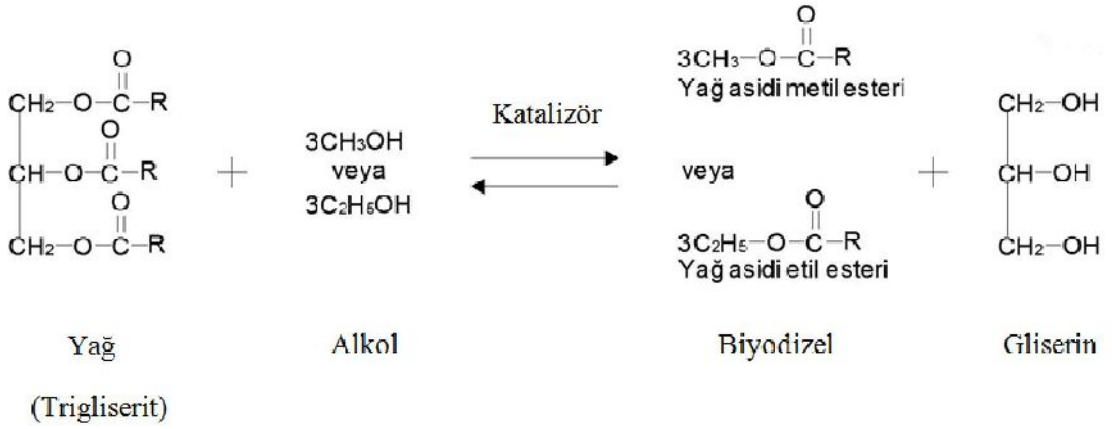
### **1.3.7.3. Piroliz (Ayrıştırma)**

Piroliz veya kraking, oksijen varlığında bitkisel yağların, alkanlar ( $C_nH_{2n+2}$ ), alkenler ( $C_nH_{2n}$ ), alkadienler ( $C_nH_{2n-2}$ ), karboksilik asitler, aromatik bileşikler ve az miktarda gaz bileşikler vermek suretiyle termal olarak bozunmasıdır. Yani piroliz yöntemi, ısı etkisi ile kimyasal bağların daha küçük moleküller oluşturmak üzere kırılması işlemidir [19, 31]. Yöntemin esası, bitkisel ve hayvansal yağların termal bozunmasıyla dizel yakıtlarda bulunan olefin ve parafin türü bileşiklerin elde edilmesine dayanmaktadır [31]. Bu yöntem ile yağın viskozitesi oldukça düşürülmektedir, fakat işlemler ilave masraflar getirmektedir [29].

### **1.3.7.4. Transesterifikasyon**

Transesterifikasyon reaksiyonunda, yağın (bitkisel yağlar, hayvansal yağlar, evsel atık yağlar) yapısında bulunan yağ asitleri bir katalizör eşliğinde (bazik, asidik katalizörler ve enzimler) kısa zincirli bir alkol (metanol, etanol vb.) ile tepkimeye girerek yağ asidi alkil esterlerini (biyodizel) ve gliserini meydana getirirler. Bir başka ifade ile, ester yapısındaki yağ transesterifikasyon reaksiyonu sonunda yeniden esterleşerek yağ asidi alkil esterini oluşturur [16, 32]. Ayrıca transesterifikasyon reaksiyonu sonunda oluşan üründe alkol, katalizör, mono-, di-, trigliseritler de bulunabilir [16]. Transesterifikasyon reaksiyonu esnasında, bitkisel yağın kalın (yüksek viskozite) ve yapışkan olmasına neden olan bünyesindeki gliserin (gliserol veya gliserid) uzaklaştırılarak yağın incilmesi yani viskozitesinin azalması sağlanır [30]. Transesterifikasyon reaksiyonunun genel denklemi Şekil 1.3'te verilmektedir.

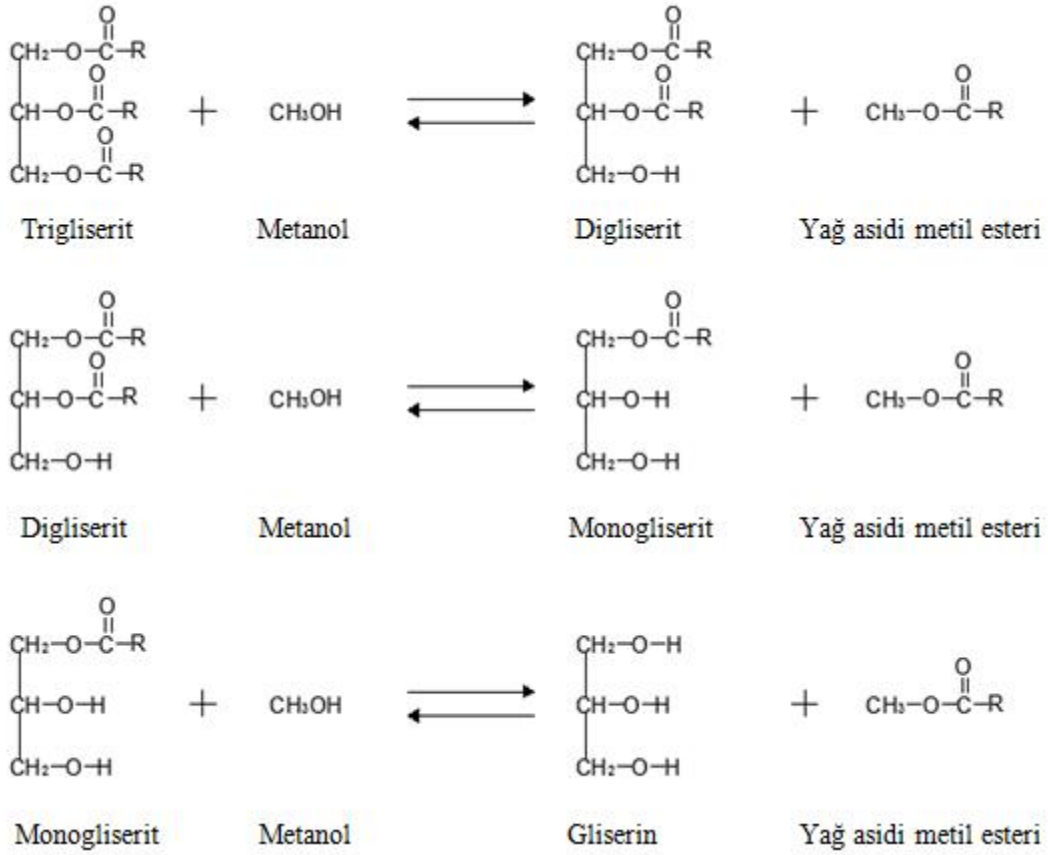




Şekil 1.3. Transesterifikasyon reaksiyonunun genel denklemi [15]

Transesterifikasyon reaksiyonu daha açık bir şekilde Şekil 1.4'te verilmiştir. Söz konusu şekilde görüldüğü gibi, transesterifikasyon reaksiyonu ardışık üç reaksiyondan meydana gelir. Bu reaksiyonlarda, öncelikle trigliseritten digliserit, daha sonra digliseritten monogliserit ve son olarak monogliseritten gliserin elde edilir. Her bir reaksiyonunun sonunda bir mol yağ asidi esteri meydana geldiğinden transesterifikasyon reaksiyonu sonunda üç mol yağ asidi esteri üretilmiş olur [16].

Transesterifikasyonun bir diğer adı da alkolizdir. Literatürde bu işlem metanol kullanıldığında metanoliz, etanol kullanıldığında ise etanoliz olarak adlandırılmıştır [16]. Metanolizde oluşan ürün yağ asidi metil esteri, etanolizde ise yağ asidi etil esteridir. Her iki ürün de biyodizeldir [15].



Şekil 1.4. Transesterifikasyon reaksiyonunun basamakları [33]

Zhou [34] tarafından sunulan yüksek lisans tezinde, biyodizel üretiminde kullanılan yöntemler birbirleri ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 1.4'te özetlenmiştir. Transesterifikasyon reaksiyonu yönteminde soya yağı metil esteri, seyreltme yönteminde % 50 bitkisel yağ- % 50 dizel yakıtı karışımı, mikroemülsiyon oluşturma yönteminde ise % 52,70 yağ, % 13,30 metanol, % 2 oktanol ve % 1 setan düzenleyici kullanılmıştır. Tablo 1.4'te görüldüğü gibi, transesterifikasyon reaksiyonu sonunda üretilen biyodizelin yakıt özellikleri diğer yöntemler ile üretilen biyodizellerinkine göre dizel yakıtının özelliklerine daha yakındır. Ayrıca, transesterifikasyon reaksiyonunun düşük basınç ve sıcaklıklarda gerçekleşmesi, ara bileşenler olmadan direkt biyodizelin üretilmesi, zehirli hiçbir maddeye üretim aşamasında ihtiyacın duyulmaması gibi nedenlerden dolayı transesterifikasyon reaksiyonu günümüzde en çok tercih edilen yöntemlerin başında gelmektedir [12]. Bu nedenlerden dolayı, sunulan tez çalışmasında da biyodizel üretimi için transesterifikasyon reaksiyonu yöntemi kullanılmıştır.

Tablo 1.4. Biyodizel üretim yöntemlerinin karşılaştırılması [34]

Yakıt özellikleri	Test standardı	Dizel	Biyodizel üretim yöntemi			
			Transesterifikasyon	Seyreltme	Mikroemülsiyon	Piroliz
Viskozite v [cSt]	D445	2,39	4,08	4,88	11,2	10,2
Setan sayısı	D613	45,8	46,2	-	-	43
Bulutlanma noktası sıcaklığı T[°C]	D2500	-19	2	-	-	-
Akma noktası sıcaklığı T[°C]	D97	-23	1	-	-	2
Motor testi*	200 saat	Başarılı	Başarılı	Başarılı	Başarılı	-

\*Motor testi EMA (Engine Manufacturers Association) Motor İmalatçıları Birliği tarafından belirlenen yöntem ile gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1.5'te bazı yağların ve bu yağlardan üretilen metil esterlerin (biyodizel) yakıt özellikleri verilmiştir. Söz konusu tablo incelendiğinde, bitkisel yağlardan transesterifikasyon reaksiyonu ile üretilen biyodizellerin viskozite ve yoğunluk değerleri ile parlama, bulutlanma ve akma noktası sıcaklıklarının azaldığı; ısı değer ve setan sayılarının ise arttığı görülmüştür. Bulutlanma ve akma noktası sıcaklığının azalması biyodizelin akış özelliğinin saf yağlara göre daha iyi olduğunu göstermektedir. Viskozite ve yoğunluğun azalması ile ısı değer ve setan sayısının artması biyodizelin dizel yakıtına daha iyi bir alternatif yakıt olduğunu kanıtlar niteliktedir. Aynı tablodan, biyodizellerin saf dizel yakıtına göre, viskozite, yoğunluk, setan sayıları ile bulutlanma, akma ve parlama noktası sıcaklığı değerlerinin yüksek, alt ısı değerinin ise daha düşük olduğu görülmektedir.

Tablo 1.5. Bazı yağlar ve metil esterleri ile dizel yakıtının bazı yakıt özellikleri [19, 35]

Yakıt türü	40°C'de kinematik viskozite $v$ [mm <sup>2</sup> /s]	Setan sayısı	Alt ısııl değer $H_{alt}$ [kJ/kg]	Bulutlanma noktası sıcaklığı $T$ [°C]	Akma noktası sıcaklığı $T$ [°C]	Parlama noktası sıcaklığı $T$ [°C]	15°C'de yoğunluk $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Soya yağı	28,08	37,90	40115	-4	-18	242	905,0
Soya yağı biyodizeli	4,20	46,98	40534	-9	-20	174	863,3
Susam yağı	25,78	40,20	39445	1	-10	245	899,0
Susam yağı biyodizeli	4,20	50,48	40395	-6	-14	170	867,2
Kanola yağı	31,23	37,60	39874	-14	<-30	234	903,0
Kanola yağı biyodizeli	3,95	56,07	40123	-13	<-30	208	865,2
Pamuk yağı	27,02	41,80	39173	-1	-17	218	883,0
Pamuk yağı biyodizeli	3,63	52,05	40196	-9	-20	127	855,8
Dizel yakıtı	2,00-3,50	51,00	42500	-15	-33	55	830-840

\* Belirtilmemiş.

### 1.3.7.5. Süper Kritik Alkol

Bu yöntemde reaksiyon, transesterifikasyon reaksiyonundan farklı olarak, metil alkolün kritik sıcaklık ve basıncında (sırasıyla 512 K ve 8 MPa) katalizör kullanılmadan gerçekleştirilir [1]. Süper kritik sıcaklıkta metanolün dielektrik sabitindeki azalma

sebebiyle tek faz oluşur ve böylece bitkisel yağ ile metanol fazlarının ayrılmasından kaynaklanan problemler meydana gelmez. Bitkisel yağ ile metanol karışımının tek fazlı bir sisteme dönüşmesi reaksiyonun 2-4 dakika gibi çok kısa bir sürede gerçekleşmesini sağlar. Bunun ötesinde katalizör kullanılmadığı için biyodizelin saflaştırılması çok daha kolaydır. Fakat üretim maliyeti yüksektir [10].

### **1.3.8. Transesterifikasyon Reaksiyonuna Etki Eden Faktörler**

Transesterifikasyon reaksiyonuna etki eden faktörler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Serbest yağ asidi ve nem miktarı
- Katalizör cinsi ve oranı
- Alkol/yağ mol oranı
- Reaksiyon süresi ve sıcaklığı
- Karıştırma şiddeti [10]

Söz konusu faktörlerden katalizör cinsi ve oranı, reaksiyon sıcaklığı ve süresi ile alkol/yağ mol oranı bu tezin kapsamında ayrıntılı olarak incelenecek olan parametrelerdir.

### **1.4. Literatür Araştırması**

Biyodizel ile ilgili çalışmaların geçmişi çok eskiye uzanmakla birlikte bu alandaki çalışmalar özellikle son yıllarda yoğunlaşmıştır. Biyodizel üretimi, transesterifikasyon reaksiyonuna etki eden parametrelerin üretilen biyodizelin fiziksel ve kimyasal özelliklerine etkilerinin incelenmesi ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yakıt özelliklerinin belirlenmesine yönelik başlıca çalışmalar kronolojik sırayla aşağıda verilmiştir.

Tat ve Van Gerpen [36] 1999'da, 1 ve 2 numara dizel yakıtına kütleli olarak %20, 50 ve 75 oranlarında soya yağı biyodizeli ilave edilerek elde edilen karışımların kinematik viskozitelerinin sıcaklık ile değişimlerini incelemiştir. Yakıtların kinematik viskozite değerleri ASTM D445-88 standartlarına uygun olarak, kristalleşmenin başladığı sıcaklıktan 100 °C'ye kadar ölçülmüştür. Saf soya yağı biyodizelinin, % 75, 50, 20 oranlarında biyodizel içeren biyodizel-2 numara dizel yakıtı karışımlarının, saf 2 numara

dizel yakıtının, %75, 50, 20 oranlarında biyodizel içeren biyodizel-1 numara dizel yakıtı karışımlarının ve saf 1 numara dizel yakıtının sırasıyla kristalleşmeye başlama sıcaklıklarının yaklaşık olarak 0°C, -5°C, -9°C, -12°C, -18°C, -5°C, -10°C, -18°C, -20°C olduğu belirlenmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, herhangi bir sıcaklık için 1 veya 2 numara dizel yakıtına soya yağı biyodizeli ilave edildikçe, elde edilen biyodizel-dizel yakıtı karışımının kinematik viskozitesinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca herhangi bir biyodizel-dizel yakıtı karışımı için sıcaklık azaldıkça karışımın kinematik viskozitesinin hızlıca arttığı belirlenmiştir. Çalışmada, saf biyodizel ve karışımlarının kinematik viskozitelerini deney yapmadan sayısal olarak belirlemek için literatürden yararlanılarak iki denklem kullanılmıştır. Bu denklemlerden birincisi,

$$\text{Inv} = A + \frac{B}{T} + \frac{C}{T^2} \quad (1.2)$$

şeklindedir. Burada,  $v$  [cSt] kinematik viskoziteyi,  $T$  [K] sıcaklığı,  $A$ ,  $B$  ve  $C$  akışkana ait katsayıları ifade etmektedir. Söz konusu denklem kullanılarak hesaplanan kinematik viskozite değerleri ile ölçülen kinematik viskozite değerlerinin birbirine çok yakın olduğu ve bu denklemin en küçük korelasyon katsayısının ( $R^2$ ) 0,9995 olduğu belirtilmiştir. Bir diğer denklem ise,

$$\log v_K = m_1 \log v_1 + m_2 \log v_2 \quad (1.3)$$

şeklindedir. Burada,  $v_K$  karışımının kinematik viskozitesini [cSt],  $v_1$  karışımdaki 1. bileşenin kinematik viskozitesini [cSt],  $m_1$  1. bileşenin kütle oranını,  $v_2$  karışımdaki 2. bileşenin kinematik viskozitesini [cSt] ve  $m_2$  2. bileşenin kütle oranını temsil etmektedir. Bu denklem kullanılarak hesaplanan kinematik viskozite değeri ve ölçülen kinematik viskozite değerleri arasındaki en yüksek farkın ise, %75, 50, 20 oranlarında biyodizel içeren biyodizel- 2 numara dizel yakıtı karışımları için sırasıyla %1,47, 2,05, 2,00'den daha az olduğu belirtilmiştir.

Tat ve Van Gerpen [37] 2000'de, 1 ve 2 numara dizel yakıtına kütle oranı olarak %20, 50 ve 75 oranlarında soya yağı biyodizeli ilave edilerek elde edilen karışımların bağıl yoğunluklarının sıcaklık ile değişimlerini araştırmışlardır. Deney sonuçları incelendiğinde, herhangi bir sıcaklık için 1 veya 2 numara dizel yakıtına soya yağı biyodizeli ilave

edildikçe elde edilen biyodizel-dizel yakıtı karışımının bağıl yoğunluğunun arttığı, ayrıca herhangi bir biyodizel-dizel yakıtı karışımı için sıcaklık arttıkça karışımın bağıl yoğunluğunun azaldığı görülmüştür. Ölçülen bağıl yoğunluklara en küçük kareler regresyonu kullanılarak eğri uyumlandığında, her iki dizel yakıtının ve biyodizel karışımlarının bağıl yoğunlukları için,

$$\gamma = a + bT \quad (1.4)$$

şeklinde birinci dereceden doğrusal bir denklem elde edilmiştir. Burada, T [°C] sıcaklığı, a ve b korelasyon katsayılarını temsil etmektedir. Bu denklem kullanılarak belirlenen bağıl yoğunluklar ile ölçülen bağıl yoğunluklar arasındaki en yüksek farkın %0,22 olduğu hesaplanmıştır.

Encinar ve arkadaşları [38] 2002'de, enginar tohumu yağından etil ester üretimini ve sırasıyla reaksiyon sıcaklığı, katalizör oranı ve türü, etil alkol/yağ mol oranı gibi transesterifikasyon reaksiyonuna etki eden parametrelerin ester verimine etkilerini incelemiştir. Deneylerde reaksiyon süresi 120 dakikada sabit tutulmuştur. Üretilen biyodizellerin etil ester içerikleri gaz kromatografisi cihazı ile tespit edilmiştir. Biyodizellerin yoğunluk, viskozite, üst ısıl değer, setan indeksi, bulutlanma noktası sıcaklığı, akma noktası sıcaklığı, distilasyon sıcaklığı, parlama noktası sıcaklığı değerleri ise ISO normlarına uygun olarak belirlenmiştir. Kullanılan yağın yapısında kütlece, %11-14 oranında palmitik, %3 oranında stearik, %25 oranında oleik, %56 oranında linoleik asit bulunduğu vurgulanmıştır. Reaksiyon sıcaklığının etil ester verimine etkisinin incelendiği deneyler, 9:1 alkol/yağ mol oranında etil alkol ile yağın kütlece %1,00'i kadar sodyum hidroksit kullanılarak farklı sıcaklıklarda (25, 50 ve 75 °C) gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, 75, 50 ve 25°C reaksiyon sıcaklıklarında üretilen biyodizellerin sırasıyla etil ester verimlerinin %93,1, 92,5, 91,6 olduğu, ilk 10 dakikada etil ester veriminin hızlıca artarak en yüksek değerlere kadar ulaştığı daha sonra reaksiyon dengeye ulaştığı için etil ester verimindeki artışın çok az olduğu görülmüştür. 25 °C 'deki yoğunluğun, 40 °C 'deki kinematik viskozitenin, üst ısıl değer, bulutlanma noktası sıcaklığının, akma noktası sıcaklığının, parlama noktası sıcaklığının, etil ester veriminin, setan indeksinin, hacimce % 50 distile olma sıcaklığının sırasıyla; 25 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen biyodizel için 870 kg/m<sup>3</sup>, 4,59 cSt, 39,90 MJ/kg, -3°C, -7°C, 185°C, %91,6, 49,2, 351°C olduğu, 50°C reaksiyon sıcaklığında üretilen biyodizel için 870 kg/m<sup>3</sup>,

4,17 cSt, 40,00 MJ/kg, -4°C, -7°C, 185°C, %92,5, 49,2, 355°C olduğu, 75°C reaksiyon sıcaklığında üretilen biyodizel için ise 870 kg/m<sup>3</sup>, 3,43 cSt, 40,00 MJ/kg, -3°C, -6°C, 188°C, %93,2, 49,1, 354°C olduğu belirlenmiştir. En yüksek etil ester veriminin elde edildiği 75°C optimum parametre olarak seçilmiştir. Katalizör oranı ve türünün etil ester verimine olan etkisinin incelendiği deneyler, 9:1 alkol/yağ mol oranında etil alkol ile farklı oranlarda (%0, 0,25, 0,50, 0,75, 1,00 ve 1,50) sodyum hidroksit veya potasyum hidroksit kullanılarak 75°C reaksiyon sıcaklığında ve iki saat sürede gerçekleştirilmiştir. Her iki katalizör kullanımında da, ilk 10 dakikalık sürede etil ester verimlerinin hızlıca artarak en yüksek seviyelere kadar ulaştığı daha sonra reaksiyon dengeye ulaştığı için etil ester verimindeki artışın çok az olduğu belirlenmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, %1,50 oranında katalizör kullanıldığında emülsiyon ve jel oluşumunun hızlanması nedeniyle üretilen biyodizelin viskozitesinin arttığı görülmüştür. Çok uzun reaksiyon sürelerinde, farklı oranlarda katalizörler kullanılsa bile aynı değerlerde ester verimlerinin elde edilebileceği fakat katalizör oranı arttıkça reaksiyon süresinin kısaldığı belirtilmiştir. 25°C'deki yoğunluğun, 40°C'deki kinematik viskozitenin, üst ısıl değerin, bulutlanma noktası sıcaklığının, akma noktası sıcaklığının, parlama noktası sıcaklığının, etil ester veriminin, setan indeksinin, hacimce % 50 distile olma sıcaklığının sırasıyla; % 1,00 oranında sodyum hidroksit kullanılarak üretilen etil ester için 870 kg/m<sup>3</sup>, 3,43 cSt, 40,00 MJ/kg, -3°C, -6°C, 188°C, %93,2, 49,10, 354°C olduğu, % 1,00 oranında potasyum hidroksit kullanılarak üretilen etil ester için ise 870 kg/m<sup>3</sup>, 4,59 cSt, 40,00 MJ/kg, -2°C, -8°C, 185°C, %90,4, 48,3, 355°C olduğu belirlenmiştir. En yüksek etil ester verimi ve en düşük kinematik viskozite değerinin elde edildiğinden %1,00 oranı optimum parametre olarak kabul edilmiştir. Alkol/yağ mol oranının etil ester verimine olan etkisinin incelendiği deneyler, farklı mol oranlarında etil alkol (3:1, 6:1, 9:1, 12:1 ve 15:1) ile %1,00 oranında sodyum hidroksit kullanılarak 75°C reaksiyon sıcaklığında ve iki saat sürede gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, mol oranı arttıkça ester veriminin arttığı fakat aşırı alkol kullanımında (örneğin 15:1 mol oranında) gliserinin etil ester içerisindeki çözünürlüğü arttığı için verimin azaldığı görülmüştür. 25°C'deki yoğunluğun, 40°C'deki kinematik viskozitenin, üst ısıl değerin, bulutlanma noktası sıcaklığının, akma noktası sıcaklığının, parlama noktası sıcaklığının, etil ester veriminin, setan indeksinin, hacimce % 50 distile olma sıcaklığının sırasıyla; 3:1 mol oranında alkol kullanılarak üretilen biyodizel için 893 kg/m<sup>3</sup>, 8,43 cSt, 39,60 MJ/kg, 1°C, -7°C, 195°C, %62,1, 49,2, 334°C, 6:1 mol oranında alkol kullanılarak üretilen biyodizel için 870 kg/m<sup>3</sup>, 5,72 cSt,



39,80 MJ/kg, -1°C, -9°C, 184°C, %88,20, 49,00, 355°C, 9:1 mol oranında alkol kullanılarak üretilen biyodizel için 870 kg/m<sup>3</sup>, 3,43 cSt, 40,00 MJ/kg, -3°C, -6°C, 188°C, %93,2, 49,1, 354°C, 12:1 mol oranında alkol kullanılarak üretilen biyodizel için 870 kg/m<sup>3</sup>, 4,58 cSt, 39,90 MJ/kg, -3°C, -7°C, 190°C, %94,50, 48,40, 354°C, 15:1 mol oranında alkol kullanılarak üretilen biyodizel için ise 872 kg/m<sup>3</sup>, 4,69 cSt, 39,80 MJ/kg, -3°C, -6°C, 187°C, %89,80, 49,00, 355°C olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, %1,00 oranında sodyum hidroksit ile 9:1 veya 12:1 alkol/yağ mol oranında etil alkol kullanılarak 75°C reaksiyon sıcaklığında üretilen biyodizelin en yüksek etil ester verimine sahip olduğu belirlenmiştir.

Kerschbaum ve Rinke [39] 2004'te, transesterifikasyon reaksiyonu yöntemiyle bitkisel atık yağ ve kolza yağı kullanılarak üretilen biyodizellerinin dinamik viskozitelerinin sıcaklıkla değişimlerini incelemişlerdir. Her biyodizelin dinamik viskozite değerleri 258,15 K'den 273,15 K'ye kadar 1'er K, 273,15 K'den 303,15 K'ye kadar ise 5'er K aralıklarla ölçülmüştür. 273 K'den yüksek sıcaklıklarda tüm biyodizellerin dinamik viskozite değerlerinin birbirlerine çok yakın olduğu ve bu sıcaklık aralığında biyodizellerin dinamik viskozitelerini hesaplamak için üstel bir denklemin türetildiği belirtilmiştir. Bu denklem ile elde edilen dinamik viskozite değerleri ile ölçülen değerlerin birbirlerine çok yakın olduğu görülmüştür. 273 K'den düşük sıcaklıklarda ise, sıcaklığın azalmasıyla biyodizellerin dinamik viskoziteleri farklı eğilimler göstermiştir. Bu durumun, düşük sıcaklıklarda kristalleşme nedeni ile farklı biyodizellerin kimyasal yapılarında farklı değişimlerin meydana gelmesinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Sonuç olarak, 273 K'den düşük sıcaklıklarda dört farklı biyodizel için dört farklı denklem türetilmiştir.

Vicente ve arkadaşları [40] 2004'te, bazik katalizörler (sodyum hidroksit, sodyum metoksit, potasyum hidroksit ve potasyum metoksit) kullanılarak rafine ayçiçeği yağından transesterifikasyon reaksiyonu ile metil ester üretimini araştırmışlardır. Deneyler farklı bazik katalizörlerin etkisini araştırmak için, 60 g yağ, 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol ile yağın kütlece %1,00'i kadar katalizör kullanılarak 65°C reaksiyon sıcaklığında ve 4 saat sürede gerçekleştirilmiştir. Reaksiyon sonunda elde edilen karışım, bir ayırma hunisine alınarak üç saat bekletilmiş ve gözle görülür bir faz ayrımı meydana geldiğinde üst faz yani metil ester fazı alınmıştır. Çalışmada sıklıkla bahsi geçen ürün verimliliği, saflaştırma işleminden sonra elde edilen ürünün kütlesinin başlangıçta kullanılan yağın kütlesine oranı olarak, ester içeriği ise reaksiyon kalıntısı metil alkol, katalizör ve sabundan arındırılan son ürünün yapısındaki metil esterlerin kütlesine yine o son ürünün kütlesine oranı olarak tanımlanmıştır. Deney sonuçlarına göre, ester içeriği ve ürün verimliliği

sırasıyla sodyum hidroksit kullanımında % 99,71, % 86,71 olarak; potasyum hidroksit kullanımında %99,76, %91,67 olarak; sodyum metoksit kullanımında %99,72, %99,33 olarak; potasyum metoksit kullanımında ise % 99,52, % 98,46 olarak belirlenmiştir. Görüldüğü gibi, farklı katalizörler kullanarak elde edilen biyodizellerin ester içerikleri neredeyse birbirlerine çok yakın iken trigliseridlerin ve serbest yağ asitlerinin sabunlaşması nedeniyle ürün verimlilikleri farklılıklar göstermiştir. Özellikle, ham madde olarak kullanılan rafine ayçiçeği yağının asit değerinin 0,45 mg KOH/g olması nedeniyle, serbest yağ asitlerden ziyade trigliseridlerin sabunlaşması ürün verimliliğini azaltmıştır. Katalizör türleri karşılaştırıldığında, sodyum veya potasyum metoksit kullanımında sodyum veya potasyum hidroksit kullanımına göre daha yüksek ürün verimliliği elde edilmiştir. Bu durum, sodyum veya potasyum hidroksitin hidroksil grubu ( $\text{OH}^-$ ) içermesinden dolayı metil alkol içerisinde çözündüğünde su meydana gelirken, sodyum veya potasyum metoksitin alkol içerisinde çözünmesinde ise suyun oluşmamasına bağlanmıştır. Farklı katalizör türleri kullanılarak üretilen biyodizellerin bazı önemli fiziksel özellikleri de incelenmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre, kütlece yüzde monogliserid, serbest gliserin, ve toplam gliserin içeriği ile asit değeri ve iyot sayısı sırasıyla; sodyum hidroksit kullanımında %0,295, %0,0033, %0,0793, 0,033 mg KOH/g, 128,1 mg  $\text{I}_2$ /g olarak, potasyum hidroksit kullanımında % 0,24, % 0,0032, % 0,0652, 0,0085 mg KOH/g, 127,7 mg  $\text{I}_2$ /g olarak, sodyum metoksit kullanımında % 0,285, % 0,0040, % 0,0780, 0,007 mg KOH/g, 128,5 mg  $\text{I}_2$ /g olarak ve potasyum hidroksit kullanımında ise %0,48, %0,0042, %0,1280, 0,05 mg KOH/g, 128,1 mg  $\text{I}_2$ /g olarak belirlenmiştir. Her dört katalizör türü kullanımında da monogliserid içeriğinin standartlarda belirtilen (en fazla %0,80) değerden düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, her dört katalizörün kullanılması durumunda da ester içeriklerinin neden yüksek olduğunu açıklamaktadır. Toplam gliserin içeriklerinin standartlarda belirtilen değerden (en fazla %0,25) düşük olması saflaştırma işleminin tam olarak yerine getirilmesinden bir diğer ifade ile gliserinin iyice süzülmesinden kaynaklanmaktadır. Biyodizel içerisindeki serbest yağ asitlerinin seviyesini gösteren asit değeri her dört katalizör kullanımında da standartlarda belirtilen (en fazla 0,50 mg KOH/g) değeri aşmamıştır. Biyodizelin doymamışlık seviyesini belirleyen ve kullanılan yağa bağlı olarak değişen iyot sayısı ise katalizör türüne bağlı olmaksızın standartlarda belirtilen değerden (en fazla 120 mg  $\text{I}_2$ /g) oldukça fazladır. Bu durum, ham madde olarak kullanılan ayçiçeği yağının iyot sayısının yüksek olmasına bağlanmıştır.

Ramadhas ve arkadaşları [41] 2005'te, 34 mg KOH/g asit değerine sahip kauçuk tohumu yağından iki aşamalı biyodizel üretimini araştırmışlardır. İlk aşama olan asit katalizörlü esterleştirme reaksiyonunun sırasıyla alkol/yağ mol oranı ve katalizör oranının esterleşme verimine etkisi incelenerek optimum şartları araştırılmıştır. Alkol/yağ mol oranının esterleşme verimine etkisinin incelendiği deneyler, farklı alkol/yağ mol oranlarında (3:1, 6:1 ve 9:1) metil alkol ile yağın hacminin %0,50'si kadar sülfürik asit kullanılarak 50°C reaksiyon sıcaklığında ve 30 dakika sürede gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre en yüksek esterleşme verimi (yaklaşık %90) 6:1 oranında metil alkol kullanımında elde edilmiştir. Katalizör oranının esterleşme verimine etkisinin incelendiği deneyler ise, 6:1 mol oranında metil alkol ile yağın hacminin %0,25, 0,50, 1,00, 1,50 ve 2,00'si kadar sülfürik asit kullanılarak 50°C reaksiyon sıcaklığında ve 30 dakika sürede gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, en yüksek esterleşme verimine (yaklaşık %95 ile) %0,50 oranında sülfürik asit kullanıldığında ulaşılmıştır. Deneyler sonunda yağın asit değeri 4 mg KOH/g'nin (%2 serbest yağ asidi oranı) altına düşmüş böylece ikinci aşama olan bazik katalizörlü transesterifikasyon reaksiyonuna geçilebilmiştir. Benzer şekilde, metil alkol/yağ mol oranı ve katalizör oranının biyodizel dönüşüm verimine etkisi incelenerek bazik katalizörlü transesterifikasyon reaksiyonunun optimum şartları araştırılmıştır. Alkol/yağ mol oranının biyodizel dönüşüm verimine etkisinin incelendiği deneyler, farklı oranlarda (6:1, 8:1, 9:1, 12:1 ve 16:1) metil alkol ile 5 g sodyum hidroksit kullanılarak  $45 \pm 5^\circ\text{C}$  reaksiyon sıcaklığında ve 30 dakika sürede gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, 9:1 alkol/yağ mol oranında yaklaşık %96 ile en yüksek ester verimine ulaşılmıştır. Mol oranının daha fazla artırılmasının dönüşüm verimini çok az etkilemediği görülmüştür. Katalizör oranının biyodizel dönüşüm verimine etkisinin incelendiği deneyler ise, 9:1 mol oranında metil alkol ile yağın kütlelerinin %0,30, 0,40, 0,45, 0,50, 0,55, 0,60, 0,70 ve 0,80'i kadar sodyum hidroksit kullanılarak 50°C reaksiyon sıcaklığında ve 30 dakika sürede gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, en yüksek ester verimine yağın kütlelerinin %0,50'si kadar sodyum hidroksit kullanılarak ulaşılmıştır. Ayrıca, katalizör oranının artırılmasının sabunlaşmaya neden olduğu ve viskoziteyi artırdığı vurgulanmıştır. Tüm bu reaksiyonlar sonunda üretilen kauçuk tohumu yağı metil esterinin sırasıyla bağıl yoğunluğu 0,874, 40°C'deki kinematik viskozitesi 5,81 mm<sup>2</sup>/s, parlama noktası sıcaklığı 130°C, alt ısı değeri 36,50 MJ/kg, asit değeri 0,118 mg KOH/g olarak belirlenmiştir.

Çildir ve Çanakçı [42] 2006'da, ayçiçeği, mısırözü ve kolza yağından transesterifikasyon reaksiyonuyla biyodizel üretimini ve katalizör oranı ile yağ/alkol mol

oranının elde edilen biyodizellerin bazı önemli yakıt özelliklerine (dönüşüm oranı, gliserin miktarı, kinematik viskozite, yoğunluk, akma noktası ve parlama noktası sıcaklıkları) etkilerini incelemiştir. Çalışmada transesterifikasyon reaksiyonu, metil alkol ile sodyum hidroksit kullanılarak 60°C reaksiyon sıcaklığında ve 1 saat sürede gerçekleştirilmiştir. Reaksiyon sonunda elde edilen karışımın sıcaklığının yüksek olması nedeniyle geri soğutucu cam balondan çıkartılmamış ve karışım soğutulmuştur. Karışım soğuduktan sonra ayırma hunisine alınmış ve biyodizel-gliserin faz ayrımı açıkça görülene kadar dinlendirilmiştir. Belirgin faz ayrımı gözlemlendiğinde, alt fazı oluşturan gliserin ayırma hunisi musluğu yardımı uzaklaştırılmıştır. Ayırma hunisinde kalan biyodizeli reaksiyona girmemiş katalizör ve alkol gibi yapısındaki bazı yabancı maddelerden arındırmak için saf su ile dört kere yıkanmıştır. On iki saat dinlendirilen yıkanmış biyodizel ısıtılarak nemi alınmıştır. Çalışmada, mısır, kolza ve ayçiçeği yağı metil esterlerinin akma noktası sıcaklıkları ASTM D664, parlama noktası sıcaklıkları ASTM D93, yoğunlukları ASTM D4052, kinematik viskoziteleri ASTM D445 standartlarına uygun olarak belirlenmiştir. Reaksiyon için kullanılan yağ miktarının biyodizel üretildikten sonraki ürün miktarına oranı alınarak hesaplanan dönüşüm oranının katalizör oranıyla değişiminin incelendiği deneyler, farklı yağlar (mısır, ayçiçeği ve kolza yağı), farklı oranlarda katalizör (%0,10, 0,30, 0,50 ve 1,00) ile 1:6 yağ/alkol mol oranında alkol kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan yağın doyma noktası, asit numarası ve dönüşüm oranıyla ilişkili olan akma noktası sıcaklığının katalizör oranıyla değişiminin incelendiği deneyler, farklı yağlar (mısır, ayçiçeği ve kolza yağı), farklı oranlarda katalizör (%0,10, 0,30, 0,50 ve 1,00) ile 1:6 mol oranında alkol kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, katalizör oranının değişmesine rağmen mısır ve kolza yağı biyodizellerinin akma noktası sıcaklıkları -9°C'de sabit kalmış, ayçiçeği yağı biyodizelinin akma noktası sıcaklığı %0,10 ve %0,30 katalizör oranı için -6°C iken %0,50'de biraz artmış, %1,00 katalizör oranında ise -9°C'ye düşmüştür. Bununla birlikte, akma noktası sıcaklığı, doyma noktası, asit numarası ve dönüşüm oranından etkilendiği için grafiklerde katalizör oranı ile akma noktası sıcaklığının orantılı olarak değişmediği görülmektedir. Kolza yağı biyodizelinin parlama noktası sıcaklığının katalizör ve mol oranına göre değişiminin incelendiği deneyler, farklı oranlarda katalizör (%0,10, 0,30, 0,50 ve 1,00) ile değişik yağ/alkol mol oranlarında (1:3, 1:6 ve 1:10) alkol kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, %0,30 katalizör oranı kullanıldığında elde edilen kolza yağı biyodizelinin parlama noktası sıcaklığının 1:3, 1:6 ve 1:10 mol oranı kullanımında sırasıyla 172°C, 45°C, 30°C olduğu

görülmüştür. Biyodizellerin yoğunluklarının katalizör oranına göre değişimlerinin incelendiği deneyler, farklı yağlar (mısır, ayçiçeği ve kolza yağı), değişik oranlarda katalizör ( % 0,10, 0,30, 0,50 ve 1,00) ile 1:6 mol oranında alkol kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, %0,10, 0,30, 0,50 ve 1,00 oranında katalizör kullanılarak üretilen ayçiçeği yağı biyodizellerinin yoğunluklarının sırasıyla 0,8931 g/mL, 0,8854 g/mL, 0,8842 g/mL, 0,8836 g/mL olduğu tespit edilmiştir. Kolza yağı biyodizeli için katalizör oranı arttıkça yoğunluğunun sürekli azaldığı, mısır yağı biyodizelinin yoğunluğunun ise % 0,10 ile % 0,30 katalizör oranı aralığında arttığı görülmüştür. En düşük yoğunluk değeri %1,00 oranında katalizör kullanımında kolza yağı biyodizelinde elde edilmiştir. Araştırmacılar katalizör oranının daha fazla artırılması durumunda ester oluşumunun gözlenmeyeceği bunun yerine sabunlaşma reaksiyonlarının artacağını vurgulanmışlardır. Ayçiçeği yağı metil esterinin kinematik viskozitesinin katalizör ve yağ/alkol mol oranına göre değişiminin incelendiği deneyler, farklı oranlarda katalizör (%0,10, 0,30, 0,50 ve 1,00) ile değişik yağ/alkol mol oranlarında (1:3, 1:6 ve 1:10) alkol kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, mol ve katalizör oranı arttıkça biyodizelin kinematik viskozitesinin azaldığı görülmüştür. Bu sonuç, mol oranının artmasıyla ester dönüşüm oranının artmasına bağlanmıştır. Örneğin, %0,50 oranında katalizör kullanımında, 1:3, 1:6 ve 1:10 mol oranı kullanılarak üretilen biyodizellerin sırasıyla 40°C'deki kinematik viskozite değerleri 5,69 mm<sup>2</sup>/s, 4,09 mm<sup>2</sup>/s ve 3,96 mm<sup>2</sup>/s olarak ölçülmüştür. Biyodizel üretimi sırasında meydana gelen gliserin miktarının katalizör oranına göre değişiminin incelendiği deneyler, farklı yağlar (mısır, ayçiçeği ve kolza yağı), değişik oranlarda katalizör (%0,10, 0,30, 0,50 ve 1,00) ile 1:6 mol oranında alkol kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, her üç yağ içinde katalizör oranı arttıkça elde edilen gliserin miktarının arttığı tespit edilmiştir

Math ve Irfan [43] 2007'de, serbest yağ asidi içeriği yüksek restaurant yağından iki aşamalı biyodizel üretimi ile sırasıyla alkol miktarı (kullanılan yağın hacimsel olarak %20, 25, 30, 35, 40 ve 45'i kadar), katalizör oranı (kullanılan yağın kütlece %0,30, 0,50, 0,70 1,00 ve 1,50'si kadar), reaksiyon sıcaklığı (30, 45 ve 55°C) ile reaksiyon süresi (60, 90 ve 120 dakika) gibi önemli reaksiyon parametrelerinin biyodizel verimine etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada; ucuz olması nedeniyle alkol türü olarak metil alkol, biyodizel üretiminin ilk aşamasında serbest yağ asitlerini esterlere dönüştürmede yeterince hızlı ve oldukça etkili olan asit katalizör sülfürik asit ve ikinci aşamada bazik katalizör sodyum hidroksit kullanılmıştır. Deneylere geçmeden önce yağ süzölmüş ve 60°C'de ısıtılmıştır.

Üretilen biyodizelin hacminin başlangıçta kullanılan yağın hacmine oranı olarak tanımlanan biyodizel veriminin alkol miktarıyla değişiminin incelendiği deneyler; 100 mL yağ, %0,30 oranında sodyum hidroksit, 1 mL sülfürik asit ve farklı hacimsel oranlarda (%20, 25, 30, 35, 40 ile 45) metil alkol kullanılarak 55°C reaksiyon sıcaklığında ve 90 dakika sürede gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, %35 metil alkol/yağ hacimsel oranında en yüksek (%85,50) biyodizel verimine ulaşıldığı, alkol miktarının daha fazla artırılmasının biyodizel verimine hiçbir olumlu etkisinin olmadığı vurgulanmıştır. Katalizör oranının biyodizel verimine etkisinin incelendiği deneyler, 100 mL yağ, %35 alkol/yağ hacimsel oranında metil alkol, 1 mL sülfürik asit ve farklı kütle oranlarında (%0,50, 0,70, 1,00 ile 1,50) sodyum hidroksit kullanılarak 55°C reaksiyon sıcaklığında ve 90 dakika sürede gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, en yüksek (%83,50) biyodizel verimine %0,70 oranında katalizör kullanıldığında ulaşıldığı, daha fazla katalizör kullanımının sabunlaşmayı artırdığı ve biyodizel verimini açıkça düşürdüğü görülmüştür. Reaksiyon sıcaklığının biyodizel verimine etkisinin incelendiği deneyler, 100 mL yağ karışımı, %35 alkol/yağ hacimsel oranında metil alkol, 1 mL sülfürik asit ve %0,70 oranında sodyum hidroksit kullanılarak farklı reaksiyon sıcaklıklarda (30, 45 ile 55°C) ve 90 dakika sürede gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, en yüksek biyodizel verimini (%83,50) veren sıcaklığın 55°C olduğu görülmüştür. 30 ve 45°C reaksiyon sıcaklığında sırasıyla biyodizel verimlerinin %78,50 ve %80,50 olduğu belirtilmiştir. Reaksiyon süresinin biyodizel verimine etkisinin incelendiği deneyler ise; 100 mL yağ karışımı, %35 alkol/yağ hacimsel oranında metil alkol, 1 mL sülfürik asit ile %0,70 oranında sodyum hidroksit kullanılarak 55°C reaksiyon sıcaklığında ve farklı sürelerde (60, 90 ile 120 dakika) gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, en yüksek biyodizel veriminin (%83,50) 90 dakika sonunda elde edildiği görülmüştür. 60 ve 120 dakika sonunda elde edilen biyodizellerin verimlerinin sırasıyla %79,50 ve %80,50 olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak, %35 hacimsel oranında metil alkol, %0,30 oranında sodyum hidroksit kullanılarak 55°C reaksiyon sıcaklığında ve 90 dakika sürede gerçekleştirilen transesterifikasyon reaksiyon sonunda elde edilen biyodizelin en yüksek verime sahip olduğu tespit edilmiştir.

Wang ve arkadaşları [44] 2007'de, asit değeri  $75,92 \pm 0,036$  mg KOH/g olan atık kızartma yağından iki aşamalı biyodizel üretimini araştırmışlardır. Biyodizel üretiminin ilk aşaması olan serbest yağ asitlerinin metanolizi (esterleşme) reaksiyonu, 40 g atık yağ,

asidik heterojen katalizör ferrik sülfat ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ) ve metil alkol kullanılarak  $95^\circ\text{C}$  reaksiyon sıcaklığında farklı sürelerde (0,25, 0,50, 1,00, 2,00, 3,00 ve 4,00 saat) gerçekleştirilmiştir. Bu reaksiyonlarda, ferrik sülfat yağın kütlece %0,00, 1,00, 2,00, 3,00 ve 4,00 oranlarında, metil alkol ise 3:1, 5:1, 7:1, 8:1 ve 10:1 alkol/yağ mol oranlarında kullanılmıştır. Esterleşme reaksiyonu sonunda meydana gelen karışımdan metil alkolü uzaklaştırmak için  $50^\circ\text{C}$ 'de  $10\pm 1$  mmHg vakum altında dönel buharlaştırıcı kullanılmıştır. Daha sonra faz ayrımı için karışım dinlendirilmiştir. Bir günün ardından, yağ asidi metil ester ve reaksiyona girmemiş trigliseritlerden oluşan üst faz ile su ve katalizör kalıntılarında oluşan alt faz meydana gelmiştir. Atık yağdaki serbest yağ asitlerinin yağ asidi metil esterine dönüşüm oranı,

$$\text{Dönüşüm oranı [\%]} = (1 - AS_{\text{üstfaz}}/AS_{\text{atıkyağ}}) \cdot 100 \quad (1.5)$$

formülüne göre hesaplanmıştır. Burada,  $AS_{\text{üstfaz}}$  ve  $AS_{\text{atıkyağ}}$  sırasıyla reaksiyon süresi sonunda üst fazın ve atık yağın asit sayıdır. Reaksiyon süresinin serbest yağ asidi dönüşüm oranına etkisinin incelendiği deneyler, yağın kütlece %2,50'si kadar ferrik sülfat ve 10:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak  $95^\circ\text{C}$  reaksiyon sıcaklığında farklı sürelerde (0,25, 0,50, 1,00, 2,00, 3,00 ve 4,00 saat) gerçekleştirilmiştir. İlk yarım saat içerisinde dönüşüm oranının %85'in üstünde olduğu, yarım saat ile 2 saatlik süre aralığında dönüşüm oranının yavaşça artarak %95'in biraz üstüne çıktığı, 2 saatin sonunda reaksiyonun dengeye ulaştığı, 3 ve 4 saat aralığında ise dönüşüm oranının yaklaşık olarak sabit kaldığı belirlenmiştir. Katalizör oranının serbest yağ asidi dönüşüm oranına etkisinin incelendiği deneyler, yağın kütlece farklı oranlarında (%0,00, 1,00, 2,00, 3,00 ve 4,00) ferrik sülfat ile 10:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak  $95^\circ\text{C}$  reaksiyon sıcaklığında 3 saatte gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, % 0,00 ve 1,00 oranında katalizör kullanıldığında dönüşüm oranının sırasıyla %18,00, %94,40 olduğu fakat %2,00 ve daha fazla katalizör oranının dönüşüm oranına etkisinin çok az olduğu görülmüştür. Alkol/yağ mol oranının serbest yağ asidi dönüşüm oranına etkisinin incelendiği deneyler ise, yağın kütlece %3,00'ü kadar ferrik sülfat ile farklı alkol/yağ mol oranlarında (3:1, 5:1, 7:1, 8:1 ve 10:1) metil alkol kullanılarak  $95^\circ\text{C}$  reaksiyon sıcaklığında ve 3 saatte gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, 3:1 mol oranında %91,60 dönüşüm oranının elde edildiği, metil alkol miktarı artırıldığında dönüşüm oranının arttığı fakat 7:1

oranından sonra mol oranındaki artışın dönüşüm oranını pek fazla etkilemediği görülmüştür. Esterleşme reaksiyonunun optimum parametrelerini belirlemek için istatistiksel bir yaklaşım kullanılmıştır. Bu yaklaşım sonucunda, %2,00 oranında katalizör ve 10:1 mol oranında metil alkol kullanılarak 4 saatte gerçekleştirilen reaksiyonun sonunda %97,22 ile en yüksek dönüşüm oranının elde edilebileceği belirlenmiştir. Esterleşme reaksiyonu sonunda asit değeri  $2,10 \pm 0,036$  mg KOH/g'ye düşen atık yağ biyodizel üretimi için bazik katalizörlü transesterifikasyon reaksiyonuna tabi tutulmuştur. Bu reaksiyon, yağın kütlece %1,00'i kadar potasyum hidroksit ile 6:1 mol oranında metil alkol kullanılarak 65°C reaksiyon sıcaklığında ve 1 saatte gerçekleştirilmiştir. Reaksiyon sonunda oluşan karışımdan metil alkolü uzaklaştırmak için 50°C'de  $10 \pm 1$  mmHg vakum altında dönel buharlaştırıcı kullanılmıştır. Daha sonra faz ayrımı için karışım dinlendirilmiştir. Faz ayrımı meydana geldikten sonra metil ester fazı yani biyodizel 80°C'deki sıcak saf su ile yıkanmıştır. Yıkanan biyodizel, 90°C'de  $5 \pm 1$  mmHg vakum altında dönel buharlaştırıcıda nemi alınmıştır. Üretilen bu biyodizelin gaz kromatografisi cihazı ile metil ester veriminin %97,02 olduğu belirlenmiştir. Çalışmanın sonuçlar kısmında araştırmacılar, sülfürik asit ile kıyaslandığında, heterojen asit katalizör olan ferrik sülfatın korozif olmaması, çevre dostu olması ve sistemden kolayca ayrışabiliyor olması nedeniyle daha avantajlı olduğunu belirtmişlerdir.

Alptekin ve Çanakçı [45] 2007'de, altı farklı bitkisel yağdan (ayçiçeği, kanola, soya, pamuk, mısır ve atık palmye yağı) üretilen biyodizellerin dizel yakıtlarıyla harmanlanmasıyla elde edilen karışımların kinematik viskozite ve yoğunluklarının karışım oranı ile değişimlerini incelenmişlerdir. Transesterifikasyon reaksiyonu, 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol ve yağın kütlece %1,00'i kadar potasyum hidroksit kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretilen biyodizeller hacimsel olarak %2,00, 5,00, 10,00, 20,00, 50,00 ve 75,00 oranlarında iki farklı dizel yakıtı (motorin ve Euro dizel) ile karıştırılmıştır. Karışımların yoğunlukları ve viskoziteleri ASTM test metotlarına uygun olarak ölçülmüştür. Ayrıca, orijinali Arrhenius tarafından sunulmuş Grunberg ve Nissan tarafından şekillendirilmiş olan karışım denklemleri kullanılarak ölçüm yapılmadan viskozite ve yoğunluk değerleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, hesaplanan değerler ile ölçülen değerlerin birbirlerine çok yakın olduğunu göstermiştir.

Yavuz ve arkadaşları [46] 2008'de, mısırozü, ayçiçeği, soya ve kanola yağından transesterifikasyon reaksiyonu ile üretilen biyodizellerin yoğunluk, kinematik viskozite, parlama noktası sıcaklığı, akma noktası sıcaklığı, kükürt oranı ve alt ısı değerlerini



belirleyerek birbirleriyle karşılaştırmışlardır. Transesterifikasyon reaksiyonu, dört farklı yağ için de, 200 mL metil alkol ile 5 gram potasyum hidroksit kullanılarak 60°C reaksiyon sıcaklığında ve 60 dakika sürede gerçekleştirilmiştir. Soya, mısırözü, ayçiçeği ve kanola yağı metil esterlerinin sırasıyla 15°C'deki yoğunluklarının 870 kg/m<sup>3</sup>, 880 kg/m<sup>3</sup>, 880 kg/m<sup>3</sup>, 840 kg/m<sup>3</sup>, 40°C'deki kinematik viskozitelerinin 10,40 mm<sup>2</sup>/s, 11,20 mm<sup>2</sup>/s, 10,80 mm<sup>2</sup>/s, 10,00 mm<sup>2</sup>/s, parlama noktası sıcaklıklarının 140°C, 80°C, 120°C, 80°C, akma noktası sıcaklıklarının -4°C, -8°C, -4°C, -8°C, kükürt oranlarının 200 ppm, 600 ppm, 200 ppm, 600 ppm, alt ısıl değerlerinin 38650 kJ/kg, 38600 kJ/kg, 38400 kJ/kg, 38800 kJ/kg olduğu belirlenmiştir.

Altun ve Öner [47] 2008'de, hayvan kesim hanelerinde et üretimi sırasında yan ürün olarak meydana gelen hayvansal iç yağdan transesterifikasyon reaksiyonu ile üretilen biyodizelin yakıt özelliklerini belirlemişlerdir. Biyodizel üretimi için transesterifikasyon reaksiyonu, 400 g iç yağ, 89,40 g metil alkol (%98 saflıkta) ile 2 g sodyum hidroksit (%98 saflıkta) kullanılarak 60°C reaksiyon sıcaklığında ve 3 saat sürede gerçekleştirilmiştir. Reaksiyon sonunda üretilen karışım, ayırma hunisinde 12 saat bekletilmiştir. 12 saatin sonunda, metil ester fazı ile gliserin fazı net bir şekilde ayrılarak gliserin fazı uzaklaştırılmıştır. İçerisindeki muhtemel reaksiyon kalıntılarını uzaklaştırmak için metil ester fazı, 60°C'deki saf su ile iki defa yıkanmıştır. Yıkanan metil ester fazı filtrelenerek oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Üretilen biyodizelin 40 °C 'deki kinematik viskozitesi 5,072 mm<sup>2</sup>/s, alt ısıl değeri 39 858 kJ/kg, 15°C'deki yoğunluğu 877 kg/m<sup>3</sup>, parlama noktası sıcaklığı 130°C, akma noktası sıcaklığı 0°C, setan sayısı 58,80 olarak belirlenmiştir. Üretilen biyodizel hacimce %5, 20 ve 50 oranlarında ticari dizel yakıtı ile karıştırılmıştır ve bu karışımlar sırasıyla B5, B20 ve B50 olarak isimlendirilmiştir. B5, B20 ve B50 karışımlarının sırasıyla kinematik viskozite ve yoğunluk değerleri, 3,6823 mm<sup>2</sup>/s, 844,66 kg/m<sup>3</sup>; 3,7650 cSt, 846,99 kg/m<sup>3</sup>; 3,8690 cSt, 853 kg/m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir.

Chhetri ve arkadaşları [48] 2008'de, lokantalardan toplanan atık kızartma yağından üretilen etil esterinin yakıt özelliklerini ve katalizör oranının etil ester verimine etkisini incelemişlerdir. Etil esterinin yakıt özellikleri (yoğunluk, kinematik viskozite, asit değeri, parlama noktası sıcaklığı, bulutlanma noktası sıcaklığı, akma noktası sıcaklığı, setan indeksi, asit sayısı, mono, di ve trigliserit içeriği) ASTM standartlarına uygun ölçümler ile, yağ asidi içeriği ise gaz kromatografisi cihazı ile belirlenmiştir. Deneylere geçmeden önce, atık kızartma yağı 110°C'de ısıtılarak yapısındaki muhtemel nemin buharlaşması sağlanmış daha sonra 75 mikronluk filtre kağıtları ile içerisindeki muhtemel yabancı maddelerden

arındırılmıştır. Katalizör oranının etil ester verimine etkisinin incelendiği deneyler, her bir litre atık yağ için 280 mL saf etil alkol ile farklı kütle oranlarında (yağın kütlece %0,40, 0,60, 0,80, 1,00 ve 1,20'si kadar) sodyum hidroksit kullanılarak 60 °C reaksiyon sıcaklığında ve 25 dakika sürede gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, %0,40 oranında katalizör kullanımında ester ve gliserin arasındaki faz ayrımının gözlemlenmediği yani reaksiyonun tamamlanmadığı, kütle olarak %0,60, 0,80 ve 1,00 oranlarında katalizör kullanıldığında etil ester içeriğinin yaklaşık olarak sırasıyla %50, 94 ve 40 olduğu, %1,20 oranında katalizör kullanıldığında ise neredeyse tamamen sabun oluşumunun gözlemlendiği belirtilmiştir. En yüksek etil ester içeriğini veren %0,80 oranının optimum değer olduğu vurgulanmıştır. Gaz kromatografisi sonuçlarından, atık kızartma yağı etil esterinin yapısındaki yağ asitlerinin yaklaşık %61,42'sinin tekli doymamış (C16:1, C18:1, C20:1), %26,13'ünün çoklu doymamış (C18:2, C18:3) sadece %12,45'inin (C14:0, C16:0, C18:0, C20:0, C24:0) doymuş yapıda olduğu belirlenmiştir. Üretilen etil esterinin 40 °C'deki kinematik viskozitesinin 5,03 mm<sup>2</sup>/s, 15°C'deki yoğunluğunun 870 kg/m<sup>3</sup>, akma noktası sıcaklığının -16°C, bulutlanma noktası sıcaklığının -1°C, soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığının -10°C, setan sayısının 61, parlama noktası sıcaklığının 164°C, asit sayısının 0,29 mg KOH/g, kütlece yüzde mono, di ve trigliserit içeriğinin sırasıyla %0,293, %0,190, %0,061 olduğu belirtilmiştir.

Zhang ve Jiang [49] 2008'de, serbest yağ asidi miktarı (45,51 mg KOH/g) yüksek *Zanthoxylum bungeanum* (çin dikenli kül) tohumu yağından iki aşamalı biyodizel üretimini araştırmışlardır. İlk aşama olan asit katalizörlü esterleştirme reaksiyonu, 24:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol ile yağın kütle oranının %2,00'si kadar sülfürik asit kullanılarak 60°C reaksiyon sıcaklığında ve 80 dakika sürede gerçekleştirilmiştir. Böylece, yağın asit değeri başlangıçta 45,51 mg KOH/g iken asit katalizörlü reaksiyon sonunda 1,16 mg KOH/g 'ye düşmüştür. İkinci aşamadaki bazik katalizörlü transesterifikasyon reaksiyonu ise 80 gram yağ, 6,5:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol ile yağın kütle oranının %0,90'ı kadar potasyum hidroksit kullanılarak 60°C reaksiyon sıcaklığında ve 90 dakika sürede gerçekleştirilmiştir. Tüm bu reaksiyonlar neticesinde üretilen biyodizelin verimi %98 olarak belirlenmiştir.

Anastopoulos ve arkadaşları [50] 2009'da, saf ayçiçeği, kolza tohumu, zeytin ile atık kızartma yağından tek ve iki aşamalı transesterifikasyon reaksiyonuyla etil ester üretimini araştırmışlardır. Biyodizel üretimine geçilmeden önce, sadece atık kızartma yağı susuz sodyum sülfat yardımıyla kurutulmuş ve bir gece dinlendirildikten sonra vakumlanarak

filtrelenmiştir. Çalışmada biyodizel üretimi için transesterifikasyon reaksiyonu, 250 g ayçiçeği yağı, farklı oranlarda (%0,25, 0,50, 0,75 ve 1,00) sodyum hidroksit ile değişik alkol/yağ mol oranlarında (6:1, 8:1, 10:1, 12:1 ve 14:1) etil alkol kullanılarak farklı reaksiyon sıcaklıklarda (35°C, 80°C, 90°C) gerçekleştirilmiştir. Reaksiyon süresi 210 dakikada sabit tutulmuştur. Transesterifikasyon (etanoliz) reaksiyonu sonunda ürünlerin yapısında bulunabilecek etil alkol 150 mmHg mutlak basınçlı vakum yardımıyla uzaklaştırılmıştır. Daha sonra gliserinin çökmesi için transesterifikasyon reaksiyonu ürünleri ayırma hunisine alınmıştır. Etil alkolün kullanılması durumunda oluşan güçlü emülsiyonlar nedeniyle gliserin fazının sadece yoğunluk farkı yardımıyla etil ester fazından ayrılamadığı görülmüştür. Bu nedenle, yaklaşık 10 g saf gliserin transesterifikasyon reaksiyonu ürünlerine eklenerek ayırma hunisi hızlıca çalkalanmıştır. Yaklaşık bir saat sonra belirgin bir faz ayrımının görüldüğü belirtilmiştir. Faz ayrımı gerçekleştikten sonra, etil ester fazı 10 kere 50 cm<sup>3</sup> 'lük 50°C sıcaklıktaki saf su ile yıkanmıştır. Yıkanan etil ester fazı 110°C'ye kadar ısıtılarak yapısındaki nem alınmıştır. Katalizör oranının etil ester verimine etkisinin incelendiği deneyler, 12:1 alkol/yağ mol oranında etil alkol ile farklı oranlarda (%0,25, 0,50, 0,75, 1,00, 1,25 ve 1,50) sodyum hidroksit kullanılarak 80°C reaksiyon sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, 210 dakikanın sonunda, %1,00 oranında sodyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin kütlece en yüksek etil ester verimine sahip olduğu ve sırasıyla %1,25, 1,50, 0,75, 0,50 ile 0,25 oranlarında katalizör kullanımında ise verimin gittikçe azaldığı görülmüştür. Sonuç olarak % 1,00 optimum değer olarak belirlenmiştir. Reaksiyon sıcaklığının etil ester verimine etkisinin incelendiği deneyler, 12:1 alkol/yağ mol oranında etil alkol ve %1,00 oranında sodyum hidroksit kullanılarak farklı sıcaklıklarda (35°C, 80°C ve 90°C) gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, reaksiyon sıcaklığı arttıkça etil ester veriminin arttığı, 35°C ve 80°C reaksiyon sıcaklığında 150 dakikanın sonunda üretilen biyodizellerin etil ester verimlerinin sırasıyla % 54,60, % 81,40 olduğu görülmüştür. Ayrıca, her üç reaksiyon sıcaklığı için de, ilk 150 dakika süre zarfında etil ester veriminin hızlıca arttığı daha sonra ise verimin reaksiyon süresi sonuna kadar yaklaşık olarak sabit kaldığı belirtilmiştir. 80°C ve 90°C'de, bir birine yakın etil ester verimlerinin elde edilmesine rağmen optimum sıcaklık değeri olarak 80°C seçilmiştir. Alkol/yağ mol oranının etil ester verimine etkisinin incelendiği deneyler, farklı mol oranlarında (6:1, 8:1, 10:1, 12:1 ve 14:1) etil alkol ile %1,00 oranında sodyum hidroksit kullanılarak 80 °C reaksiyon sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları

incelendiğinde, 210 dakikanın sonunda, 6:1, 12:1 ve 14:1 mol oranlarında üretilen biyodizellerin sırasıyla kütlece etil ester verimlerinin %69,40, 85,40, 79,70 olduğu ve sırasıyla 12:1, 10:1, 8:1, 14:1 ile 6:1 mol oranlarında alkol kullanımında gittikçe verimin azaldığı görülmüştür. Alkol miktarı arttıkça ester içeriğinin arttığı fakat daha fazla alkol kullanımında (örneğin 14:1 mol oranında) gliserinin ester içerisindeki çözünürlüğü arttığından verimin azaldığı belirtilmiştir. En yüksek etil ester veriminin elde edildiği 12:1 alkol/yağ mol oranı optimum değer olarak belirlenmiştir. 210 dakika sonunda %85,40 oranında etil ester verimine sahip biyodizelin üretilmesine rağmen araştırmacılar optimum süreyi 150 dakika olarak belirlemişlerdir. Böylece, tek aşamalı biyodizel üretimi için optimum parametrelerin, reaksiyon süresi, alkol/yağ mol oranı, katalizör oranı ve sıcaklık için sırasıyla 150 dakika, 12:1, %1,00, 80°C olduğu sonucuna varılmıştır. Bu parametrelere göre üretilen ayçiçeği, kolza tohumu, zeytin ve atık kızartma yağı etil esterlerinin verimlerinin sırasıyla % 81,40, 81,40, 82,60, 75,00 olduğu belirtilmiştir. İki aşamalı biyodizel üretiminde, sadece etil alkol/yağ mol oranı (4:1, 6:1 ve 8:1) ile katalizör oranının (%0,25, 0,50, 0,75 ve 1,00) etil ester verimine etkisi incelenmiş, tüm deneyler 80°C reaksiyon sıcaklığında ve 90 dakika sürede gerçekleştirilmiştir. Katalizör oranının etil ester verimine etkisinin incelendiği deneyler, %81,40 verime sahip ayçiçeği yağı etil esteri, 6:1 alkol/yağ mol oranında etil alkol ile farklı oranlarda (%0,25, 0,50, 0,75 ve 1,00) sodyum hidroksit kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, 90 dakika sonunda %0,75 oranında sodyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin kütlece en yüksek etil ester verimine (%97,20) sahip olduğu ve sırasıyla %0,75, 1,00, 0,50 ile 0,25 oranında katalizör kullanımında verimin gittikçe azaldığı görülmüştür. Katalizör oranı arttıkça etil ester içeriği artmış fakat katalizör oranının daha fazla artırılması durumunda emülsiyon ve sabun oluşumu nedeniyle verim azalmıştır. En yüksek etil ester veriminin elde edildiği %0,75 katalizör oranı optimum parametre olarak belirlenmiştir. Alkol/yağ mol oranının etil ester verimine etkisinin incelendiği deneyler, farklı mol oranlarında (4:1, 6:1 ve 8:1) etil alkol ile %0,75 oranında sodyum hidroksit kullanılarak 80°C reaksiyon sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, ilk 30 dakikanın sonunda bile 4:1, 6:1 ve 8:1 mol oranlarında üretilen biyodizellerin sırasıyla kütlece etil ester verimlerinin %88,90, 96,70, 97,00 olduğu görülmüştür. Fakat optimum değer olarak en yüksek verimin elde edildiği 8:1 değil 6:1 mol oranı seçilmiştir. 90 dakika sonunda yaklaşık % 98,00 oranında etil ester verimine sahip biyodizelin üretilmesine rağmen araştırmacılar optimum süreyi %96,70 oranında verimin elde edildiği 30 dakika olarak

kabul etmişlerdir. Böylece ikinci aşama için, %96,70 oranında ester verimini veren optimum reaksiyon parametreleri, 30 dakika, 6:1 alkol/yağ mol oranı, %0,75 oranında sodyum hidroksit ve 80°C olarak belirlenmiştir. 15°C'deki yoğunluk, 40°C'deki kinematik viskozite, parlama noktası sıcaklığı, kütlece sülfür içeriği, bulutlanma noktası sıcaklığı, akma noktası sıcaklığı, soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığı, oksidasyon kararlılığı, kütlese kül içeriği, su içeriği, kütlese karbon kalıntısı, üst ısıl değer, asit değeri, kütlese ester içeriği, kütlese mono-, di-, trigliserid içeriği, kütlese serbest ve toplam gliserin içeriği, sırasıyla ayçiçeği yağı etil esteri için 882,70 kg/m<sup>3</sup>, 4,63 cSt, 178°C, 3,70 mg/kg, 2°C, -6°C, -3°C, 0,80 h, %0,01'den daha az, 154 mg/kg, %0,0164, 38,60 MJ/kg, 0,15 mg KOH/g, %96,70, %0,478, %0,152, %0,087, %0,017, %0,148 olarak, kolza tohumu yağı etil esteri için 881,20 kg/m<sup>3</sup>, 4,84 cSt, 181°C, 3,50 mg/kg, 1°C, -8°C, -4°C, 2,00 h, %0,01'den daha az, 189 mg/kg, %0,0110, 38,30 MJ/kg, 0,35 mg KOH/g, %97,20, %0,512, %0,095, %0,275, %0,005, %0,180 olarak, zeytin yağı etil esteri için 881,50 kg/m<sup>3</sup>, 4,00 cSt, 182°C, 2,80 mg/kg, 7°C, -5°C, -2°C, 3,30 h, %0,01'den daha az, 208 mg/kg, %0,0028, 38,20 MJ/kg, 0,19 mg KOH/g, %97,80, %0,644, %0,130, %0,116, %0,014, %0,12 olarak, atık kızartma yağı etil esteri için 888,50 kg/m<sup>3</sup>, 5,81 cSt, 188°C, 4,80 mg/kg, 9°C, -1°C, 3°C, 0,33 h, %0,01'den daha az, 376 mg/kg, %0,1549, 37,80 MJ/kg, 0,46 mg KOH/g, %93,20, %1,367, %2,228, %3,132, %0,148, %0,254 olarak belirlenmiştir.

Karonis ve arkadaşları [51] 2009'da, katalizör olarak bazik karakterdeki heterojen katı kalsiyum etoksit kullanılarak, ayçiçeği, kolza tohumu, zeytin ile atık kızartma yağından tek ve iki aşamalı transesterifikasyon reaksiyonuyla etil ester üretimini araştırmışlardır. Elde edilen etil esterlerin yakıt özellikleri ISO ve EN test metotlarına uygun olarak ölçülmüştür. Çalışmada, ayçiçeği yağından etil ester üretiminde sırasıyla katalizör oranı, reaksiyon sıcaklığı ve alkol/yağ mol oranının etil ester verimine etkisi incelenerek optimum üretim parametreleri belirlenmiştir. Elde edilen parametreler kullanılarak kolza tohumu, zeytin ve kullanılmış atık kızartma yağından etil esterler üretilmiştir. Etil ester verimi HP-Innowax (30 m·0,15 mm·0,2 µm) kapiler kolonun kullanıldığı gaz kromatografisi cihazı ile belirlenmiştir. Optimum reaksiyon parametrelerin belirlendiği tüm deneyler sırasında reaksiyon süresi 4 saat, kullanılan ayçiçeği yağı miktarı ise 250 g olarak sabit tutulmuştur. Katalizör oranının etil ester verimine etkisinin incelendiği deneyler, farklı oranlarda (%0,5, 1, 2, 3 ve 4) kalsiyum etoksit ile 12:1 mol oranında etil alkol kullanılarak 80°C reaksiyon sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deney

sonuçlarına göre en yüksek verim, 2,5 saatin sonunda % 4,00 oranında katalizör kullanılarak (%81,80) elde edilmiştir. Fakat %3,00 ve %4,00 oranlarında elde edilen etil ester verimleri birbirlerine çok yakın olduğundan optimum parametre olarak % 3,00 seçilmiştir. Reaksiyon sıcaklığının etkisinin incelendiği deneyler, %3,00 oranında katalizör ve 12:1 mol oranında etil alkol kullanılarak farklı reaksiyon sıcaklıklarında (70, 80 ve 90°C) gerçekleştirilmiştir. Ester verimi 2,5 saatin sonunda 70°C ve 80°C için sırasıyla %31,40 ve %80,50 olarak belirlenmiştir. 80°C ve 90°C’de elde edilen verimler birbirlerine çok yakın olduğundan optimum parametre olarak 80°C seçilmiştir. En yüksek ester verimini veren alkol/yağ mol oranını belirlemek için %3,00 oranında katalizör ile farklı mol oranlarında (6:1, 9:1, 12:1 ve 15:1) etil alkol kullanılarak 80°C reaksiyon sıcaklığında deneyler yapılmıştır. 4 saatin sonunda 6:1, 12:1 ve 15:1 mol oranları için sırasıyla %56,40, %80,50, %77,60 oranlarında verimler elde edilmiştir. Sonuç olarak, %3,00 katalizör oranı ve 12:1 alkol/yağ mol oranı kullanılarak 80°C reaksiyon sıcaklığında üretilen biyodizelin en yüksek etil ester verimine sahip olduğu belirlenmiştir. Ayçiçeği yağı için belirlenen bu parametrelere göre üretilen kolza tohumu, zeytin ve atık kızartma yağı etil esterlerinin verimleri yaklaşık %81, %80 ve %75 olarak belirlenmiştir. Ester verimleri, EN 14214 standardında belirtilen değeri (%96,50) sağlamadığından ikinci aşamaya geçilmiştir. Bu aşamada da, etil alkol ve kalsiyum etoksit kullanılarak optimum reaksiyon parametrelerinin belirlenmesi için sırasıyla katalizör oranı ve alkol/yağ mol oranının ester verimine etkisi incelenmiştir. Reaksiyon sıcaklığı 80°C’de sabit tutulmuştur. Katalizör oranının ester verimine etkisinin incelendiği deneyler sırasında farklı oranlarda (%0,25, 0,50, 0,75 ile 1,00) katalizör ve 6:1 mol oranında etil alkol kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre en yüksek verim %0,75 oranında katalizör kullanılarak 1,5 saatin sonunda %97,5 olarak elde edilmiştir. Etil alkol miktarının etkisinin incelendiği deneyler, %0,75 oranında katalizör ile farklı mol oranlarda (4:1, 6:1 ve 8:1) etil alkol kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, 30 dakikanın sonunda 4:1, 6:1 ve 8:1 mol oranları kullanılarak üretilen biyodizellerin verimleri sırasıyla %88,9, %96,5 ve %96,8 olarak belirlenmiştir. 8:1 mol oranında az da olsa daha yüksek verimin elde edilmesine rağmen optimum parametre olarak 6:1 seçilmiştir. Sonuç olarak ikinci aşamada optimum reaksiyon parametreleri, katalizör oranı ve alkol/yağ mol oranı için sırasıyla %0,75 ve 6:1 olarak belirlenmiştir. İkinci aşama ile ayçiçeği yağı etil esterinin verimi %16 oranında artarak yaklaşık %96,5 seviyelerine yükselmiştir. Ayrıca, zeytin yağı ve kolza tohum yağı etil esterlerinin EN

14214 standardını sağlayarak verimlerinin %96,5'i aştığı fakat atık yağın veriminin yaklaşık %90 seviyelerinde kaldığı görülmüştür.

Math M. C ve arkadaşları [52] 2010'da, hacimsel olarak %75 oranında restaurant yağı ve %25 oranında domuz yağı içeren karışımdan iki aşamalı biyodizel üretimini araştırmışlardır. Biyodizel üretiminin ilk aşaması olan asit katalizörlü esterleşme reaksiyonunda 1,50 mL sülfürik asit (%95 saflıkta) kullanılmıştır. Deneylere geçmeden önce yağ karışımı süzölmüş ve 120 °C'de 15 dakika ısıtılmıştır. Üretilen biyodizelin hacminin başlangıçta kullanılan yağın hacmine oranı olarak tanımlanan biyodizel veriminin alkol miktarıyla değişiminin incelendiği deneyler, 100 mL yağ karışımı, %0,30 oranında sodyum hidroksit, 1,50 mL sülfürik asit ile farklı hacimsel oranlarda (%25, 30, 35, 40, 45 ve 50) metil alkol kullanılarak 65°C reaksiyon sıcaklığında ve 90 dakika sürede gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, %40 metil alkol/yağ hacimsel oranında en yüksek (%80) biyodizel verimine ulaşıldığı, alkol miktarının daha fazla artırılmasının biyodizel verimine hiçbir olumlu etkisinin olmadığı gibi aksine ester ve gliserin fazlarının ayrıştırılmasını zorlaştırdığından verimi olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. Katalizör oranının biyodizel verimine etkisinin incelendiği deneyler, 100 mL yağ karışımı, %40 alkol/yağ hacimsel oranında metil alkol, 1,50 mL sülfürik asit ile farklı kütle oranlarında (%0,30, 0,50, 0,70 ve 0,90) sodyum hidroksit kullanılarak 65 °C reaksiyon sıcaklığında ve 90 dakika sürede gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, en yüksek biyodizel verimine (%80) %0,30 oranında katalizör kullanıldığında ulaşıldığı, daha fazla katalizör kullanımının sabunlaşmayı arttırdığı görülmüştür. Reaksiyon sıcaklığının biyodizel verimine etkisinin incelendiği deneyler, 100 mL yağ karışımı, %40 alkol/yağ hacimsel oranında metil alkol, 1,50 mL sülfürik asit ve %0,30 oranında sodyum hidroksit kullanılarak farklı reaksiyon sıcaklıklarında (55, 60, 65°C) ve 90 dakika sürede gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, en yüksek biyodizel verimini (%80) veren sıcaklığın 65°C olduğu görülmüştür. Reaksiyon süresinin biyodizel verimine etkisinin incelendiği deneyler ise, 100 mL yağ karışımı, %40 alkol/yağ hacimsel oranında metil alkol, 1,50 mL sülfürik asit ve %0,30 oranında sodyum hidroksit kullanılarak 65 °C reaksiyon sıcaklığında ve farklı sürelerde (90, 120, 150 dakika) gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, en yüksek biyodizel veriminin 90 dakika sonunda %80 olarak elde edildiği, reaksiyon süresinin artışı ile reaksiyon hızının artarak 90 dakika da en yüksek değere ulaştığı ve sürenin daha fazla uzatılması durumunda biyodizel veriminin yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmüştür. Özetle, %75 oranında

restaurant yağı ve %25 oranında domuz yağı içeren yağ karışımından, %40 hacimsel oranında metil alkol ile %0,30 oranında sodyum hidroksit kullanılarak 65°C reaksiyon sıcaklığında ve 90 dakika sürede gerçekleştirilen transesterifikasyon reaksiyonu ile en yüksek verime sahip biyodizelin elde edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Ibeto ve arkadaşları [53] 2011'de, saf yerfıstığı yağı biyodizelinin ve bu biyodizeli hacimsel olarak % 10 oranında içeren biyodizel-dizel yakıtı karışımının (B10) yakıt özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmanın ön bilgiler ve giriş kısmında, içten yanmalı motorlarda yüksek yoğunluklu yakıtın kullanılması durumunda yanmanın kötüleşeceği ve partikül madde emisyonunun artacağı belirtilmiştir. Saf biyodizelin ve biyodizel-dizel yakıtı karışımının asit, iyot, sabunlaşma ve peroksit değeri basit titrasyon yöntemiyle belirlenmiştir. Yerfıstığı yağının oleik asitçe serbest yağ asidi yüzdesi,

$$\text{Serbest Yağ Asidi [\%]} = 0,503 \cdot \text{asit değeri} \quad (1.6)$$

bağıntısı yardımıyla hesaplanmıştır. Biyodizel üretimi için transesterifikasyon reaksiyonu, 100 mL yerfıstığı yağı, 1,06 g potasyum hidroksit (%85 saflıkta) ile 30 mL metil alkol (% 97 saflıkta) kullanılarak 60-65 °C reaksiyon sıcaklığında ve 1 saat sürede gerçekleştirilmiştir. Reaksiyon sonunda elde edilen karışım, ayırma hunisine alınmış ve bir gece bekletilmiştir. Faz ayrımından sonra metil ester fazı yani biyodizel sıcak saf su ile 5 kere yıkanmıştır. Üretilen biyodizelin ve B10'un sırasıyla bağıl yoğunlukları 0,88, 0,85, 40°C'deki kinematik viskoziteleri 5,16 mm<sup>2</sup>/s, 5,62 mm<sup>2</sup>/s, asit değerleri 4,96 mg KOH/g, 5,89 mg KOH/g, serbest yağ asidi yüzdeleri %2,49, %2,96, sabunlaşma değerleri 244,74 mg KOH/g, 218,09 mg KOH/g, iyot değerleri 52,45 mg KOH/g, 63,77 mg KOH/g, peroksit değerleri 3,23 mEq/kg, 2,17 mEq/kg, parlama noktası sıcaklıkları 202°C, 103°C, ısı değerleri 39114,29 J/g, 39114,29 J/g olarak belirlenmiştir.

Nita ve Gecai [54] 2011'de, mısır yağı, mısır yağı metil esteri ve saf dizel yakıtının 20 ve 60 °C sıcaklık aralığındaki yoğunluk ve viskozitelerini ölçüm yapmadan tayin edebilmek için denklemler belirlemişlerdir. Çalışmada kullanılan mısır yağı ve mısır yağı metil esterinin sırasıyla 15°C'deki yoğunlukları 922 kg/m<sup>3</sup>, 883 kg/m<sup>3</sup>, parlama noktası sıcaklıkları 277°C, 130°C, su içerikleri 493 mg/kg, 250 mg/kg olarak belirlenmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, artan sıcaklıkla birlikte mısır yağı, mısır yağı metil esteri ve dizel yakıtının yoğunluklarının benzer oranlarda doğrusal olarak azaldığı ve aynı sıcaklık değeri için mısır yağının en yüksek, dizel yakıtının ise en düşük yoğunluğa sahip



olduğu görülmüştür. Deney sonuçlarından yararlanılarak, en küçük kareler yöntemi ile farklı sıcaklıklarda yoğunluk tahmini yapabilmek için,  $d$  [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ] yoğunluk,  $T$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] sıcaklık,  $a$  ve  $b$  korelasyon katsayıları olmak üzere,

$$d = aT + b \quad (1.7)$$

şekilde birinci dereceden bir denklem türetilmiştir. Bu denklem kullanılarak hesaplanan yoğunluk değerleri ile deneysel olarak belirlenen yoğunluk değeri arasındaki en yüksek fark metil ester için  $0,0020 \text{ g}/\text{cm}^3$ , mısır yağı için  $0,0015 \text{ g}/\text{cm}^3$ , dizel yakıtı için  $0,0002 \text{ g}/\text{cm}^3$  olarak hesaplanmıştır. Kinematik viskoziteler incelendiğinde, dizel yakıtı ile metil esterin benzer viskozitelere sahip olduğu, mısır yağının ise belirgin bir şekilde daha yüksek viskoziteye sahip olduğu görülmüştür. Her üç yakıtında sıcaklık arttıkça viskozitelerinin azaldığı ve mısır yağının viskozitesindeki azalışın daha fazla olduğu belirtilmiştir. Deney sonuçlarından yararlanılarak farklı sıcaklıklardaki kinematik viskozite değerlerini belirlemek için en küçük kareler yöntemi ile,

$$v [\text{cSt}] = eT^3 + fT^2 + gT + h \quad (1.8)$$

şekilde üçüncü dereceden bir denklem türetilmiş fakat bu denklemin doğruluğunun yakıt türüne ve sıcaklığa bağlı olarak değiştiği vurgulanmıştır. Bu denklemde  $T$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] cinsinden sıcaklığı,  $e$ ,  $f$ ,  $g$  ve  $h$  korelasyon katsayılarını temsil etmektedir. Ortam sıcaklığında mısır yağı, mısır yağı metil esteri ve dizel yakıtı için bu denklem kullanılarak elde edilen viskozite değerlerinin deneysel değerlere çok yakın olduğu fakat sıcaklık arttıkça mısır yağı ve metil esteri ile dizel yakıtı için hata yüzdelерinin arttığı belirtilmiştir.

Sivaramakrishnan ve Ravikumar [55] 2011'de, pamuk, mısır, fındık, keten, hardal, zeytin, palmye, kolza, aspir, susam, soya, ayçiçeği ve ceviz yağından üretilen biyodizellerin viskozite, yoğunluk, parlama noktası ve üst ısıl değer gibi önemli yakıt özelliklerini belirlemiştir. Biyodizel üretimi, metil alkol ve bazik katalizör kullanarak,  $65^{\circ}\text{C}$ 'nin biraz altında ve 3 saat sürede gerçekleştirilmiştir. Pamuk, mısır, fındık, keten, hardal, zeytin, palmye, kolza tohumu, aspir, susam, soya, ayçiçeği, ceviz yağı biyodizellerinin sırasıyla  $27^{\circ}\text{C}$ 'deki yoğunlukları  $871 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,  $873 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,  $875 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,  $885 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,  $866 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,  $860 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,  $867 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,  $857 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,  $866 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,  $880 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,  $865 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,  $863 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,  $864 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,  $40^{\circ}\text{C}$ 'deki kinematik viskoziteleri  $3,75 \text{ mm}^2/\text{s}$ ,  $3,62$

mm<sup>2</sup>/s, 3,59 mm<sup>2</sup>/s, 2,83 mm<sup>2</sup>/s, 4,10 mm<sup>2</sup>/s, 4,18 mm<sup>2</sup>/s, 3,94 mm<sup>2</sup>/s, 4,60 mm<sup>2</sup>/s, 4,03 mm<sup>2</sup>/s, 3,04 mm<sup>2</sup>/s, 4,08 mm<sup>2</sup>/s, 4,16 mm<sup>2</sup>/s, 4,11 mm<sup>2</sup>/s, parlama noktası sıcaklıkları 455 K, 427 K, 425 K, 415 K, 442 K, 447 K, 434 K, 453 K, 440 K, 418 K, 441 K, 439 K, 443 K ve üst ısıl değerleri 41,18 MJ/kg, 41,14 MJ/kg, 41,12 MJ/kg, 40,84 MJ/kg, 41,30 MJ/kg, 41,35 MJ/kg, 41,24 MJ/kg, 41,55 MJ/kg, 41,26 MJ/kg, 40,90 MJ/kg, 41,28 MJ/kg, 41,33 MJ/kg, 41,32 MJ/kg olarak ölçülmüştür. Üst ısıl değeri ölçüm yapmadan belirlemek için viskozite, yoğunluk ve parlama noktası sıcaklığı kullanılarak regresyon analizinden bağıntı geliştirilmiş, ölçülen üst ısıl değerler ile hesaplanan ısıl değerler arasındaki hata oranları bulunmuştur. Hesaplamalar neticesinde söz konusu bağıntının %94,90 doğruluğa sahip olduğu belirlenmiştir.

Satyanarayana ve Muralleedharan [56] 2011'de, saf kauçuk tohumu, hindistan cevizi ve palmye çekirdeği yağından transesterifikasyon reaksiyonu ile biyodizel üretimini araştırmışlardır. Standart titrasyon metodu ile asit değeri 48,00 mg KOH/g olarak belirlenen saf kauçuk tohumu yağından biyodizel üretiminde önce asit katalizörlü esterleşme reaksiyonu daha sonra bazik katalizörlü transesterifikasyon reaksiyonu yöntemi kullanılmıştır. Asit katalizörlü esterleşme reaksiyonu, 100 mL saf kauçuk tohumu yağı, farklı alkol/yağ hacimsel oranlarında (0,10, 0,15, 0,20, 0,25, 0,30, 0,35, 0,40 ve 0,45) metil alkol ile kullanılan yağın hacimce %1,00'i kadar sülfürik asit kullanılarak farklı reaksiyon sürelerinde (30, 60 ve 90 dakika) ve 63±2°C reaksiyon sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Her bir reaksiyondan sonra elde edilen karışım ayırma hunisinde bir saat dinlendirilmiştir. Reaksiyon fazlası metil alkol, reaksiyona girmemiş katalizör ve diğer safsızlıklar üst fazı oluştururken, bazik katalizörlü transesterifikasyon reaksiyonu için kullanılacak olan ürün alt fazı oluşturmuştur. Deneyler sonunda, 0,35 veya 0,40 alkol/yağ hacimsel oranında metil alkol ile kullanılan yağın hacimce %1,00'i kadar sülfürik asit kullanılarak 63 ± 2 °C reaksiyon sıcaklığında ve 1 saat sürede gerçekleştirilen reaksiyon sonunda kauçuk tohumu yağının 48,00 mg KOH/g olan başlangıçtaki asit değerinin 1,72 mg KOH/g'ye düştüğü belirlenmiştir. Saf hindistan cevizi, palmye çekirdeği ve ön işlemden geçirilmiş kauçuk tohumu yağından biyodizel üretmek için bazik katalizörlü transesterifikasyon reaksiyonu, farklı alkol/yağ hacimsel oranlarında (0,10, 0,15, 0,20, 0,25, 0,30, 0,35, 0,40 ve 0,45) metil alkol ile yağın kütlece farklı oranlarında (%0,20, 0,30, 0,40, 0,50, 0,60, 0,70 ve 0,80) potasyum hidroksit (bazik katalizör) kullanılarak farklı reaksiyon sürelerinde (10, 20, 30, 40, 50, 60 dakika) ve değişik reaksiyon sıcaklıklarında (55, 60, 65°C) gerçekleştirilerek, en yüksek biyodizel dönüşüm verimini veren parametreler araştırılmıştır. Metil alkol/yağ

hacimsel oranının biyodizel dönüşüm verimine olan etkisinin incelendiği deneyler neticesinde, hindistan cevizi ve palmye yağı için 0,25, kauçuk tohumu yağı için ise 0,30 hacimsel oranında en yüksek biyodizel dönüşüm veriminin elde edildiği belirlenmiştir. Katalizör oranının biyodizel verimine etkisinin araştırıldığı deneylerin sonuçları incelendiğinde, tüm yağlar için kütlece %0,50 oranında katalizör kullanımında en yüksek verimin elde edildiği görülmüştür. Katalizör oranı daha fazla artırıldığında, serbest yağ asitleri sabuna dönüştüğü için biyodizel veriminin azaldığı açıkça görülmüştür. Reaksiyon süresinin biyodizel verimine etkisinin incelendiği deneylerde, ekonomik olması bakımından en yüksek dönüşüm verimini veren en kısa reaksiyon süresi belirlenmeye çalışılmıştır. Hindistan cevizi ve palmye çekirdeği yağı kullanımında 20 dakika, kauçuk tohumu yağı kullanımında ise 40 dakikanın sonunda en yüksek dönüşüm verimi elde edilmiş, reaksiyon süresinin daha fazla artırılması durumunda ise dönüşüm verimlerinde önemli değişimler gözlemlenmemiştir. Kauçuk tohumu yağı kullanıldığında en yüksek dönüşüm verimine, hindistan cevizi ve palmye çekirdeği yağı kullanımına göre daha geç sürede ulaşılmasının nedeni olarak kauçuk tohumu yağının yapısındaki serbest yağ asidi miktarının daha yüksek olması gösterilmiştir. Reaksiyon sıcaklığının biyodizel dönüşüm verimine olan etkisi incelendiğinde, kauçuk tohumu, hindistan cevizi ve palmye çekirdeği yağı biyodizelleri için sırasıyla  $55 \pm 5^\circ\text{C}$ ,  $58 \pm 2^\circ\text{C}$ ,  $60 \pm 2^\circ\text{C}$  reaksiyon sıcaklıklarında en yüksek dönüşüm verimlerine ulaşıldığı görülmüştür. Ayrıca, metil alkolün buharlaşma sıcaklığının  $64,50-65^\circ\text{C}$  olması nedeniyle reaksiyon sıcaklığının  $65^\circ\text{C}$ 'nin üstünde olmaması gerektiği, aksi takdirde metil alkol buharlaşacağı için reaksiyon tamamlanamayacağından dönüşüm veriminin azalacağı vurgulanmıştır. Sonuç olarak, kauçuk tohumu yağı metil esteri için %98-99 olan en yüksek dönüşüm verimine hacimce 0,30 alkol/yağ oranında metil alkol ile yağın kütlece %0,50'si kadar potasyum hidroksit kullanılarak  $55 \pm 5^\circ\text{C}$  reaksiyon sıcaklığı ve 40 dakika sürede, hindistan cevizi yağı metil esteri için %98-99 olan en yüksek dönüşüm verimine hacimce 0,25 alkol/yağ oranında metil alkol ile yağın kütlece %0,50'si kadar potasyum hidroksit kullanılarak  $58 \pm 2^\circ\text{C}$  reaksiyon sıcaklığı ve 20 dakika sürede, son olarak palmye çekirdeği yağı metil esteri için %98-99 olan en yüksek dönüşüm verimine hacimce 0,25 alkol/yağ oranında metil alkol ile yağın kütlece %0,50'si kadar potasyum hidroksit kullanılarak  $60 \pm 2^\circ\text{C}$  reaksiyon sıcaklığı ve 20 dakikada gerçekleştirilen transesterifikasyon reaksiyonu ile ulaşılmıştır. Kauçuk tohumu, hindistan cevizi ve palmye çekirdeği yağı metil esterlerinin sırasıyla bağıl yoğunlukları 0,875, 0,879, 0,866,  $40^\circ\text{C}$ 'deki kinematik viskoziteleri  $4,98 \text{ mm}^2/\text{s}$ ,

4,07 mm<sup>2</sup>/s, 8,85 mm<sup>2</sup>/s, alt ısııl değerleri 37 780 kJ/kg, 36770 kJ/kg, 34750 kJ/kg, parlama noktası sıcaklıkları 164°C, 178°C, 167°C, bulutlanma noktası sıcaklıkları 5°C, 25°C, 13°C ve akma noktası sıcaklıkları -8°C, 22°C, olarak belirlenmiştir.

Özcanlı ve arkadaşları [57] 2011'de, sakız ağacı yağından transesterifikasyon reaksiyonu ile üretilen biyodizelin saf olarak (B100) ve hacimsel olarak %5 (B5), %10 (B10), %25 (B25), %50 (B50) oranlarında dizel yakıtı ile harmanlanmasıyla elde edilen karışımlarının, üç silindirli, dört zamanlı, direkt enjeksiyonlu, hava soğutmalı bir dizel motorda kullanılmasının motor performansı ve eksoz emisyonlarına etkilerini incelemişlerdir. Deneyle, tam yükte, 1000 devir/dakikadan 2400 devir/dakikaya 200 devir/dakika artırımlar ile gerçekleştirilmiştir. Biyodizel üretimine geçmeden soxhlet ekstraktöründe çözücü hekzan kullanılarak söz konusu yağ elde edilmiştir. Üretilen sakız ağacı tohumu ham yağı süzöldükten sonra 105°C'de kurutulmuş, daha sonra titrasyon yöntemi ile serbest yağ asidi bileşimi %0,56 olarak belirlenmiştir. Transesterifikasyon reaksiyonu, 6:1 metil alkol/yağ mol oranında alkol kullanılarak, 60°C reaksiyon sıcaklığı ve 50 dakika sürede gerçekleştirilmiştir. Reaksiyon sonunda meydana gelen karışım, ayırma hunisine alınarak 8 saat bekletilmiş ve gözle görülür şekilde bir faz ayrımı meydana geldiğinde üst faz yani metil ester fazı alınmıştır. Deneylede kullanılan dizel, B5, B10, B25, B50, B100 yakıtlarının sırasıyla, 15°C'deki yoğunlukları 829 kg/m<sup>3</sup>, 831 kg/m<sup>3</sup>, 832 kg/m<sup>3</sup>, 840 kg/m<sup>3</sup>, 852 kg/m<sup>3</sup>, 870 kg/m<sup>3</sup>, 40°C'deki kinematik viskoziteleri 2,65 mm<sup>2</sup>/s, 3,04 mm<sup>2</sup>/s, 3,27 mm<sup>2</sup>/s, 3,61 mm<sup>2</sup>/s, 3,84 mm<sup>2</sup>/s, 5,72 mm<sup>2</sup>/s, üst ısııl değerleri 44861 kJ/kg, 44496 kJ/kg, 43601 kJ/kg., 43409 kJ/kg, 41791 kJ/kg, 38516 kJ/kg, setan sayıları 54,791, 55,195, 55,974, 56,802, 57,478, 59,680, parlama noktası sıcaklıkları 67,00°C, 67,00°C, 68,00°C, 84,00°C, 90,00°C, 106,50°C, sülfür içerikleri 11,54 mg/kg, 10,51 mg/kg, 11,02 mg/kg, 9,58 mg/kg, 4,95 mg/kg, 0,12 mg/kg, bulutlanma noktası sıcaklıkları -18,10°C, -16,20°C, -14,80°C, -11,80°C, -6,70°C, +2,10°C olarak belirlenmiştir.

Sabagh ve arkadaşları [58] 2011'de, atık yağdan, yağın kütlesinin %0,35'i kadar sodyum hidroksit ile 6:1 alkol/yağ mol oranlarında farklı alkoller (metil alkol, propanol ve bütanol) kullanılarak, 60°C reaksiyon sıcaklığında ve 60 dakika sürede transesterifikasyon reaksiyonu ile biyodizel üretimini araştırmışlardır. Gaz kromatografisi sonuçlarına göre, 60 dakika sonunda, metil alkol kullanılarak üretilen biyodizelin en yüksek ester verimine (%87) sahip olduğu belirlenmiştir. En yüksek ester verimine farklı alkoller arasında metil alkol kullanılarak ulaşıldığı için sodyum hidroksit oranının ester verimine etkisi

incelenirken alkol olarak metil alkol kullanılmıştır. 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol ile yağın kütlelerinin %0,40, 0,60 ve 1,00'i kadar sodyum hidroksit kullanılarak 60°C reaksiyon sıcaklığında ve 60 dakika sürede gerçekleştirilen transesterifikasyon reaksiyonları ile katalizör oranının ester verimine etkisi incelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre, %0,40, 0,60 ve 1,00 oranlarında sodyum hidroksit kullanılarak elde edilen verimlerin sırasıyla % 87, 80, 70 olduğu belirlenmiştir. En yüksek verimin elde edildiği %0,40 katalizör oranı optimum değer olarak kabul edilmiştir. %0,40 oranında katalizör ile 6:1 mol oranında metil alkol kullanılarak 60°C reaksiyon sıcaklığında ve 60 dakika sürede gerçekleştirilen transesterifikasyon reaksiyonu sonunda üretilen biyodizel, hacimsel olarak %10 (B10), %15 (B15) ve %20 (B20) oranlarında dizel yakıtı ile karıştırılmıştır. B10, B15, B20 yakıtlarının sırasıyla, 15°C'deki yoğunlukları 828,00 kg/m<sup>3</sup>, 828,30 kg/m<sup>3</sup>, 828,60 kg/m<sup>3</sup>, 40°C'deki kinematik viskoziteleri 2,67 mm<sup>2</sup>/s, 2,85 mm<sup>2</sup>/s, 3,05 mm<sup>2</sup>/s, parlama noktası sıcaklıkları 79°C, 82°C, 84°C, akma noktası sıcaklıkları -6°C, -5°C, -4°C, setan sayıları 49,8, 51,2, 53,5, alt ısı değerleri 45 563 kJ/kg, 45 560 kJ/kg, 45 558 kJ/kg, kütlece yüzde kükürt içerikleri 0,73, 0,68, 0,64 ve kütlece yüzde kül içerikleri 0,004, 0,0038, 0,00336 olarak belirlenmiştir.

Aliyu ve arkadaşları [59] 2012'de, mahogany (maun) tohumu yağından transesterifikasyon reaksiyonu ile biyodizel üretimini araştırmışlardır. Transesterifikasyon reaksiyonu rafine edilmiş 15 cm<sup>3</sup> mahogany yağı, 0,1648 g sodyum hidroksit ile 42 cm<sup>3</sup> metanol kullanılarak 60°C reaksiyon sıcaklığında ve 30 dakika sürede gerçekleştirilmiştir. Mahogany yağının 15°C'deki yoğunluğu 937 kg/m<sup>3</sup>, 40°C'deki kinematik viskozitesi 56 mm<sup>2</sup>/s, kütlece su içeriği % 0,25, asit değeri 5,99 mg KOH/g olarak belirlenmiştir. Üretilen biyodizelin ise 15°C'deki yoğunluğu 863 kg/m<sup>3</sup>, 40°C'deki kinematik viskozitesi 4,83 mm<sup>2</sup>/s, asit değeri 0,49 mg KOH/g, bulutlanma noktası sıcaklığı 0°C, akma noktası sıcaklığı 6°C olarak ölçülmüştür. Mahogany metil esterinin dizel yakıtına iyi bir alternatif olabileceği ve yakıt özelliklerinin ASTM D6751-06 standartlarına uygun olduğu vurgulanmıştır.

Aliyu ve arkadaşları [60] 2012'de, soya ve yerfıstığı tohumu yağından transesterifikasyon reaksiyonu ile biyodizel üretimini araştırmışlardır. Transesterifikasyon reaksiyonu 160 mL soya veya yerfıstığı tohumu yağı, 0,4682 g sodyum hidroksit ile 120 mL methanol kullanılarak 60 °C reaksiyon sıcaklığında ve 60 dakika sürede gerçekleştirilmiştir. Reaksiyon sonunda faz ayrımı için karışım bir gece dinlendirilmiş daha sonra metil ester fazı sıcak su ile yıkanmıştır. Üretilen yerfıstığı ve soya yağı

biyodizellerinin 15 °C 'deki yoğunlukları, 40 °C 'deki kinematik viskoziteleri, parlama noktası sıcaklıkları, ısıl değerleri sırasıyla 884 kg/m<sup>3</sup>, 880 kg/m<sup>3</sup>; 4,96 mm<sup>2</sup>/s, 4,08 mm<sup>2</sup>/s; 176°C, 178°C; 33,70 MJ/kg, 33,50 MJ/kg olarak belirlenmiştir. Soya ve yerfıstığı yağı biyodizellerinin yoğunluklarının farklı olmasının nedeni olarak, üretimlerinde kullanılan yağların iyot sayılarının yani doymamışlık seviyelerinin farklı olması gösterilmiştir. İyot sayısı 138,70 olan soya yağından üretilen biyodizelin, iyot sayısı 67,45 olan yerfıstığı yağından üretilen biyodizelden daha yoğun olduğu görülmüştür.

Moradi ve arkadaşları [61] 2013'te, soya yağı biyodizelinin bazı yakıt özelliklerinin metil ester verimi ile değişimini incelemiştir. Biyodizel üretimi, 100 g soya yağı, 12:1 alkol/yağ mol oranında metanol (%99,9) ile yağın kütlece %5,00'i kadar heterojen katalizör baryum oksit kullanılarak 70°C reaksiyon sıcaklığında ve farklı sürelerde (30, 90, 150, 240, 360 dakika) gerçekleştirilmiştir. Reaksiyon süresi sonunda üretilen biyodizeller sıcak su ile en az 3 kere yıkanmış, daha sonra 110°C'de 4 saat ısıtılarak saflaştırılmıştır. Saflaştırılan biyodizellerin kinematik viskoziteleri, bulutlanma noktası sıcaklıkları ve akma noktası sıcaklıkları sırasıyla ASTM D445, ASTM 2500, ASTM D97 standartlarına uygun olarak belirlenirken kütlese yağ asidi metil ester verimleri gaz kromatografisi cihazı ile tespit edilmiştir. Reaksiyon süresi ile bazı yakıt özelliklerinin değişimlerinin incelendiği deneyler neticesinde, 30, 90, 150, 240 ve 360 dakika reaksiyon süreleri sonunda üretilen biyodizellerin metil ester içerikleri, 40°C'deki kinematik viskoziteleri, bulutlanma noktası sıcaklıkları, akma noktası sıcaklıkları sırasıyla %28,09, 11,92 cSt, -1°C, -7°C; %37,82, 6,95 cSt, 0°C, -6°C; %45,82, 5,00 cSt, 0°C, -6°C; %67,13, 4,76 cSt, 1°C, -4°C; %74,03, 4,52 cSt, 1°C, -3°C olarak belirlenmiştir. Yüzde metil ester verimi x [%] ile ifade edilmek üzere, viskozite, bulutlanma noktası sıcaklığı ve akma noktası sıcaklığının metil ester verimi ile değişimlerine sırasıyla,

$$v_{\text{biyodizel}} [\text{mm}^2/\text{s}] = 0,0065x^2 - 0,7949x + 28,335 \quad (1.9)$$

$$T_{\text{akma noktası}} [^\circ\text{C}] = -0,0016x^2 + 0,2136x - 5,9291 \quad (1.10)$$

$$T_{\text{bulutlanma noktası}} [^\circ\text{C}] = 0,09x - 9,7938 \quad (1.11)$$

şeklindeki lineer ve lineer olmaya eğriler uyumlanmıştır. Bu eğrilerin sırasıyla R<sup>2</sup> değerleri 0,9957, 0,9921, 0,9849 olarak belirlenmiştir.

Gurasala ve arkadaşları [62] 2013'te, atık tavuk yağından biyodizel üretimini incelemiştir. Tavuk yağının serbest yağ asidi yüzdesi 0,1N potasyum hidroksit (KOH)

çözültisi kullanılarak % 13,8 (26,58 mg KOH/g ) olarak belirlendiğinden, biyodizel üretimine geçilmeden önce metil alkol ve asit katalizör ferrik sülfat ( $Fe_2(SO_4)_3$ ) kullanılarak esterleşme reaksiyonu (ön iyileştirme reaksiyonu) gerçekleştirilmiştir. Esterleşme reaksiyonunun optimum parametrelerini belirlemek için sırasıyla katalizör oranı (%0,50, 1,00, 1,50, 2,00 ve 2,50), reaksiyon sıcaklığı (45, 50, 55, 60 ve 65°C), reaksiyon süresi (30, 60, 90, 120 ve 150 dakika) ile alkol/yağ mol oranının (3:1, 6:1, 9:1, 12:1 ve 15:1) serbest yağ asidi dönüşüm verimine etkisi araştırılmıştır. Serbest yağ asidi yüzde dönüşüm verimi,

$$\text{Dönüşüm Verimi [\%]} = [(AV_0 - AV_t)/AV_0] \cdot 100 \quad (1.12)$$

bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır. Burada,  $AV_0$  ve  $AV_t$  sırasıyla atık yağın başlangıçtaki ve reaksiyon sonundaki asit değerini temsil etmektedir. Mol ve katalizör oranının serbest yağ asidi dönüşüm verimine etkisinin araştırıldığı deneylerin sonuçları incelendiğinde, 3:1 ve 6:1 mol oranı kullanımında yeterli dönüşüm verimlerinin elde edilemediği fakat 10,5:1 mol oranı kullanımında verimin %90'dan daha yüksek bir değer aldığı görülmüştür. Ayrıca, düşük katalizör oranlarında mol oranının artırılmasının verimi önemli ölçüde etkilediği ve daha yüksek katalizör oranlarında ise daha fazla alkol kullanılsa bile verimin çok az değiştiği belirtilmiştir. Reaksiyon sıcaklığı ve mol oranının verime olan etkisinin incelendiği deneylerden, düşük mol oranlarında sıcaklığın artırılmasının verimi çok fazla etkilemediği sonucuna varılmıştır. Mol oranı ve reaksiyon süresinin verime olan etkisinin incelendiği deneylerin sonuçlarından, aynı reaksiyon süresi için mol oranı arttıkça daha yüksek verimin elde edildiği ayrıca aynı mol oranında reaksiyon süresinin artışı ile verim artarken mol oranının aşırı artışı durumunda ise verimin azaldığı görülmüştür. Reaksiyon süresi ve katalizör oranının verime olan etkisinin incelendiği deneylerden, aynı katalizör oranı için reaksiyon süresinin artışı ile verimin arttığı görülmüştür. Düşük katalizör oranlarında verim reaksiyon süresi ile hızlıca artarken katalizör oranının artışı ile verimdeki artış azalmıştır. Reaksiyon sıcaklığı ve katalizör oranının etkisinin araştırıldığı deneylerin sonuçlarından, düşük katalizör oranlarında reaksiyon sıcaklığı yüksek olsa bile verimlerin yeterli seviyelerde olmadığı ve %1,00 ile %1,40 katalizör oranı aralığında reaksiyon hızının daha yüksek olduğu görülmüştür. Optimum reaksiyon parametreleri, direkt deney sonuçlarına göre değil yapay sinir ağları temeline dayanan bir program yardımıyla, %1,42 katalizör oranı, 10,89:1 alkol/yağ mol oranı, 50°C reaksiyon sıcaklığı ve

117 dakika reaksiyon süresi olarak belirlenmiştir. Bu şartlarda, atık tavuk yağının başlangıçta %13,8 olan serbest asit yüzdesi %0,69'a düşmüştür. Asit değerinin %1,00'in altında olması nedeniyle rahatlıkla bazik katalizörlü transesterifikasyon reaksiyonu ile biyodizel üretimine geçilmiştir. Biyodizel üretimi, potasyum hidroksit ile metanol kullanılarak 60°C reaksiyon sıcaklığında ve 1 saat sürede gerçekleştirilmiştir. Üretilen tavuk yağı metil esterinin 40°C'deki kinematik viskozitesi, 15°C'deki yoğunluğu, parlama noktası sıcaklığı, setan indeksi, net yanma ısısı, bulutlanma noktası sıcaklığı, akma noktası sıcaklığı, asit değeri, kül içeriği ve su içeriği sırasıyla 2,66 cSt, 850 kg/m<sup>3</sup>, 170°C, 61, 37,64 MJ/kg, -5°C, -6°C, 0,25 mg KOH/g, %0,022 g/g, %0,01 g olarak belirlenmiştir.

Goede ve arkadaşları [63] 2013'te, hacimsel olarak % 2, 5, 7, 10, 15 ve 20 oranlarında soya ile kolza yağı biyodizellerinin Euro ve sentetik dizel yakıtıyla harmanlanmasıyla elde edilen karışımların bazı yakıt özelliklerini incelemişlerdir. Karışımların setan sayıları, bulutlanma noktası sıcaklıkları, soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklıkları, akma noktası sıcaklıkları, aşınma dirençleri sırasıyla ASTM D6890, ASTM D2500, ASTM D6371, ASTM D97, ASTM D6078 standartlarına uygun olarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan Euro dizel yakıtının setan sayısı, 15 °C 'deki yoğunluğu, parlama noktası sıcaklığı, 40°C'deki kinematik viskozitesi, sülfür içeriği, su içeriği, bulutlanma noktası sıcaklığı, soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığı ve akma noktası sıcaklığı sırasıyla 57, 833 kg/m<sup>3</sup>, 84°C, 2,79 cSt, 1 mg/kg'dan daha az, 44 mg/kg, -22°C, -20°C, -27°C olarak, Fischer-Tropsch teknolojisi ile doğal gazdan üretilen yüksek kalitedeki sentetik dizel yakıtının setan sayısı, 15 °C 'deki yoğunluğu, parlama noktası sıcaklığı, 40°C'deki kinematik viskozitesi, sülfür içeriği, su içeriği, bulutlanma noktası sıcaklığı, soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığı ve akma noktası sıcaklığı sırasıyla 80, 766 kg/m<sup>3</sup>, 58°C, 2,19 cSt, 1 mg/kg'dan daha az, 50 mg/kg, -7°C, -9°C, -14°C olarak, soya yağı biyodizelinin setan sayısı, 15 °C 'deki yoğunluğu, parlama noktası sıcaklığı, 40°C'deki kinematik viskozitesi, metil ester içeriği, sülfür içeriği, su içeriği, bulutlanma noktası sıcaklığı, soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığı, akma noktası sıcaklığı ve asit değeri sırasıyla 53,2, 880 kg/m<sup>3</sup>, 172°C, 4,33 cSt, %99,9, 1 mg/kg, 300 mg/kg, 1°C, -3°C, 0°C, 0,48 mg KOH/g olarak, kolza tohumu yağı biyodizelinin setan sayısı, 15 °C 'deki yoğunluğu, parlama noktası sıcaklığı, 40°C'deki kinematik viskozitesi, metil ester içeriği, sülfür içeriği, su içeriği, bulutlanma noktası sıcaklığı, soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığı, akma noktası sıcaklığı ve asit değeri sırasıyla 60,6, 879 kg/m<sup>3</sup>, 161°C, 4,53 cSt, %100, 0 mg/kg, 2 mg/kg, 158 mg/kg, -4°C, -13°C, -11°C, 0,12 mg KOH/g olarak



belirlenmiştir. Biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının biyodizel oranı arttıkça bulutlanma noktası sıcaklıklarının arttığı, sentetik dizel yakıtı içeren karışımların Euro dizel içerenlerinkine göre bulutlanma noktası sıcaklıklarının daha yüksek olduğu ve karışım oranı arttıkça Euro dizel içeren karışımların bulutlanma noktası sıcaklıklarındaki değişimlerin daha belirgin olduğu belirlenmiştir. Biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının biyodizel oranı arttıkça soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklıklarının arttığı, Euro dizele soya yağı biyodizeli ilavesinde % 10 oranına kadar soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığının çok fazla değişmediği fakat bu orandan sonra soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığının hızlıca arttığı, kolza yağı biyodizeli ilavesinde ise yine %10 oranına kadar soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığının arttığı belirlenmiştir. Biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının biyodizel oranı arttıkça viskozitelerinin arttığı, yapısında Euro dizel bulunan karışımların viskozitelerinin daha fazla olduğu belirlenmiştir. Sentetik dizel yakıtına hem kolza hem de soya yağı biyodizeli ilave edildiğinde %10 oranına kadar karışımların setan sayılarının arttığı, fakat bu orandan sonra beklenmedik şekilde her iki biyodizel için de karışım oranının artırılması durumunda setan sayılarının azaldığı belirlenmiştir. Euro dizel yakıtı için ise, biyodizel ilavesi ile setan sayısının sürekli olarak arttığı fakat kolza yağı biyodizeli içeren karışımlardaki artışın daha fazla olduğu görülmüştür. Euro dizelin parlama noktası sıcaklığı sentetik dizel yakıtıninkine göre çok yüksek olduğu için Euro dizel içeren karışımların parlama noktası sıcaklıklarının sentetik dizel yakıtı içerenlerinkine göre daha fazla olduğu belirtilmiştir. Sentetik dizel yakıtının yoğunluğu yapısında aromatik bileşiklerin yerine parafinik bileşiklerin bulunması nedeniyle daha azdır. Her iki dizel yakıtına da biyodizel ilave edildiğinde yoğunluk değerleri doğrusal olarak artmaktadır. Fakat sentetik dizel yakıtı içeren karışımların yoğunlukları her karışım oranı için daha düşüktür. Aşınma direncinin belirlenmesi için sadece sentetik dizel yakıtı ile soya ve kolza yağı biyodizellerinin hacimsel olarak %0,5, 1, 1,5, 7 ile 20 oranlarında sentetik dizel yakıtıyla harmanlanmasıyla elde edilen karışımlar kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre, biyodizel oranı arttıkça aşınma direncinin arttığı, fakat soya yağı biyodizeli içeren karışımların aşınma dirençlerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Enjektör kirliliğinin belirlenmesi için soya ve kolza yağı biyodizellerinin hacimsel olarak %7 ile %20 oranlarında Euro ve sentetik dizel yakıtıyla harmanlanmasıyla elde edilen karışımlar kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre, sentetik dizel yakıtı kullanımında Euro dizel kullanımına göre enjektör kirliliğinin daha az olduğu, sentetik dizel yakıtına %7 oranında her iki biyodizel ilavesinde de kirliliğin azaldığı, Euro dizel yakıtı içeren

karışımlar için karışım oranının kirliliğe etkisini olmadığı, son olarak sentetik dizel yakıtı içeren karışımların kirliliğinin her karışım oranı için daha az olduğu belirlenmiştir.

Kelkar ve arkadaşları [64] 2013'te, jatropha yağından biyodizel üretimini incelemiştir. Transesterifikasyon reaksiyonu yardımıyla, ortam koşullarında kurutulan yağdan, sodyum hidroksit kullanılarak 55°C reaksiyon sıcaklığında jatropha yağı biyodizeli üretilmiştir. Üretilen biyodizelin, setan sayısı, parlama noktası sıcaklığı ve akma noktası sıcaklığı sırasıyla 75, 120°C, -12°C olarak belirlenmiştir.

Lopes ve arkadaşları [65] 2013'te, soya, kolza ve mısır yağından üretilen biyodizelleri hacimsel olarak %5, 20 ve 50 oranlarında içeren biyodizel-Euro IV dizel yakıtı karışımlarının alt ısı değerlerini (A. I. D) ASTM D240 standardına uygun olarak bomba kalorimetresi ile belirlemiştir. Ölçülen değerler kullanılarak karışımların alt ısı değerlerini hesaplamak için bazı yakıt özelliklerinin fonksiyonu olan bağıntılar türetilmiştir. Çalışmanın birinci aşamasında, ASTM D3338 metoduna uygun olarak,

$$A. I. D_{\text{biyodizel-dizel yakıtı karışımı}} [M]/kg = 0,022 + 0,3394 \cdot C - 0,001 \cdot O + 1,033 \cdot H \quad (1.13)$$

şeklindeki bağıntı yardımıyla karışımların alt ısı değerleri belirlenmiş ve ASTM D240 standardına uygun olarak ölçülen değerler ile karşılaştırılmıştır. Bağıntıdaki C, O ve H yakıtın elemansal bileşimindeki atomların sayılarını belirtmektedir. Yukarıdaki bağıntıdan elde edilen değerlerin ASTM D240 standardına göre ölçülen değerlere yakın olduğu görülmüştür. ASTM D3338 metodunu geliştirmek için,

$$A. I. D_{\text{biyodizel-dizel yakıtı karışımı}} [M]/kg = A. I. D_{\text{saf dizel}} \cdot \text{Hacimsel Dizel Yüzdesi} + A. I. D_{\text{saf biyodizel}} \cdot \text{Hacimsel Biyodizel Yüzdesi} \quad (1.14)$$

şeklindeki başka bir bağıntı kullanılmıştır. Bu bağıntının, sadece biyodizel-dizel yakıtı karışımları için kullanılmasının gerektiği, saf dizel veya saf biyodizellerin ısı değerlerinin belirlenmesinde yeterli doğrulukta sonuçlar vermediği belirtilmiştir. (1.13) bağıntısında ise sadece oksijenin katsayısı keyfi olarak değiştirilerek,

$$A. I. D_{\text{biyodizel-dizel yakıtı karışımı}} [\text{MJ}/\text{kg}] = 0,022 + 0,3394 \cdot C - 0,122 \cdot O + 1,033 \cdot H \quad (1.15)$$

şeklindeki (1.15) bağıntısı geliştirilmiştir. ASTM D240 metoduyla belirlenen alt ısı değerler referans alındığında, ASTM D3338 test metodu, (1.13), (1.14) ve (1.15) bağıntıları kullanılarak belirlenen karışımların alt ısı değerleri için ortalama bağıl hata oranları sırasıyla %3,83, %0,59, %1,81, %0,50 olarak belirlenmiştir. Ortalama bağıl hata oranları dikkate alındığında (1.15) bağıntısının ölçüm değerlerine daha yakın sonuçlar verdiği görülebilir.

Yukarıda belirtilen literatüre özeti haricinde, Tablo 1.6'da sadece bazik katalizör kullanılarak gerçekleştirilen transesterifikasyon reaksiyonlarıyla ilgili, Tablo 1.7'de ise asit ve bazik katalizör kullanılarak gerçekleştirilen esterleştirme ve transesterifikasyon reaksiyonlarıyla ilgili literatürden elde edilen optimum reaksiyon parametreleri özetlenmiştir. Ayrıca, söz konusu her iki tabloda da belirtilen parametrelere göre üretilen biyodizellerin bazı yakıt özellikleri verilmiştir.

Tablo 1.6. Sadece bazik katalizör kullanılarak gerçekleştirilen transesterifikasyon reaksiyonunun optimum parametreleri üretilen biyodizellerin bazı yakıt özellikleri

Kaynak	Kullanılan Maddeler			Optimum Reaksiyon Parametreleri				Üretilen Biyodizelin Bazı Yakıt Özellikleri	
	Yağ	Alkol	Katalizör	Katalizör türü ve oranı	Sıcaklık	Süre	Alkol/ yağ mol oranı	40°C'de kinematik viskozite $\nu$ [cSt]	15°C'de yoğunluk $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
[66]	Atık palmiye	Etil	HCl H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2,25 M HCl	90°C	3 h	6:1	14,94*	0,8737**
[67]	Atık kızartma	Metil	NaOH	%2,00	55°C	30 dk	6:1	4,79	884,4***
[68]	Etiyopya hardalı	Metil	KOH	%1,40 KOH	20-45°C	30 dk	4,6:1	4,83	888,8
[69]	Saf kanola	Metil	NaOH KOH NaOCH <sub>3</sub> KOCH <sub>3</sub>	0,20 mol/mol KOCH <sub>3</sub>	50°C	10 dk	4,5:1	*****	*****
[70]	Atık kızartma	Etil	NaOH KOH NaOCH <sub>3</sub> KOCH <sub>3</sub>	%1,00 KOH	60 °C	120 dk	12:1	4,63	866
[71]	Atık kızartma	Metil	KOCH <sub>3</sub>	%0,75	50°C	2 h	8:1	4,89	880
[72]	Fıstık	Metil	NaOH	%0,50	60°C	2 h	6:1	4,42	848,50
[73]	Hint	Metil	NaOH	%1,00 NaOH	60°C	2 h	6:1	11,50	920
[74]	Mısır	Metil	NaOH	%0,50	60°C	2 h	6:1	4,0694	864,20
[75]	Atık kızartma	Metil	NaOH	%0,50	50°C	30 dk	7,5:1	4,36	890,00

\*20°C'de kinematik viskozite

\*\*15 °C'de bağıl yoğunluk

\*\*\*25 °C'de bağıl yoğunluk

\*\*\*\*25 °C'de yoğunluk

\*\*\*\*\*Belirtilmemiş

Tablo 1.7. Asit ve bazik katalizör kullanılarak gerçekleştirilen esterleştirme ve transesterifikasyon reaksiyonunun optimum parametreleri ve üretilen biyodizellerin bazı yakıt özellikleri

Kaynak	Kullanılan Maddeler				Optimum Reaksiyon Parametreleri								Üretilen Biyodizelin Bazı Yakıt Özellikleri	
	Yağ	Alkol	Katalizör		Katalizör türü ve oranı		Sıcaklık		Süre		Alkol/Yağ mol oranı		40°C'de kinematik viskozite $\nu$ [cSt]	15°C'de yoğunluk $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
			Asit	Baz	Ester.	Tranes.	Ester.	Tranes.	Ester.	Tranes.	Ester.	Tranes.		
[76]	Karanja	Metil	HCl	KOH	%0,50	%0,10	65°C	65°C	1h	1h	6:1	6:1	4,33	*
[77]	Atık tavuk	Metil	HCl H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> H <sub>3</sub> NO <sub>3</sub> S	KOH	%20 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	%1,00	60°C	60°C	80 dk	4 h	40:1	6:1	4,94	883
[78]	Atık balık	Metil	HCl	KOH	%1,00	%0,50	60°C	60°C	1h	1h	6:1	6:1	4,50	878 <sup>**</sup>
[79]	Karanja	Metil	Zr	KOH	%1,00	%1,00	60°C	60°C	2 h	2h	9:1	6:1	4,33	*

\* Belirtilmemiş

\*\* 16°C'de yoğunluk

### 1.5. Tez Çalışmasının Amacı ve Kapsamı

Ülkemizde kolayca üretilebilir olması nedeniyle dışa bağımlılık oluşturmaması, birçok ülkede teşvik edilerek kullanılmaya başlanması, 2005 yılından itibaren Avrupa Birliği'nde dizel yakıtına belirli oranlarda katılmasının mecburi hale getirilmesi, Avrupa Birliği üyelik süreci devam etmekte olan ülkemizde ise 1 Ocak 2016 tarihinden itibaren pazardaki dizel yakıtına %3 oranında biyodizel katılmasının önerilmesi, dizel motorlarında önemli bir değişiklik yapılmadan kullanılabilmesi, çevreci bir yakıt olması ve hammaddesi olan yağların yenilenebilir nitelikte olması nedeniyle biyodizel, dizel motorlar için yakın geleceğin en önemli alternatif yakıtı olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda önem arz etmekte olan biyodizelin üretimi ve bazı yakıt özelliklerinin belirlenmesi için sunulan tez ile kapsamlı bir çalışma yapılmıştır.

Bu tezde amaç kısaca, bazı bitkisel yağlardan biyodizel üretimi ve en uygun üretim parametrelerinin belirlenmesidir. Tezin başlığı ise: “Çeşitli üretim parametrelerinin mısır ve fındık yağından üretilen biyodizellerin önemli yakıt özelliklerine etkilerinin deneysel olarak incelenmesi” olarak belirlenmiştir. Biyodizel üretiminde, bölge ekonomisine katkı yapacağı düşünülerek ve literatürde pek rastlanmadığı için mısır ve fındık yağı kullanılmıştır. Transesterifikasyon reaksiyona etki eden parametrelerin (sırasıyla katalizör türü ve oranı, reaksiyon sıcaklığı, reaksiyon süresi ve alkol/yağ mol oranı) üretilen biyodizelin dinamik ve kinematik viskozitesine etkisi incelenerek en uygun üretim parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada katalizör türü olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH); katalizör oranı olarak %0,25, 0,50, 0,75, 0,90, 1,00, 1,10, 1,25, 1,50; reaksiyon sıcaklığı olarak 40, 50, 60, 70°C; reaksiyon süresi olarak 30, 60, 90, 120 dakika ve alkol/yağ mol oranı olarak 3:1, 6:1, 9:1, 12:1 seçilmiştir. Daha sonra, her bir yağ ve katalizör türü için ayrı ayrı olmak üzere, en düşük viskoziteli biyodizeller ile teorik olarak en yüksek metil ester verimine sahip biyodizeller, belirli hacimsel oranlarda (%0, 5, 10, 15 ve 20) dizel yakıtı ile harmanlanarak elde edilen karışımların farklı sıcaklıklardaki (10, 20, 30 ve 40°C) yoğunluk, dinamik ve kinematik viskoziteleri belirlenmiştir. Viskozite-sıcaklık, viskozite-karışım oranı, yoğunluk-sıcaklık ve yoğunluk-karışım oranı değişimlerine en küçük kareler yöntemiyle eğriler uyumlanmıştır. Eğrilerden elde edilen değerler ile deneysel veriler karşılaştırılmıştır. Yine en küçük kareler yöntemi kullanılarak viskozite ve yoğunluğun sıcaklık ve karışım oranına

bağlı olarak değişimini veren iki-boyutlu yüzey denklemleri uyumlanmıştır. Ayrıca, en uygun parametreler ışığında üretilen saf mısır yağı ve fındık yağı biyodizellerinin ısıł değer, parlama noktası sıcaklığı ve soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklıkları Prof. Dr. Saadettin Güner Yakıt Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde, yađ asidi metil ester içerikleri ise Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde ölçtürülmüştür.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMA

### 2.1. Deneylerde Kullanılan Cihazlar

Biyodizel üretiminde ve üretilen biyodizellerin yoğunluk ile dinamik viskozitelerinin belirlenmesinde Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İçten Yanmalı Motorlar Laboratuvarı'nda bulunan cihazlar kullanılmıştır. Bu cihazlar ve resimleri aşağıda verilmiştir:

#### a) Manyetik karıştırıcılı ısıtıcı

Dragon-Med MS7-H550-PRO marka manyetik karıştırıcılı ısıtıcı (Şekil 2.1) transesterifikasyon reaksiyonunun gerçekleştirilmesinde kullanılmıştır.



Şekil 2.1. Manyetik karıştırıcılı ısıtıcı

#### b) Hassas terazi

Avery Berkel CB062-10ABAAGA marka hassas terazi (Şekil 2.2), biyodizel üretiminde kullanılan kimyasal malzemelerin kütlelerini ölçmek için kullanılmıştır ve 0,01 g hassasiyete sahiptir.





Şekil 2.2. Hassas terazi

c) Piknometre

ISOLAB marka kalibreli ve termometreli piknometre (Şekil 2.3) yardımıyla üretilen biyodizellerin yoğunlukları belirlenmiştir.



Şekil 2.3. Piknometre

d) Viskozimetre

B 79 282 Haake Falling Ball marka viskozimetre (Şekil 2.4) yardımıyla üretilen biyodizellerin dinamik viskoziteleri belirlenmiştir.



Şekil 2.4. Viskozimetre ve bilyeler

e) Kronometre

Şekil 2.5'te görülen kronometre, üretilen biyodizellerin dinamik viskozitelerini belirlerken bilyenin düşme süresinin ölçümünde kullanılmıştır.

f) Su banyosu

Şekil 2.6'da görülen HAAKE F3 80681 marka sabit sıcaklık su banyosu, üretilen biyodizellerin farklı sıcaklıklardaki dinamik viskozitelerinin belirlenmesinde kullanılmıştır ve viskozimetre ile beraber çalıştırılmıştır.



Şekil 2.5. Kronometre



Şekil 2.6. Su banyosu

## 2.2. Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

### a) Mısır yağı

Bu tez çalışmasında piyasadan temin edilen rafine ve vintelize edilmiş mısır yağı kullanılmıştır (Şekil 2.7). Söz konusu yağın 15°C'de yoğunluğu 922,35 kg/m<sup>3</sup>, 20°C'de

yoğunluğu  $920,73 \text{ kg/m}^3$ ,  $40^\circ\text{C}$ 'de dinamik ve kinematik viskozitesi sırasıyla  $31,579 \text{ cP}$ ,  $34,502 \text{ cSt}$  olarak ölçülmüştür. Bu değerler, (2.5.1) ve (2.5.2)'de açıklanan yoğunluk ve viskozite ölçümü esaslarına dayanarak belirlenmiştir. Ölçüm detayları Ek Tablo A-2'de verilmiştir. Değerler, Kafadar [27] tarafından yapılmış doktora tezinde kullanılan mısırozü yağıninkilerine benzerdir [27].

#### b) Fındık yağı

Bu tez çalışmasında piyasadan temin edilen rafine ve vintelize edilmiş fındık yağı kullanılmıştır (Şekil 2.7). Söz konusu yağın  $15^\circ\text{C}$ 'de yoğunluğu  $920,72 \text{ kg/m}^3$ ,  $20^\circ\text{C}$ 'de yoğunluğu  $919,10 \text{ kg/m}^3$ ,  $40^\circ\text{C}$ 'de dinamik ve kinematik viskozitesi sırasıyla  $32,849 \text{ cP}$ ,  $35,953 \text{ cSt}$  olarak ölçülmüştür. Bu değerler, (2.5.1) ve (2.5.2)'de açıklanan yoğunluk ve viskozite ölçümü esaslarına dayanarak belirlenmiştir. Ölçüm detayları Ek Tablo A-2'de verilmiştir. Değerler, Kafadar [27] tarafından yapılmış doktora tezinde kullanılan fındık yağıninkilerine benzerdir [27].



Şekil 2.7. Kullanılan mısır ve fındık yağı

#### c) Metil alkol (Metanol)

Tezde %99,90 saflıkta metil alkol kullanılmıştır (Şekil 2.8). Söz konusu metil alkolün bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Kullanılan metil alkolün bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri [80]

Kimyasal Formülü	CH <sub>3</sub> OH (MeOH)
Molekül kütlesi	32,04 g/mol
20°C'de yoğunluk	0,7918 g/cm <sup>3</sup>
20°C'de dinamik viskozite	0,59 cP
Erime noktası sıcaklığı	-97,6°C
Parlama noktası sıcaklığı	11-12°C
Safılık	%99,90



Şekil 2.8. Kullanılan metil alkol

## d) Sodyum ve potasyum hidroksit

Kullanılan sodyum hidroksit (Şekil 2.9) ve potasyum hidroksitin (Şekil 2.10) bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Kullanılan sodyum ve potasyum hidroksitin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri [81, 82]

Kimyasal Formül	NaOH (sodyum hidroksit)	KOH (potasyum hidroksit)
Molekül kütlesi	39,9971 g/mol	56,1056 g/mol
20°C’de yoğunluk	2,13 g/cm <sup>3</sup>	2,044 g/cm <sup>3</sup>
Erime noktası sıcaklığı	318°C	406°C



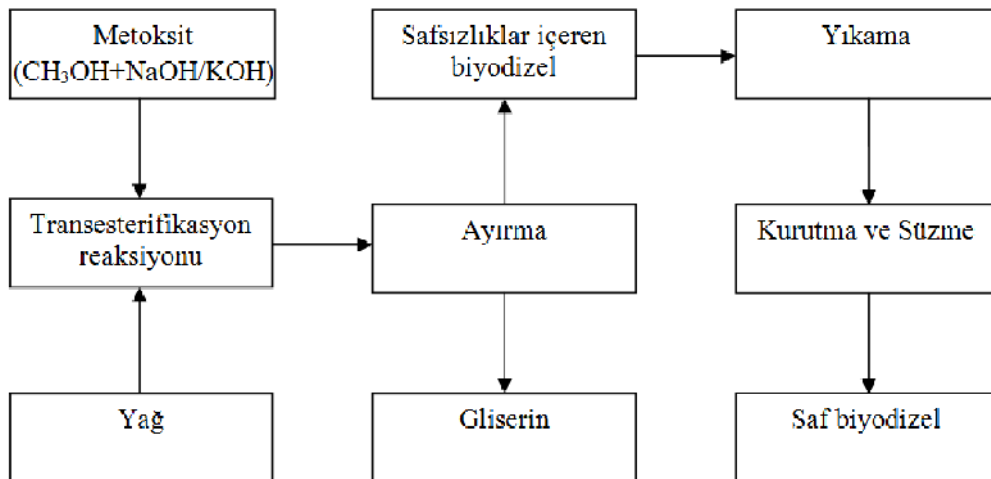
Şekil 2.9. Kullanılan sodyum hidroksit



Şekil 2.10. Kullanılan potasyum hidroksit

### 2.3. Deneylerin Yapılışı

Deneyler baz katalizli transesterifikasyon reaksiyonu yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerin işlem akış şeması Şekil 2.11’de gösterilmiştir:



Şekil 2.11. Biyodizel üretimi akış şeması

a) Yağın ısıtılması

Şekil 2.12 ve Şekil 2.13'te görüldüğü gibi, mısır veya fındık yağından hassas terazi yardımıyla 200 g tartılır ve manyetik karıştırıcılı ısıtıcıda reaksiyon sıcaklığına kadar ısıtılır.



Şekil 2.12. Yağın tartılması



Şekil 2.13. Yağın ısıtılması

b) Metoksit çözeltisinin hazırlanması

Hassas terazide, yağa göre katalizörün kütleli oranı parametresine bağlı olarak tartılan sodyum hidroksit (veya potasyum hidroksit) ile alkol/yağ mol oranı parametresine bağlı olarak tartılan metil alkol (Şekil 2.14, Şekil 2.15) ağız kapalı bir kaba konulur. Sodyum hidroksit (veya potasyum hidroksit) ile metil alkol manyetik karıştırıcılı ısıtıcı yardımıyla karıştırılır (Şekil 2.16) ve sodyum hidroksitin (veya potasyum hidroksit) tamamen çözünmesi sağlanır. Metil alkol ile sodyum hidroksit (potasyum hidroksit) karıştırıldığında sodyum metoksit çözeltisi (potasyum metoksit) meydana gelir.





Şekil 2.14. Sodyum (veya potasyum) hidroksitin tartılması



Şekil 2.15. Metil alkolün tartılması



Şekil 2.16. Metoksit karışımının oluşturulması

c) Transesterifikasyon reaksiyonu

Şekil 2.17’de görüldüğü gibi, hazırlanan metoksit çözeltisi reaksiyon kabındaki ısıtılmış olan yağa yavaşça eklenir. Yağ ile metoksit çözeltisi belirli bir reaksiyon süresi ve sıcaklığında 500 devir/dakika hızla manyetik karıştırıcı ısıtıcı yardımıyla karıştırılır (Şekil 2.18). Böylece, transesterifikasyon reaksiyonu başlatılmış olur. Reaksiyon esnasında alkol kaybının meydana gelmemesi için reaksiyon geri soğutucu altında gerçekleştirilir. Reaksiyon süresince sıcaklığın sabit kalması için sıcaklık dijital termometre ile sürekli kontrol edilmiştir.



Şekil 2.17. Yağın üstüne metoksit çözeltisinin eklenmesi



Şekil 2.18. Transesterifikasyon reaksiyonunun başlatılması

#### d) Ayırma

Reaksiyon süresi sonunda meydana gelen karışım ayırma hunisine alınarak faz ayrımı için bir gün beklenir. Bir günün sonunda Şekil 2.19’da görüldüğü gibi, ayırma hunisinde alt faz (gliserin) ve üst faz (biyodizel) olmak üzere iki faz meydana gelir. Gliserinin yoğunluğu biyodizelin yoğunluğundan yüksek olduğu için alt fazı gliserin oluşturur. Gliserin ayırma hunisinin musluğu yardımıyla Şekil 2.20’de görüldüğü gibi kolaylıkla uzaklaştırılır.



Şekil 2.19. Reaksiyon sonunda meydana gelen karışımın ayırma hunisine alınması ve biyodizel ile gliserin fazının meydana gelmesi



Şekil 2.20. Gliserin fazının uzaklaştırılması

e) Yıkama

Şekil 2.21’de görüldüğü gibi, ayırma işlemi sonunda geriye kalan biyodizel fazı safsızlıklardan arınması için yıkama işlemine tabi tutulur. Yıkama işleminde biyodizel saf su ile yavaşça yıkanır. Yıkama işlemi genel olarak temiz yıkama suyu elde edilinceye kadar devam ettirilir.



Şekil 2.21. Biyodizelin yıkanması

f) Kurutma ve süzme

Şekil 2.22’de görüldüğü gibi, yıkanmış biyodizel, yapısında bulunan muhtemel metil alkol ve suyu uzaklaştırmak için yaklaşık 100°C’ye kadar ısıtılır. Isıtılan biyodizel daha sonra filtre kağıtları yardımıyla Şekil 2.23’deki gibi süzülür. Süzülen ve kullanıma hazır hale gelen biyodizel Şekil 2.24’te görülmektedir.



Şekil 2.22. Yıkanan biyodizelin ısıtılması



Şekil 2.23. Biyodizelin süzülmesi



Şekil 2.24. Kullanıma hazır biyodizel

#### 2.4. İncelenen Parametreler

Üretim aşamasındaki çeşitli parametreler, biyodizelin fiziksel ve kimyasal özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu tezde, sırasıyla aşağıdaki parametrelerin üretilen biyodizelin dinamik ve kinematik viskozite ile yoğunluğuna etkisi incelenmiştir:

- Yağ türü: Mısır yağı, fındık yağı
- Katalizör türü: Sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH)
- Katalizör oranı, %: 0,25, 0,50, 0,75, 0,90, 1,00, 1,10, 1,25, 1,50
- Reaksiyon sıcaklığı, °C: 40, 50, 60, 70
- Reaksiyon süresi, dakika: 30, 60, 90, 120
- Alkol/yağ mol oranı: 3:1, 6:1, 9:1, 12:1

Yukarıdaki parametre değerleri literatür araştırılması yapılarak belirlenmiştir [83-95].



## 2.5. Deneylerde Ölçülen Büyüklükler, Ölçüm ve Hesap Yöntemleri

Üretilen biyodizellerin dinamik viskozite ve yoğunluk değerleri K.T.Ü Makina Mühendisliği Bölümü İçten Yanmalı Motorlar laboratuvarında bulunan düzenekler yardımıyla ölçülmüş olup, bunların dışında kalan üst ısıl değer, parlama noktası sıcaklığı ve soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığı K.T.Ü bünyesinde bulunan Prof. Dr. Saadettin Güner Yakıt Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde, biyodizellerin yağ asidi metil esteri içerikleri ise Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde ölçtürülmüştür. Bu ölçümler aşağıdaki standartlara uygun şekilde gerçekleştirilmiştir:

- Üst ısıl değer: DIN 51900-2
- Parlama noktası sıcaklığı: TS EN ISO 3679
- Soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığı: TS EN 116

### 2.5.1. Yoğunluk Ölçümü

Üretilen biyodizellerin yoğunlukları ISO 4787 standardına uygun olarak hassas terazi ve piknometre kullanılarak ölçülmüştür. Prensip olarak piknometre yardımıyla yoğunluğun tespiti, yoğunluğu bilenen bir akışkanın (genellikle su) hacminin belirlenmesi ilkesine dayanmaktadır. Çalışmada kullanılan piknometre suyun hacmine göre kalibre edilmiştir. Yoğunluk ölçümünde öncelikle, piknometrenin darası ( $m_{\text{dara}}$ ) belirlenir. Sonra, piknometrenin içerisine saf su doldurularak kapağı kapatılır ve bir miktar suyun taşması sağlanır. Taşan su temizlenir ve piknometre kurutulur. Ardından su ile dolu piknometre hassas terazide tartılarak toplam kütlesi,  $m_{\text{toplam}}$  ( $= m_{\text{su}} + m_{\text{dara}}$ ) belirlenir. Daha sonra suyla dolu olarak tarttığımız değerden ( $m_{\text{toplam}}$ ) sadece piknometreyi tarttığımız değer çıkarılarak ( $m_{\text{dara}}$ ) piknometrenin su değeri (suyun kütlesi,  $m_{\text{su}}$ ) belirlenir. Bu değer, saf suyun ilgili sıcaklıktaki yoğunluğuna ( $\rho_{\text{su}}$ ) bölünerek suyun hacmi,

$$V = m_{\text{su}} / \rho_{\text{su}} \quad (2.1)$$

şeklinde belirlenmiş olur. Bu çalışmada kullanılan piknometre için su kütlesi 49,09 g olarak belirlenmiştir. Bu değer piknometrenin katalog değeri ile uyumludur. Sonraki

aşamada, yoğunluğu tayin edilecek sıvı (biyodizel) piknometreye doldurulur. Benzer şekilde, piknometre tartılıp numune ile dolu piknometrenin toplam kütlesi ( $m_{\text{toplam}}$ ) belirlenir. Belirlenen bu değerden piknometrenin darası ( $m_{\text{dara}}$ ) çıkartılarak numunenin, yani biyodizelin kütlesi belirlenmiş olur. Biyodizelin kütlesinin yoğunluğa bölümü hacmini verir ki, bu hacim değeri daha önceden (2.1) numaralı denklemde bulunan hacim değerine eşittir [96-98].

O halde:

$$V = \frac{m_{\text{su}}}{\rho_{\text{su}}} = \frac{m_{\text{biyodizel}}}{\rho_{\text{biyodizel}}} \quad (2.2)$$

düzenlenirse

$$\rho_{\text{biyodizel}} = \frac{m_{\text{toplam}} - m_{\text{dara}}}{m_{\text{su}}} \rho_{\text{su}} \quad (2.3)$$

elde edilir.

(2.3) numaralı denklem kullanılarak bu tezde saf biyodizellerin ve dizel-biyodizel karışımlarının yoğunlukları belirlenmiştir. Suyun yoğunluk değerleri ( $\rho_{\text{su}}$ ) Ek Tablo A-3'te verilmiştir.

Örneğin, %0,25 katalizör oranında sodyum hidroksit (NaOH) kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin 15 ve 40°C'deki yoğunlukları aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

$$m_{\text{biyodizel}} = 86,25 \text{ g}$$

$$m_{\text{dara}} = 42,74 \text{ g}$$

$$m_{\text{su}} = 49,09 \text{ g}$$

$$15^\circ\text{C}'de \rho_{\text{su},15^\circ\text{C}} = 999,96 \text{ kg/m}^3 \text{ (Ek Tablo A-3)}$$

$$40^\circ\text{C}'de \rho_{\text{su},15^\circ\text{C}} = 992,30 \text{ kg/m}^3 \text{ (Ek Tablo A-3)}$$

Bu değerler (2.3) numaralı denklemde yerine konulursa:

$$\rho_{\text{biyodizel},15^\circ\text{C}} = \frac{86,25 - 42,74}{49,09} 999,96$$

$$\rho_{\text{biyodizel},15^\circ\text{C}} = 886,30 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{biyodizel},40^\circ\text{C}} = \frac{86,25 - 42,74}{49,09} 992,30$$

$$\rho_{\text{biyodizel},40^{\circ}\text{C}} = 879,51 \text{ kg/m}^3$$

olarak bulunur.

### 2.5.2. Viskozite Ölçümü

Maddenin yapısının ve sıcaklığın bir fonksiyonu olan viskozite, bir akışkanın yüzey gerilimi altında deforme olmaya karşı gösterdiği direncin ölçüsüdür. Viskozite, akışkanın akmaya karşı gösterdiği iç direnç olarak da tanımlanabilir [99]. Bu çalışmada üretilen biyodizellerin dinamik viskoziteleri DIN 53015 standardına uygun olarak HAAKE Düşen Top Viskozimetresi (Falling Ball Viscometer) kullanılarak ölçülmüştür. Çalışmada kullanılan viskozimetre tüpünün boyutları Şekil 2.25'te gösterilmiştir [100]. Prensipte düşen top viskozimetresi yardımıyla viskozite tespiti, Stokes Yasası ile açıklanabilir [101]. Bu yasaya göre, bir metal küresel bilyenin sıvı içinde limit hızla düşme süresi ölçülerek sıvının viskozitesi belirlenebilir. Bilindiği gibi, sıvı içinde düşmekte olan bir bilyeye, aşağı yönlü yerçekimi kuvveti ( $F_g$ ) ile yukarı yönlü sıvının statik kaldırma kuvveti ( $F_k$ ) ve Stokes sürtünme (direnç) kuvveti ( $F_d$ ) etki eder. Bu üç kuvvet eşitlendiğinde yani,

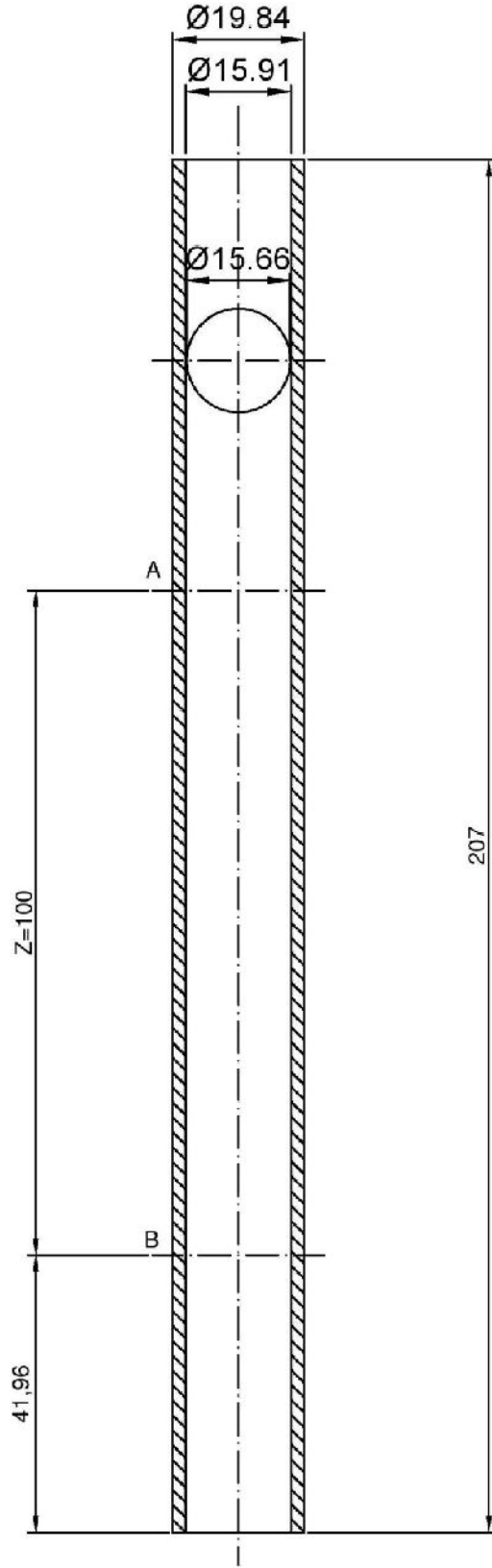
$$F_d + F_k = F_g \quad (2.4)$$

olduğunda bilye limit hıza ulaşır ve bu sabit hızla sıvı içinde aşağıya doğru düşer. Limit hıza ulaşma aralığı geçildikten sonra bilyenin Şekil 2.25'te görülen A ve B yatay çizgileri arasındaki (Z) düşey mesafesi boyunca (100 mm) sabit bir limit hızla düşme süresi olan t bir kronometre yardımıyla ölçülür. Buradan,

$$V = Z/t \quad (2.5)$$

bağıntısı ile limit hız bulunur. Sıvının viskozitesinin belirlenmesi için daha önceden bahsedildiği gibi Stokes yasası kullanılır. Stokes yasasına göre direnç kuvveti ( $F_d$ ),

$$F_d = C_d A_k \rho_{\text{sıvı}} \frac{V^2}{2} \quad (2.6)$$



Şekil 2.25. Viskoizimetre tüpünün boyutları [116]

bağıntısından yararlanılarak bulunabilir. Burada,  $F_d$  [N] sıvının bilyeye uyguladığı direnç kuvvetini,  $C_d$  bilyenin direnç katsayısını,  $A_k$  [m<sup>2</sup>] bilyenin merkezinden geçen tüp eksenine dik kesit alanını,  $\rho_{sivl}$  [kg/m<sup>3</sup>] sıvının yoğunluğunu,  $V$  [m/s] bilyenin hızını temsil etmektedir. (2.6) bağıntısı düzenlenerek hız,

$$V = \left( \frac{2F_d}{C_d A_k \rho_{sivl}} \right)^{1/2} \quad (2.7)$$

olarak elde edilir.  $A_k$  kesit alanı küre için,

$$A_k = \frac{\pi D^2}{4} \quad (2.8)$$

formülü ile rahatlıkla bulunabilir. Burada  $D$  [m] bilyenin çapıdır. Bilyenin  $C_d$  direnç katsayısı, akış laminer olduğu için,

$$C_d = \frac{24}{Re} \quad (2.9)$$

bağıntısı ile bulunabilir.  $Re$  sayısı yerine  $\frac{VD}{\nu_{sivl}}$  veya  $\frac{VD\rho_{sivl}}{\mu_{sivl}}$  yazılırsa direnç katsayısı,

$$C_d = \frac{24\mu_{sivl}}{VD\rho_{sivl}} \quad (2.10)$$

olarak elde edilir. Burada  $\mu_{sivl}$  [kg/ms] sıvının dinamik viskozitesini,  $D$  [m] geometrinin karakteristik uzunluğunu (bilyenin çapını) temsil etmektedir. (2.7) numaralı denklemdeki  $A_k$  ve  $C_d$  yerine sırasıyla (2.8) ve (2.10) numaralı bağıntılar yazıldığında ve gerekli sadeleştirmeler yapıldığında hız,

$$V = \frac{F_d}{6\mu_{sivl}\pi r} \quad (2.11)$$

olarak elde edilir. (2.11) numaralı denklemdeki  $r$  [m] bilyenin yarıçapını temsil etmektedir. (2.4) numaralı denkleme geri döndürülürse, bilyeye etki eden diğer kuvvetler olan aşağı yönlü yerçekimi kuvveti  $F_g$  [N],

$$F_g = \rho_{\text{bilye}} \frac{4}{3} \pi r^3 g \quad (2.12)$$

ve yukarı yönlü statik kaldırma kuvveti  $F_k$  [N],

$$F_k = \rho_{\text{sıvı}} \frac{4}{3} \pi r^3 g \quad (2.13)$$

bağıntıları yardımıyla hesaplanır. Burada,  $\rho_{\text{bilye}}$  ve  $\rho_{\text{sıvı}}$  sırasıyla bilyenin ve sıvının yoğunluğunu,  $g$  yerçekimi ivmesini göstermektedir. (2.4), (2.11), (2.12) ve (2.13) numaralı denklemler birleştirilirse,

$$6V\mu_{\text{sıvı}}\pi r = \frac{4}{3} \pi r^3 g (\rho_{\text{bilye}} - \rho_{\text{sıvı}}) \quad (2.14)$$

elde edilir. (2.14) numaralı denklemdeki hız ( $V$ ) yerine (2.5) numaralı denklem kullanılarak  $V = Z/t$  yazılırsa,

$$9 \frac{Z}{t} \mu_{\text{sıvı}} = 2r^2 g (\rho_{\text{bilye}} - \rho_{\text{sıvı}}) \quad (2.15)$$

elde edilir [101]. (2.15) numaralı denklemdeki  $Z$  düşey mesafesi Şekil 2.25'te görüldüğü gibi 100 mm yani 0,1 m dir. Hesaplamaları daha kolay hale getirmek için  $2r^2$ ,  $g$ ,  $9Z$  sabitleri bir araya getirilerek tek bir  $K$  sabiti tanımlanırsa sıvının dinamik viskozitesi,

$$\mu_{\text{sıvı}} = K (\rho_{\text{bilye}} - \rho_{\text{sıvı}}) t \quad (2.16)$$

bağıntısı yardımıyla bulunabilir [100]. (2.16) eşitliğindeki  $K$  katsayısı, viskozitesi ve yoğunluğu hassas olarak bilinen bir sıvı ve bu sıvının viskozitesine uygun olarak seçilen bir bilye yardımıyla,

$$K = \frac{\mu_{Siv1}}{(\rho_{bilye} - \rho_{Siv1})t} \quad (2.17)$$

bağıntısından deneysel olarak belirlenerek viskozimetrenin kalibrasyonu yapılabilir [100]. Bu çalışmada biyodizelin viskozite değerlerine uygun olarak 2,0 ile 20 cP viskozite aralığı için 15,66 mm çapındaki  $\rho_{bilye} = 2,2 \text{ g/cm}^3$  yoğunluğuna sahip bor silika cam (boron silica glass) bilye kullanılmıştır [100]. Ayrıca, (2.17) denkleminde kullanılan t süresi, ardı ardına gerçekleştirilen üç ölçümden elde edilen sürelerin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Tarafımızdan üretilen bir biyodizel numunesinin dinamik viskozitesi ve yoğunluğu hassas olarak Prof. Dr. Saadetin GÜNER Yakıt Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde ölçtürülerek, (2.17) bağıntısından K katsayısı  $0,057 \text{ mPa} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^3/\text{g} \cdot \text{s}$  olarak belirlenmiş ve böylece viskozimetrenin kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. (2.17) numaralı bağıntıdan yararlanılarak bulunan K sabiti ( $0,057 \text{ mPa} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^3/\text{g} \cdot \text{s}$ ) ve (2.16) numaralı bağıntı kullanılarak, bu tezde saf biyodizellerin ve dizel-biyodizel karışımlarının dinamik viskoziteleri belirlenmiştir. Üretilen biyodizellerin kinematik viskoziteleri ise, (2.18) eşitliğe göre,

$$v_{biyodizel} = \frac{\mu_{biyodizel}}{\rho_{biyodizel}} \quad (2.18)$$

aynı sıcaklık için belirlenmiş olan dinamik viskozitenin yoğunluğa bölünmesi ile belirlenmiştir. Örneğin, %0,25 katalizör oranında sodyum hidroksit (NaOH) kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin  $40^\circ\text{C}$ 'de dinamik ve kinematik viskoziteleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

(2.5.1) başlığı altında  $40^\circ\text{C}$ 'de biyodizelin yoğunluğu  $\rho_{biyodizel,40^\circ\text{C}} = 879,51 \text{ kg/m}^3$  olarak belirlenmişti.

$$\rho_{bilye} = 2,2 \text{ g/cm}^3$$

$$t = 56,15 \text{ s}$$

olduğuna göre, (2.16) numaralı denklem kullanılırsa dinamik viskozite,

$$\mu_{biyodizel,40^\circ\text{C}} = 0,057(2,2 - 0,87951)56,15 = 4,226 \text{ cP}$$

olarak bulunur. (2.18) numaralı denklem kullanılarak kinematik viskozite,

$$v_{\text{biyodizel},40^{\circ}\text{C}} = \frac{4,226}{0,87951} = 4,805 \text{ cSt}$$

olarak belirlenir.

Tüm biyodizel ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluk, dinamik ve kinematik viskozite değerleri (2.5.1) ve (2.5.2) bölümlerinde açıklanan yöntem ile belirlenmiştir.

## 2.6. Belirsizlik Analizi

Deneysel çalışmalarda, ölçülen bir büyüklük ölçüm cihazının hassasiyetine bağlı olarak bir miktar belirsizlik (hata) içerir [102]. Söz konusu büyüklük kullanılarak yapılan diğer hesaplar boyunca bu belirsizlik yayılarak devam eder. Sonuçta, belirlenmek istenen hedef büyüklük kendisinden önceki belirsizliklere bağlı olarak bir miktar belirsizliğe sahip olur. Ayrıca, hedef büyüklükteki değişimin belirsizlik sınırları arasında kalması durumunda, söz konusu değişim bir anlam ifade etmez. Bu nedenle elde edilen sonuçların anlamlılığını ve güvenilirliğini göstermek amacıyla belirsizlik analizinin uygulanması gerekir. Bu çalışmada, ölçülen ve hesaplanan büyüklüklerin belirsizlikleri Kline ve McClintock tarafından önerilen yöntem ile belirlenmiştir [103]. Bu yöntemle göre, ölçülen veya hesaplanan büyüklük  $R$  ve bu büyüklüğe etki eden  $n$  adet bağımsız değişkenler  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  ise,

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (2.19)$$

yazılabilir. Her bir bağımsız değişkene ait belirsizlik  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$  ve  $R$  büyüklüğünün belirsizliği  $w_R$  ise,

$$w_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} \cdot w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} \cdot w_2 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_3} \cdot w_3 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} \cdot w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.20)$$

şeklinde hesaplanmaktadır [103]. Bu tezde yoğunluk ile dinamik ve kinematik viskozite değerlerinin belirsizlikleri (2.20) bağıntısına göre belirlenmiştir. Bu bağıntıda,  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$  değerleri oransal belirsizlik olarak değil boyutlu belirsizlik olarak hesaplanmıştır.



### 2.6.1. Yoğunluk Ölçümü İçin Belirsizlik Analizi

Biyodizelin yoğunluğu,

$$\rho_{\text{biyodizel}} = \frac{m_{\text{toplam}} - m_{\text{dara}}}{m_{\text{su}}} \rho_{\text{su}} \quad (2.3)$$

şeklindeki (2.3) kullanılarak hesaplanmıştır. Belirsizlik analizi için gerekli terimler (2.19) ve (2.20) denklemlerine uyarlanırsa:

$$\rho_{\text{biyodizel}} = \rho_{\text{biyodizel}}(m_{\text{toplam}}, m_{\text{dara}})$$

$$R \equiv \rho_{\text{biyodizel}}$$

$$x_1 \equiv m_{\text{toplam}}$$

$$x_2 \equiv m_{\text{dara}}$$

$$\frac{\partial \rho_{\text{biyodizel}}}{\partial m_{\text{toplam}}} = \frac{1}{m_{\text{su}}} \rho_{\text{su}}$$

$$\frac{\partial \rho_{\text{biyodizel}}}{\partial m_{\text{dara}}} = \frac{-1}{m_{\text{su}}} \rho_{\text{su}}$$

olarak belirlenir. (2.5.1) başlığında belirtildiği gibi, (2.3) bağıntısındaki  $\rho_{\text{su}}$  değeri yoğunluğun hesaplandığı sıcaklıktaki suyun yoğunluğudur ve Ek Tablo A-3'te verilmektedir. Ayrıca, piknometrenin su değeri (suyun kütlesi,  $m_{\text{su}}$ ) 49,09 g, piknometrenin darası ( $m_{\text{dara}}$ ) ise 42,74 g olarak belirlenmiştir. Kullanılan hassas terazinin belirsizliği 0,01 g olduğu için, toplam kütle (  $m_{\text{toplam}} = m_{\text{su}} + m_{\text{dara}}$  ) ölçümünden kaynaklanan belirsizlik  $w_1 = w_{m_{\text{toplam}}} = 0,01$  g ve piknometrenin kütlelerinin yani daranın ( $m_{\text{dara}}$ ) ölçümünden kaynaklanan belirsizlik  $w_2 = w_{m_{\text{dara}}} = 0,01$  g'dır. Buna göre, örneğin %0,25 katalizör oranında sodyum hidroksit (NaOH) kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin 40°C'deki yoğunluk değerinin belirsizliği aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

$$\rho_{\text{su},40^\circ\text{C}} = 992,30 \text{ kg/m}^3 \text{ (Ek Tablo A-3)}$$

$$w_{\rho_{\text{biyodizel},40^\circ\text{C}}} = \left[ \left( \frac{1}{m_{\text{su}}} \rho_{\text{su},40^\circ\text{C}} w_{m_{\text{toplam}}} \right)^2 + \left( \frac{-1}{m_{\text{su}}} \rho_{\text{su},40^\circ\text{C}} w_{m_{\text{dara}}} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$w_{\rho_{\text{biyodizel},40^\circ\text{C}}} = \left[ \left( \frac{1}{49,09} \cdot 992,30 \cdot 0,01 \right)^2 + \left( \frac{-1}{49,09} \cdot 992,30 \cdot 0,01 \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$w_{\rho_{\text{biyodizel},40^\circ\text{C}}} = 0,2859 \text{ kg/m}^3$$

İlgili biyodizelin 40°C'deki yoğunluğu (2.5.1) başlığı altında açıklandığı gibi 879,51 kg/m<sup>3</sup> olarak bulunmuştu. O halde oransal belirsizlik yüzde cinsinden,

$$w_{\rho_{\text{biyodizel},40^{\circ}\text{C}}} = \frac{0,2859}{879,51} \cdot 100 = \%0,0325$$

olarak belirlenir.

### 2.6.2. Dinamik Viskozite Ölçümü İçin Belirsizlik Analizi

Biyodizelin dinamik viskozitesi,

$$\mu_{\text{biyodizel}} = K (\rho_{\text{bilye}} - \rho_{\text{biyodizel}}) t \quad (2.16)$$

şeklindeki bağıntı kullanılarak hesaplanmıştı. Belirsizlik analizi için gerekli terimler (2.19) ve (2.20) denklemlerine uyarlanırsa:

$$\mu_{\text{biyodizel}} = \mu_{\text{biyodizel}}(\rho_{\text{biyodizel}}, t)$$

$$R \equiv \mu_{\text{biyodizel}}$$

$$x_1 \equiv \rho_{\text{biyodizel}}$$

$$x_2 \equiv t$$

$$\frac{\partial \mu_{\text{biyodizel}}}{\partial \rho_{\text{biyodizel}}} = -Kt$$

$$\frac{\partial \mu_{\text{biyodizel}}}{\partial t} = K (\rho_{\text{bilye}} - \rho_{\text{biyodizel}})$$

olarak belirlenir.  $w_1$  değeri, yani yoğunluktan kaynaklanan belirsizlik ( $w_{\rho_{\text{biyodizel}}}$ ) (2.6.1) başlığı altında hesaplanmıştı.  $\rho_{\text{biyodizel}}$  değeri dinamik viskozitenin hesaplandığı sıcaklıktaki biyodizelin yoğunluk değeridir. Kullanılan kronometrenin, yani sürenin (t) belirsizliği ise,  $w_2 = w_t = 0,01$  s'dir. Buna göre, örneğin %0,25 katalizör oranında sodyum hidroksit (NaOH) kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin 40°C'deki dinamik viskozite değerinin belirsizliği aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

$$\rho_{\text{biyodizel},40^{\circ}\text{C}} = 879,51 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3$$

$$t = 56,15 \text{ s}$$

$$K = 0,057 \text{ mPa} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^3 / \text{g} \cdot \text{s}$$

$$\rho_{\text{bilye}} = 2,2 \text{ g/cm}^3$$

$$w_{\rho_{\text{biyodizel},40^\circ\text{C}}} = 0,2859 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3$$

$$w_{\mu_{\text{biyodizel},40^\circ\text{C}}} = \left\{ (-K t w_{\rho_{\text{biyodizel},40^\circ\text{C}}})^2 + \left[ K (\rho_{\text{bilye}} - \rho_{\text{biyodizel}}) 0,01 \right]^2 \right\}^{1/2}$$

$$w_{\mu_{\text{biyodizel},40^\circ\text{C}}} = \{ (-0,057 \cdot 56,15 \cdot 0,0002859)^2 + [(0,057 \cdot (2,2 - 0,87951) \cdot 0,01)^2] \}^{1/2}$$

$$w_{\mu_{\text{biyodizel},40^\circ\text{C}}} = 1,1848 \cdot 10^{-3} \text{ cP}$$

İlgili biyodizelin dinamik viskozitesi (2.5.2) başlığı altında 4,226 cP olarak bulunmuştu. O halde oransal belirsizlik yüzde cinsinden,

$$w_{\mu_{\text{biyodizel},40^\circ\text{C}}} = \frac{1,1848 \cdot 10^{-3}}{4,226} \cdot 100 = \%0,0280$$

olarak belirlenir.

### 2.6.3. Kinematik Viskozitenin Belirlenmesindeki Belirsizlik Analizi

Biyodizelin kinematik viskozitesi,

$$v_{\text{biyodizel}} = \frac{\mu_{\text{biyodizel}}}{\rho_{\text{biyodizel}}} \quad (2.18)$$

şeklindeki bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır. Belirsizlik analizi için gerekli terimler (2.19) ve (2.20) denklemlerine uyarlanırsa:

$$v_{\text{biyodizel}} = v_{\text{biyodizel}}(\rho_{\text{biyodizel}}, \mu_{\text{biyodizel}})$$

$$R \equiv v_{\text{biyodizel}}$$

$$x_1 \equiv \rho_{\text{biyodizel}}$$

$$x_2 \equiv \mu_{\text{biyodizel}}$$

$$\frac{\partial v_{\text{biyodizel}}}{\partial \rho_{\text{biyodizel}}} = - \frac{\mu_{\text{biyodizel}}}{\rho_{\text{biyodizel}}^2}$$

$$\frac{\partial v_{\text{biyodizel}}}{\partial \mu_{\text{biyodizel}}} = \frac{1}{\rho_{\text{biyodizel}}}$$

olarak belirlenir. Yoğunluktan kaynaklanan hata ( $w_1 = w_{\rho_{\text{biyodizel}}}$ ) ve dinamik viskoziteden kaynaklanan hata ( $w_2 = w_{\mu_{\text{biyodizel}}}$ ) değerleri sırasıyla (2.6.1) ve (2.6.2) başlığı altında hesaplanmıştı. Buna göre, örneğin %0,25 katalizör oranında sodyum hidroksit (NaOH) kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin 40°C'deki kinematik viskozite değerinin belirsizliği aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

$$\rho_{\text{biyodizel},40^\circ\text{C}} = 879,51 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3$$

$$\mu_{\text{biyodizel},40^\circ\text{C}} = 4,226 \text{ cP}$$

$$w_{\mu_{\text{biyodizel},40^\circ\text{C}}} = 1,1848 \cdot 10^{-3} \text{ cP}$$

$$w_{\rho_{\text{biyodizel},40^\circ\text{C}}} = 0,2859 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3$$

$$w_{v_{\text{biyodizel},40^\circ\text{C}}} = \left[ \left( -\frac{\mu_{\text{biyodizel},40^\circ\text{C}}}{\rho_{\text{biyodizel},40^\circ\text{C}}^2} w_{\rho_{\text{biyodizel},40^\circ\text{C}}} \right)^2 + \left( \frac{1}{\rho_{\text{biyodizel},40^\circ\text{C}}} w_{\mu_{\text{biyodizel},40^\circ\text{C}}} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$w_{v_{\text{biyodizel},40^\circ\text{C}}} = \left[ \left( -\frac{4,226}{0,87951^2} \cdot 0,2859 \cdot 10^{-3} \right)^2 + \left( \frac{1}{0,87951} \cdot 1,1848 \cdot 10^{-3} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$w_{v_{\text{biyodizel},40^\circ\text{C}}} = 2,0626 \cdot 10^{-3} \text{ cSt}$$

İlgili biyodizelin kinematik viskozitesi (2.5.2) başlığı altında 4,805 cSt olarak bulunmuştu.

O halde oransal belirsizlik yüzde cinsinden,

$$w_{v_{\text{biyodizel},40^\circ\text{C}}} = \frac{2,0626 \cdot 10^{-3}}{4,805} \cdot 100 = \%0,0429$$

olarak belirlenir.

Benzer şekilde tüm tez boyunca ölçülen yoğunluk ve dinamik viskozite ile hesaplanan kinematik viskozite değerleri için belirsizlik yazılan bir Matlab programı yardımıyla hesaplanmıştır. Hesaplanan belirsizliklerin %0,016 ile %0,054 değerleri arasında değiştiği görülmektedir. Belirsizlik değerleri oldukça düşük düzeyde olduğu için ölçüm değerlerinin oldukça yüksek güvenilirliğe sahip olduğu söylenebilir.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Gerçekleştirilen deneysel çalışma üç aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada, (2.4) bölümünde belirtilen parametrelerin (sırasıyla katalizör oranı, reaksiyon sıcaklığı, reaksiyon süresi ve alkol/yağ mol oranı) üretilen biyodizelin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozitesine etkisi tek tek incelenmiştir. Bu aşamada, bir üretim parametresinin etkisi incelenirken diğer parametreler sabit tutulmuştur. Daha açık ifade ile, en düşük viskozitenin elde edildiği parametrik değer optimum kabul edilip bir diğer parametrenin etkisinin incelendiği deneyler sırasında sabit tutulmuştur. Böylece her bir parametrenin etkisi ayrı ayrı incelenmiştir. Daha sonra, en düşük viskoziteyi veren optimum reaksiyon parametrelerine göre üretilen biyodizellerin bazı önemli yakıt özellikleri (parlama noktası sıcaklığı, soğukta filtre tıkkama noktası sıcaklığı ve üst ısıl değer) ile ortalama molekül kütleleri ve kapalı formülleri belirlenmiştir.

İkinci aşamada, iki farklı katalizör için optimum reaksiyon şartlarına göre (en düşük viskoziteyi veren parametreler ışığında) üretilen mısır ve fındık yağı biyodizelleri belirli hacimsel oranlarda ticari dizel yakıtı ile harmanlanarak elde edilen karışımların farklı sıcaklıklardaki dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerleri belirlenmiştir.

Çalışmanın son aşamasında, en küçük kareler regresyonu yöntemi ile saf biyodizel ve karışımların yoğunluk ve viskozite değişimlerine bir- ve iki-boyutlu fonksiyonlar uyumlanmıştır. Elde edilen denklemlerden hesaplanan değerler ile deneysel olarak belirlenen değerler birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

#### 3.1. Mısır Yağından Biyodizel Üretimi

##### 3.1.1. Katalizör Olarak Sodyum Hidroksit (NaOH) Kullanımı

###### a) Katalizör oranının üretilen biyodizelin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozitesine etkisi

Katalizör oranının etkisinin incelendiği deneylerde, sabit tutulan parametreler ve kullanılan katalizör oranları aşağıda verilmektedir:

Kullanılan yağ miktarı: 200 gram

Kullanılan alkol/yağ mol oranı: 6:1

Reaksiyon sıcaklığı: 60°C

Reaksiyon süresi: 60 dakika

Karıştırma hızı: 500 devir/dakika

Katalizör türü: Sodyum hidroksit (NaOH)

Kullanılan katalizör oranları: %0,25, 0,50, 0,75, 0,90, 1,00, 1,10, 1,25 ve 1,50

Söz konusu katalizör oranlarında sodyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizellerinin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin katalizör oranına göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.1, 3.2, 3.3'te verilmektedir. Biyodizel standartlarında viskozite değerleri 40°C, yoğunluk değerleri ise 15°C için verilmektedir. Bu nedenle, çalışma kapsamında üretilen biyodizellerin viskozite ve yoğunluk değerlerinin üretim parametrelerine göre değişimlerinde viskozite değerleri 40°C, yoğunluk değerleri ise 15 °C'deki değerlerdir.

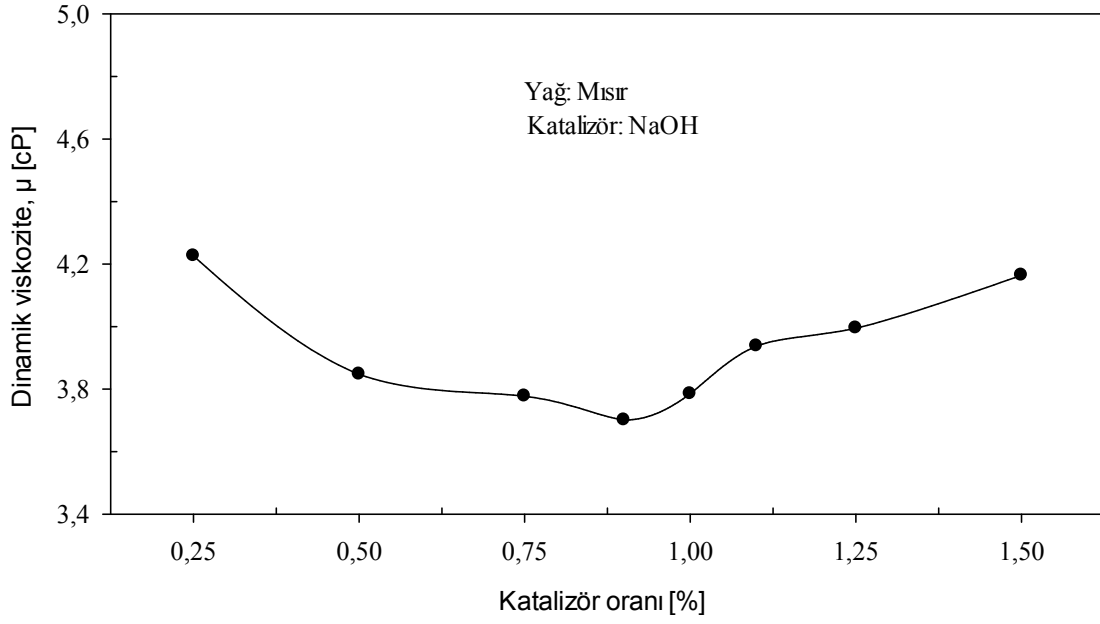
Şekil 3.1'de katalizör olarak sodyum hidroksit kullanılarak mısır yağından üretilen biyodizelin dinamik viskozitesinin katalizör oranına göre değişimi verilmiştir. Deneylede, en düşük %0,25 katalizör oranı kullanılmış ve 0,25 adımlarla %1,50'ye kadar katalizör oranları artırılarak üretimler gerçekleştirilmiştir. Literatürde genel olarak optimum katalizör oranının %1,00 olduğu belirtildiğinden, yapılan çalışmada bu bölgeyi daha hassas inceleyebilmek için %0,90 ve %1,10 katalizör oranları kullanılarak da biyodizel üretimleri gerçekleştirilmiştir. Söz konusu şekilden görüldüğü gibi, üretilen biyodizelin dinamik viskozitesi katalizör oranı arttıkça azalmış, %0,90 katalizör oranında en düşük 3,701 cP değerini almıştır. Bu değerden sonra artan katalizör oranı ile birlikte dinamik viskozite değeri de artış göstermiştir. Düşük katalizör oranlarında, örneğin %0,25 oranında katalizör kullanıldığında, yağın yapısında bulunan serbest yağ asitleri ile katalizörün reaksiyona girmesi nedeniyle arta kalan az miktarda katalizör reaksiyon süresince (60 dakika) transesterifikasyon reaksiyonunu yeterince katalizleyemediğinden transesterifikasyon reaksiyonunun verimi azalmış ve üretilen biyodizelin dinamik viskozitesi yüksek çıkmıştır. Katalizör oranı belirli bir değere kadar artırılmaya devam edildikçe transesterifikasyon reaksiyonunun verimi iyileşmiş, böylece üretilen biyodizelin viskozitesi azalmıştır. Fakat katalizör oranının artırılmaya devam edilmesi durumunda, yağın yapısının büyük kısmını oluşturan trigliseritler hidrolizlenerek sabunlaşmış dolayısıyla katalizörün etkinliği azalarak transesterifikasyon reaksiyonunun verimi azalmıştır. Bu durum, metil ester fazı

(biyodizel) ile gliserin fazının ayrışmasını zorlaştırmış, ayrıca yıkama aşamasında jel ve emülsiyon oluşumuna neden olmuştur. Tüm bu nedenler üretilen biyodizelin viskozitesinin artmasına neden olmuştur. Katalizlemenin yeterince gerçekleştiği ve sabunlaşma reaksiyonlarının düşük seviyelerde olduğu %0,90 katalizör oranında en düşük viskozite değeri elde edilmiştir. Sonuç olarak, az miktarda kullanılan katalizör reaksiyonu yeterince katalizleyemezken, yüksek katalizör oranlarında ise sabunlaşma reaksiyonları nedeniyle reaksiyon verimi azalarak üretilen biyodizelin dinamik viskozitesi artmıştır. Transesterifikasyon reaksiyonunun verimi ile üretilen biyodizelin viskozitesi arasında yukarıdaki açıklamalarda yer alan ilişki literatürdeki benzer çalışmalarda da elde edilmiştir [104-105].

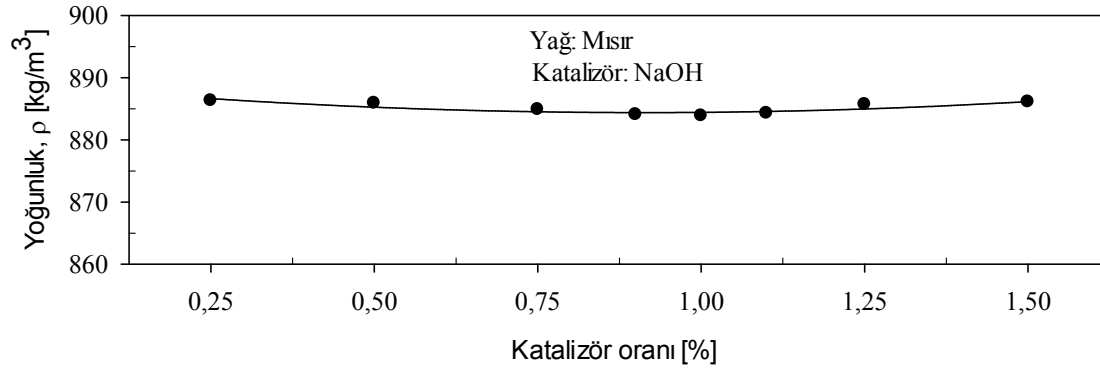
Şekil 3.2’de aynı katalizör oranları kullanılarak üretilen biyodizelin yoğunluğunun katalizör oranına göre değişimi verilmiştir. En düşük yoğunluk değeri %1,00 katalizör oranında  $883,85 \text{ kg/m}^3$  olarak elde edilmiştir. Ayrıca, yoğunluğun katalizör oranı ile birlikte çok fazla değişmediği ve yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmüştür. Yoğunlukların az da olsa değişmesinin sebebi ise reaksiyon verimi ve sabunlaşma reaksiyonları ile açıklanabilir. Düşük katalizör oranlarında arta kalan az miktarda katalizör transesterifikasyon reaksiyonunda trigliseritleri yeterince metil estere (biyodizel) dönüştüremediğinden yani reaksiyon verimi azaldığından, üretilen biyodizelin trigliserit içeriği artmış bu durum biyodizelin yoğunluğunun az da olsa artmasına neden olmuştur. Fakat, aşırı katalizör kullanımında sabun oluşumundan dolayı gliserin-metil ester fazının ayrımı zorlaştığı için biyodizelden uzaklaştırılamayan gliserin ve sabun parçacıkları yoğunluğun artmasına neden olmuştur.

Şekil 3.3’te aynı katalizör oranları kullanılarak üretilen biyodizelin kinematik viskozitesinin katalizör oranına göre değişimi verilmiştir. Kinematik viskozite değeri, ilgili katalizör oranı için dinamik viskozitenin yoğunluğa oranı ile belirlenmektedir. Yoğunluk değerlerinin katalizör oranına göre pek fazla değişmemesi nedeniyle kinematik viskozitenin katalizör oranına göre değişimi de karakteristik olarak dinamik viskozitenin katalizör oranı ile değişimine benzer nitelik göstermiştir.

En düşük dinamik ve kinematik viskozite değerlerinin %0,90 katalizör oranında elde edilmesi nedeniyle mısır yağından sodyum hidroksit kullanılarak biyodizel üretimi için bundan sonra yapılacak parametrik çalışmalarda katalizör oranı olarak %0,90 değeri kullanılacaktır.

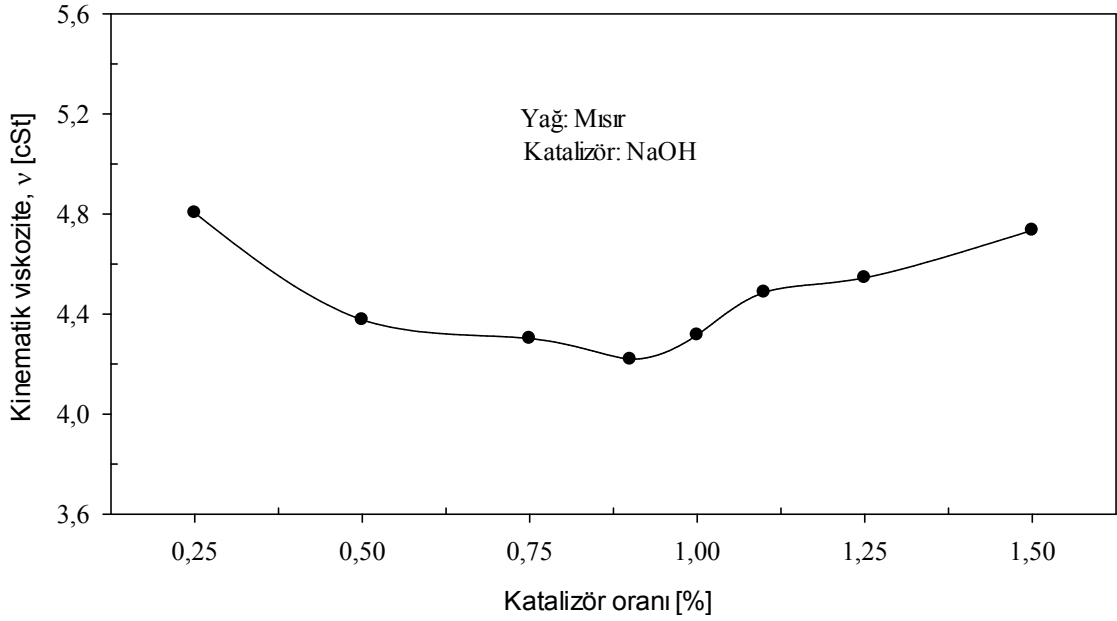


Şekil 3.1. Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin katalizör oranına göre değişimi



Şekil 3.2. Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin yoğunluğunun katalizör oranına göre değişimi





Şekil 3.3. Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin katalizör oranına göre değişimi

#### b) Reaksiyon sıcaklığının üretilen biyodizelin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozitesine etkisi

Reaksiyon sıcaklığının etkisinin incelendiği deneylerde, sabit tutulan parametreler ve seçilen reaksiyon sıcaklıkları aşağıda verilmektedir:

Kullanılan katalizör oranı: %0,90 (1,80 gram)

Katalizör türü: Sodyum hidroksit (NaOH)

Kullanılan yağ miktarı: 200 gram

Kullanılan alkol/yağ mol oranı: 6:1

Reaksiyon süresi: 60 dakika

Karıştırma hızı: 500 devir/dakika

Reaksiyon sıcaklıkları: 40, 50, 60 ve 70°C

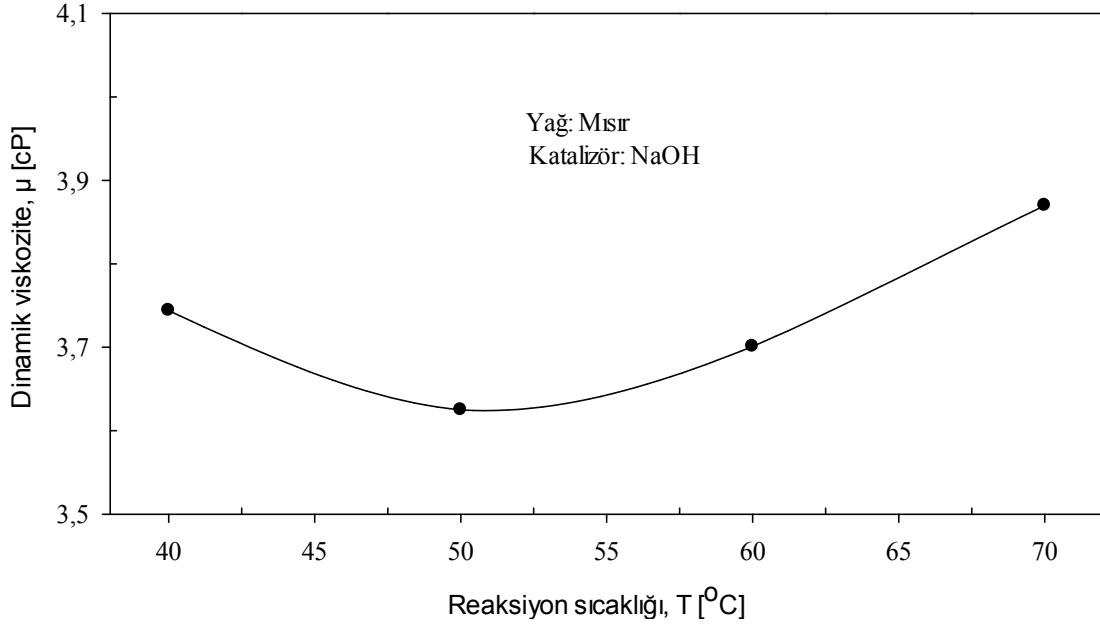
Söz konusu reaksiyon sıcaklıklarında sodyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizellerinin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.4, 3.5, 3.6'da verilmektedir.

Şekil 3.4'te katalizör olarak sodyum hidroksit kullanılarak mısır yağından üretilen biyodizelin dinamik viskozitesinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimi verilmiştir. Söz konusu şekilden görüldüğü gibi, üretilen biyodizelin dinamik viskozitesi reaksiyon sıcaklığı arttıkça azalmış, 50°C reaksiyon sıcaklığında en düşük 3,625 cP değerini almıştır. Bu değerden sonra artan reaksiyon sıcaklığı ile birlikte dinamik viskozite değeri de artış göstermiştir. Düşük sıcaklıklarda transesterifikasyon reaksiyonu başlayamadığından üretilen biyodizelin viskozitesi yüksek çıkmış, reaksiyon sıcaklığı arttıkça moleküllerin hızının artması nedeniyle transesterifikasyon reaksiyonunun verimi artmış bu durum üretilen biyodizelin viskozitesinin azalmasına neden olmuştur. Metil alkolün kaynama noktası sıcaklığı olan 64,5-65 °C 'den daha yüksek sıcaklıklarda alkol buharlaşarak reaksiyon ortamında bulunmayacağı için reaksiyon tamamlanamayacağından reaksiyon sıcaklığı daha fazla artırılmaya devam edildiğinde üretilen biyodizelin viskozitesinin de arttığı görülmüştür. Ayrıca, yine yüksek sıcaklıklarda sabunlaşma reaksiyonlarının artması ve biyodizelin yani metil esterlerin parçalanması nedeniyle üretilen biyodizelin viskozitesi artmıştır.

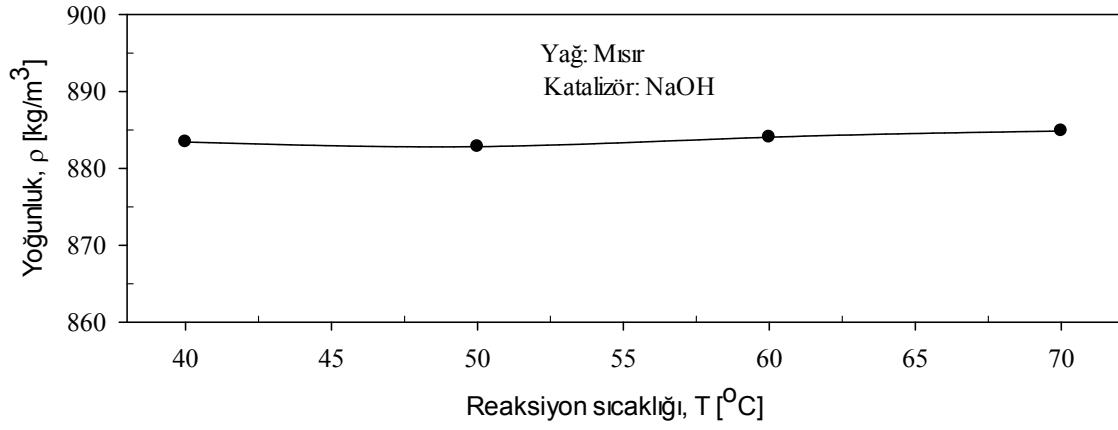
Şekil 3.5'te aynı reaksiyon sıcaklıklarında üretilen biyodizelin yoğunluğunun reaksiyon sıcaklığına göre değişimi verilmiştir. En düşük yoğunluk değeri 50°C reaksiyon sıcaklığında 882,83 kg/m<sup>3</sup> olarak elde edilmiştir. Söz konusu şekilden, yoğunluğun reaksiyon sıcaklığı ile birlikte çok fazla değişmediği ve yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmüştür.

Şekil 3.6'da aynı reaksiyon sıcaklıklarında üretilen biyodizelin kinematik viskozitesinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimi verilmiştir. Kinematik viskozite değeri, ilgili reaksiyon sıcaklığı için dinamik viskozitenin yoğunluğa oranı ile belirlenmektedir. Yoğunluk değerlerinin reaksiyon sıcaklığına göre pek fazla değişmemesi nedeniyle kinematik viskozitenin reaksiyon sıcaklığına göre değişimi de karakteristik olarak dinamik viskozitenin reaksiyon sıcaklığı ile değişimine benzer nitelik göstermiştir.

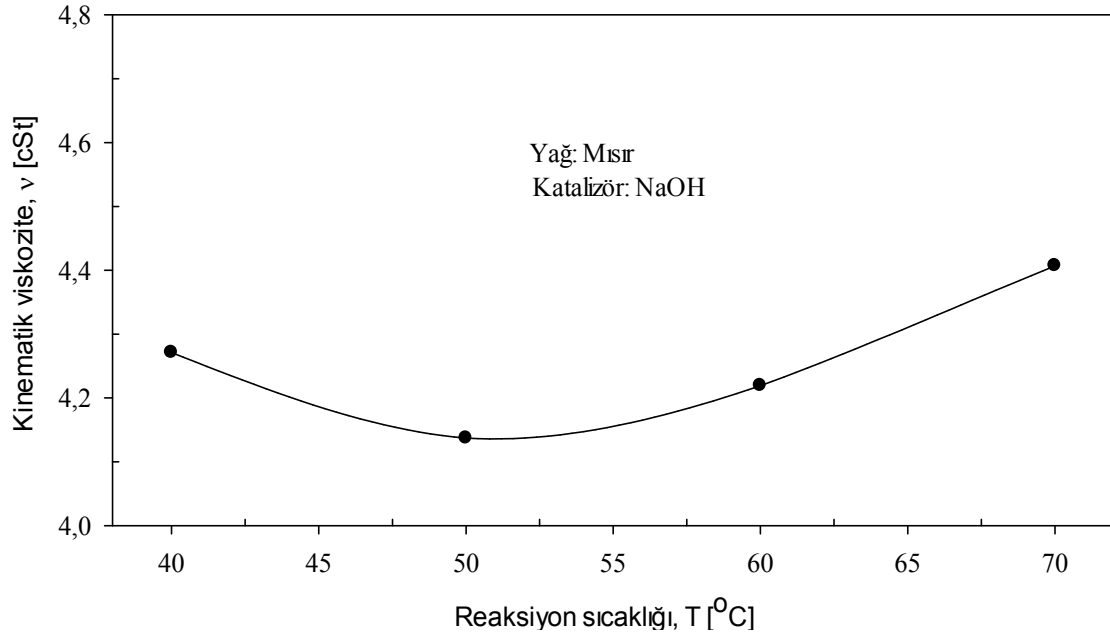
En düşük dinamik ve kinematik viskozite değerlerinin 50°C reaksiyon sıcaklığında elde edilmesi nedeniyle mısır yağından sodyum hidroksit kullanılarak biyodizel üretimi için bundan sonra yapılacak çalışmalarda reaksiyon sıcaklığı 50°C'de sabit tutulacaktır.



Şekil 3.4. Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimi



Şekil 3.5. Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin yoğunluğunun reaksiyon sıcaklığına göre değişimi



Şekil 3.6. Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimi

**c) Reaksiyon süresinin üretilen biyodizelin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozitesine etkisi**

Reaksiyon süresinin etkisinin incelendiği deneylerde, sabit tutulan parametreler ve seçilen reaksiyon süreleri aşağıda verilmektedir:

Kullanılan katalizör oranı: %0,90 (1,80 gram)

Reaksiyon sıcaklığı: 50°C

Katalizör türü: Sodyum hidroksit (NaOH)

Kullanılan yağ miktarı: 200 gram

Kullanılan alkol/yağ mol oranı: 6:1

Karıştırma hızı: 500 devir/dakika

Reaksiyon süreleri: 30, 60, 90 ve 120 dakika

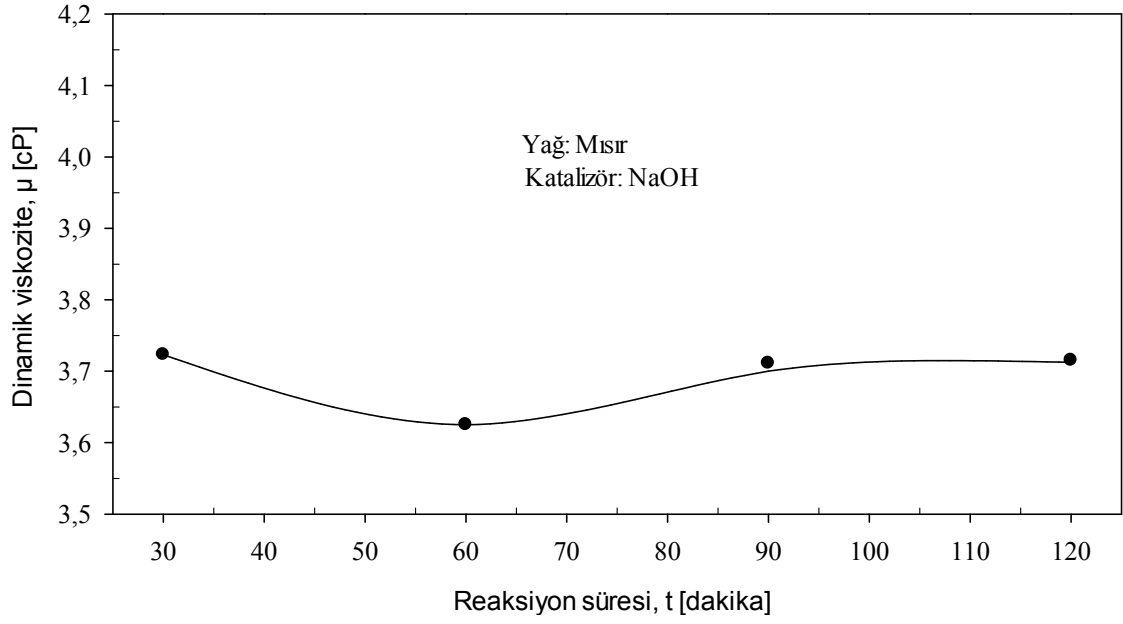
Söz konusu reaksiyon sürelerinde sodyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizellerinin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin reaksiyon süresine göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.7, 3.8, 3.9'da verilmektedir.

Şekil 3.7’de katalizör olarak sodyum hidroksit kullanılarak mısır yağından üretilen biyodizelin dinamik viskozitesinin reaksiyon süresine göre değişimi verilmiştir. Söz konusu şekilden görüldüğü gibi, üretilen biyodizelin dinamik viskozitesi reaksiyon süresi arttıkça azalmış, 60 dakika reaksiyon süresinde en düşük 3,625 cP değerini almıştır. Bu değerden sonra artan reaksiyon süresi ile birlikte dinamik viskozite yavaşça artarak, geçen süre ile birlikte sabit kalma eğilimine girdiği görülmüştür. Kısa reaksiyon sürelerinde transesterifikasyon reaksiyonuna yeterli zaman verilmediğinden transesterifikasyon reaksiyonunun verimi azalarak üretilen biyodizelin viskozitesinin arttığı fakat reaksiyon süresi uzadıkça reaksiyon verimi artıp üretilen biyodizelin viskozitesinin azaldığı görülmüştür. Reaksiyon süresinin aşırı uzaması durumunda öncelikle, meydana gelen esterler tekrar hidrolizlenerek (transesterifikasyon reaksiyonunun tersi) sabunlaşmış ve biyodizelin viskozitesi artmaya başlamıştır, daha sonra bir denge reaksiyonu olan transesterifikasyon reaksiyonu dengeye ulaştığı için üretilen biyodizellerin viskoziteleri yaklaşık olarak sabit kalmıştır.

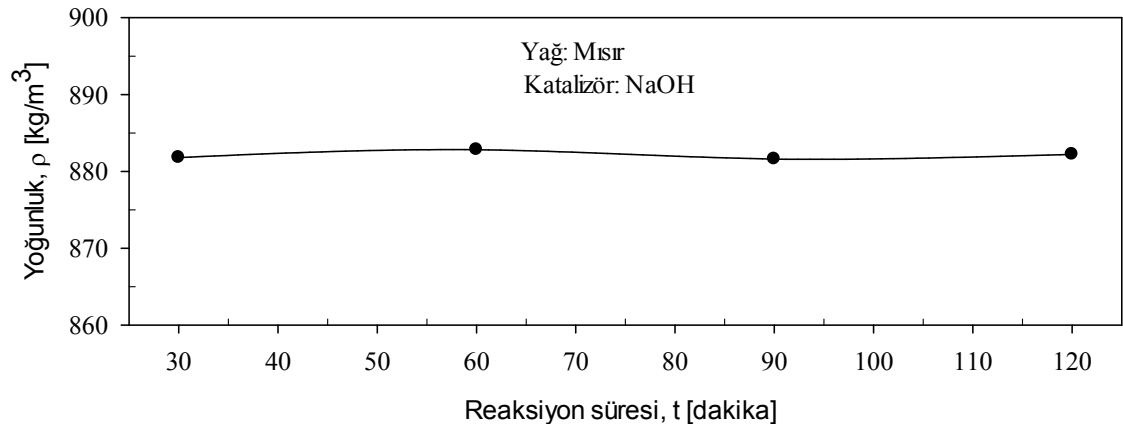
Şekil 3.8’de aynı reaksiyon sürelerinde üretilen biyodizelin yoğunluğunun reaksiyon süresine göre değişimi verilmiştir. En düşük yoğunluk değeri 90 dakika reaksiyon süresi sonunda  $881,61 \text{ kg/m}^3$  olarak elde edilmiştir. Söz konusu şekilden, yoğunluğun reaksiyon süresi ile birlikte çok fazla değişmediği ve yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmüştür.

Şekil 3.9’da aynı reaksiyon sürelerinde üretilen biyodizelin kinematik viskozitesinin reaksiyon süresine göre değişimi verilmiştir. Kinematik viskozite değeri, ilgili reaksiyon süresi için dinamik viskozitenin yoğunluğa oranı ile belirlenmektedir. Yoğunluk değerlerinin reaksiyon süresine göre pek fazla değişmemesi nedeniyle kinematik viskozitenin reaksiyon süresine göre değişimi de karakteristik olarak dinamik viskozitenin reaksiyon süresi ile değişimine benzer nitelik göstermiştir.

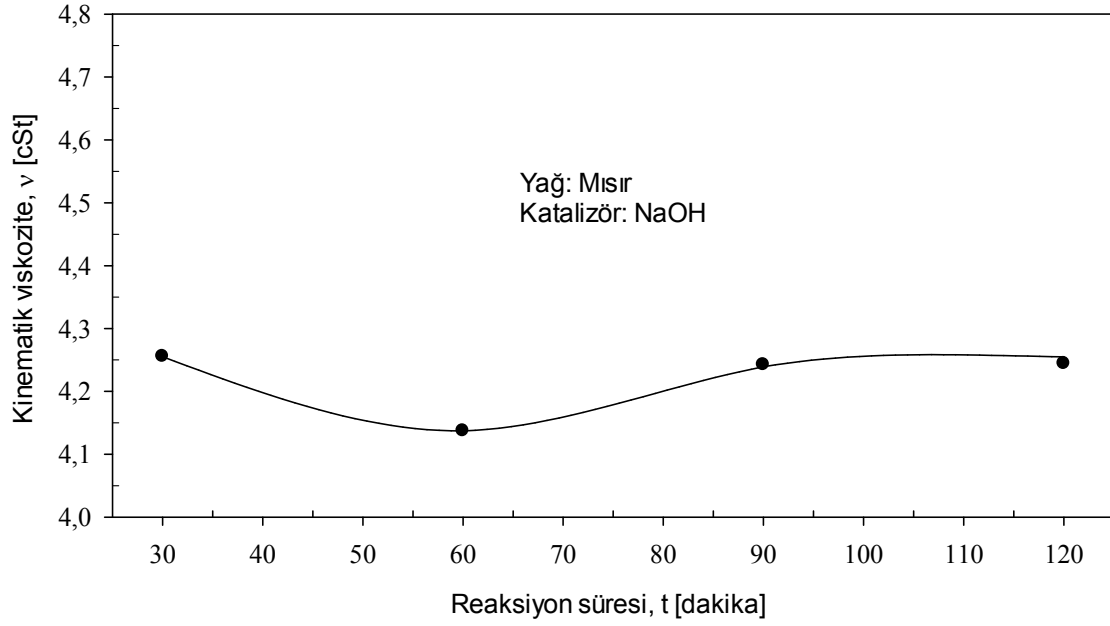
En düşük dinamik ve kinematik viskozite değerlerinin 60 dakika reaksiyon süresinde elde edilmesi nedeniyle mısır yağından sodyum hidroksit kullanılarak biyodizel üretimi için bundan sonra yapılacak çalışmalarda reaksiyon süresi 60 dakikada sabit tutulacaktır.



Şekil 3.7. Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin reaksiyon süresine göre değişimi



Şekil 3.8. Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin yoğunluğunun reaksiyon süresine göre değişimi



Şekil 3.9. Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin reaksiyon süresine göre değişimi

#### d) Alkol/yağ mol oranının üretilen biyodizelin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozitesine etkisi

Alkol/yağ mol oranının etkisinin incelendiği deneylerde, sabit tutulan parametreler ve kullanılan alkol/yağ mol oranları aşağıda verilmektedir:

Kullanılan katalizör oranı: %0,90 (1,80 gram)

Reaksiyon sıcaklığı: 50°C

Reaksiyon süresi: 60 dakika

Katalizör türü: Sodyum hidroksit (NaOH)

Kullanılan yağ miktarı: 200 gram

Karıştırma hızı: 500 devir/dakika

Kullanılan alkol/yağ mol oranları: 3:1, 6:1, 9:1 ve 12:1

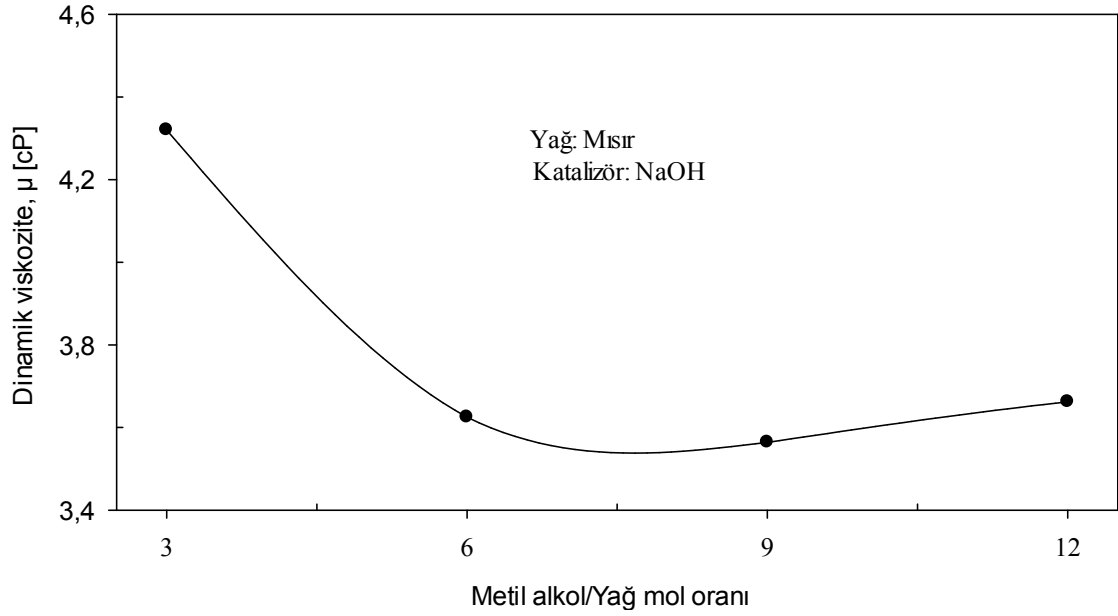
Söz konusu alkol/yağ mol oranları ile sodyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizellerinin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.10, 3.11, 3.12'de verilmektedir.

Şekil 3.10'da katalizör olarak sodyum hidroksit kullanılarak mısır yağından üretilen biyodizelin dinamik viskozitesinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi verilmiştir. Söz konusu şekilden görüldüğü gibi, üretilen biyodizelin dinamik viskozitesi metil alkol/yağ mol oranı arttıkça azalmış, 9:1 mol oranında en düşük 3,564 cP değerini almıştır. Bu değerden sonra artan mol oranı ile birlikte dinamik viskozite değerinin de arttığı görülmüştür. Bilindiği gibi, transesterifikasyon reaksiyonu için stokiometrik olarak 3:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol gereklidir. Deney sonuçları incelendiğinde, 3:1 alkol/yağ mol oranı kullanılarak üretilen biyodizelin en yüksek viskoziteye sahip olduğu görülmüştür. Daha fazla alkol kullanıldığında ise, örneğin 6:1 veya 9:1 alkol/yağ mol oranlarında, bir denge reaksiyonu olan transesterifikasyon reaksiyonu ürünler yönüne kaydığı için reaksiyon verimi artarak üretilen biyodizelin dinamik viskozitesi azalmıştır. Fakat, aşırı miktarlarda alkol kullanıldığında, örneğin 12:1 alkol/yağ mol oranında, gliserinin metil ester (biyodizel) fazındaki çözünürlüğünün artması, ester fazı ile gliserin fazının ayrışmasının zorlaşması ve reaksiyon sırasında gliserinin ortamda çözünmüş olarak bulunması reaksiyonun yönünü girenler yönüne kaydırıldığından reaksiyon verimi azalıp üretilen biyodizelin dinamik viskozitesinin arttığı görülmüştür. Ayrıca, yağ ve alkol birbiri içerisinde çözünmezken reaksiyon ortamında bulunan katalizör alkolde iyi bir şekilde çözüldüğünden, reaksiyon ortamında fazla alkolün bulunması hem reaksiyona girenlerin daha iyi karışmasına engel olduğundan, hem de ortamdaki katalizörü seyrelterek aktivitesini azalttığından yüksek alkol/yağ mol oranlarında üretilen biyodizelin dinamik viskozitesi yüksek çıkmıştır.

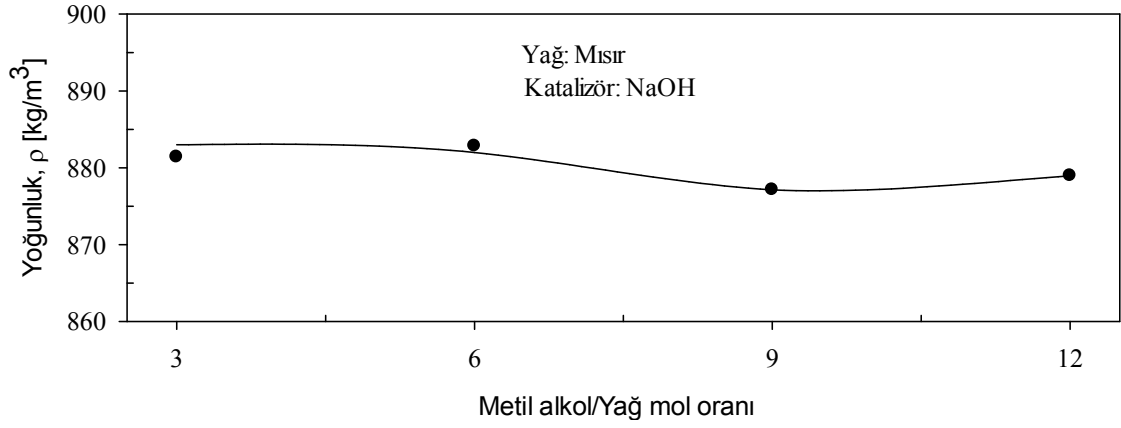
Şekil 3.11'de aynı metil alkol/yağ mol oranları kullanılarak üretilen biyodizelin yoğunluğunun alkol/yağ mol oranına göre değişimi verilmiştir. En düşük yoğunluk değeri 9:1 mol oranında  $877,13 \text{ kg/m}^3$  olarak elde edilmiştir. Söz konusu şekilden, yoğunluğun alkol/yağ mol oranıyla birlikte çok fazla değişmediği ve yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmüştür. Yoğunlukların az da olsa değişmesinin sebebi ise reaksiyon verimi ve emülsiyon oluşumu ile açıklanabilir. Alkol miktarının artırılması durumunda (örneğin 9:1 alkol/yağ mol oranında) transesterifikasyon reaksiyonunun verimi arttığından üretilen biyodizelin viskozite ve yoğunluğunun azaldığı görülmüştür. Fakat alkol miktarının daha fazla artırılması durumunda (örneğin 12:1 alkol/yağ mol oranında) ise emülsiyon oluşumundan kaynaklanan gliserin ve metil ester fazlarının ayrışmasının zorlaşması üretilen biyodizelin viskozite ve yoğunluğunun artmasına neden olmuştur.



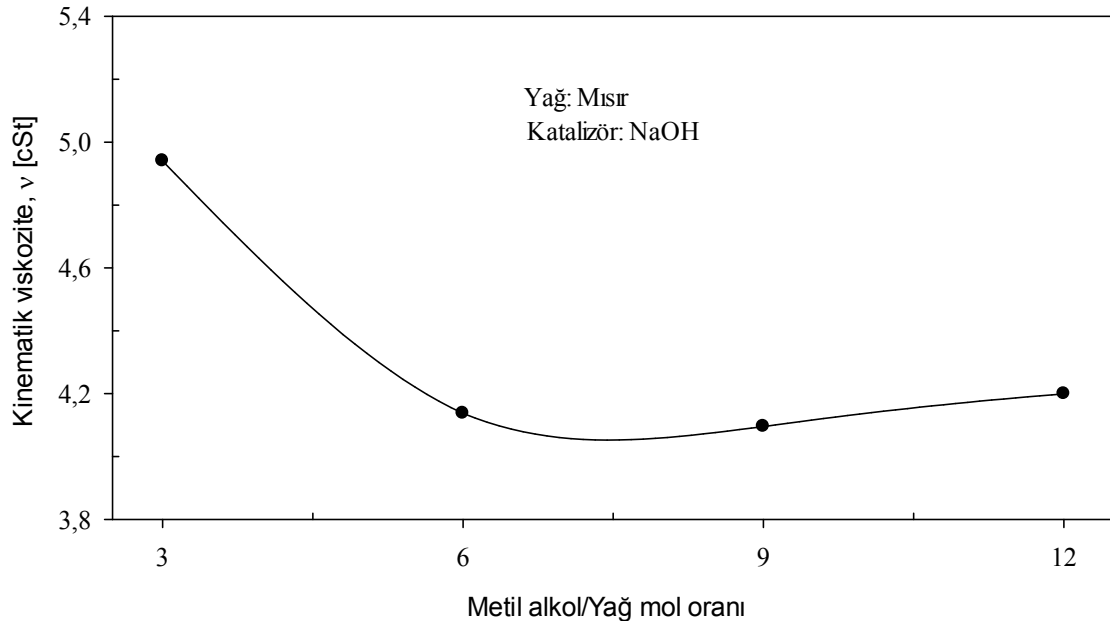
Şekil 3.12’de aynı metil alkol/yağ mol oranları kullanılarak üretilen biyodizelin kinematik viskozitesinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi verilmiştir. Kinematik viskozite değeri, ilgili metil alkol/yağ mol oranı için dinamik viskozitenin yoğunluğa oranı ile belirlenmektedir. Yoğunluk değerlerinin metil alkol/yağ mol oranına göre pek fazla değişmemesi nedeniyle kinematik viskozitenin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi de karakteristik olarak dinamik viskozitenin metil alkol/yağ mol oranı ile değişimine benzer nitelik göstermiştir.



Şekil 3.10. Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi



Şekil 3.11. Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin yoğunluğunun metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi



Şekil 3.12. Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi

En düşük dinamik ve kinematik viskozite değerlerinin 9:1 alkol/yağ mol oranında elde edilmesi nedeniyle mısır yağı biyodizeli üretimi için sodyum hidroksit kullanılarak gerçekleştirilen transesterifikasyon reaksiyonunun en uygun koşulları:

- %0,90 oranında katalizör kullanımı
- 50°C reaksiyon sıcaklığı
- 60 dakika reaksiyon süresi
- 9:1 alkol/yağ mol oranı

olarak belirlenmiştir.

Yukarıda belirlenen şartlara göre üretilen biyodizelin ve satın alınan ticari dizel yakıtının bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri, standartların ilgili değerleri ile karşılaştırılarak Tablo 3.1’de verilmiştir. Söz konusu tablodan görüldüğü gibi, üretilen biyodizelin kinematik viskozitesi, yoğunluğu, parlama noktası sıcaklığı ve soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığı değerleri ilgili standartlara uygundur. Üst ısıl değeri ise standartlarda belirtilmemiş olup dizel yakıtınıninkinden % 13,10 oranında daha düşük çıkmıştır. Yine yukarıda belirlenen şartlara göre üretilen biyodizelin ortalama molekül kütlesi, kapalı formülü ve yapısındaki yağ asidi metil esterlerinin kompozisyonu Tablo 3.2’de verilmiş olup, görüldüğü gibi üretilen biyodizelin içeriğinde ana bileşenler olarak kütleli % 46,954 oranında yapısında karbon atomları arasında bir adet çift bağ bulunduran 18 karbonlu doymamış oleik yağ asidi, %34,243 oranında yapısında iki adet çift bağ bulunduran 18 karbonlu doymamış linoleik yağ asidi ve %15,190 oranında yapısında çift bağ bulunmayan 16 karbonlu doymuş palmitik yağ asidi metil esterinin bulunduğu belirlenmiştir. Söz konusu biyodizelin ortalama molekül kütlesi ve kapalı formülü sırasıyla 292,87 g/mol ve  $C_{18,77}H_{35,16}O_2$  olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.1. Ticari dizel yakıtının ve belirlenen optimum şartlarda mısır yağı ve sodyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri ve ilgili standart değerler

Özellikler	Dizel Yakıtı	Biyodizel	EN 14214	ASTM D 6751
40°C’de kinematik viskozite, cSt	2,700	4,095	3,50-5,00	1,90-6,00
15°C’de yoğunluk, kg/m <sup>3</sup>	833,33	877,13	860-900	*
Parlama noktası sıcaklığı, °C	63,0	169,0	101≤	130≤
Soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığı, °C	-6,0	-5,0	<+5 (yaz) -15< (kış)	*
Üst ısıl değer, kJ/kg	45950	39930	*	*

\* Belirtilmemiş.

Tablo 3.2. Belirlenen optimum şartlarda mısır yağı ve sodyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin ortalama molekül kütlesi, kapalı formülü ile yapısındaki yağ asitlerinin türü ve yağ asidi metil esterlerinin kütleli yüzdeleri

Yağ asidi türü	Yağ asidi metil esterinin kütleli yüzdesi, %	Biyodizelin ortalama molekül kütlesi M [g/mol]	Biyodizelin kapalı formülü
Palmitik (C16:0)	15,190	292,87	C <sub>18,77</sub> H <sub>35,16</sub> O <sub>2</sub>
Oleik (C18:1)	46,954		
Linoleik (C18:2)	34,243		
α-Linolenik (C18:3)	1,276		
Araşidik (C20:0)	0,754		
Gadoleik (C20:1)	0,657		
Behenik (C22:0)	0,487		
Lignoserik (C24:0)	0,439		

### 3.1.2. Katalizör Olarak Potasyum Hidroksit (KOH) Kullanımı

#### a) Katalizör oranının üretilen biyodizelin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozitesine etkisi

Katalizör oranının etkisinin incelendiği deneylerde, sabit tutulan parametreler ve kullanılan katalizör oranları aşağıda verilmektedir:

Kullanılan yağ miktarı: 200 gram

Kullanılan alkol/yağ mol oranı: 6:1

Reaksiyon sıcaklığı: 60°C

Reaksiyon süresi: 60 dakika

Karıştırma hızı: 500 devir/dakika

Katalizör türü: Potasyum hidroksit (KOH)

Kullanılan katalizör oranları: %0,25, 0,50, 0,75, 0,90, 1,00, 1,10, 1,25 ve 1,50

Söz konusu katalizör oranlarında potasyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizellerinin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin katalizör oranına göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.13, 3.14, 3.15'te verilmektedir.

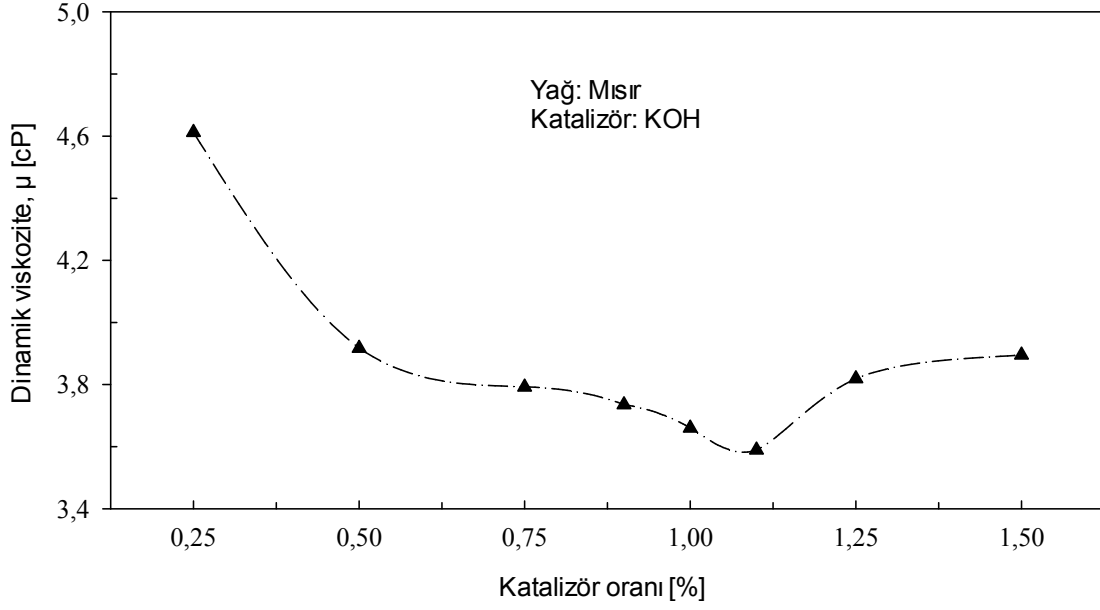
Şekil 3.13'te katalizör olarak potasyum hidroksit kullanılarak mısır yağından üretilen biyodizelin dinamik viskozitesinin katalizör oranına göre değişimi verilmiştir. Söz konusu şekilden görüldüğü gibi, üretilen biyodizelin dinamik viskozitesi katalizör oranı arttıkça

azalmış, %1,10 katalizör oranında en düşük 3,589 cP değerini almıştır. Bu değerden sonra artan katalizör oranı ile birlikte dinamik viskozite değeri de artış göstermiştir. Sodyum hidroksit kullanılarak mısır yağından üretilen biyodizelin dinamik viskozitesinin katalizör oranına göre değişimi (Şekil 3.1) yorumlanırken bahsedildiği gibi, burada da, düşük katalizör oranlarında transesterifikasyon reaksiyonunun yeterince katalizlenememesi nedeniyle, yüksek katalizör oranlarında ise sabunlaşma reaksiyonları nedeniyle transesterifikasyon reaksiyonunun verimi azaldığından her iki durumda da üretilen biyodizelin dinamik viskozitesi artmıştır. En düşük dinamik viskozite değeri, katalizlemenin yeterince etkin olarak gerçekleştiği ve sabunlaşma reaksiyonlarının düşük düzeyde olduğu katalizör oranında elde edilmiştir.

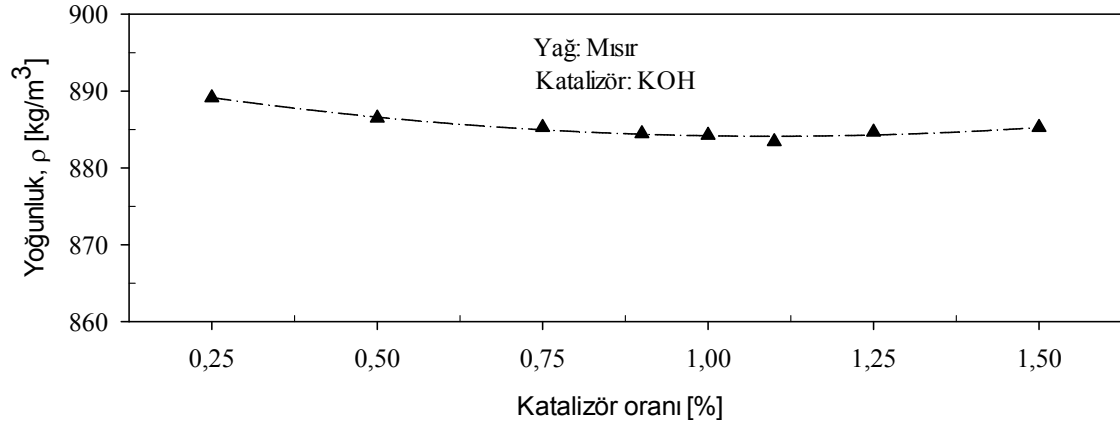
Şekil 3.14'te aynı katalizör oranları kullanılarak üretilen biyodizelin yoğunluğunun katalizör oranına göre değişimi verilmiştir. En düşük yoğunluk değeri %1,10 katalizör oranında 883,44 kg/m<sup>3</sup> olarak elde edilmiştir. Söz konusu şekilden, yoğunluğun katalizör oranı ile birlikte çok fazla değişmediği ve yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmüştür. Sodyum hidroksit kullanılarak mısır yağından üretilen biyodizelin yoğunluğunun katalizör oranına göre değişimi (Şekil 3.2) yorumlanırken bahsedildiği gibi, burada da, düşük katalizör oranlarında arta kalan az miktarda katalizörün trigliseritleri yeterince metil estere dönüştürememesi, aşırı katalizör kullanımında ise sabunlaşma nedeniyle üretilen biyodizelin yoğunluğu artmıştır. En düşük dinamik viskozitenin elde edildiği %1,10 katalizör oranında sabunlaşma reaksiyonları daha düşük seviyede olduğundan üretilen biyodizelin yoğunluk değeri de daha düşük çıkmıştır.

Şekil 3.15'te aynı katalizör oranları kullanılarak üretilen biyodizelin kinematik viskozitesinin katalizör oranına göre değişimi verilmiştir. Kinematik viskozite değeri, ilgili katalizör oranı için dinamik viskozitenin yoğunluğa oranı ile belirlenmektedir. Yoğunluk değerlerinin katalizör oranına göre pek fazla değişmemesi nedeniyle kinematik viskozitenin katalizör oranına göre değişimi de karakteristik olarak dinamik viskozitenin katalizör oranı ile değişimine benzer nitelik göstermiştir.

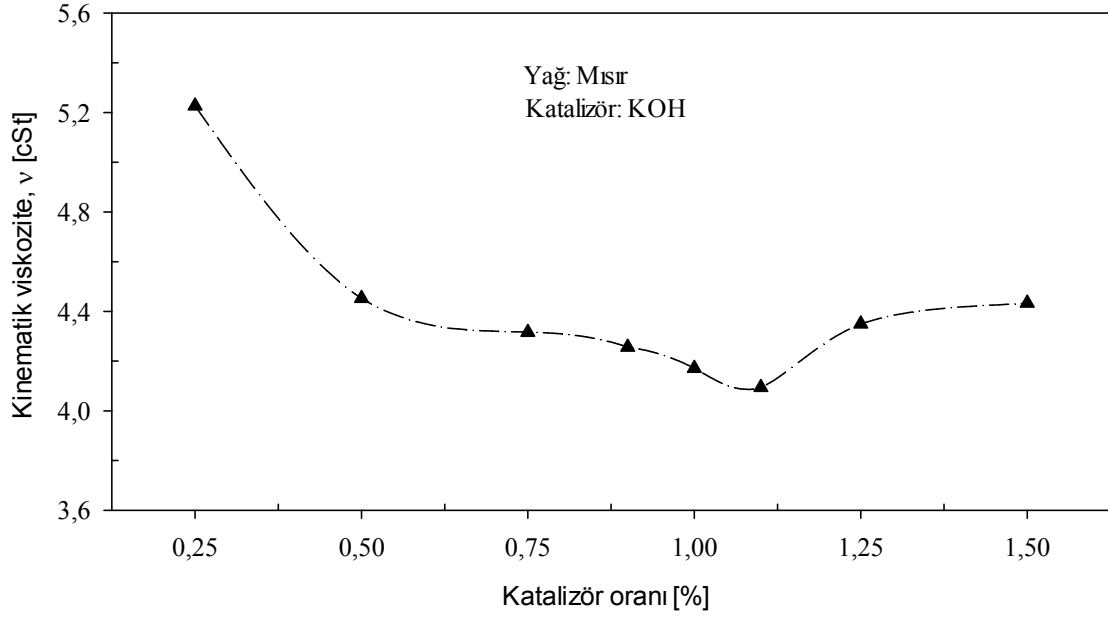
En düşük dinamik ve kinematik viskozite değerlerinin %1,10 katalizör oranında elde edilmesi nedeniyle mısır yağından potasyum hidroksit kullanılarak biyodizel üretimi için bundan sonra yapılacak parametrik çalışmalarda katalizör oranı olarak %1,10 değeri kullanılacaktır.



Şekil 3.13. Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin katalizör oranına göre değişimi



Şekil 3.14. Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin yoğunluğunun katalizör oranına göre değişimi



Şekil 3.15. Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin katalizör oranına göre değişimi

#### b) Reaksiyon sıcaklığının üretilen biyodizelin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozitesine etkisi

Reaksiyon sıcaklığının etkisinin incelendiği deneylerde, sabit tutulan parametreler ve seçilen reaksiyon sıcaklıkları aşağıda verilmektedir:

Kullanılan katalizör oranı: %1,10 (2,20 gram)

Katalizör türü: Potasyum hidroksit (KOH)

Kullanılan yağ miktarı: 200 gram

Kullanılan alkol/yağ mol oranı: 6:1

Reaksiyon süresi: 60 dakika

Karıştırma hızı: 500 devir/dakika

Reaksiyon sıcaklıkları: 40, 50, 60 ve 70°C

Söz konusu reaksiyon sıcaklıklarında potasyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizellerinin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.16, 3.17, 3.18'de verilmektedir.

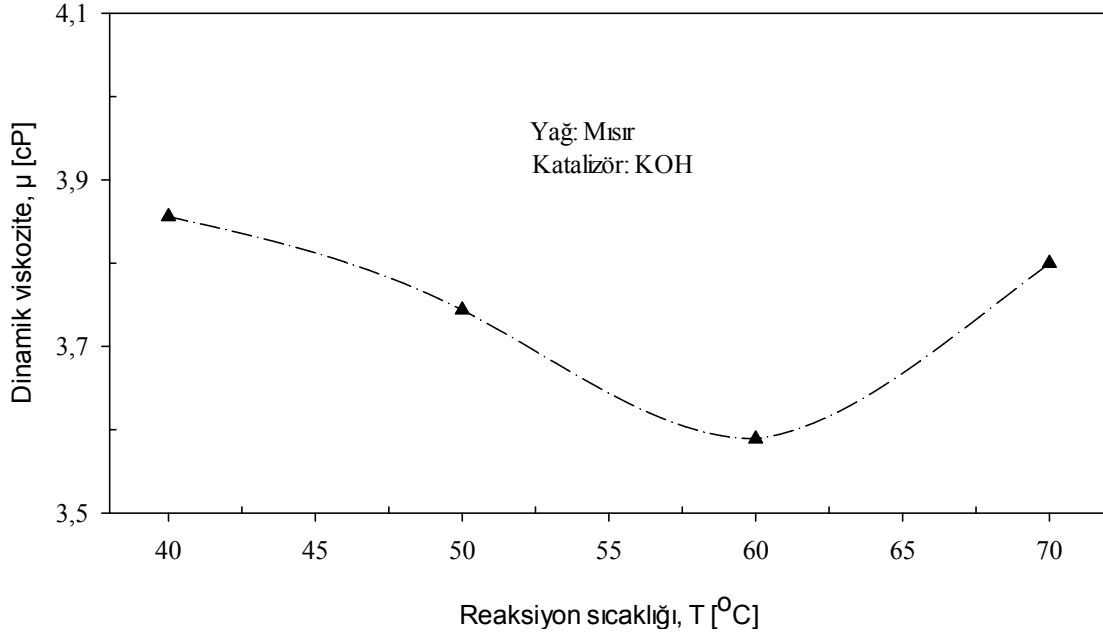
Şekil 3.16’da katalizör olarak potasyum hidroksit kullanılarak mısır yağından üretilen biyodizelin dinamik viskozitesinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimi verilmiştir. Söz konusu şekilden görüldüğü gibi, üretilen biyodizelin dinamik viskozitesi reaksiyon sıcaklığı arttıkça azalmış, 60°C reaksiyon sıcaklığında en düşük 3,589 cP değerini almıştır. Bu değerden sonra artan reaksiyon sıcaklığı ile birlikte dinamik viskozite değeri de artış göstermiştir. Sodyum hidroksit kullanılarak mısır yağından üretilen biyodizelin dinamik viskozitesinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimi (Şekil 3.4) yorumlanırken açıklandığı gibi, burada da, düşük reaksiyon sıcaklıklarında transesterifikasyon reaksiyonunun etkin bir şekilde başlayamaması nedeniyle üretilen biyodizelin viskozitesi yüksek çıkmış, reaksiyon sıcaklığı arttıkça transesterifikasyon reaksiyonunun verimi arttığından dolayı üretilen biyodizelin viskozitesi azalmış fakat reaksiyon sıcaklığının artırılmaya devam edilmesi durumunda alkolün reaksiyon ortamından buharlaşmaya başlaması nedeniyle üretilen biyodizelin viskozitesi artmıştır. Ayrıca, yine yüksek sıcaklıklarda sabunlaşma reaksiyonları ve metil esterlerin parçalanması da üretilen biyodizelin viskozitesinin artmasına neden olmuştur.

Şekil 3.17’de aynı reaksiyon sıcaklıklarında üretilen biyodizelin yoğunluğunun reaksiyon sıcaklığına göre değişimi verilmiştir. En düşük yoğunluk değeri 40 veya 50°C reaksiyon sıcaklığında 883,04 kg/m<sup>3</sup> olarak elde edilmiştir. Söz konusu şekilden, yoğunluğun reaksiyon sıcaklığı ile birlikte pek fazla değişmediği ve yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmüştür.

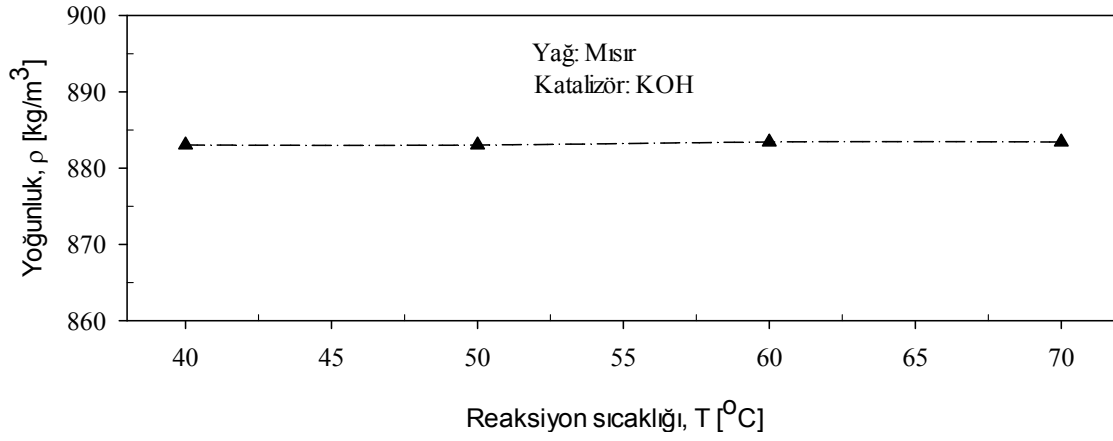
Şekil 3.18’de aynı reaksiyon sıcaklıklarında üretilen biyodizelin kinematik viskozitesinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimi verilmiştir. Kinematik viskozite değeri, ilgili reaksiyon sıcaklığı için dinamik viskozitenin yoğunluğa oranı ile belirlenmektedir. Yoğunluk değerlerinin reaksiyon sıcaklığına göre pek fazla değişmemesi nedeniyle kinematik viskozitenin reaksiyon sıcaklığına göre değişimi de karakteristik olarak dinamik viskozitenin reaksiyon sıcaklığı ile değişimine benzer nitelik göstermiştir.

En düşük dinamik ve kinematik viskozite değerlerinin 60°C reaksiyon sıcaklığında elde edilmesi nedeniyle mısır yağından potasyum hidroksit kullanılarak biyodizel üretimi için bundan sonra yapılacak çalışmalarda reaksiyon sıcaklığı 60°C’de sabit tutulacaktır.

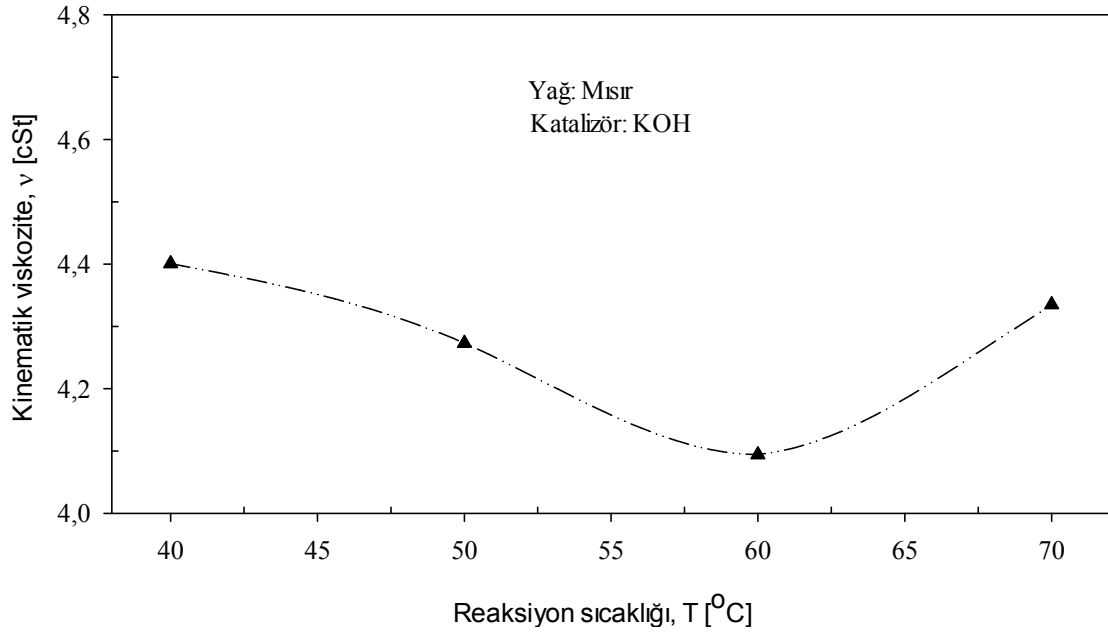




Şekil 3.16. Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimi



Şekil 3.17. Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin yoğunluğunun reaksiyon sıcaklığına göre değişimi



Şekil 3.18. Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimi

**c) Reaksiyon süresinin üretilen biyodizelin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozitesine etkisi**

Reaksiyon süresinin etkisinin incelendiği deneylerde, sabit tutulan parametreler ve seçilen reaksiyon süreleri aşağıda verilmektedir:

Kullanılan katalizör oranı: %1,10 (2,20 gram)

Reaksiyon sıcaklığı: 60°C

Katalizör türü: Potasyum hidroksit (KOH)

Kullanılan yağ miktarı: 200 gram

Kullanılan alkol/yağ mol oranı: 6:1

Karıştırma hızı: 500 devir/dakika

Reaksiyon süreleri: 30, 60, 90 ve 120 dakika

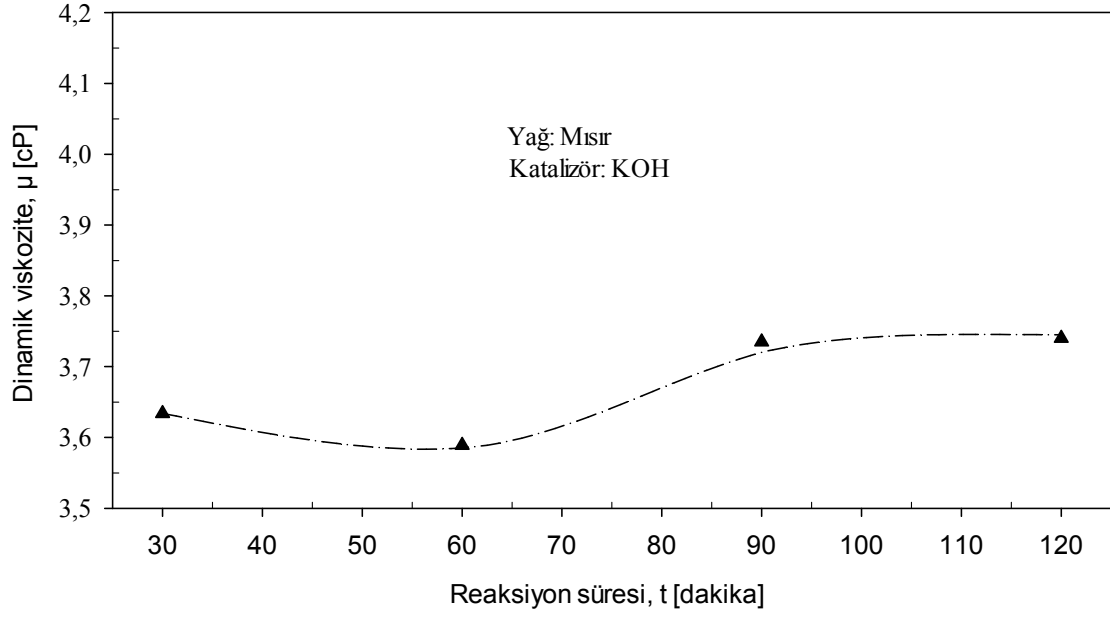
Söz konusu reaksiyon sürelerinde potasyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizellerinin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin reaksiyon süresine göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.19, 3.20, 3.21’de verilmektedir.

Şekil 3.19’da katalizör olarak potasyum hidroksit kullanılarak mısır yağından üretilen biyodizelin dinamik viskozitesinin reaksiyon süresine göre değişimi verilmiştir. Söz konusu şekilden görüldüğü gibi, üretilen biyodizelin dinamik viskozitesi reaksiyon süresi arttıkça azalmış, 60 dakika reaksiyon süresinde en düşük 3,589 cP değerini almıştır. Bu değerden sonra artan reaksiyon süresi ile birlikte dinamik viskozite değeri de yavaşça artarak, geçen süre ile birlikte sabit kalma eğilimine girdiği görülmüştür. Sodyum hidroksit kullanılarak mısır yağından üretilen biyodizelin dinamik viskozitesinin reaksiyon süresine göre değişimi (Şekil 3.7) yorumlanırken açıklandığı gibi, burada da, kısa reaksiyon sürelerinde transesterifikasyon reaksiyonuna yeterli zamanın verilmemesi nedeniyle reaksiyon veriminin azalmasıyla üretilen biyodizelin viskozitesinin arttığı, fakat reaksiyon süresinin uzatılmasıyla veriminin artıp üretilen biyodizelin viskozitesinin azaldığı, reaksiyon süresinin aşırı uzatılması durumunda ise üretilen biyodizelin viskozitesinin önce hidroliz ve sabunlaşma reaksiyonları nedeniyle tekrar arttığı daha sonra transesterifikasyon reaksiyonu dengeye ulaştığı için sabit kalma eğilimi gösterdiği görülmüştür.

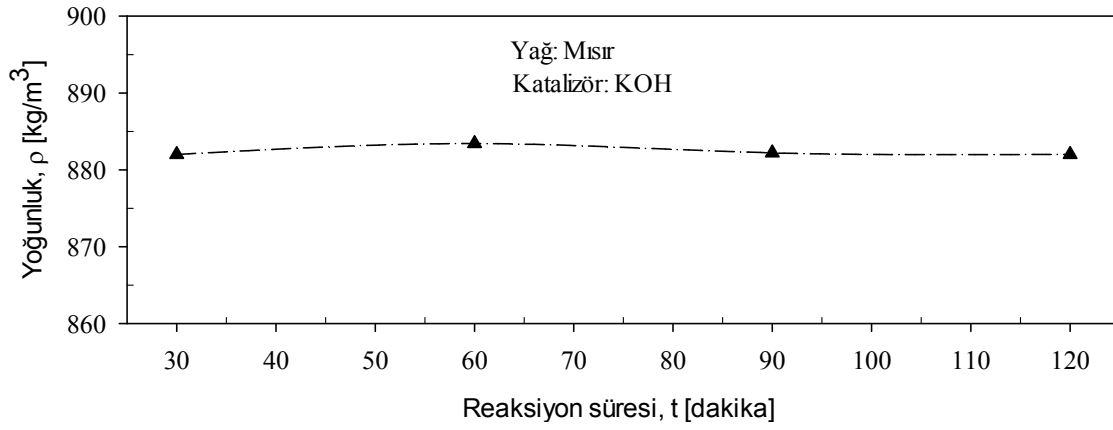
Şekil 3.20’de aynı reaksiyon sürelerinde üretilen biyodizelin yoğunluğunun reaksiyon süresine göre değişimi verilmiştir. En düşük yoğunluk değeri 30 veya 120 dakikalık reaksiyon süresi sonunda  $882,02 \text{ kg/m}^3$  olarak elde edilmiştir. Söz konusu şekilden, yoğunluğun reaksiyon süresi ile birlikte çok fazla değişmediği ve yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmüştür.

Şekil 3.21’de aynı reaksiyon sürelerinde üretilen biyodizelin kinematik viskozitesinin reaksiyon süresine göre değişimi verilmiştir. Kinematik viskozite değeri, ilgili reaksiyon süresi için dinamik viskozitenin yoğunluğa oranı ile belirlenmektedir. Yoğunluk değerlerinin reaksiyon süresine göre pek fazla değişmemesi nedeniyle kinematik viskozitenin reaksiyon süresine göre değişimi de karakteristik olarak dinamik viskozitenin reaksiyon süresi ile değişimine benzer nitelik göstermiştir.

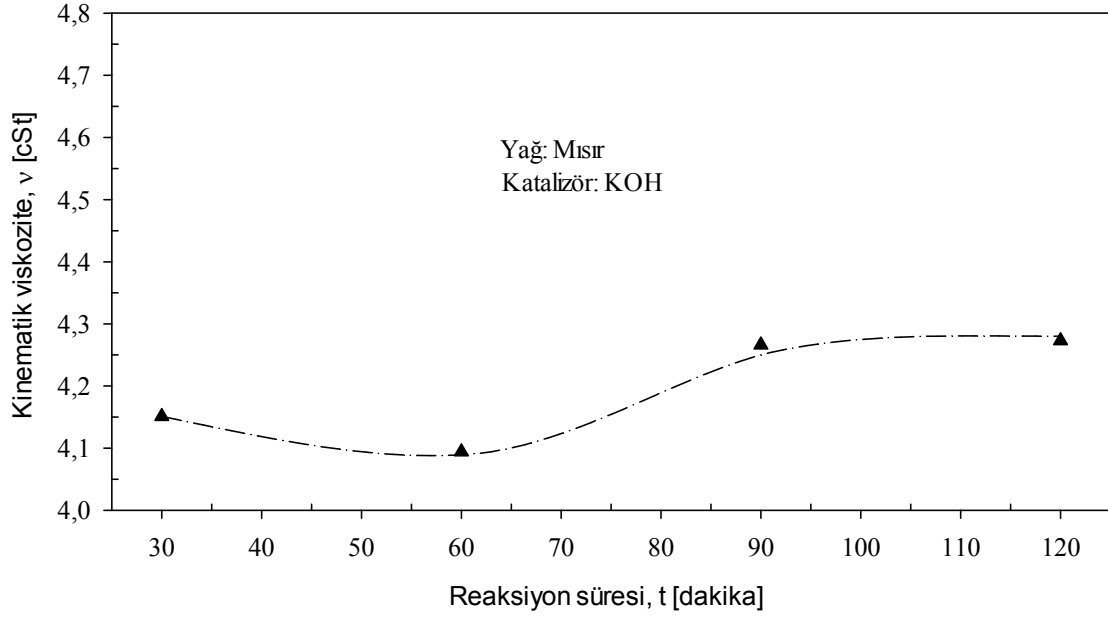
En düşük dinamik ve kinematik viskozite değerlerinin 60 dakika reaksiyon süresinde elde edilmesi nedeniyle mısır yağından potasyum hidroksit kullanılarak biyodizel üretimi için bundan sonra yapılacak çalışmalarda reaksiyon süresi 60 dakikada sabit tutulacaktır.



Şekil 3.19. Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin reaksiyon süresine göre değişimi



Şekil 3.20. Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin yoğunluğunun reaksiyon süresine göre değişimi



Şekil 3.21. Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin reaksiyon süresine göre değişimi

**d) Alkol/yağ mol oranının üretilen biyodizelin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozitesine etkisi**

Alkol/yağ mol oranının etkisinin incelendiği deneylerde, sabit tutulan parametreler ve kullanılan alkol/yağ mol oranları aşağıda verilmektedir:

Kullanılan katalizör oranı: %1,10 (2,20 gram)

Reaksiyon sıcaklığı: 60°C

Reaksiyon süresi: 60 dakika

Katalizör türü: Potasyum hidroksit (KOH)

Kullanılan yağ miktarı: 200 gram

Karıştırma hızı: 500 devir/dakika

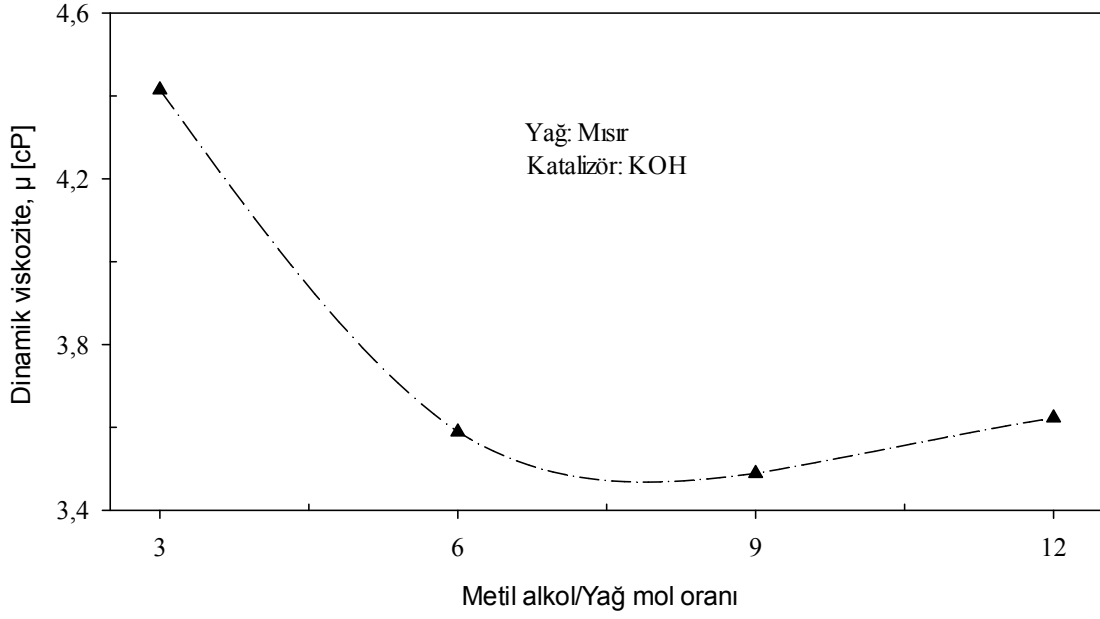
Kullanılan alkol/yağ mol oranları: 3:1, 6:1, 9:1 ve 12:1

Söz konusu alkol/yağ mol oranları ile potasyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizellerinin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.22, 3.23, 3.24'te verilmektedir.

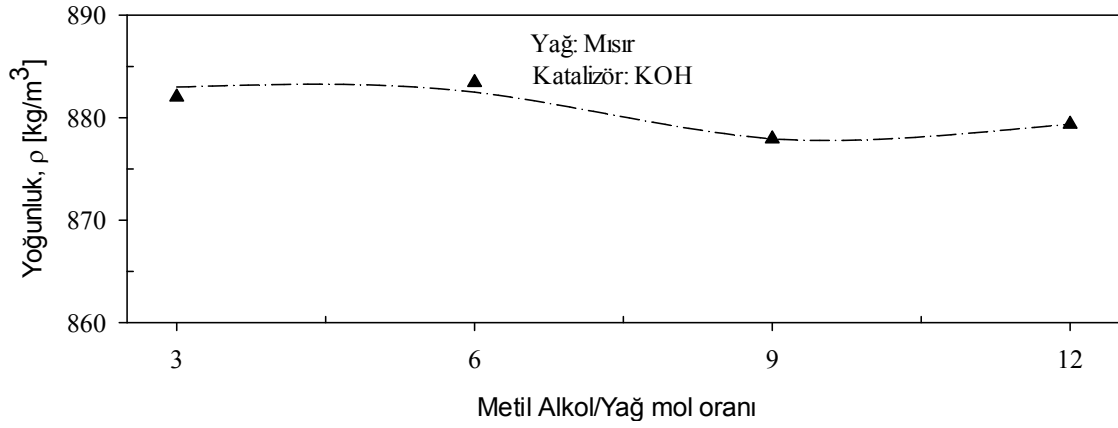
Şekil 3.22’de katalizör olarak potasyum hidroksit kullanılarak mısır yağından üretilen biyodizelin dinamik viskozitesinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi verilmiştir. Söz konusu şekilden görüldüğü gibi, üretilen biyodizelin dinamik viskozitesi metil alkol/yağ mol oranı arttıkça azalmış, 9:1 mol oranında en düşük 3,489 cP değerini almıştır. Bu değerden sonra artan mol oranı ile birlikte dinamik viskozite değerinin de arttığı görülmüştür. Sodyum hidroksit kullanılarak mısır yağından üretilen biyodizelin dinamik viskozitesinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi (Şekil 3.10) yorumlanırken açıklandığı gibi, burada da, stokiyometrik oran olan 3:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen biyodizelin en yüksek viskoziteye sahip olduğu, 6:1 veya 9:1 mol oranlarında bir denge reaksiyonu olan transesterifikasyon reaksiyonu ürünler yönünde kaydığından transesterifikasyon reaksiyonunun verimi iyileşerek üretilen biyodizelin viskozitesinin azaldığı, fakat 12:1 mol oranında yani aşırı alkol kullanımında gliserinin metil ester fazındaki çözünürlüğünün artması ve ester fazı ile gliserin fazının ayrışmasının zorlaşması nedeniyle transesterifikasyon reaksiyonunun verimi azalarak üretilen biyodizelin viskozitesinin arttığı görülmüştür.

Şekil 3.23’te aynı metil alkol/yağ mol oranları kullanılarak üretilen biyodizelin yoğunluğunun alkol/yağ mol oranına göre değişimi verilmiştir. En düşük yoğunluk değeri 9:1 mol oranında  $877,94 \text{ kg/m}^3$  olarak elde edilmiştir. Söz konusu şekilden, yoğunluğun reaksiyon süresi ile birlikte çok fazla değişmediği ve yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmüştür. Sodyum hidroksit kullanılarak mısır yağından üretilen biyodizelin yoğunluğunun metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi (Şekil 3.11) yorumlanırken açıklandığı gibi, burada da, düşük mol oranlarında (3:1) yeterli verim elde edilemediğinden üretilen biyodizelin yapısında çokça trigliserit bulunması, aşırı alkol kullanımında (12:1 mol oranı) ise gliserin-metil ester fazının ayrımının zorlaşması biyodizelin yoğunluğunun artmasına neden olmuştur.

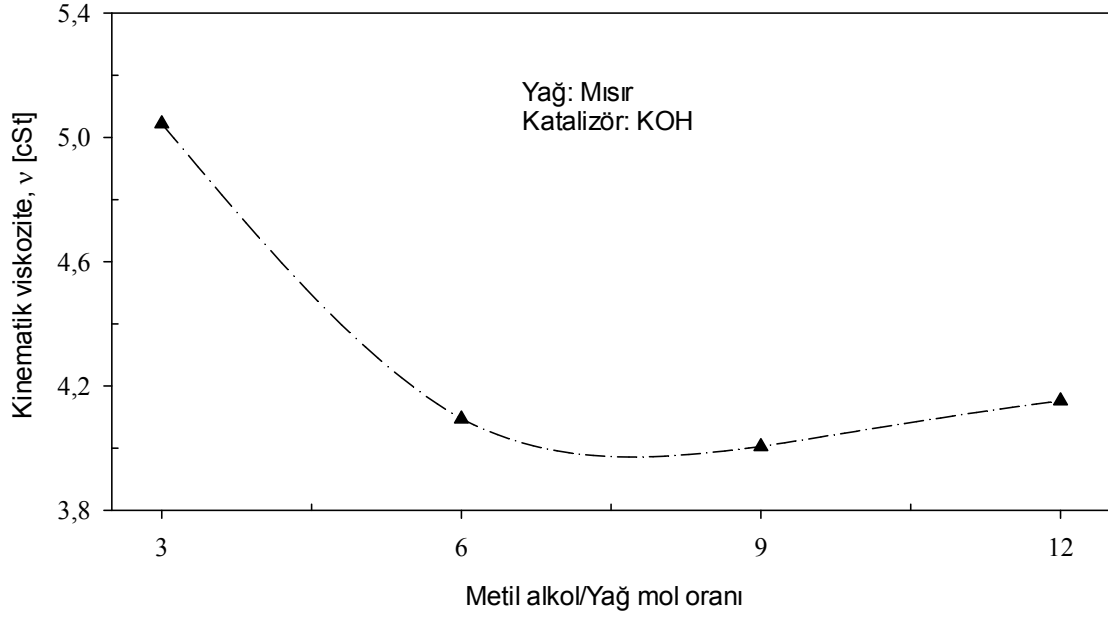
Şekil 3.24’te aynı metil alkol/yağ mol oranları kullanılarak üretilen biyodizelin kinematik viskozitesinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi verilmiştir. Kinematik viskozite değeri, ilgili metil alkol/yağ mol oranı için dinamik viskozitenin yoğunluğa oranı ile belirlenmektedir. Yoğunluk değerlerinin metil alkol/yağ mol oranına göre pek fazla değişmemesi nedeniyle kinematik viskozitenin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi de karakteristik olarak dinamik viskozitenin metil alkol/yağ mol oranı ile değişimine benzer nitelik göstermiştir.



Şekil 3.22. Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi



Şekil 3.23. Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin yoğunluğunun metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi



Şekil 3.24. Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi

En düşük dinamik ve kinematik viskozite değerlerinin 9:1 alkol/yağ mol oranında elde edilmesi nedeniyle mısır yağı biyodizeli üretimi için potasyum hidroksit kullanılarak gerçekleştirilen transesterifikasyon reaksiyonunun en uygun koşulları:

- %1,10 oranında katalizör kullanımı
- 60°C reaksiyon sıcaklığı
- 60 dakika reaksiyon süresi
- 9:1 alkol/yağ mol oranı

olarak belirlenmiştir.

Yukarıda belirlenen şartlara göre üretilen biyodizelin ve satın alınan ticari dizel yakıtının bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri, standartların ilgili değerleri ile karşılaştırılarak Tablo 3.3'te verilmiştir. Söz konusu tablodan görüldüğü gibi, üretilen biyodizelin kinematik viskozitesi, yoğunluğu, parlama noktası sıcaklığı ve soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığı değerleri ilgili standartlara uygundur. Üst ısıl değeri ise standartlarda belirtilmemiş olup dizel yakıtınınkinden % 13,06 oranında daha düşük



çıkıştır. Yine yukarıda belirlenen şartlara göre üretilen biyodizelin ortalama molekül kütlesi, kapalı formülü ve yapısındaki yağ asidi metil esterlerinin kompozisyonu Tablo 3.4'te verilmiş olup, görüldüğü gibi üretilen biyodizelin içeriğinde ana bileşenler olarak kütleli % 47,184 oranında yapısında karbon atomları arasında bir adet çift bağ bulundurulmuş 18 karbonlu doymamış oleik yağ asidi, %29,575 oranında yapısında iki adet çift bağ bulundurulmuş 18 karbonlu doymamış linoleik yağ asidi ve %20,278 oranında yapısında çift bağ bulunmayan 16 karbonlu doymuş palmitik yağ asidi metil esterinin bulunduğu belirlenmiştir. Söz konusu biyodizelin ortalama molekül kütlesi ve kapalı formülü sırasıyla 291,27 g/mol ve  $C_{18,66}H_{35,13}O_2$  olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.3. Ticari dizel yakıtının ve belirlenen optimum şartlarda mısır yağı ve potasyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri ve ilgili standart değerler

Özellikler	Dizel Yakıtı	Biyodizel	EN 14214	ASTM D 6751
40°C'de kinematik viskozite, cSt	2,700	4,005	3,50-5,00	1,90-6,00
15°C'de yoğunluk, kg/m <sup>3</sup>	833,33	877,94	860-900	*
Parlama noktası sıcaklığı, °C	63,0	171,0	101≤	130≤
Soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığı, °C	-6,0	-4,0	<+5 (yaz) -15 < (kış)	*
Üst ısı değeri, kJ/kg	45950	39947	*	*

\* Belirtilmemiş.

Tablo 3.4. Belirlenen optimum şartlarda mısır yağı ve potasyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin ortalama molekül kütlesi, kapalı formülü ile yapısındaki yağ asitlerinin türü ve yağ asidi metil esterlerinin kütleli yüzdeleri

Yağ asidi türü	Yağ asidi metil esterinin kütleli yüzdesi, %	Biyodizelin ortalama molekül kütlesi M [g/mol]	Biyodizelin kapalı formülü
Palmitik (C16:0)	20,278	291,27	$C_{18,66}H_{35,13}O_2$
Oleik (C18:1)	47,184		
Linoleik (C18:2)	29,575		
α-Linolenik (C18:3)	1,077		
Araşidik (C20:0)	0,972		
Gadoleik (C20:1)	0,445		
Behenik (C22:0)	0,470		

## 3.2. Fındık Yağından Biyodizel Üretimi

### 3.2.1. Katalizör Olarak Sodyum Hidroksit (NaOH) Kullanımı

#### a) Katalizör oranının üretilen biyodizelin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozitesine etkisi

Katalizör oranının etkisinin incelendiği deneylerde, sabit tutulan parametreler ve kullanılan katalizör oranları aşağıda verilmektedir:

Kullanılan yağ miktarı: 200 gram

Kullanılan alkol/yağ mol oranı: 6:1

Reaksiyon sıcaklığı: 60°C

Reaksiyon süresi: 60 dakika

Karıştırma hızı: 500 devir/dakika

Katalizör türü: Sodyum hidroksit (NaOH)

Kullanılan katalizör oranları: %0,25, 0,50, 0,75, 0,90, 1,00, 1,10, 1,25 ve 1,50

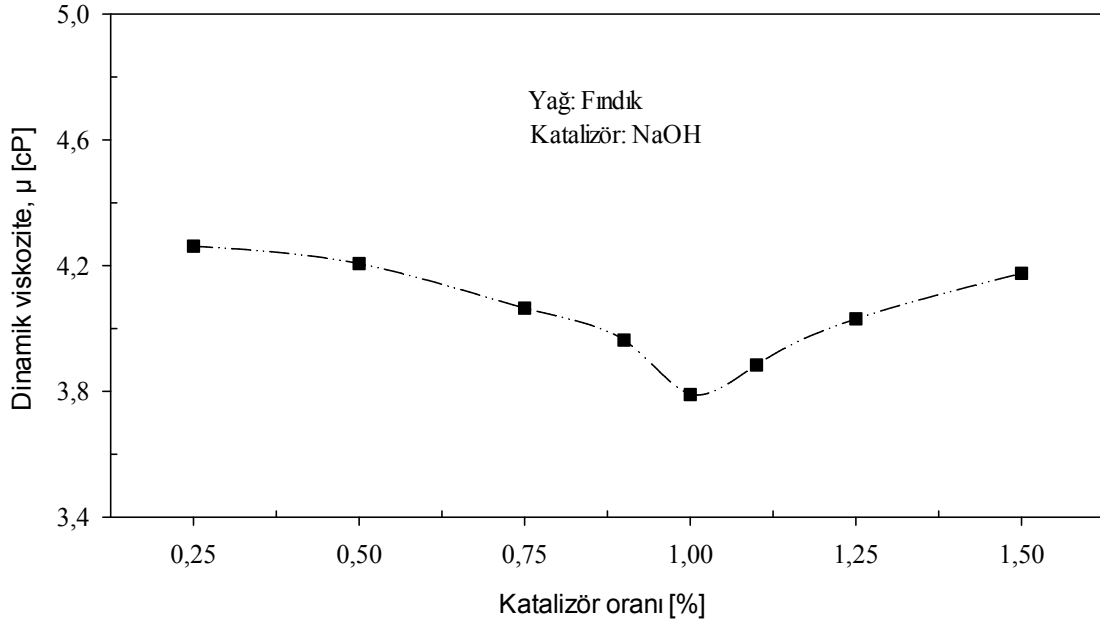
Söz konusu katalizör oranlarında sodyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizellerinin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin katalizör oranına göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.25, 3.26, 3.27’de verilmektedir.

Şekil 3.25’te katalizör olarak sodyum hidroksit kullanılarak fındık yağından üretilen biyodizelin dinamik viskozitesinin katalizör oranına göre değişimi verilmiştir. Söz konusu şekilden görüldüğü gibi, üretilen biyodizelin dinamik viskozitesi katalizör oranı arttıkça azalmış, %1,00 katalizör oranında en düşük 3,790 cP değerini almıştır. Bu değerden sonra artan katalizör oranı ile birlikte dinamik viskozite değeri de artış göstermiştir. Sodyum hidroksit kullanılarak mısır yağından üretilen biyodizelin dinamik viskozitesinin katalizör oranına göre değişimi (Şekil 3.1) yorumlanırken bahsedildiği gibi, burada da, düşük katalizör oranlarında transesterifikasyon reaksiyonunun yeterince katalizlenememesi, yüksek katalizör oranlarında ise sabunlaşma reaksiyonları ve metil ester fazı ile gliserin fazının yeterince ayrıştırılamaması nedeniyle transesterifikasyon reaksiyonunun verimi azalmış ve her iki durumda da üretilen biyodizelin dinamik viskozitesi artmıştır. En düşük dinamik viskozite değeri katalizlemenin yeterince etkin olarak gerçekleştiği ve sabunlaşma reaksiyonlarının daha düşük düzeyde olduğu katalizör oranında elde edilmiştir.

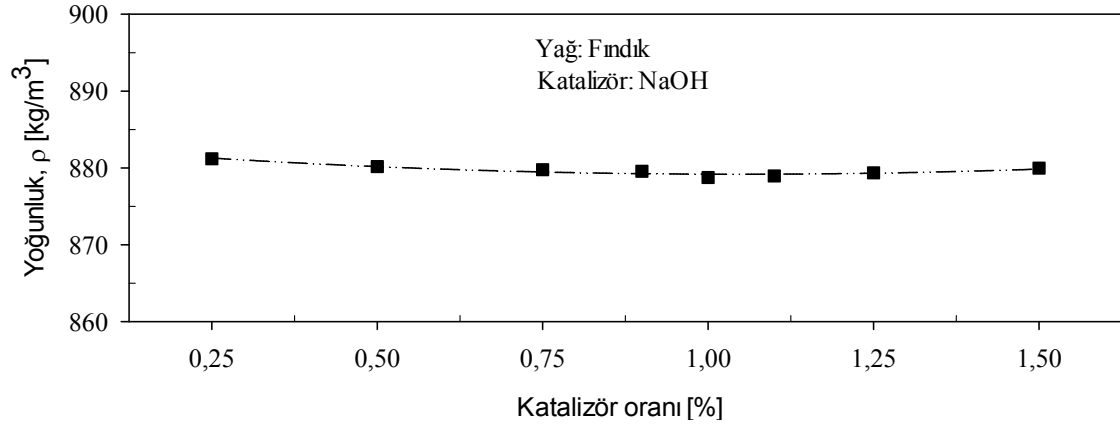
Şekil 3.26’da aynı katalizör oranları kullanılarak üretilen biyodizelin yoğunluğunun katalizör oranına göre değişimi verilmiştir. En düşük yoğunluk değeri %1,00 katalizör oranında 878,76 kg/m<sup>3</sup> olarak elde edilmiştir. Söz konusu şekilden, yoğunluğun katalizör oranı ile birlikte çok fazla değişmediği ve yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmüştür. Sodyum hidroksit kullanılarak mısır yağından üretilen biyodizelin yoğunluğunun katalizör oranına göre değişimi (Şekil 3.2) yorumlanırken bahsedildiği gibi, burada da, düşük katalizör oranlarında üretilen biyodizelin yapısında trigliseritlerin bulunması, aşırı katalizör kullanımında ise sabunlaşma nedeniyle üretilen biyodizelin yoğunluğu yüksek çıkmıştır. En düşük dinamik viskozitenin elde edildiği % 1,00 katalizör oranında sabunlaşma reaksiyonları daha düşük seviyede olduğundan üretilen biyodizelin yoğunluk değeri de daha düşük çıkmıştır.

Şekil 3.27’de aynı katalizör oranları kullanılarak üretilen biyodizelin kinematik viskozitesinin katalizör oranına göre değişimi verilmiştir. Kinematik viskozite değeri, ilgili katalizör oranı için dinamik viskozitenin yoğunluğa oranı ile belirlenmektedir. Yoğunluk değerlerinin katalizör oranına göre pek fazla değişmemesi nedeniyle kinematik viskozitenin katalizör oranına göre değişimi de karakteristik olarak dinamik viskozitenin katalizör oranı ile değişimine benzer nitelik göstermiştir.

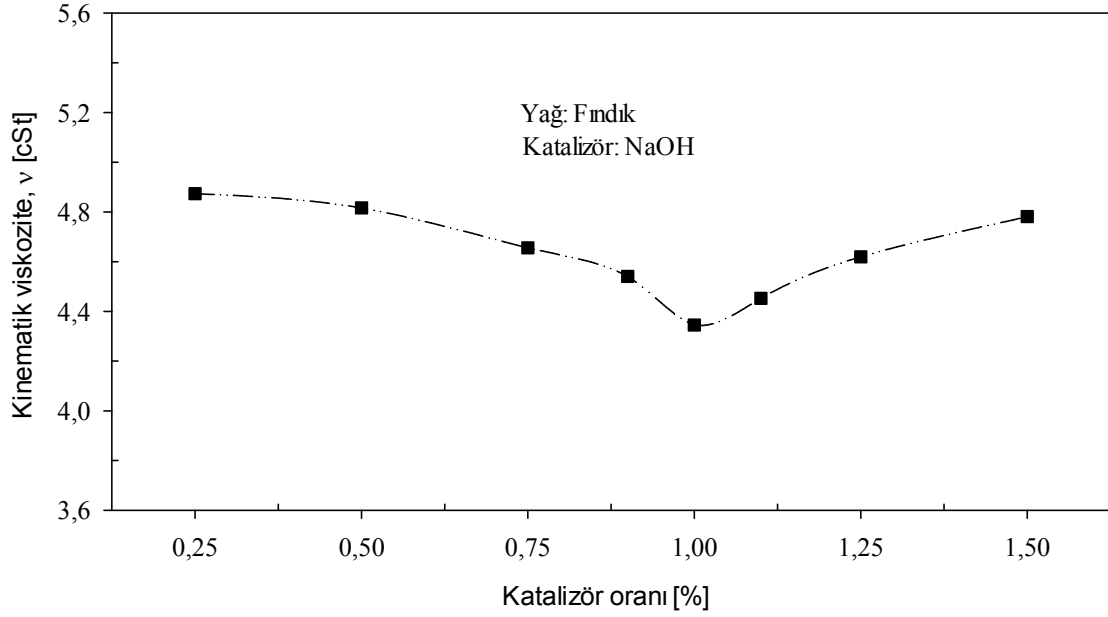
En düşük dinamik ve kinematik viskozite değerlerinin %1,00 katalizör oranında elde edilmesi nedeniyle fındık yağından sodyum hidroksit kullanılarak biyodizel üretimi için bundan sonra yapılacak parametrik çalışmalarda katalizör oranı olarak % 1,00 değeri kullanılacaktır.



Şekil 3.25. Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin katalizör oranına göre değişimi



Şekil 3.26. Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin yoğunluğunun katalizör oranı göre değişimi



Şekil 3.27. Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin katalizör oranına göre değişimi

### b) Reaksiyon sıcaklığının üretilen biyodizelin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozitesine etkisi

Reaksiyon sıcaklığının etkisinin incelendiği deneylerde, sabit tutulan parametreler ve seçilen reaksiyon sıcaklıkları aşağıda verilmektedir:

Kullanılan katalizör oranı: %1,00 (2,00 gram)

Katalizör türü: Sodyum hidroksit (NaOH)

Kullanılan yağ miktarı: 200 gram

Kullanılan alkol/yağ mol oranı: 6:1

Reaksiyon süresi: 60 dakika

Karıştırma hızı: 500 devir/dakika

Reaksiyon sıcaklıkları: 40, 50, 60 ve 70°C

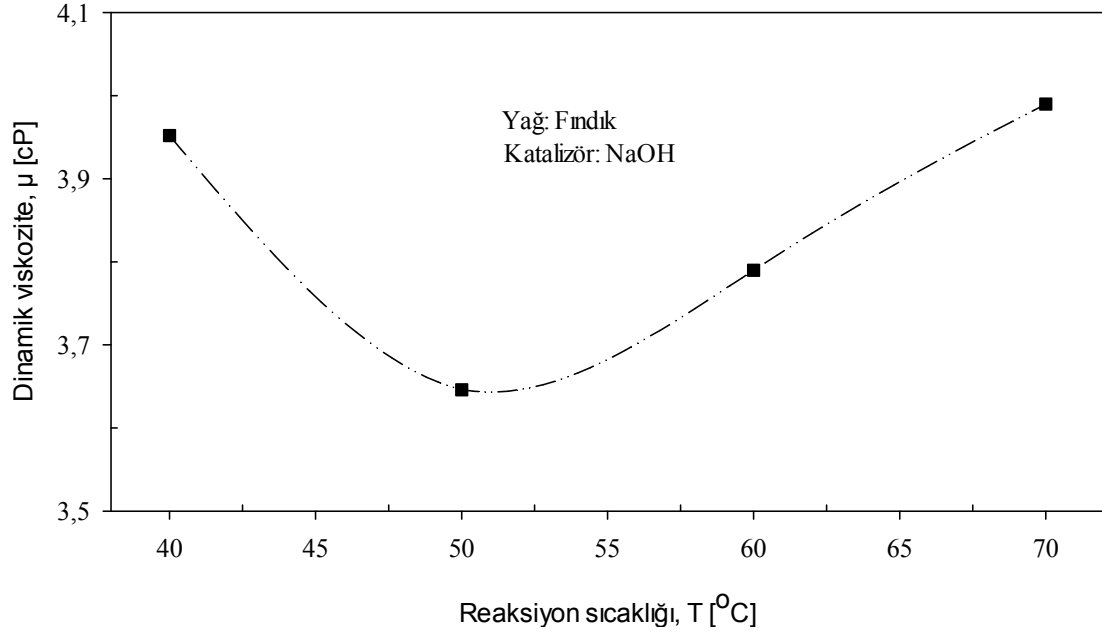
Söz konusu reaksiyon sıcaklıklarında sodyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizellerinin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.28, 3.29, 3.30'da verilmektedir.

Şekil 3.28’de katalizör olarak sodyum hidroksit kullanılarak fındık yağından üretilen biyodizelin dinamik viskozitesinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimi verilmiştir. Söz konusu şekilden görüldüğü gibi, üretilen biyodizelin dinamik viskozitesi reaksiyon sıcaklığı arttıkça azalmış, 50°C reaksiyon sıcaklığında en düşük 3,646 cP değerini almıştır. Bu değerden sonra artan reaksiyon sıcaklığı ile birlikte dinamik viskozite değeri de artış göstermiştir. Sodyum hidroksit kullanılarak mısır yağından üretilen biyodizelin dinamik viskozitesinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimi (Şekil 3.4) yorumlanırken açıklandığı gibi, burada da, düşük reaksiyon sıcaklıklarında transesterifikasyon reaksiyonunun etkin bir şekilde başlayabilmesi için gerekli olan enerjinin sağlanamaması nedeniyle yeterli verim elde edilememiş böylece üretilen biyodizelin viskozitesi yüksek çıkmış, reaksiyon sıcaklığı arttıkça transesterifikasyon reaksiyonunun verimi arttığından üretilen biyodizelin viskozitesi azalmış, fakat reaksiyon sıcaklığının daha fazla artırılıp kullanılan metil alkolün kaynama noktası sıcaklığına yaklaşması durumunda alkolün reaksiyon ortamından buharlaşmaya başlaması nedeniyle üretilen biyodizelin viskozitesi artmıştır. Ayrıca, yine yüksek sıcaklıklarda sabunlaşma reaksiyonları ve metil esterlerin parçalanması da üretilen biyodizelin viskozitesinin artmasına neden olmuştur.

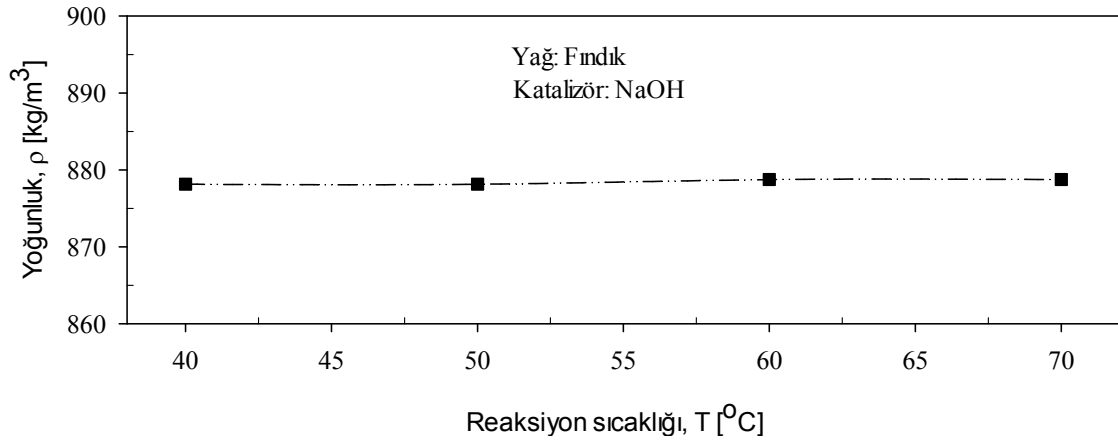
Şekil 3.29’da aynı reaksiyon sıcaklıklarında üretilen biyodizelin yoğunluğunun reaksiyon sıcaklığına göre değişimi verilmiştir. En düşük yoğunluk değeri 40 veya 50°C reaksiyon sıcaklığında 878,15 kg/m<sup>3</sup> olarak elde edilmiştir. Söz konusu şekilden, yoğunluğun reaksiyon sıcaklığı ile birlikte çok fazla değişmediği ve yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmüştür.

Şekil 3.30’da aynı reaksiyon sıcaklıklarında üretilen biyodizelin kinematik viskozitesinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimi verilmiştir. Kinematik viskozite değeri, ilgili reaksiyon sıcaklığı için dinamik viskozitenin yoğunluğa oranı ile belirlenmektedir. Yoğunluk değerlerinin reaksiyon sıcaklığına göre pek fazla değişmemesi nedeniyle kinematik viskozitenin reaksiyon sıcaklığına göre değişimi de karakteristik olarak dinamik viskozitenin reaksiyon sıcaklığı ile değişimine benzer nitelik göstermiştir.

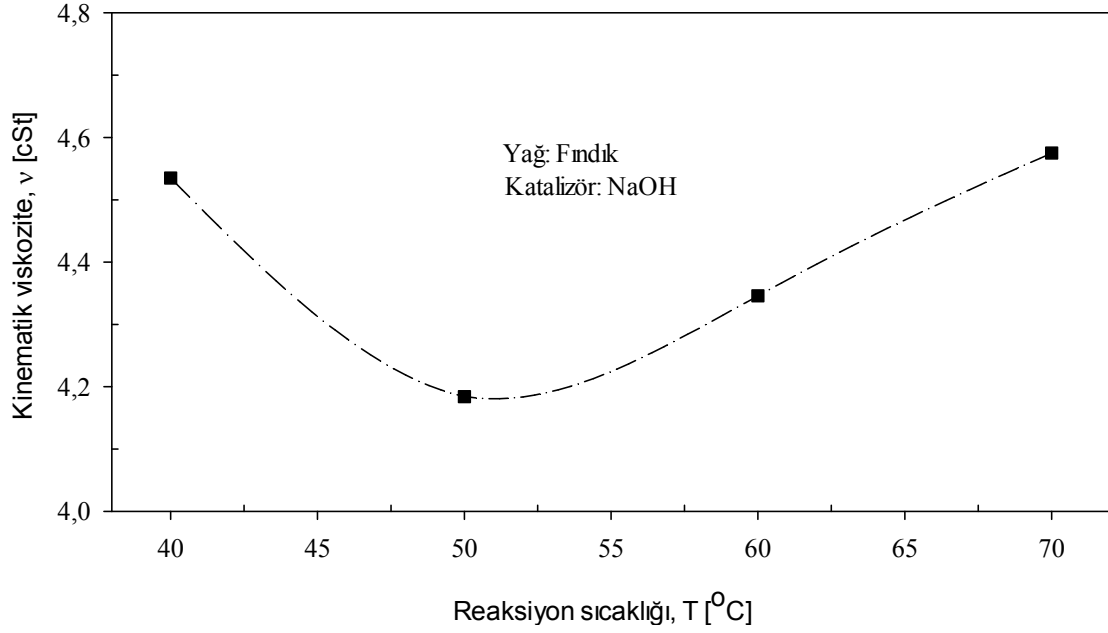
En düşük dinamik ve kinematik viskozite değerlerinin 50°C reaksiyon sıcaklığında elde edilmesi nedeniyle fındık yağından sodyum hidroksit kullanılarak biyodizel üretimi için bundan sonra yapılacak çalışmalarda reaksiyon sıcaklığı 50°C’de sabit tutulacaktır.



Şekil 3.28. Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimi



Şekil 3.29. Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin yoğunluğunun reaksiyon sıcaklığına göre değişimi



Şekil 3.30. Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimi

**c) Reaksiyon süresinin üretilen biyodizelin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozitesine etkisi**

Reaksiyon süresinin etkisinin incelendiği deneylerde, sabit tutulan parametreler ve seçilen reaksiyon süreleri aşağıda verilmektedir:

Kullanılan katalizör oranı: %1,00 (2,00 gram)

Reaksiyon sıcaklığı: 50°C

Katalizör türü: Sodyum hidroksit (NaOH)

Kullanılan yağ miktarı: 200 gram

Kullanılan alkol/yağ mol oranı: 6:1

Karıştırma hızı: 500 devir/dakika

Reaksiyon süreleri: 30, 60, 90 ve 120 dakika

Söz konusu reaksiyon sürelerinde sodyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizellerinin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin reaksiyon süresine göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.31, 3.32, 3.33'te verilmektedir.

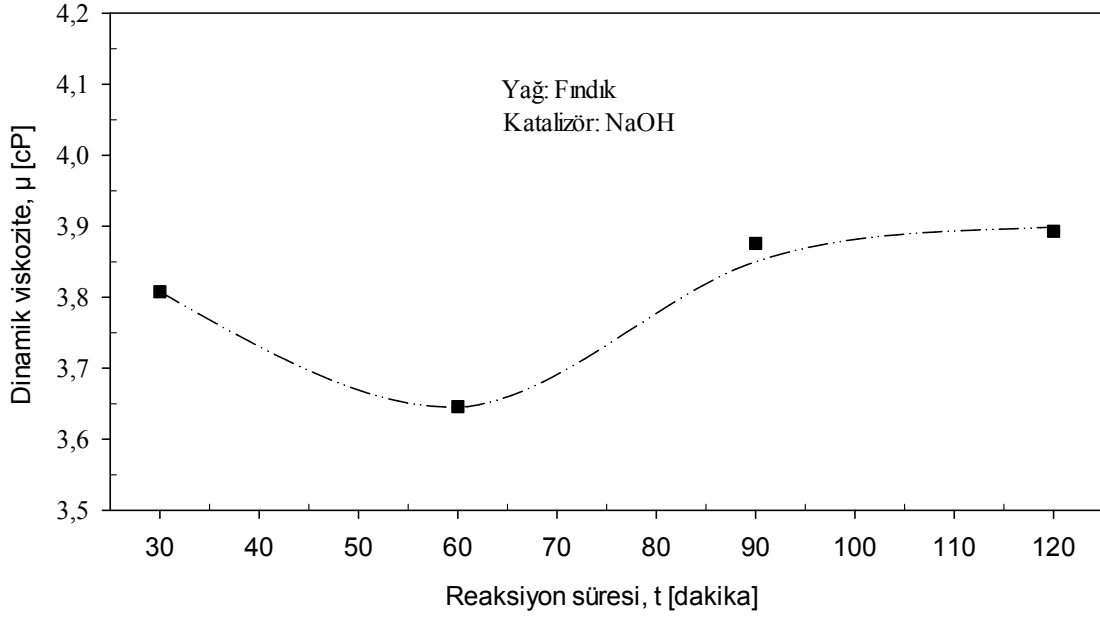


Şekil 3.31’de katalizör olarak sodyum hidroksit kullanılarak fındık yağından üretilen biyodizelin dinamik viskozitesinin reaksiyon süresine göre değişimi verilmiştir. Söz konusu şekilden görüldüğü gibi, üretilen biyodizelin dinamik viskozitesi reaksiyon süresi arttıkça azalmış, 60 dakika reaksiyon süresinde en düşük 3,646 cP değerini almıştır. Bu değerden sonra artan reaksiyon süresi ile birlikte dinamik viskozite yavaşça artarak, geçen süre ile birlikte sabit kalma eğilimine girdiği görülmüştür. Sodyum hidroksit kullanılarak mısır yağından üretilen biyodizelin dinamik viskozitesinin reaksiyon süresine göre değişimi (Şekil 3.7) yorumlanırken açıklandığı gibi, burada da, kısa reaksiyon sürelerinde transesterifikasyon reaksiyonunun gerçekleşmesi için yeterli zamanın olmaması nedeniyle trigliseritler yeterince metil esterlere dönüşmemiş ve böylece üretilen biyodizelin viskozitesi artmış, fakat reaksiyon süresinin uzatılmasıyla transesterifikasyon reaksiyonunun verimi arttığından üretilen biyodizelin viskozitesi azalmış, reaksiyon süresinin aşırı uzatılması durumunda ise üretilen biyodizelin viskozitesi önce hidroliz ve sabunlaşma reaksiyonları nedeniyle tekrar artmış daha sonra transesterifikasyon reaksiyonu dengeye ulaştığı için sabit kalma eğilimi göstermiştir.

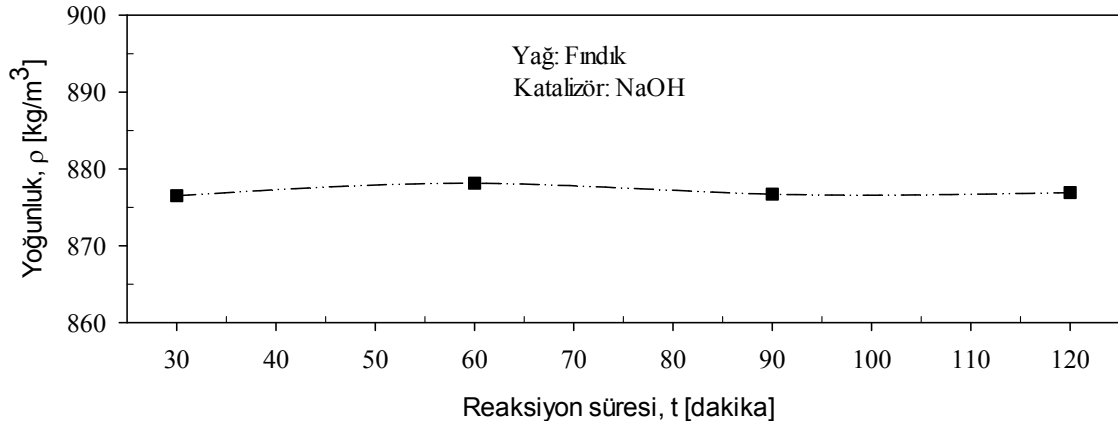
Şekil 3.32’de aynı reaksiyon sürelerinde üretilen biyodizelin yoğunluğunun reaksiyon süresine göre değişimi verilmiştir. En düşük yoğunluk değeri 30 dakikalık reaksiyon süresi sonunda  $876,52 \text{ kg/m}^3$  olarak elde edilmiştir. Söz konusu şekilden, yoğunluğun reaksiyon süresi ile birlikte çok fazla değişmediği ve yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmüştür.

Şekil 3.33’te aynı reaksiyon sürelerinde üretilen biyodizelin kinematik viskozitesinin reaksiyon süresine göre değişimi verilmiştir. Kinematik viskozite değeri, ilgili reaksiyon süresi için dinamik viskozitenin yoğunluğa oranı ile belirlenmektedir. Yoğunluk değerlerinin reaksiyon süresine göre pek fazla değişmemesi nedeniyle kinematik viskozitenin reaksiyon süresine göre değişimi de karakteristik olarak dinamik viskozitenin reaksiyon süresi ile değişimine benzer nitelik göstermiştir.

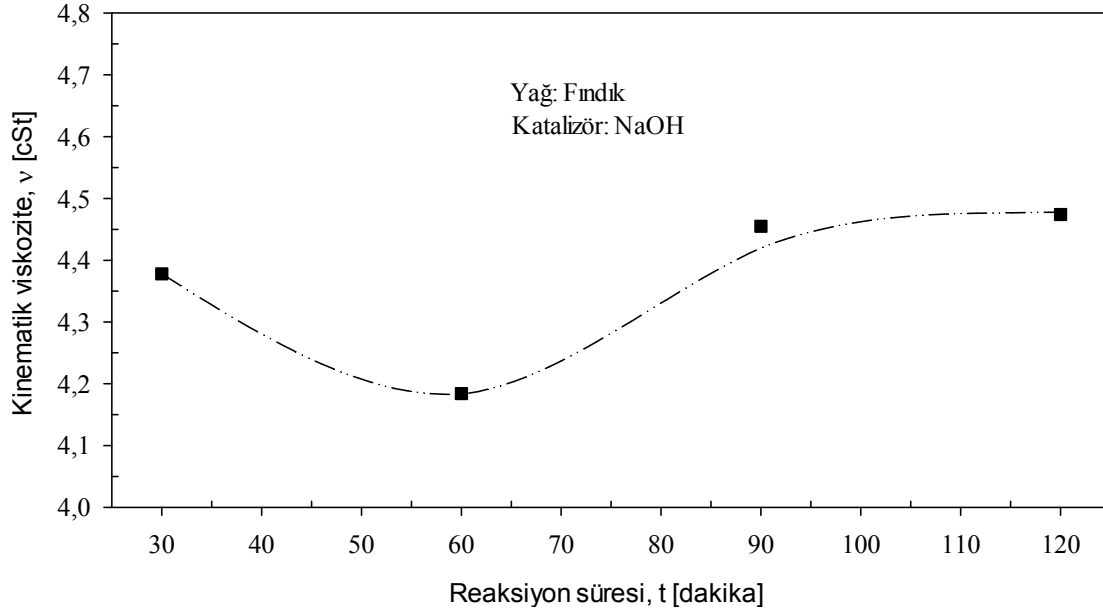
En düşük dinamik ve kinematik viskozite değerlerinin 60 dakika reaksiyon süresinde elde edilmesi nedeniyle fındık yağından sodyum hidroksit kullanılarak biyodizel üretimi için bundan sonra yapılacak çalışmalarda reaksiyon süresi 60 dakikada sabit tutulacaktır.



Şekil 3.31. Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin reaksiyon süresine göre değişimi



Şekil 3.32. Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin yoğunluğunun reaksiyon süresine göre değişimi



Şekil 3.33. Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin reaksiyon süresine göre değişimi

#### d) Alkol/yağ mol oranının üretilen biyodizelin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozitesine etkisi

Alkol/yağ mol oranının etkisinin incelendiği deneylerde, sabit tutulan parametreler ve kullanılan alkol/yağ mol oranları aşağıda verilmektedir:

Kullanılan katalizör oranı: %1,00 (2,00 gram)

Reaksiyon sıcaklığı: 50°C

Reaksiyon süresi: 60 dakika

Katalizör türü: Sodyum hidroksit (NaOH)

Kullanılan yağ miktarı: 200 gram

Karıştırma hızı: 500 devir/dakika

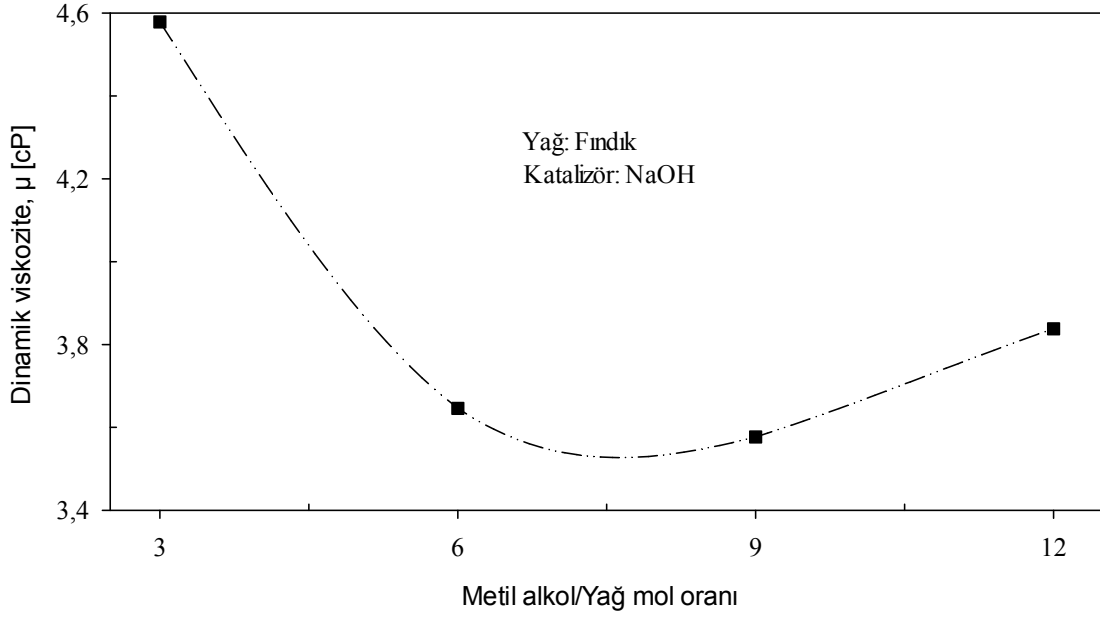
Kullanılan alkol/yağ mol oranları: 3:1, 6:1, 9:1 ve 12:1

Söz konusu alkol/yağ mol oranları ile sodyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizellerinin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.34, 3.35, 3.36'da verilmektedir.

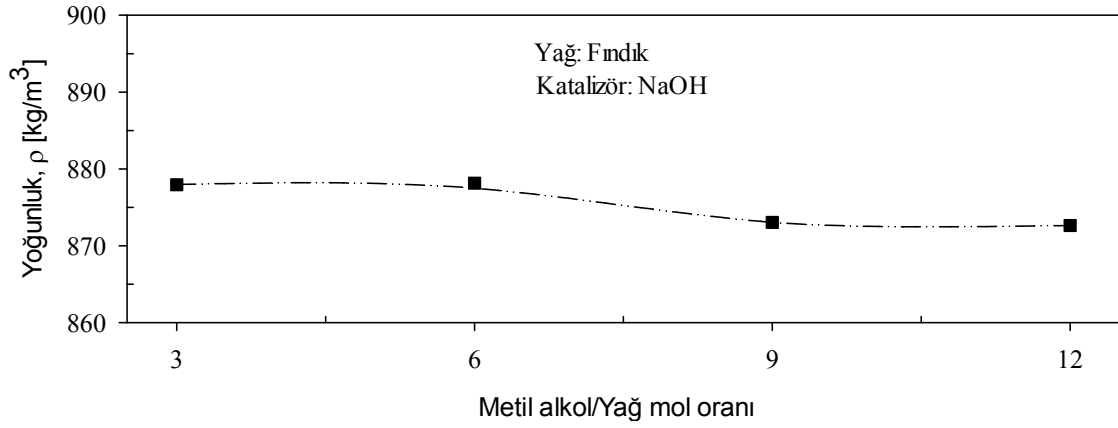
Şekil 3.34'te katalizör olarak sodyum hidroksit kullanılarak fındık yağından üretilen biyodizelin dinamik viskozitesinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi verilmiştir. Söz konusu şekilden görüldüğü gibi, üretilen biyodizelin dinamik viskozitesi metil alkol/yağ mol oranı arttıkça azalmış, 9:1 mol oranında en düşük 3,577 cP değerini almıştır. Bu değerden sonra artan mol oranı ile birlikte dinamik viskozite değerinin de arttığı görülmüştür. Sodyum hidroksit kullanılarak mısır yağından üretilen biyodizelin dinamik viskozitesinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi (Şekil 3.10) yorumlanırken açıklandığı gibi, burada da, düşük mol oranlarında örneğin stokiyometrik oran olan 3:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen biyodizelin viskozitesinin en yüksek değeri aldığı, 6:1 veya 9:1 mol oranlarında yani daha fazla alkol kullanımında bir denge reaksiyonu olan transesterifikasyon reaksiyonu ürünler yönüne kaydığından transesterifikasyon reaksiyonunun verimi iyileşerek üretilen biyodizelin viskozitesinin azaldığı, fakat aşırı miktarda alkol kullanımında ise (12:1 mol oranında) gliserinin metil ester fazındaki çözünürlüğünün artması nedeniyle transesterifikasyon reaksiyonunun verimini azalarak üretilen biyodizelin viskozitesini arttırdığı görülmüştür.

Şekil 3.35'te aynı metil alkol/yağ mol oranları kullanılarak üretilen biyodizelin yoğunluğunun alkol/yağ mol oranına göre değişimi verilmiştir. En düşük yoğunluk değeri 12:1 mol oranında  $872,65 \text{ kg/m}^3$  olarak elde edilmiştir. Söz konusu şekilden, yoğunluğun reaksiyon süresi ile birlikte çok fazla değişmediği ve yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmüştür.

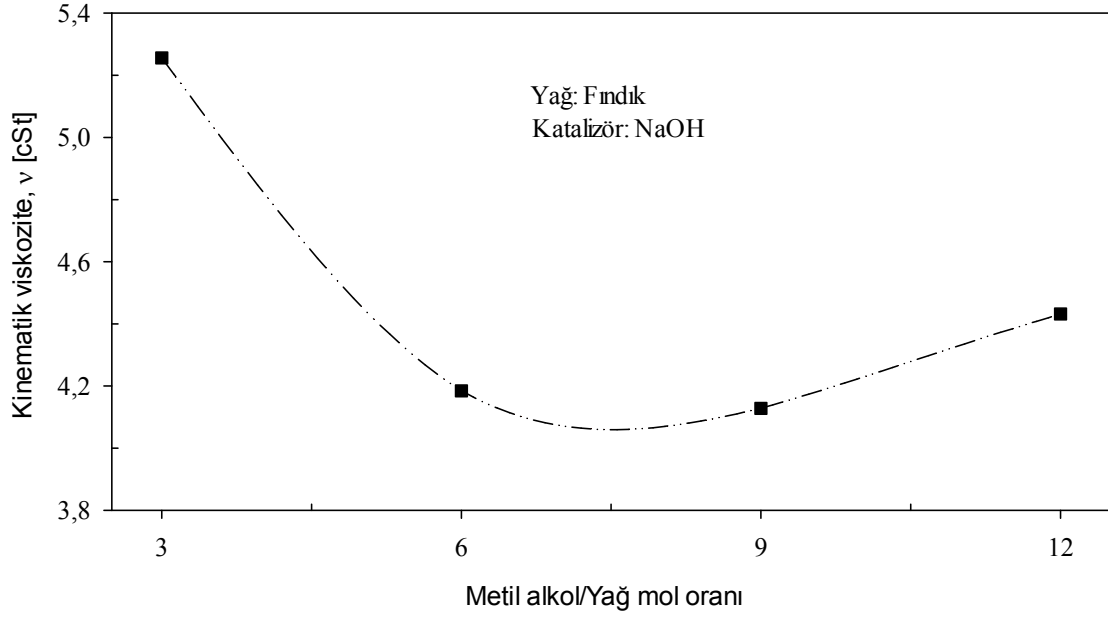
Şekil 3.36'da aynı metil alkol/yağ mol oranları kullanılarak üretilen biyodizelin kinematik viskozitesinin alkol/yağ mol oranına göre değişimi verilmiştir. Kinematik viskozite değeri, ilgili metil alkol/yağ mol oranı için dinamik viskozitenin yoğunluğa oranı ile belirlenmektedir. Yoğunluk değerlerinin metil alkol/yağ mol oranına göre pek fazla değişmemesi nedeniyle kinematik viskozitenin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi de karakteristik olarak dinamik viskozitenin metil alkol/yağ mol oranı ile değişimine benzer nitelik göstermiştir.



Şekil 3.34. Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi



Şekil 3.35. Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin yoğunluğunun metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi



Şekil 3.36. Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi

En düşük dinamik ve kinematik viskozite değerlerinin 9:1 alkol/yağ mol oranında elde edilmesi nedeniyle fındık yağı biyodizeli üretimi için sodyum hidroksit kullanılarak gerçekleştirilen transesterifikasyon reaksiyonunun en uygun koşulları:

- %1,00 oranında katalizör kullanımı
- 50°C reaksiyon sıcaklığı
- 60 dakika reaksiyon süresi
- 9:1 alkol/yağ mol oranı

olarak belirlenmiştir.

Yukarıda belirlenen şartlara göre üretilen biyodizelin ve satın alınan ticari dizel yakıtının bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri, standartların ilgili değerleri ile karşılaştırılarak Tablo 3.5'te verilmiştir. Söz konusu tablodan görüldüğü gibi, üretilen biyodizelin kinematik viskozitesi, yoğunluğu, parlama noktası sıcaklığı ve soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığı değerleri ilgili standartlara uygundur. Üst ısıl değeri ise standartlarda belirtilmemiş olup dizel yakıtınınkinden % 13,20 oranında daha düşük

çıkıştır. Yine yukarıda belirlenen şartlara göre üretilen biyodizelin ortalama molekül kütlesi, kapalı formülü ve yapısındaki yağ asidi metil esterlerinin kompozisyonu Tablo 3.6'da verilmiş olup, görüldüğü gibi üretilen biyodizelin içeriğinde ana bileşenler olarak kütleli % 74,778 oranında yapısında karbon atomları arasında bir adet çift bağ bulunduran 18 karbonlu doymamış oleik yağ asidi, %12,203 oranında yapısında iki adet çift bağ bulunduran 18 karbonlu doymamış linoleik yağ asidi ve %11,356 oranında yapısında çift bağ bulunmayan 16 karbonlu doymuş palmitik yağ asidi metil esterinin bulunduğu belirlenmiştir. Söz konusu biyodizelin ortalama molekül kütlesi ve kapalı formülü sırasıyla 293,80 g/mol ve  $C_{18,76}H_{35,56}O_2$  olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.5. Ticari dizel yakıtının ve belirlenen optimum şartlarda fındık yağı ve sodyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri ve ilgili standart değerler

Özellikler	Dizel Yakıtı	Biyodizel	EN 14214	ASTM D 6751
40°C'de kinematik viskozite, cSt	2,700	4,128	3,50-5,00	1,90-6,00
15°C'de yoğunluk kg/m <sup>3</sup>	833,33	873,06	860-900	*
Parlama noktası sıcaklığı, °C	63,0	177,0	101≤	130≤
Soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığı, °C	-6,0	-6,0	<+5 (yaz) -15 < (kış)	*
Üst ısı değer, kJ/kg	45950	39883	*	*

\* Belirtilmemiş.

Tablo 3.6. Belirlenen optimum şartlarda fındık yağı ve sodyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin ortalama molekül kütlesi, kapalı formülü ile yapısındaki yağ asitlerinin türü ve yağ asidi metil esterlerinin kütleli yüzdeleri

Yağ asidi türü	Yağ asidi metil esterinin kütleli yüzdesi, %	Biyodizelin ortalama molekül kütlesi M [g/mol]	Biyodizelin kapalı formülü
Palmitik (C16:0)	11,356	293,80	$C_{18,76}H_{35,56}O_2$
Oleik (C18:1)	74,778		
Linoleik (C18:2)	12,203		
α-Linolenik (C18:3)	0,347		
Araşidik (C20:0)	0,345		
Gadoleik (C20:1)	0,509		
Behenik (C22:0)	0,462		

### 3.2.2. Katalizör Olarak Potasyum Hidroksit (KOH) Kullanımı

#### a) Katalizör oranının üretilen biyodizelin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozitesine etkisi

Katalizör oranının etkisinin incelendiği deneylerde, sabit tutulan parametreler ve kullanılan katalizör oranları aşağıda verilmektedir:

Kullanılan yağ miktarı: 200 gram

Kullanılan alkol/yağ mol oranı: 6:1

Reaksiyon sıcaklığı: 60°C

Reaksiyon süresi: 60 dakika

Karıştırma hızı: 500 devir/dakika

Katalizör türü: Potasyum hidroksit (KOH)

Kullanılan katalizör oranları: %0,25, 0,50, 0,75, 0,90, 1,00, 1,10, 1,25 ve 1,50

Söz konusu katalizör oranlarında potasyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizellerinin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin katalizör oranına göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.37, 3.38, 3.39'da verilmektedir.

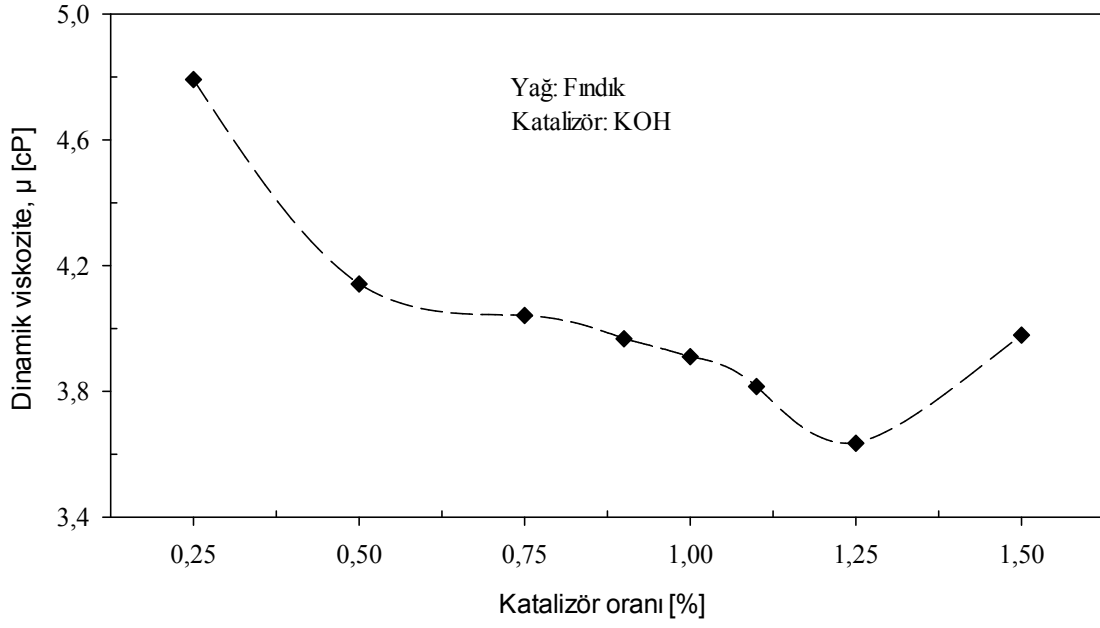
Şekil 3.37'de katalizör olarak potasyum hidroksit kullanılarak fındık yağından üretilen biyodizelin dinamik viskozitesinin katalizör oranına göre değişimi verilmiştir. Söz konusu şekilden görüldüğü gibi, üretilen biyodizelin dinamik viskozitesi katalizör oranı arttıkça azalmış, % 1,25 katalizör oranında en düşük 3,635 cP değerini almıştır. Bu değerden sonra artan katalizör oranı ile birlikte dinamik viskozite değeri de artış göstermiştir. Sodyum hidroksit kullanılarak mısır yağından üretilen biyodizelin dinamik viskozitesinin katalizör oranına göre değişimi (Şekil 3.1) yorumlanırken bahsedildiği gibi, burada da, düşük katalizör oranlarında transesterifikasyon reaksiyonunun yeterince katalizlenememesi, yüksek katalizör oranlarında ise sabunlaşma reaksiyonları ve metil ester fazı ile gliserin fazının yeterince ayrıştırılamaması nedeniyle transesterifikasyon reaksiyonunun verimi azalmış ve her iki durumda da üretilen biyodizelin dinamik viskozitesi artmıştır. En düşük dinamik viskozite değeri katalizlemenin yeterince etkin olarak gerçekleştiği ve sabunlaşma reaksiyonlarının daha düşük düzeyde olduğu katalizör oranında elde edilmiştir.



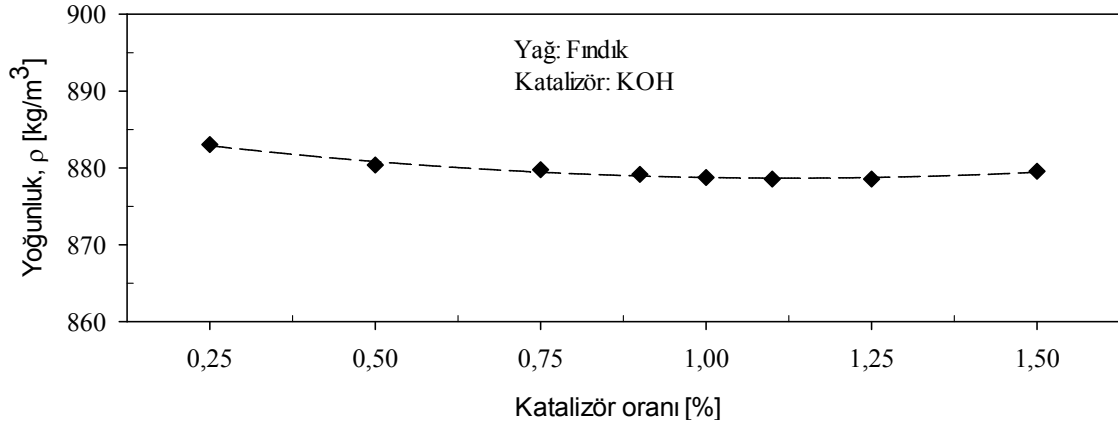
Şekil 3.38’de aynı katalizör oranları kullanılarak üretilen biyodizelin yoğunluğunun katalizör oranına göre değişimi verilmiştir. En düşük yoğunluk değeri %1,25 (veya %1,10) katalizör oranında  $878,56 \text{ kg/m}^3$  olarak elde edilmiştir. Söz konusu şekilden, yoğunluğun katalizör oranı ile birlikte çok fazla değişmediği ve yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmüştür. Sodyum hidroksit kullanılarak mısır yağından üretilen biyodizelin yoğunluğunun katalizör oranına göre değişimi (Şekil 3.2) yorumlanırken bahsedildiği gibi, burada da, düşük katalizör oranlarında üretilen biyodizelin yapısında trigliseritlerin bulunması, aşırı katalizör kullanımında ise sabunlaşma reaksiyonları nedeniyle üretilen biyodizelin yoğunluğu yüksek çıkmıştır.

Şekil 3.39’da aynı katalizör oranları kullanılarak üretilen biyodizelin kinematik viskozitesinin katalizör oranına göre değişimi verilmiştir. Kinematik viskozite değeri, ilgili katalizör oranı için dinamik viskozitenin yoğunluğa oranı ile belirlenmektedir. Yoğunluk değerlerinin katalizör oranına göre pek fazla değişmemesi nedeniyle kinematik viskozitenin katalizör oranına göre değişimi de karakteristik olarak dinamik viskozitenin katalizör oranı ile değişimine benzer nitelik göstermiştir.

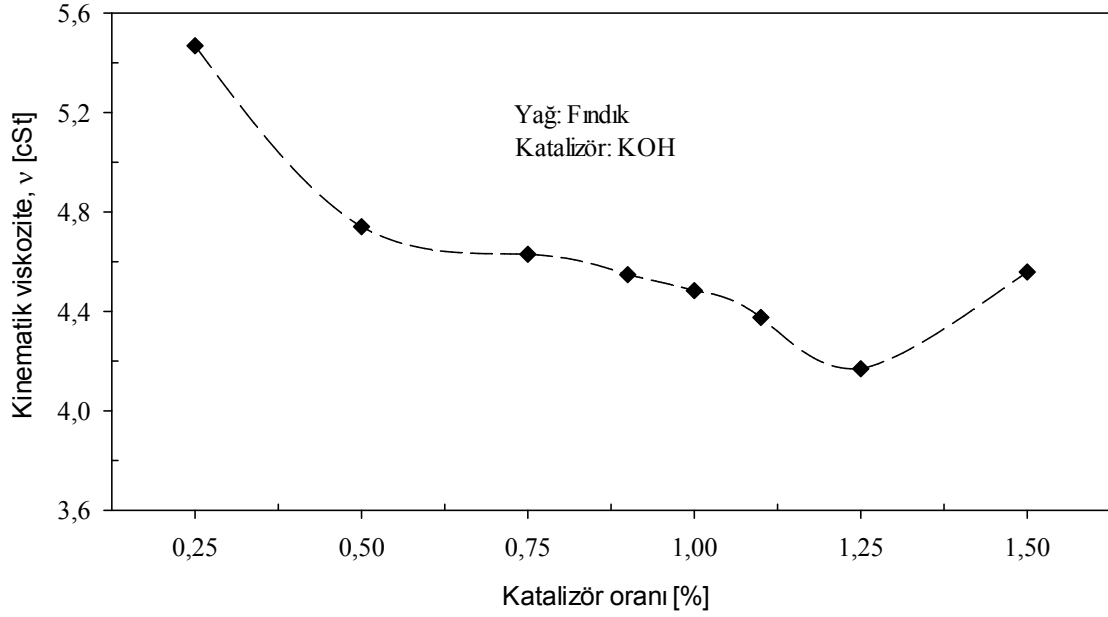
En düşük dinamik ve kinematik viskozite değerlerinin %1,25 katalizör oranında elde edilmesi nedeniyle fındık yağından potasyum hidroksit kullanılarak biyodizel üretimi için bundan sonra yapılacak parametrik çalışmalarda katalizör oranı olarak % 1,25 değeri kullanılacaktır.



Şekil 3.37. Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin katalizör oranına göre değişimi



Şekil 3.38. Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin yoğunluğunun katalizör oranına göre değişimi



Şekil 3.39. Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin katalizör oranına göre değişimi

#### b) Reaksiyon sıcaklığının üretilen biyodizelin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozitesine etkisi

Reaksiyon sıcaklığının etkisinin incelendiği deneylerde, sabit tutulan parametreler ve seçilen reaksiyon sıcaklıkları aşağıda verilmektedir:

Kullanılan katalizör oranı: %1,25 (2,50 gram)

Katalizör türü: Potasyum hidroksit (KOH)

Kullanılan yağ miktarı: 200 gram

Kullanılan alkol/yağ mol oranı: 6:1

Reaksiyon süresi: 60 dakika

Karıştırma hızı: 500 devir/dakika

Reaksiyon sıcaklıkları: 40, 50, 60 ve 70°C

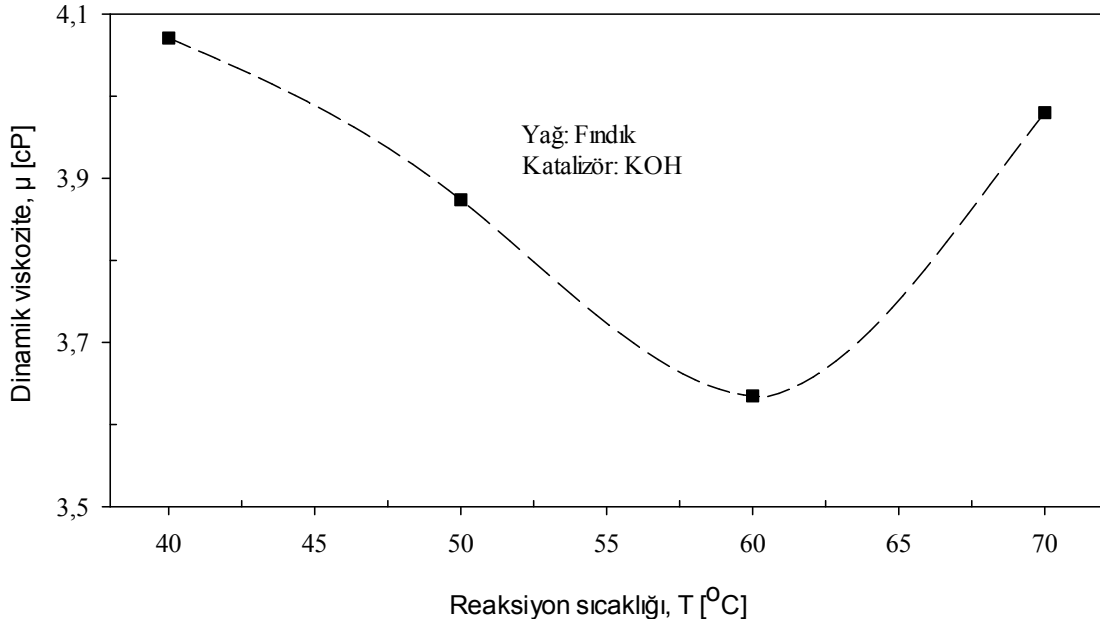
Söz konusu reaksiyon sıcaklıklarında potasyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizellerinin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.40, 3.41, 3.42'de verilmektedir.

Şekil 3.40'da katalizör olarak potasyum hidroksit kullanılarak fındık yağından üretilen biyodizelin dinamik viskozitesinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimi verilmiştir. Söz konusu şekilden görüldüğü gibi, üretilen biyodizelin dinamik viskozitesi reaksiyon sıcaklığı arttıkça azalmış, 60°C reaksiyon sıcaklığında en düşük 3,635 cP değerini almıştır. Bu değerden sonra artan reaksiyon sıcaklığı ile birlikte dinamik viskozite değeri de artış göstermiştir. Sodyum hidroksit kullanılarak mısır yağından üretilen biyodizelin dinamik viskozitesinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimi (Şekil 3.4) yorumlanırken açıklandığı gibi, burada da, düşük reaksiyon sıcaklıklarında trigliseritlerin metil esterlere dönüştürülebilmesi için gerekli olan enerjinin sağlanamaması nedeniyle üretilen biyodizelin viskozitesi artmış, reaksiyon sıcaklığı arttıkça transesterifikasyon reaksiyonunun verimi arttığından üretilen biyodizelin viskozitesi azalmış, fakat sıcaklığın daha fazla artırılması durumunda metil alkolün reaksiyon ortamından buharlaşmaya başlaması nedeniyle transesterifikasyon reaksiyonu reaktanlar yönüne kayarak üretilen biyodizelin viskozitesi tekrar artmıştır. Ayrıca, yine yüksek sıcaklıklarda sabunlaşma reaksiyonlarının artması ve metil esterlerin parçalanması da üretilen biyodizelin viskozitesinin artmasına neden olmuştur.

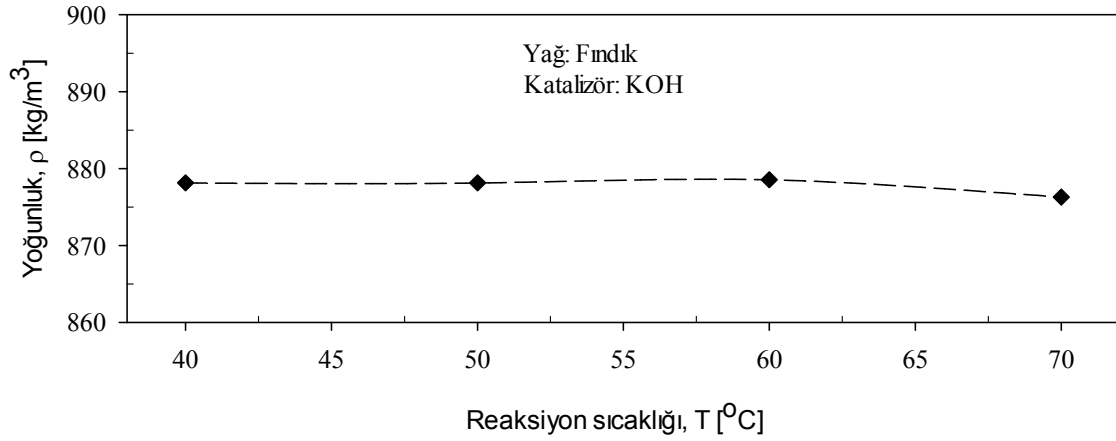
Şekil 3.41'de aynı reaksiyon sıcaklıklarında üretilen biyodizelin yoğunluğunun reaksiyon sıcaklığına göre değişimi verilmiştir. En düşük yoğunluk değeri 70°C reaksiyon sıcaklığında 876,31 kg/m<sup>3</sup> olarak elde edilmiştir. Söz konusu şekilden, yoğunluğun reaksiyon sıcaklığı ile birlikte çok fazla değişmediği ve yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmüştür.

Şekil 3.42'de aynı reaksiyon sıcaklıklarında üretilen biyodizelin kinematik viskozitesinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimi verilmiştir. Kinematik viskozite değeri, ilgili reaksiyon sıcaklığı için dinamik viskozitenin yoğunluğa oranı ile belirlenmektedir. Yoğunluk değerlerinin reaksiyon sıcaklığına göre pek fazla değişmemesi nedeniyle kinematik viskozitenin reaksiyon sıcaklığına göre değişimi de karakteristik olarak dinamik viskozitenin reaksiyon sıcaklığı ile değişimine benzer nitelik göstermiştir.

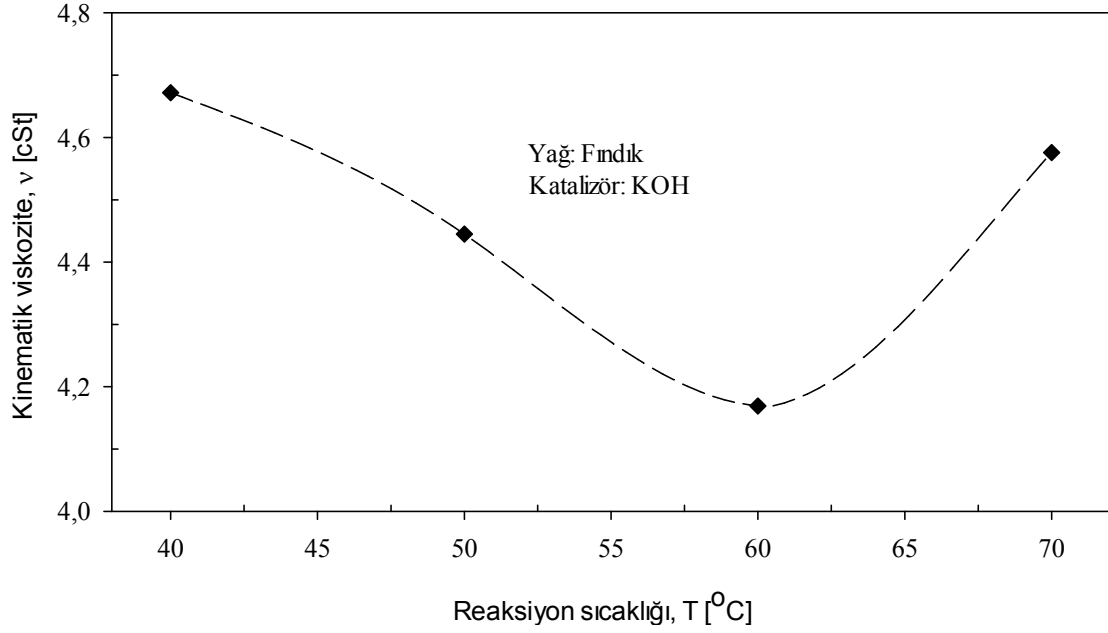
En düşük dinamik ve kinematik viskozite değerlerinin 60°C reaksiyon sıcaklığında elde edilmesi nedeniyle fındık yağından potasyum hidroksit kullanılarak biyodizel üretimi için bundan sonra yapılacak çalışmalarda reaksiyon sıcaklığı 60°C'de sabit tutulacaktır.



Şekil 3.40. Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimi



Şekil 3.41. Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin yoğunluğunun reaksiyon sıcaklığına göre değişimi



Şekil 3.42. Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimi

**c) Reaksiyon süresinin üretilen biyodizelin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozitesine etkisi**

Reaksiyon süresinin etkisinin incelendiği deneylerde, sabit tutulan parametreler ve seçilen reaksiyon süreleri aşağıda verilmektedir:

Kullanılan katalizör oranı: %1,25 (2,50 gram)

Reaksiyon sıcaklığı: 60°C

Katalizör türü: Potasyum hidroksit (KOH)

Kullanılan yağ miktarı: 200 gram

Kullanılan alkol/yağ mol oranı: 6:1

Karıştırma hızı: 500 devir/dakika

Reaksiyon süreleri: 30, 60, 90 ve 120 dakika

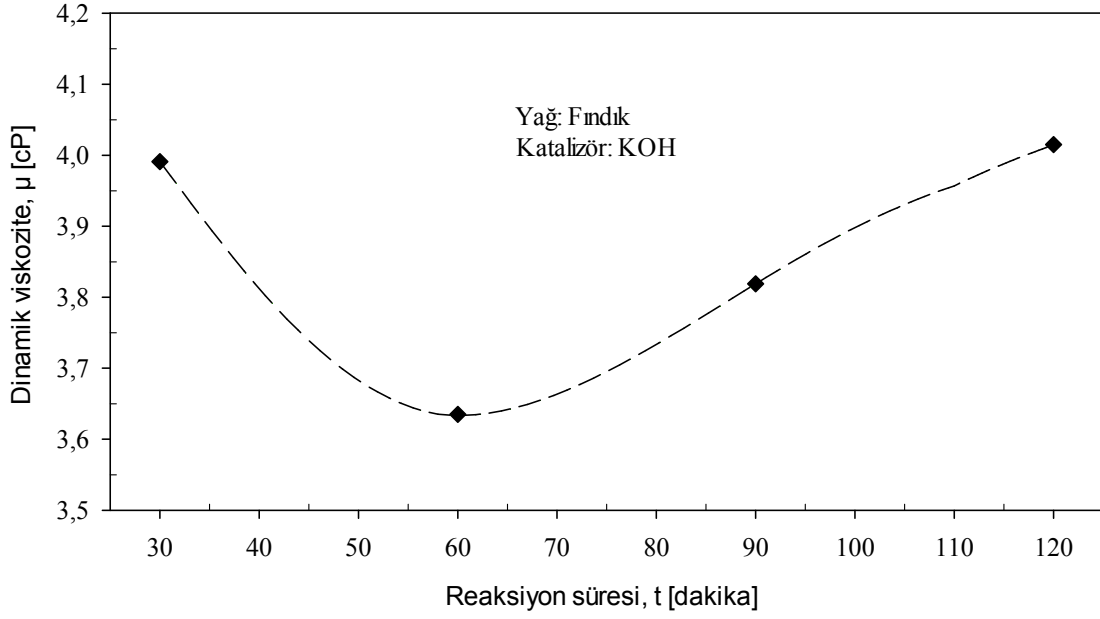
Söz konusu reaksiyon sürelerinde potasyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizellerinin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin reaksiyon süresine göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.43, 3.44, 3.45'te verilmektedir.

Şekil 3.43'te katalizör olarak potasyum hidroksit kullanılarak fındık yağından üretilen biyodizelin dinamik viskozitesinin reaksiyon süresine göre değişimi verilmiştir. Söz konusu şekilden görüldüğü gibi, üretilen biyodizelin dinamik viskozitesi reaksiyon süresi arttıkça azalmış, 60 dakika reaksiyon süresinde en düşük 3,635 cP değerini almıştır. Bu değerden sonra artan reaksiyon süresi ile birlikte dinamik viskozite değeri de artmaya devam etmiştir. Diğerlerinden farklı olarak potasyum hidroksit ve fındık yağı kullanımında dinamik viskozitenin sabit kalma eğiliminin gerçekleştiği süre yakalanamamıştır. Muhtemelen, söz konusu biyodizel için üretim süresi daha uzun tutulsa idi benzer sabit kalma eğilimi burada da elde edilebilirdi. Sodyum hidroksit kullanılarak mısır yağından üretilen biyodizelin dinamik viskozitesinin reaksiyon süresine göre değişimi (Şekil 3.7) yorumlanırken açıklandığı gibi, burada da, kısa reaksiyon sürelerinde üretilen biyodizelin yapısında trigliseritlerin bulunması nedeniyle viskozite artmış, fakat reaksiyon süresinin uzatılmasıyla transesterifikasyon reaksiyonunda yeterli verimin sağlanması nedeniyle biyodizelin viskozitesi azalmış, reaksiyon süresinin aşırı uzatılması durumunda ise üretilen biyodizelin viskozitesi hidroliz ve sabunlaşma reaksiyonları nedeniyle tekrar artmıştır.

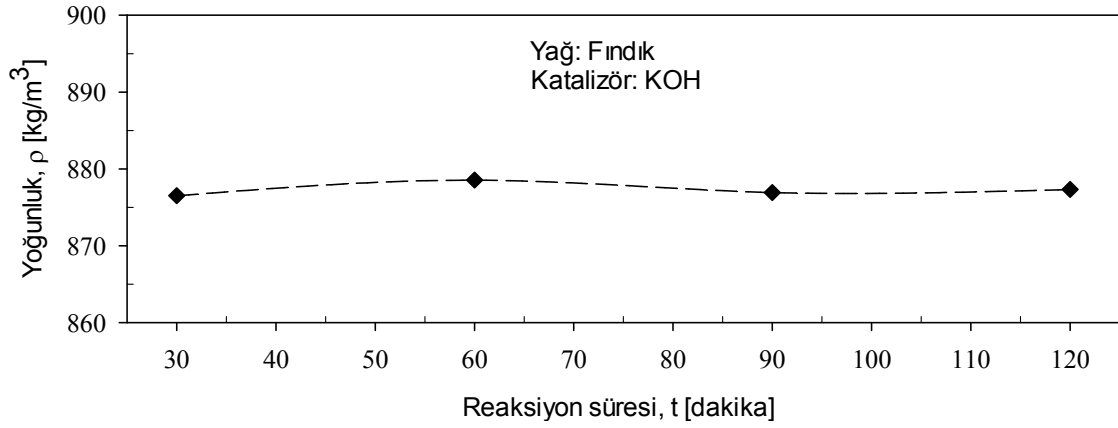
Şekil 3.44'te aynı reaksiyon sürelerinde üretilen biyodizelin yoğunluğunun reaksiyon süresine göre değişimi verilmiştir. En düşük yoğunluk değeri 30 dakikalık reaksiyon süresi sonunda  $876,52 \text{ kg/m}^3$  olarak edilmiştir. Söz konusu şekilden, yoğunluğun reaksiyon süresi ile birlikte çok fazla değişmediği ve yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmüştür.

Şekil 3.45'te aynı reaksiyon sürelerinde üretilen biyodizelin kinematik viskozitesinin reaksiyon süresine göre değişimi verilmiştir. Kinematik viskozite değeri, ilgili reaksiyon süresi için dinamik viskozitenin yoğunluğa oranı ile belirlenmektedir. Yoğunluk değerlerinin reaksiyon süresine göre pek fazla değişmemesi nedeniyle kinematik viskozitenin reaksiyon süresine göre değişimi de karakteristik olarak dinamik viskozitenin reaksiyon süresi ile değişimine benzer nitelik göstermiştir.

En düşük dinamik ve kinematik viskozite değerlerinin 60 dakika reaksiyon süresinde elde edilmesi nedeniyle fındık yağından potasyum hidroksit kullanılarak biyodizel üretimi için bundan sonra yapılacak çalışmalarda reaksiyon süresi 60 dakikada sabit tutulacaktır.

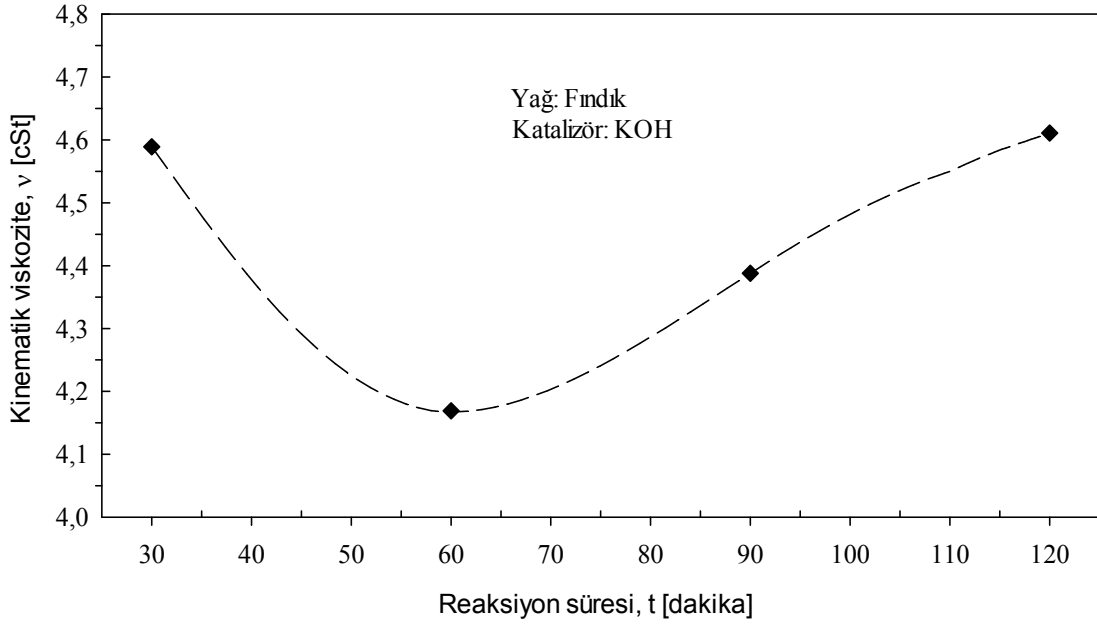


Şekil 3.43. Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin reaksiyon süresine göre değişimi



Şekil 3.44. Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin yoğunluğunun reaksiyon süresine göre değişimi





Şekil 3.45. Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin reaksiyon süresine göre değişimi

#### d) Alkol/yağ mol oranının üretilen biyodizelin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozitesine etkisi

Alkol/yağ mol oranının etkisinin incelendiği deneylerde, sabit tutulan parametreler ve kullanılan alkol/yağ mol oranları aşağıda verilmektedir:

Kullanılan katalizör oranı: %1,25 (2,50 gram)

Reaksiyon sıcaklığı: 60°C

Reaksiyon süresi: 60 dakika

Katalizör türü: Potasyum hidroksit (KOH)

Kullanılan yağ miktarı: 200 gram

Karıştırma hızı : 500 devir/dakika

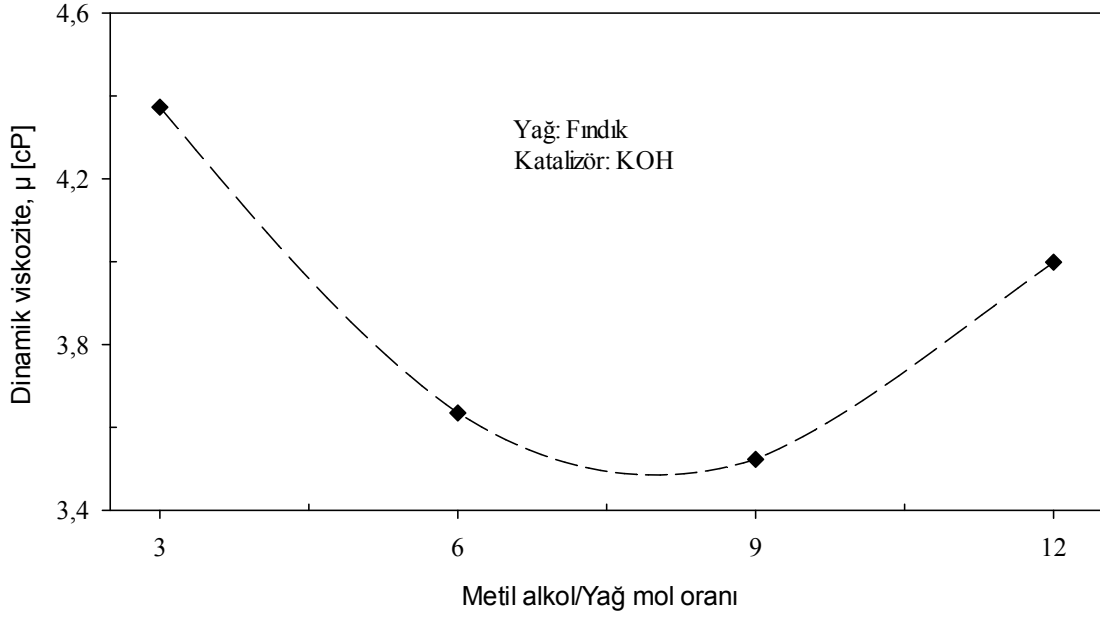
Kullanılan alkol/yağ mol oranları: 3:1, 6:1, 9:1 ve 12:1

Söz konusu alkol/yağ mol oranları ile potasyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizellerinin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.46, 3.47, 3.48'de verilmektedir.

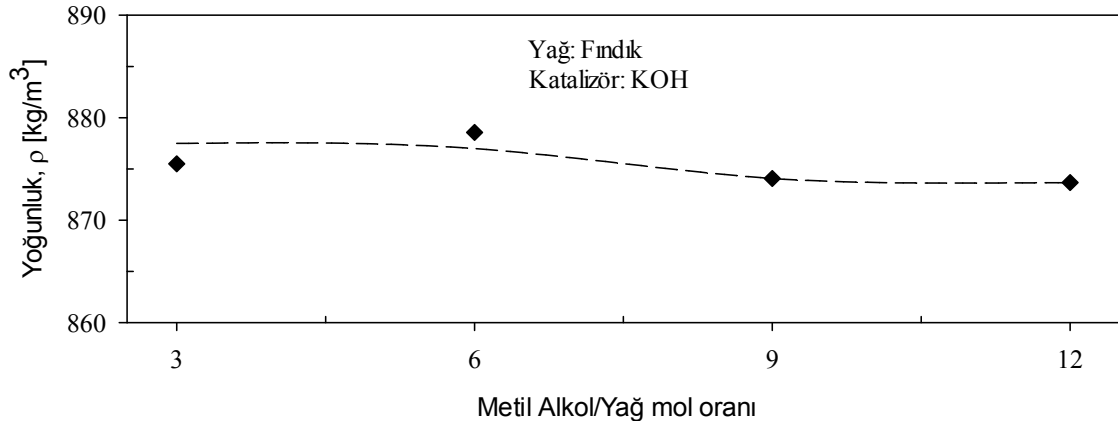
Şekil 3.46'da katalizör olarak potasyum hidroksit kullanılarak fındık yağından üretilen biyodizelin dinamik viskozitesinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi verilmiştir. Söz konusu şekilden görüldüğü gibi, üretilen biyodizelin dinamik viskozitesi metil alkol/yağ mol oranı arttıkça azalmış, 9:1 mol oranında en düşük 3,523 cP değerini almıştır. Bu değerden sonra artan mol oranı ile birlikte dinamik viskozitenin de arttığı görülmüştür. Sodyum hidroksit kullanılarak mısır yağından üretilen biyodizelin dinamik viskozitesinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi (Şekil 3.10) yorumlanırken açıklandığı gibi, burada da, düşük mol oranlarında örneğin stokiyometrik oran olan 3:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen biyodizelin viskozitesinin en yüksek değeri aldığı, 6:1 veya 9:1 mol oranlarında yani daha fazla alkol kullanımında bir denge reaksiyonu olan transesterifikasyon reaksiyonu ürünler yönüne kaydığından transesterifikasyon reaksiyonunun verimi iyileşerek üretilen biyodizelin viskozitesinin azaldığı, fakat aşırı miktarda alkol kullanımında ise (12:1 mol oranında) gliserinin metil ester fazındaki çözünürlüğünün artması nedeniyle ester fazı ile gliserin fazının ayrışmasının zorlaşmasından dolayı transesterifikasyon reaksiyonunun verimi azalarak üretilen biyodizelin viskozitesinin arttığı görülmüştür.

Şekil 3.47'de aynı mol oranları kullanılarak üretilen biyodizelin yoğunluğunun alkol/yağ mol oranına göre değişimi verilmiştir. En düşük yoğunluk değeri 12:1 mol oranında 873,67 kg/m<sup>3</sup> olarak elde edilmiştir. Söz konusu şekilden, yoğunluğun reaksiyon süresi ile birlikte çok fazla değişmediği ve yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmüştür.

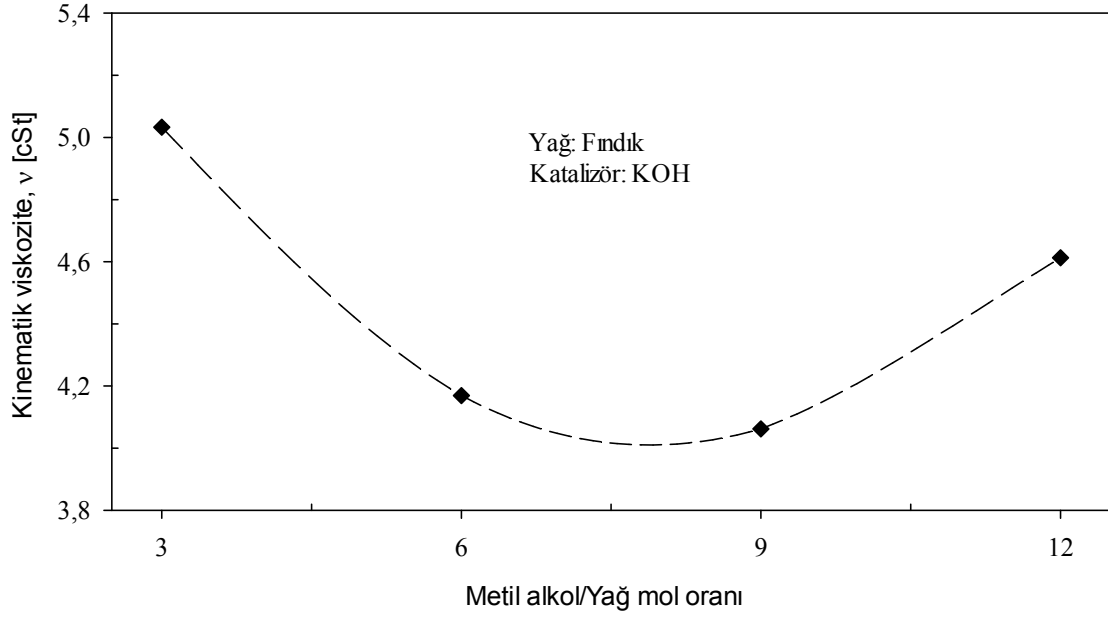
Şekil 3.48'de aynı metil alkol/yağ mol oranları kullanılarak üretilen biyodizelin kinematik viskozitesinin mol oranına göre değişimi verilmiştir. Kinematik viskozite değeri, ilgili metil alkol/yağ mol oranı için dinamik viskozitenin yoğunluğa oranı ile belirlenmektedir. Yoğunluk değerlerinin metil alkol/yağ mol oranına göre pek fazla değişmemesi nedeniyle kinematik viskozitenin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi de karakteristik olarak dinamik viskozitenin metil alkol/yağ mol oranı ile değişimine benzer nitelik göstermiştir.



Şekil 3.46. Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi



Şekil 3.47. Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin yoğunluğunun metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi



Şekil 3.48. Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi

En düşük dinamik ve kinematik viskozite değerlerinin 9:1 alkol/yağ mol oranında elde edilmesi nedeniyle fındık yağı biyodizeli üretimi için potasyum hidroksit kullanılarak gerçekleştirilen transesterifikasyon reaksiyonunun en uygun koşulları:

- %1,25 oranında katalizör kullanımı
- 60°C reaksiyon sıcaklığı
- 60 dakika reaksiyon süresi
- 9:1 alkol/yağ mol oranı

olarak belirlenmiştir.

Yukarıda belirlenen şartlara göre üretilen biyodizelin ve satın alınan ticari dizel yakıtının bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri, standartların ilgili değerleri ile karşılaştırılarak Tablo 3.7’de verilmiştir. Söz konusu tablodan görüldüğü gibi, üretilen biyodizelin kinematik viskozitesi, yoğunluğu, parlama noktası sıcaklığı ve soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığı değerleri ilgili standartlara uygundur. Üst ısıl değeri ise standartlarda belirtilmemiş olup dizel yakıtınınkinden % 13,19 oranında daha düşük

çıkıştır. Yine yukarıda belirlenen şartlara göre üretilen biyodizelin ortalama molekül kütlesi, kapalı formülü ve yapısındaki yağ asidi metil esterlerinin kompozisyonu Tablo 3.8’de verilmiş olup, görüldüğü gibi üretilen biyodizelin içeriğinde ana bileşenler olarak kütleli % 76,129 oranında yapısında karbon atomları arasında bir adet çift bağ bulundurulmuş 18 karbonlu doymamış oleik yağ asidi, %13,044 oranında yapısında iki adet çift bağ bulundurulmuş 18 karbonlu doymamış linoleik yağ asidi ve %9,656 oranında yapısında çift bağ bulunmayan 16 karbonlu doymuş palmitik yağ asidi metil esterinin bulunduğu belirlenmiştir. Söz konusu biyodizelin ortalama molekül kütlesi ve kapalı formülü sırasıyla 294,10 g/mol ve  $C_{18,82}H_{35,62}O_2$  olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.7. Ticari dizel yakıtının ve belirlenen optimum şartlarda fındık yağı ve potasyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri ve ilgili standart değerler

Özellikler	Dizel Yakıtı	Biyodizel	EN 14214	ASTM D 6751
40°C’de kinematik viskozite, cSt	2,700	4,062	3,50-5,00	1,90-6,00
15°C’de yoğunluk kg/m <sup>3</sup>	833,33	874,07	860-900	*
Parlama noktası sıcaklığı, °C	63,0	175,0	101≤	130≤
Soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığı, °C	-6,0	-6,0	<+5 (yaz) -15 < (kış)	*
Üst ısı değeri, kJ/kg	45950	39889	*	*

\* Belirtilmemiş.

Tablo 3.8. Belirlenen optimum şartlarda fındık yağı ve potasyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin ortalama molekül kütlesi, kapalı formülü ile yapısındaki yağ asitlerinin türü ve yağ asidi metil esterlerinin kütleli yüzdeleri

Yağ asidi türü	Yağ asidi metil esterinin kütleli yüzdesi, %	Biyodizelin ortalama molekül kütlesi M [g/mol]	Biyodizelin kapalı formülü
Palmitik (C16:0)	9,656	294,10	$C_{18,82}H_{35,62}O_2$
Oleik (C18:1)	76,129		
Linoleik (C18:2)	13,044		
α-Linolenik (C18:3)	0,204		
Araşidik (C20:0)	0,236		
Gadoleik (C20:1)	0,338		
Behenik (C22:0)	0,392		

### 3.3. Farklı Yağ ve Katalizörler Kullanılarak Üretilen Biyodizellerin Karşılaştırılması

Farklı yağ ve katalizörler kullanılarak üretilen biyodizellerin karşılaştırmalı olarak incelenebilmesi ve sonuçların daha iyi irdelenebilmesi için, dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin katalizör oranı, reaksiyon sıcaklığı, reaksiyon süresi ve alkol/yağ mol oranı gibi üretim aşamasındaki parametrelerine göre değişimleri aşağıda toplu olarak verilmektedir.

#### 3.3.1. Katalizör Oranına Göre Değişimler

Katalizör oranının etkisinin incelendiği tüm deneylerde, sabit tutulan parametreler ve kullanılan katalizör oranları aşağıda verilmektedir:

Kullanılan yağ cinsleri: Mısır ve fındık

Kullanılan yağ miktarı: 200 gram

Kullanılan alkol/yağ mol oranı: 6:1

Reaksiyon sıcaklığı: 60°C

Reaksiyon süresi: 60 dakika

Karıştırma hızı: 500 devir/dakika

Katalizör türleri: Sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH)

Kullanılan katalizör oranları: %0,25, 0,50, 0,75, 0,90, 1,00, 1,10, 1,25 ve 1,50

Şekil 3.49'da farklı yağ ve katalizör türleri kullanılarak üretilen biyodizellerin dinamik viskozitelerinin katalizör oranına göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, dinamik viskozitenin katalizör oranına göre değişiminin karakteristiğini belirlemede yağın cinsinin daha etkin olduğu görülmektedir. Diğer bir deyişle, aynı yağlar için değişim karakteristikleri birbirine benzer nitelik göstermektedir. Örneğin, fındık yağından üretilen biyodizellerin dinamik viskozitelerinin katalizör oranına göre değişimleri daha az iken, mısır yağından üretilen biyodizellerin dinamik viskozitelerinin katalizör oranına göre değişimleri ise daha fazladır. Her iki katalizör kullanımında da mısır yağından daha düşük katalizör oranlarında daha düşük viskoziteli biyodizeller elde edilmiştir. Bu durum, mısır yağının viskozitesinin (40°C'de 31,579 cP) fındık yağının viskozitesinden

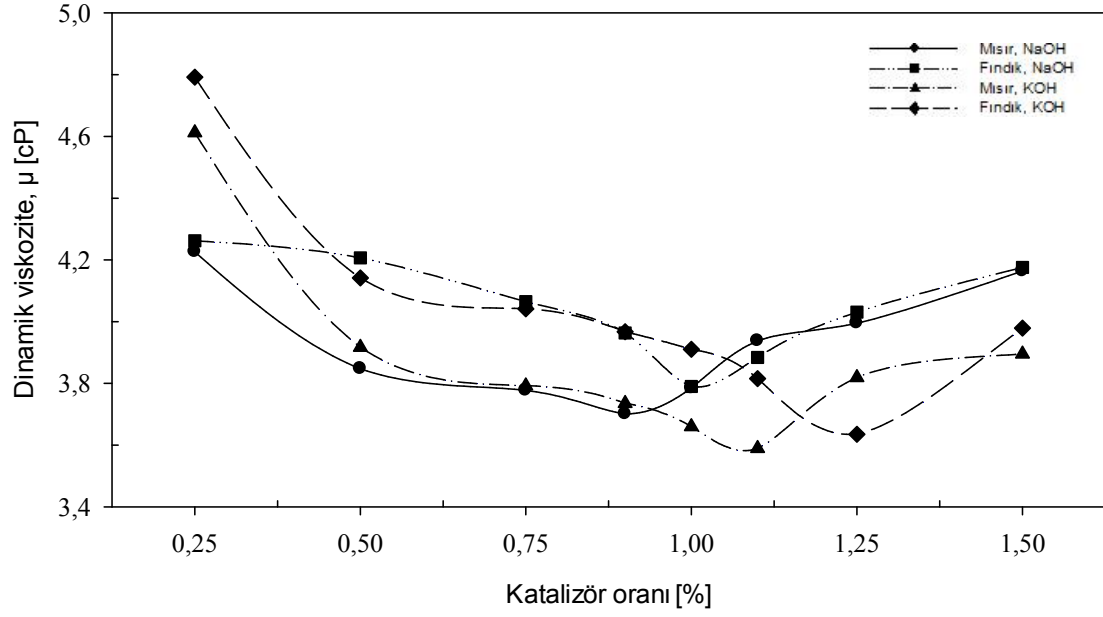
(40°C’de 32,849 cP) daha düşük olmasıyla açıklanabilir. Mısır yağı biyodizeli üretiminde daha düşük katalizör oranlarının yeterli olması ise, mısır yağının yapısında fındık yağına göre daha az serbest yağ asitlerinin bulunması ile açıklanabilir. Diğer taraftan her iki yağ için de, daha yüksek katalizör oranlarında potasyum hidroksit (KOH) kullanıldığında sodyum hidroksit (NaOH) kullanımına göre daha düşük viskoziteli biyodizellerin üretildiği belirlenmiştir. Katalizör olarak potasyum hidroksit kullanımında daha düşük viskozitenin elde edilmesi, sodyum hidroksite göre potasyum hidroksitin transesterifikasyon reaksiyonunu daha iyi katalizlemesinden ve metil alkol içerisinde daha iyi çözünmesinden kaynaklanmıştır. Ayrıca, potasyum hidroksitin molekül kütlesinin (56,1056 g/mol) sodyum hidroksitinkine (39,997 g/mol) göre daha yüksek olması nedeniyle yeterli verimin elde edilip en düşük viskozitenin sağlanabilmesi için daha yüksek potasyum hidroksit oranları kullanılmıştır. Tüm yağ ve katalizörler dikkate alındığında en düşük viskozite değeri mısır yağından %1,10 oranında potasyum hidroksit kullanılarak gerçekleştirilen üretim ile 3,589 cP (Şekil 3.13) olarak elde edilmiştir. Diğer yağ ve katalizörler kullanılarak üretilen biyodizellerin viskoziteleri ise en düşükten en yükseğe doğru, fındık yağından %1,25 oranında potasyum hidroksit kullanılarak 3,635 cP (Şekil 3.37), mısır yağından %0,90 oranında sodyum hidroksit kullanılarak 3,701 cP (Şekil 3.1) ve fındık yağından %1,00 oranında sodyum hidroksit kullanılarak 3,790 cP (Şekil 3.25) şeklinde sıralanabilir. En düşük viskozite değerleri dikkate alındığında, mısır yağından potasyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin viskozitesine göre, sırasıyla fındık yağından potasyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin viskozitesi %1,28, mısır yağından sodyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin viskozitesi %3,12 ve fındık yağından sodyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin viskozitesi de %5,60 oranında daha yüksek değer almaktadır.

Şekil 3.50’de farklı yağ ve katalizör türleri kullanılarak üretilen biyodizellerin yoğunluklarının katalizör oranına göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, genel olarak yoğunluk değerlerinin katalizör oranı ile çok fazla değişmediği, bununla birlikte %1,00 ile %1,10 katalizör oranları civarlarında en düşük yoğunluk değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Her iki katalizör ile yapılan üretimlerde de, tüm katalizör oranları için fındık yağı biyodizellerinin yoğunlukları mısır yağı biyodizellerine göre daha düşük değerler almıştır. Bu durum, saf fındık yağının yoğunluğunun (15°C’de 920,72 kg/m<sup>3</sup>) mısır yağının yoğunluğundan (15°C’de 922,35 kg/m<sup>3</sup>) daha düşük olmasıyla açıklanabilir. Aynı yağlardan farklı katalizörler kullanılarak

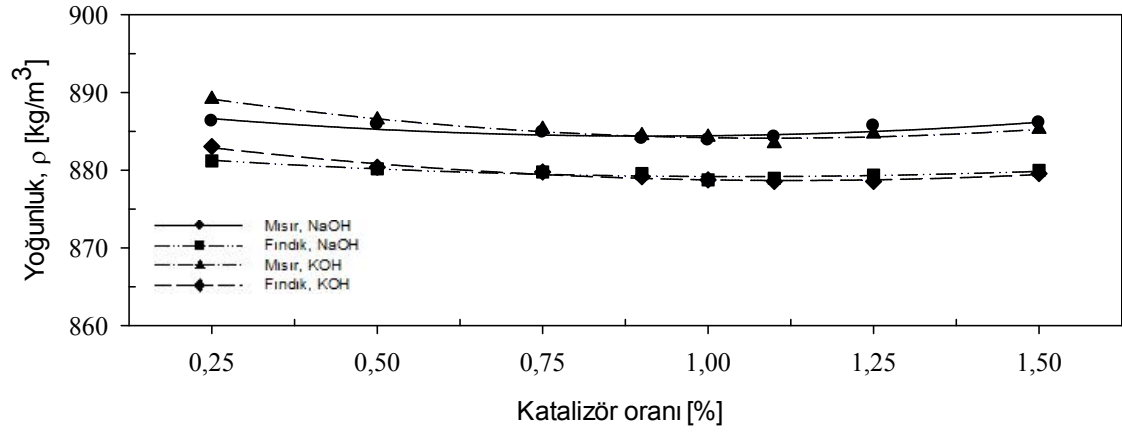
üretilen biyodizellerin yoğunluklarının katalizör oranına göre çok fazla değişmemesinin sebebi, katalizörün üretilen biyodizelin yapısında bulunmaması (veya çok az bulunması) ve sadece reaksiyonu hızlandırma ile verimi iyileştirmek için kullanılmasındandır. Tüm yağ ve katalizörler dikkate alındığında en düşük yoğunluk değeri fındık yağından %1,10 (veya %1,25) oranında potasyum hidroksit kullanılarak gerçekleştirilen üretim ile  $878,56 \text{ kg/m}^3$  (Şekil 3.38) olarak elde edilmiştir. Diğer yağ ve katalizörler kullanılarak üretilen biyodizellerin yoğunlukları ise en düşükten en yükseğe doğru, fındık yağından %1,00 oranında sodyum hidroksit kullanılarak  $878,76 \text{ kg/m}^3$  (Şekil 3.26), mısır yağından %1,10 oranında potasyum hidroksit kullanılarak  $883,44 \text{ kg/m}^3$  (Şekil 3.14) ve mısır yağından %1,00 oranında sodyum hidroksit kullanılarak  $883,85 \text{ kg/m}^3$  (Şekil 3.2) şeklinde sıralanabilir. En düşük yoğunluk değerleri dikkate alındığında, fındık yağından %1,10 (veya %1,25) oranında potasyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin yoğunluğuna göre, sırasıyla fındık yağından %1,00 oranında sodyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin yoğunluğu %0,02, mısır yağından %1,10 oranında potasyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin yoğunluğu %0,56 ve mısır yağından %1,00 oranında sodyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin yoğunluğu %0,60 oranında daha yüksek değer almaktadır.

Şekil 3.51'de farklı yağ ve katalizör türleri kullanılarak üretilen biyodizellerin kinematik viskozitelerinin katalizör oranına göre değişimleri verilmiştir. Yoğunluk değerleri farklı katalizör türü ve yağ cinsi için katalizör oranına göre çok fazla değişmediğinden (Şekil 3.50), kinematik viskozitelerin katalizör oranına göre değişimleri de dinamik viskozitelerin katalizör oranına göre değişimlerine oldukça benzer karakterde elde edilmiştir.

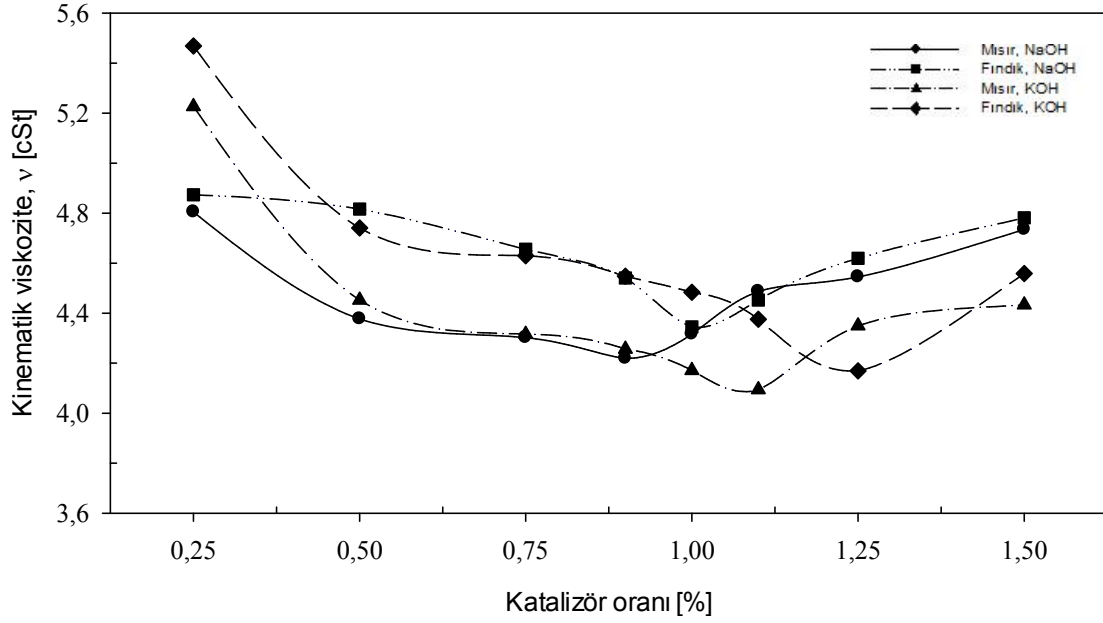




Şekil 3.49. Farklı yağ ve katalizör kullanılarak üretilen biyodizellerin dinamik viskozitelerinin katalizör oranına göre değişimleri



Şekil 3.50. Farklı yağ ve katalizör kullanılarak üretilen biyodizellerin yoğunluklarının katalizör oranına göre değişimleri



Şekil 3.51. Farklı yağ ve katalizör kullanılarak üretilen biyodizellerin kinematik viskozitelerinin katalizör oranına göre değişimleri

### 3.3.2. Reaksiyon Sıcaklığına Göre Değişimler

Reaksiyon sıcaklığının etkisinin incelendiği tüm deneylerde, sabit tutulan parametreler ve seçilen reaksiyon sıcaklıkları aşağıda verilmektedir:

Kullanılan yağ cinsleri: Mısır ve fındık

Kullanılan katalizör oranları: %0,90, 1,00, 1,10 ve 1,25

Katalizör türleri: Sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH)

Kullanılan yağ miktarı: 200 gram

Kullanılan alkol/yağ mol oranı: 6:1

Reaksiyon süresi: 60 dakika

Karıştırma hızı: 500 devir/dakika

Reaksiyon sıcaklıkları: 40, 50, 60 ve 70°C

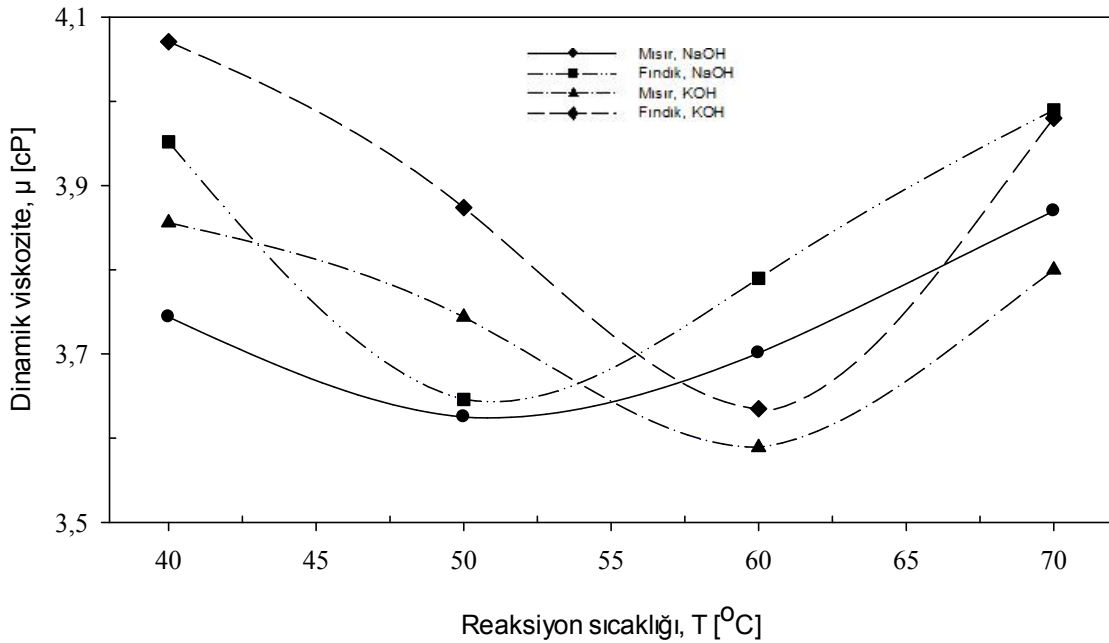
Şekil 3.52'de farklı yağ ve katalizör türleri kullanılarak üretilen biyodizellerin dinamik viskozitelerinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, karakteristik olarak her iki yağ için de viskozitenin reaksiyon

sıcaklığına göre değişiminde katalizör türünün etkili olduğu görülmektedir. Örneğin, katalizör olarak potasyum hidroksit kullanılarak gerçekleştirilen üretimlerde, yağlar farklı olmasına rağmen reaksiyon sıcaklığına göre değişimler benzer karakter göstermekte ve 60°C civarındaki reaksiyon sıcaklığında en düşük viskozite değerleri elde edilmektedir. Sodyum hidroksit kullanılarak gerçekleştirilen üretimlerde de yine farklı yağlar için reaksiyon sıcaklığına göre değişimler kendi içinde benzer karakter göstermekte olup bu kez 50°C civarında en düşük viskozite değerleri elde edilmiştir. Tüm yağ ve katalizörler dikkate alındığında en düşük viskozite değeri mısır yağından potasyum hidroksit kullanılarak 60°C reaksiyon sıcaklığında gerçekleştirilen üretim ile 3,589 cP (Şekil 3.16) olarak elde edilmiştir. Diğer yağ ve katalizörler kullanılarak üretilen biyodizellerin viskoziteleri ise en düşüğe doğru, mısır yağından sodyum hidroksit kullanılarak 50°C reaksiyon sıcaklığında 3,625 cP (Şekil 3.4), fındık yağından potasyum hidroksit kullanılarak 60°C reaksiyon sıcaklığında 3,635 cP (Şekil 3.40) ve fındık yağından sodyum hidroksit kullanılarak 50°C reaksiyon sıcaklığında 3,646 cP (Şekil 3.28) olarak sıralanabilir. En düşük viskozite değerleri dikkate alındığında, mısır yağından potasyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin viskozitesine göre, sırasıyla mısır yağından sodyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin viskozitesi %1,00, fındık yağından potasyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin viskozitesi %1,28 ve fındık yağından potasyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin viskozitesi de %1,59 oranında daha yüksek değer almaktadır.

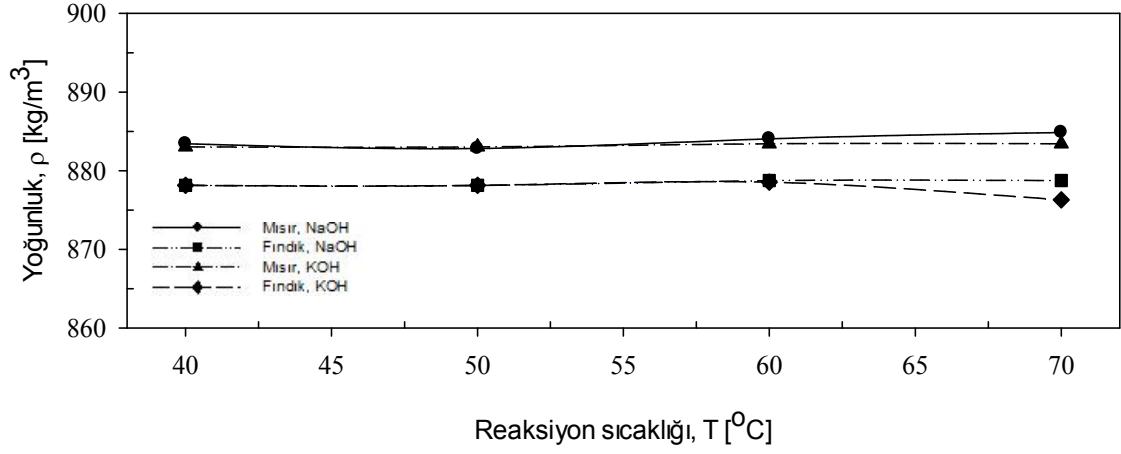
Şekil 3.53'te farklı yağ ve katalizör türleri kullanılarak üretilen biyodizellerin yoğunluklarının reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, genel olarak yoğunluk değerlerinin reaksiyon sıcaklığı ve katalizör türüne bağlı olarak pek fazla değişmediği fakat kullanılan yağın cinsine göre belirgin bir şekilde değiştiği görülmüştür. Ayrı ayrı her iki katalizör kullanılarak gerçekleştirilen üretimlerde de tüm reaksiyon sıcaklıkları için fındık yağı biyodizellerinin yoğunlukları mısır yağı biyodizellerinkine göre daha düşük değerler almıştır. Bu durum daha önceden bahsedildiği gibi saf fındık yağının yoğunluğunun (15 °C 'de 920,72 kg/m<sup>3</sup> ) mısır yağının yoğunluğundan (15°C'de 922,35 kg/m<sup>3</sup>) daha düşük olmasıyla açıklanabilir. Tüm yağ ve katalizörler dikkate alındığında en düşük yoğunluk değeri fındık yağından potasyum hidroksit kullanılarak 70°C reaksiyon sıcaklığında gerçekleştirilen üretim ile 876,31 kg/m<sup>3</sup> (Şekil 3.41) olarak elde edilmiştir. Diğer yağ ve katalizörler kullanılarak üretilen biyodizellerin yoğunlukları ise en düşüğe doğru, fındık yağından sodyum

hidroksit kullanılarak 40°C (veya 50°C) reaksiyon sıcaklığında 878,15 kg/m<sup>3</sup> (Şekil 3.29), mısır yağından sodyum hidroksit kullanılarak 50°C reaksiyon sıcaklığında 882,83 kg/m<sup>3</sup> (Şekil 3.5) ve mısır yağından potasyum hidroksit kullanılarak 40°C (veya 50°C) reaksiyon sıcaklığında 883,04 kg/m<sup>3</sup> (Şekil 3.17) şeklinde sıralanabilir. En düşük yoğunluk değerleri dikkate alındığında, fındık yağından potasyum hidroksit kullanılarak 70 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen biyodizelin yoğunluğuna göre, sırasıyla fındık yağından sodyum hidroksit kullanılarak 40 °C (veya 50 °C) reaksiyon sıcaklığında üretilen biyodizelin yoğunluğu % 0,21, mısır yağından sodyum hidroksit kullanılarak 50 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen biyodizelin yoğunluğu %0,74 ve mısır yağından potasyum hidroksit kullanılarak 40°C (veya 50°C) reaksiyon sıcaklığında üretilen biyodizelin yoğunluğu %0,77 oranında daha yüksek değer almaktadır.

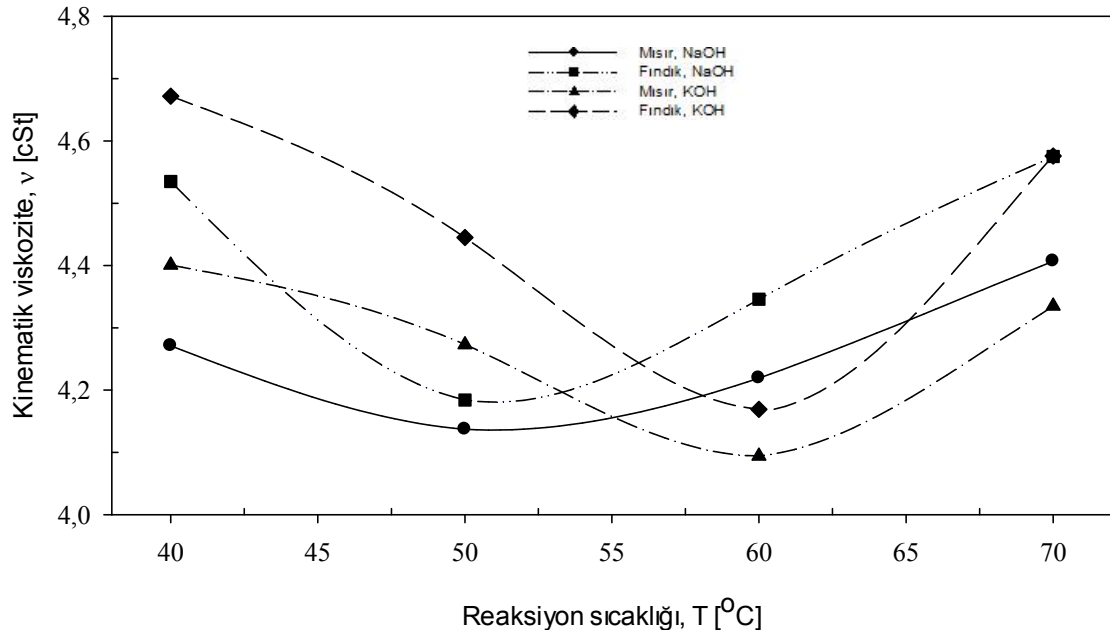
Şekil 3.54'te farklı yağ ve katalizör türleri kullanılarak üretilen biyodizellerin kinematik viskozitelerinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri verilmiştir. Yoğunluk değerleri farklı katalizör türü ve yağ cinsi için reaksiyon sıcaklığına göre çok fazla değişmediğinden (Şekil 3.52), kinematik viskozitelerin reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri de dinamik viskozitelerin reaksiyon sıcaklığına göre değişimlerine oldukça benzer karakterde elde edilmiştir.



Şekil 3.52. Farklı yağ ve katalizör kullanılarak üretilen biyodizellerin dinamik viskozitelerinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



Şekil 3.53. Farklı yağ ve katalizör kullanılarak üretilen biyodizellerin yoğunluklarının reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



Şekil 3.54. Farklı yağ ve katalizör kullanılarak üretilen biyodizellerin kinematik viskozitelerinin reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri

### 3.3.3. Reaksiyon Süresine Göre Değişimler

Reaksiyon süresinin etkisinin incelendiği tüm deneylerde, sabit tutulan parametreler ve seçilen reaksiyon süreleri aşağıda verilmektedir:

Kullanılan yağ cinsleri: Mısır ve fındık

Kullanılan katalizör oranları: %0,90, 1,00, 1,10 ve 1,25

Reaksiyon sıcaklıkları: 50 ve 60°C

Katalizör türleri: Sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH)

Kullanılan yağ miktarı: 200 gram

Kullanılan alkol/yağ mol oranı: 6:1

Karıştırma hızı: 500 devir/dakika

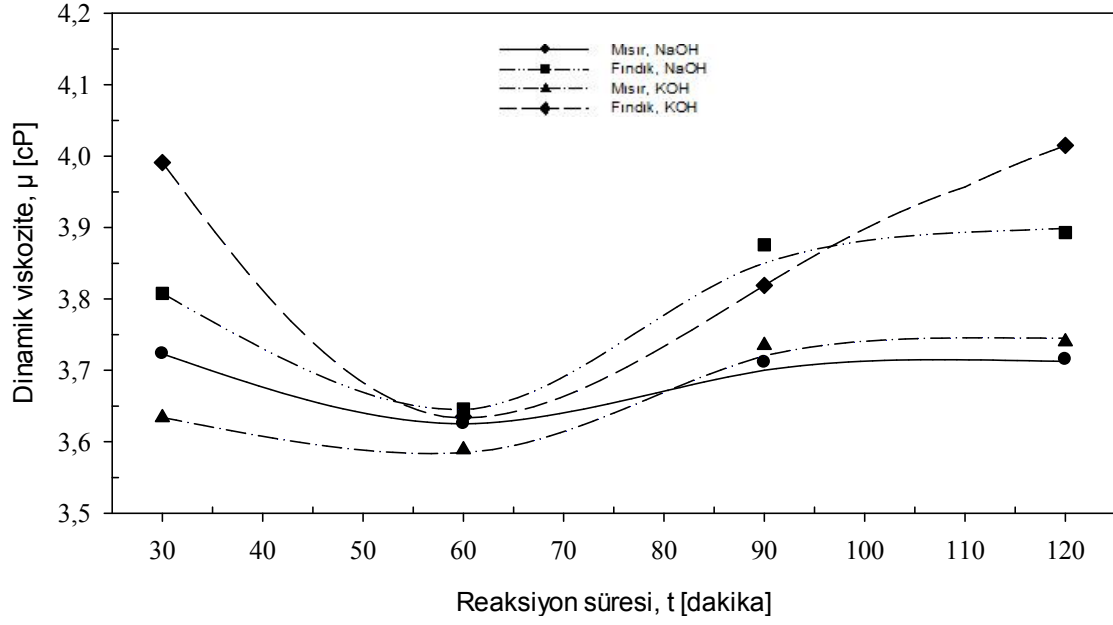
Reaksiyon süreleri: 30, 60, 90 ve 120 dakika

Şekil 3.55'te farklı yağ ve katalizör türleri kullanılarak üretilen biyodizellerin dinamik viskozitelerinin reaksiyon süresine göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, dinamik viskozitenin reaksiyon süresine göre değişiminin karakteristiğini belirlemede yağın cinsinin katalizör türüne göre daha etkin olduğu görülmektedir. Diğer bir deyişle, aynı yağlar için değişim karakteristikleri birbirine benzer nitelik göstermektedir. Örneğin, mısır yağından üretilen biyodizellerin dinamik viskozitelerinin reaksiyon süresine göre değişimleri daha az iken, fındık yağından üretilen biyodizellerin dinamik viskoziteleri reaksiyon süresine göre daha belirgin bir değişim göstermektedir. En düşük viskozite değerleri, her iki yağ ve katalizör türü için de 60 dakikalık reaksiyon süresinde elde edilmiştir. Tüm yağ ve katalizörler dikkate alındığında en düşük viskozite değeri mısır yağından potasyum hidroksit kullanılarak 60 dakika reaksiyon süresinde gerçekleştirilen üretim ile 3,589 cP (Şekil 3.19) olarak elde edilmiştir. 60 dakikalık reaksiyon süresinde diğer yağ ve katalizör türleri kullanılarak üretilen biyodizellerin viskoziteleri ise en düşüğe doğru, mısır yağından sodyum hidroksit kullanılarak 3,625 cP (Şekil 3.7), fındık yağından potasyum hidroksit kullanılarak 3,635 cP (Şekil 3.43) ve fındık yağından sodyum hidroksit kullanılarak 3,646 cP (Şekil 3.31) şeklinde sıralanabilir. En düşük viskozite değerleri dikkate alındığında, 60 dakikalık reaksiyon süresi için, mısır yağından potasyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin viskozitesine göre, sırasıyla mısır yağından sodyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin viskozitesi %1,00, fındık yağından potasyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin viskozitesi %1,28 ve fındık yağından sodyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin viskozitesi %1,59 oranında daha yüksek değer almaktadır.

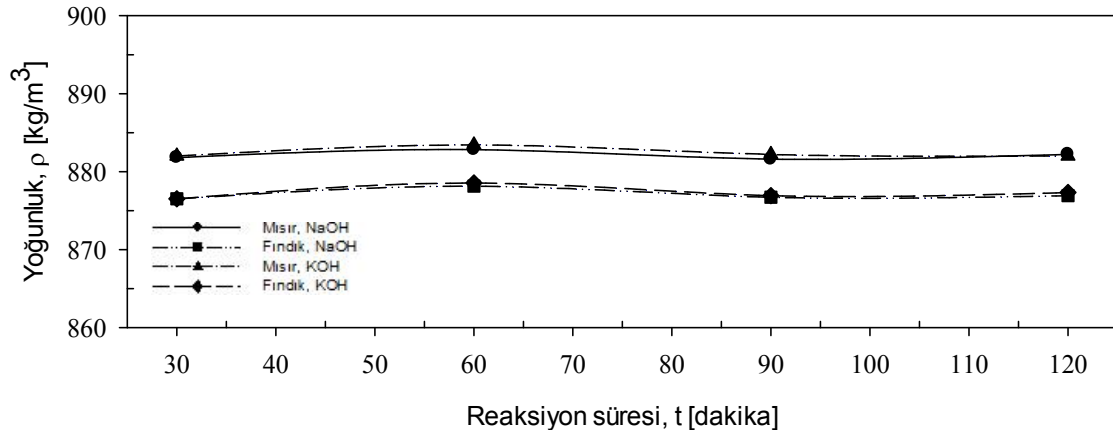
Şekil 3.56'da farklı yağ ve katalizör türleri kullanılarak üretilen biyodizellerin yoğunluklarının reaksiyon süresine göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil

incelendiğinde, genel olarak yoğunluk değerlerinin reaksiyon süresi ile çok fazla değişmediği görülmüştür. Ayrı ayrı her iki katalizör kullanılarak gerçekleştirilen üretimlerde, tüm reaksiyon süresi için fındık yağı biyodizellerinin yoğunlukları mısır yağı biyodizellerinkine göre daha düşük değerler almıştır. Bu durum daha önceden belirtildiği gibi saf fındık yağının yoğunluğunun (15 °C 'de 920,72 kg/m<sup>3</sup> ) mısır yağının yoğunluğundan (15°C'de 922,35 kg/m<sup>3</sup>) daha düşük olmasıyla açıklanabilir. Tüm yağ ve katalizörler dikkate alındığında en düşük yoğunluk değeri fındık yağından sodyum veya potasyum hidroksit kullanılarak 30 dakikalık reaksiyon süresinde gerçekleştirilen üretim ile 876,52 kg/m<sup>3</sup> (Şekil 3.32, 3.44) olarak elde edilmiştir. Diğer yağ ve katalizörler kullanılarak üretilen biyodizellerin yoğunlukları ise en düşüğe doğru, mısır yağından sodyum hidroksit kullanılarak 90 dakikalık reaksiyon süresinde 881,61 kg/m<sup>3</sup> (Şekil 3.8) ve mısır yağından potasyum hidroksit kullanılarak 30 veya 120 dakikalık reaksiyon süresinde 882,02 kg/m<sup>3</sup> (Şekil 3.20) şeklinde sıralanabilir. En düşük yoğunluk değerleri dikkate alındığında, fındık yağından sodyum veya potasyum hidroksit kullanılarak 30 dakikalık reaksiyon süresinde üretilen biyodizelin yoğunluğuna göre, sırasıyla mısır yağından sodyum hidroksit kullanılarak 90 dakikalık reaksiyon süresinde üretilen biyodizelin yoğunluğu %0,58 ve mısır yağından potasyum hidroksit kullanılarak 30 veya 120 dakikalık reaksiyon süresinde üretilen biyodizelin yoğunluğu %0,63 oranında daha yüksek değer almaktadır.

Şekil 3.57'de farklı yağ ve katalizör türleri kullanılarak üretilen biyodizellerin kinematik viskozitelerinin reaksiyon süresine göre değişimleri verilmiştir. Yoğunluk değerleri farklı katalizör türü ve yağ cinsi için, reaksiyon süresine göre çok fazla değişmediğinden (Şekil 3.56), kinematik viskozitelerin reaksiyon süresine göre değişimleri de dinamik viskozitelerin reaksiyon süresine göre değişimlerine oldukça benzer karakterde elde edilmiştir.

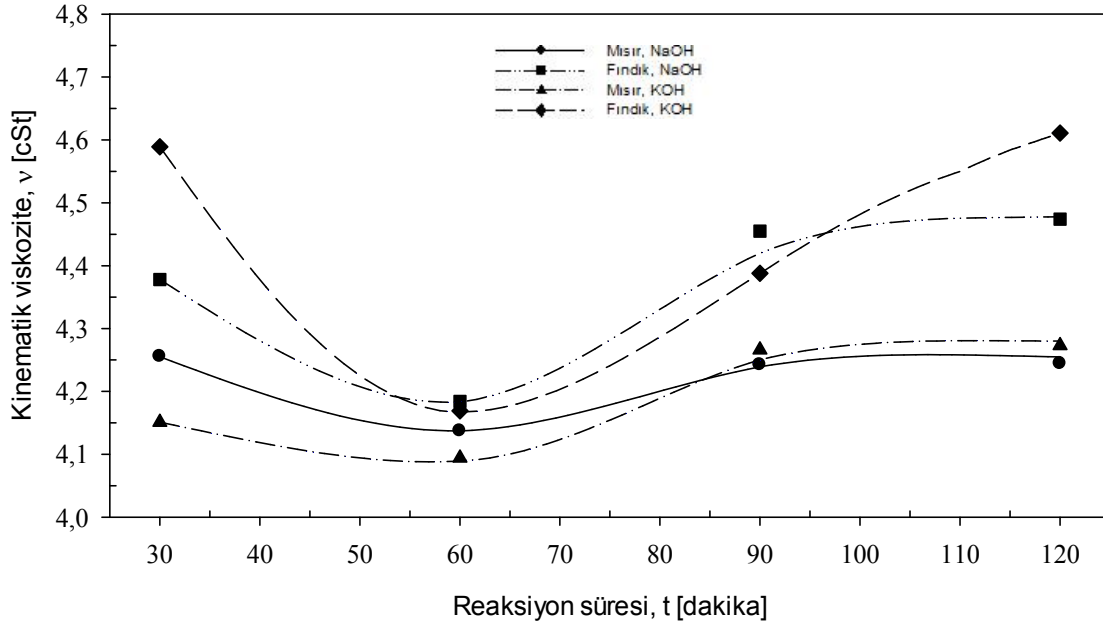


Şekil 3.55. Farklı yağ ve katalizör kullanılarak üretilen biyodizellerin dinamik viskozitelerinin reaksiyon süresine göre değişimleri



Şekil 3.56. Farklı yağ ve katalizör kullanılarak üretilen biyodizellerin yoğunluklarının reaksiyon süresine göre değişimleri





Şekil 3.57. Farklı yağ ve katalizör kullanılarak üretilen biyodizellerin kinematik viskozitelerinin reaksiyon süresine göre değişimleri

### 3.3.4. Alkol/Yağ Mol Oranına Göre Değişimler

Alkol/yağ mol oranının etkisinin incelendiği tüm deneylerde, sabit tutulan parametreler ve kullanılan alkol/yağ mol oranları aşağıda verilmektedir:

Kullanılan yağ cinsleri: Mısır ve fındık

Kullanılan katalizör oranları: %0,90, 1,00, 1,10 ve 1,25

Reaksiyon sıcaklıkları: 50 ve 60°C

Reaksiyon süresi: 60 dakika

Katalizör türleri: Sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH)

Kullanılan yağ miktarı: 200 gram

Karıştırma hızı: 500 devir/dakika

Kullanılan alkol/yağ mol oranları: 3:1, 6:1, 9:1 ve 12:1

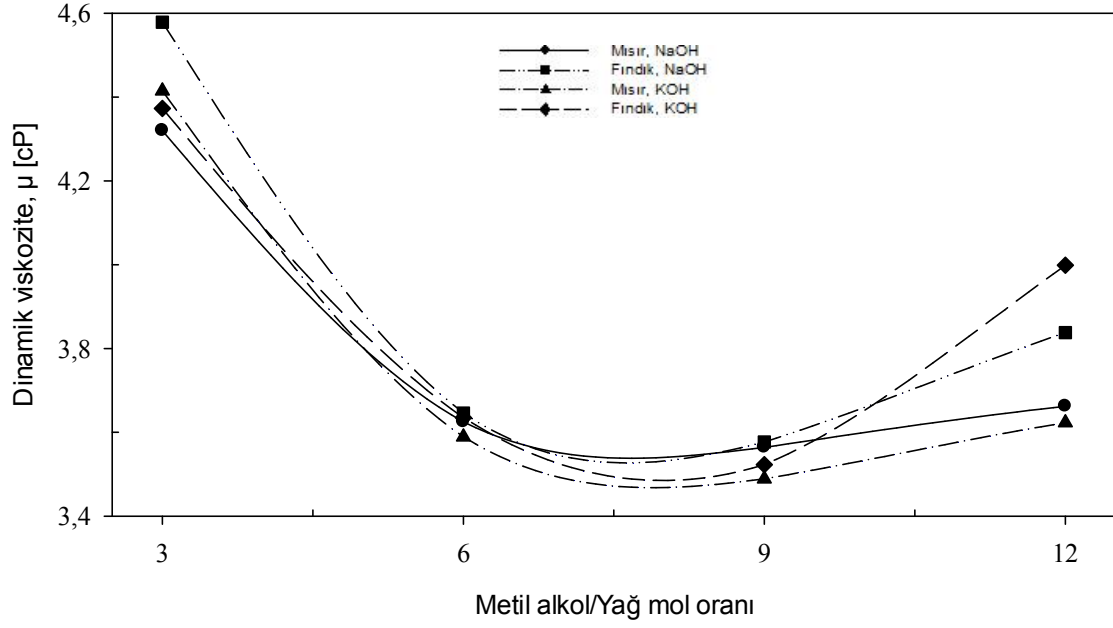
Şekil 3.58'de farklı yağ ve katalizör türleri kullanılarak üretilen biyodizellerin dinamik viskozitelerinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, dinamik viskozitenin alkol/yağ mol oranına göre değişiminin

karakteristiğine esas olarak yağın cinsinin belirgin bir şekilde etki ettiği görülmektedir. Diğer bir deyişle, aynı yağlar için değişim karakteristikleri birbirlerine benzer nitelik göstermektedir. Örneğin, her iki yağdan da üretilen biyodizellerin viskoziteleri artan alkol/yağ mol oranı ile birlikte hızlı bir şekilde düşerek 9:1 alkol/yağ mol oranında en düşük değere ulaştıktan sonra, alkol/yağ mol oranı artırılmaya devam edilmesi durumunda mısır yağı biyodizellerinin viskozite değerleri pek fazla artmazken, fındık yağı biyodizellerinin viskozite değerleri belirgin bir şekilde artmaya devam ettiği görülmektedir. Yapılan ölçümler dikkate alındığında en düşük viskozite değerleri, her iki yağ ve katalizör türü için de 9:1 metil alkol/yağ mol oranında elde edilmiştir. Tüm yağ ve katalizörler dikkate alındığında en düşük viskozite değeri mısır yağından potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak gerçekleştirilen üretim ile 3,489 cP (Şekil 3.22) olarak elde edilmiştir. 9:1 alkol/yağ mol oranında diğer yağ ve katalizörler kullanılarak üretilen biyodizellerin viskoziteleri ise en düşüğe doğru, fındık yağından potasyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin dinamik viskozitesi 3,523 cP (Şekil 3.46), mısır yağından sodyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin dinamik viskozitesi 3,564 cP (Şekil 3.10) ve fındık yağından sodyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin dinamik viskozitesi 3,577 cP (Şekil 3.34) olarak belirlenmiştir. En düşük viskozite değerleri dikkate alındığında (9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanımında), mısır yağından potasyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin viskozitesine göre, sırasıyla fındık yağından potasyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin viskozitesi %0,97, mısır yağından sodyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin viskozitesi %2,15 ve fındık yağından sodyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin viskozitesi %2,52 oranında daha yüksek değer almaktadır.

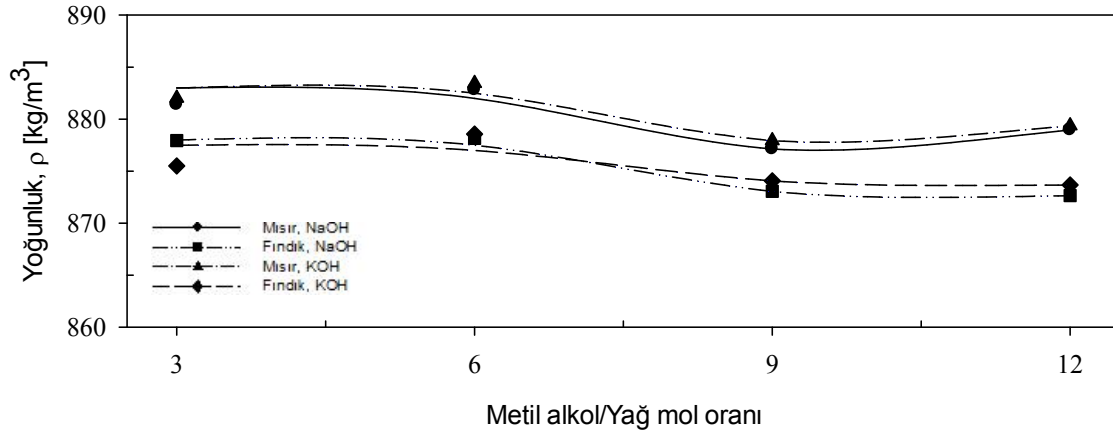
Şekil 3.59'da farklı yağ ve katalizör türleri kullanılarak üretilen biyodizellerin yoğunluklarının metil alkol/yağ mol oranına göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, genel olarak yoğunluk değerlerinin mol oranı ile çok fazla değişmediği görülmüştür. Her iki katalizör ile gerçekleştirilen üretimlerde, tüm reaksiyon süresi için fındık yağı biyodizellerinin yoğunlukları mısır yağı biyodizellerinkine göre daha düşük değerler almıştır. Bu durum daha önceden belirtildiği gibi saf fındık yağının yoğunluğunun ( $15^{\circ}\text{C}$ 'de  $920,72 \text{ kg/m}^3$ ) mısır yağının yoğunluğundan ( $15^{\circ}\text{C}$ 'de  $922,35 \text{ kg/m}^3$ ) daha düşük olmasıyla açıklanabilir. Tüm yağ ve katalizörler dikkate alındığında en düşük yoğunluk değeri fındık yağından sodyum hidroksit ve 12:1 mol oranında alkol kullanılarak gerçekleştirilen üretim ile  $872,65 \text{ kg/m}^3$  (Şekil 3.35) olarak elde edilmiştir. Diğer yağ ve

katalizörler kullanılarak üretilen biyodizellerin yoğunlukları ise en düşükten en yükseğe doğru, fındık yağından potasyum hidroksit ve 12:1 mol oranında alkol kullanılarak  $873,67 \text{ kg/m}^3$  (Şekil 3.47), mısır yağından sodyum hidroksit ve 9:1 mol oranında alkol kullanılarak  $877,13 \text{ kg/m}^3$  (Şekil 3.11) ve mısır yağından potasyum hidroksit ile 9:1 mol oranında alkol kullanılarak  $877,94 \text{ kg/m}^3$  (Şekil 3.23) şeklinde sıralanabilir. Görüldüğü gibi fındık yağı biyodizellerinde 12:1 mol oranında, mısır yağı biyodizellerinde ise 9:1 mol oranında en düşük yoğunluk değerleri elde edilmiştir. En düşük yoğunluk değerleri dikkate alındığında, fındık yağından sodyum hidroksit ve 12:1 mol oranında alkol kullanılarak üretilen biyodizelin yoğunluğuna göre, sırasıyla fındık yağından potasyum hidroksit ve 12:1 mol oranında alkol kullanılarak üretilen biyodizelin yoğunluğu %0,12, mısır yağından sodyum hidroksit ve 9:1 mol oranında alkol kullanılarak üretilen biyodizelin yoğunluğu %0,51 ve mısır yağından potasyum hidroksit ile 9:1 mol oranında alkol kullanılarak üretilen biyodizelin yoğunluğu %0,61 oranında daha yüksek değer almaktadır.

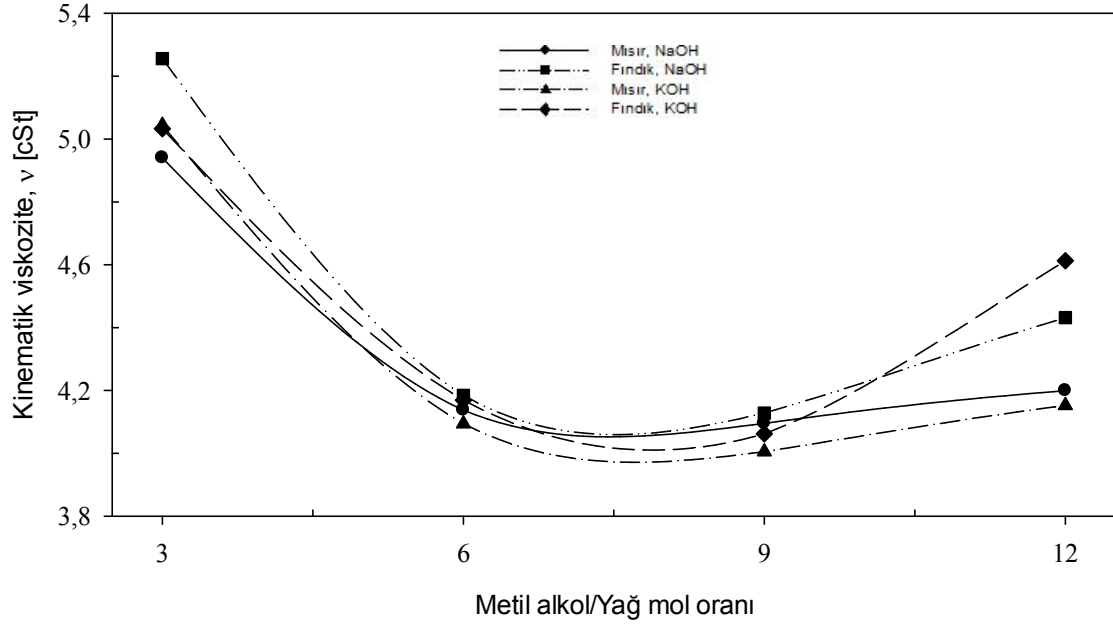
Şekil 3.60'da farklı yağ ve katalizör türleri kullanılarak üretilen biyodizellerin kinematik viskozitelerinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimleri verilmiştir. Yoğunluk değerleri farklı katalizör türü ve yağ cinsi için metil alkol/yağ mol oranına göre çok fazla değişmediğinden (Şekil 3.59), kinematik viskozitelerin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimleri de dinamik viskozitelerin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimlerine oldukça benzer karakterde elde edilmiştir.



Şekil 3.58. Farklı yağ ve katalizör kullanılarak üretilen biyodizellerin dinamik viskozitelerinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimleri



Şekil 3.59. Farklı yağ ve katalizör kullanılarak üretilen biyodizellerin yoğunluklarının metil alkol/yağ mol oranına göre değişimleri



Şekil 3.60. Farklı yağ ve katalizör kullanılarak üretilen biyodizellerin kinematik viskozitelerinin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimleri

### 3.4. Mısır Yağı Biyodizeli-Dizel Yakıtı Karışımlarının Dinamik Viskozite, Yoğunluk ve Kinematik Viskozitelerinin Belirlenmesi

#### 3.4.1. Sodyum Hidroksit Kullanılarak Üretilen Mısır Yağı Biyodizeli-Dizel Yakıtı Karışımları

##### 3.4.1.1. En Düşük Viskoziteye Sahip Biyodizel İçin

Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelleri içerisinde en düşük viskoziteye sahip biyodizel ile dizel yakıtı hacimsel olarak belirli oranlarda (%5, 10, 15, 20) karıştırılarak elde edilen yakıt karışımlarının çeşitli sıcaklıklardaki (10, 20, 30, 40°C) dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerleri belirlenmiştir. Söz konusu biyodizelin üretim parametreleri aşağıdaki gibidir:

Yağ: Mısır yağı

Katalizör türü: NaOH

Katalizör oranı: %0,90

Reaksiyon sıcaklığı: 50°C

Reaksiyon süresi: 60 dakika

Kullanılan alkol/yağ mol oranı: 9:1

#### 3.4.1.1.1. Sıcaklığa Göre Değişimler

Söz konusu biyodizel-dizel yakıtı karışımları için dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin sıcaklığa göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.61, 3.62 ve 3.63'te verilmektedir.

Şekil 3.61'de sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, saf biyodizel, biyodizel-dizel yakıtı karışımları ve saf dizel yakıtının viskozite değerlerinin sıcaklık arttıkça eksponansiyel olarak azaldığı görülmüştür. Düşük sıcaklıklarda saf biyodizel ve saf dizel yakıtının dinamik viskoziteleri arasındaki fark daha fazla iken, artan sıcaklıkla birlikte eğriler birbirlerine eksponansiyel olarak yaklaşmaktadır. Söz konusu dinamik viskozite değerlerine,

$$\mu = \mu(T) = y_0 + ae^{-bT} \quad (3.1)$$

şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

Şekil 3.62'de sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklığa göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, yoğunluk değerlerinin beklendiği gibi sıcaklık arttıkça azaldığı görülmüştür. Ölçüm yapılan sıcaklık aralığında yoğunluk değerlerinin sıcaklık arttıkça doğrusala yakın olmakla birlikte ikinci dereceden bir değişim gösterdiği belirlenmiştir. Bu nedenle söz konusu yoğunluk değerlerine,

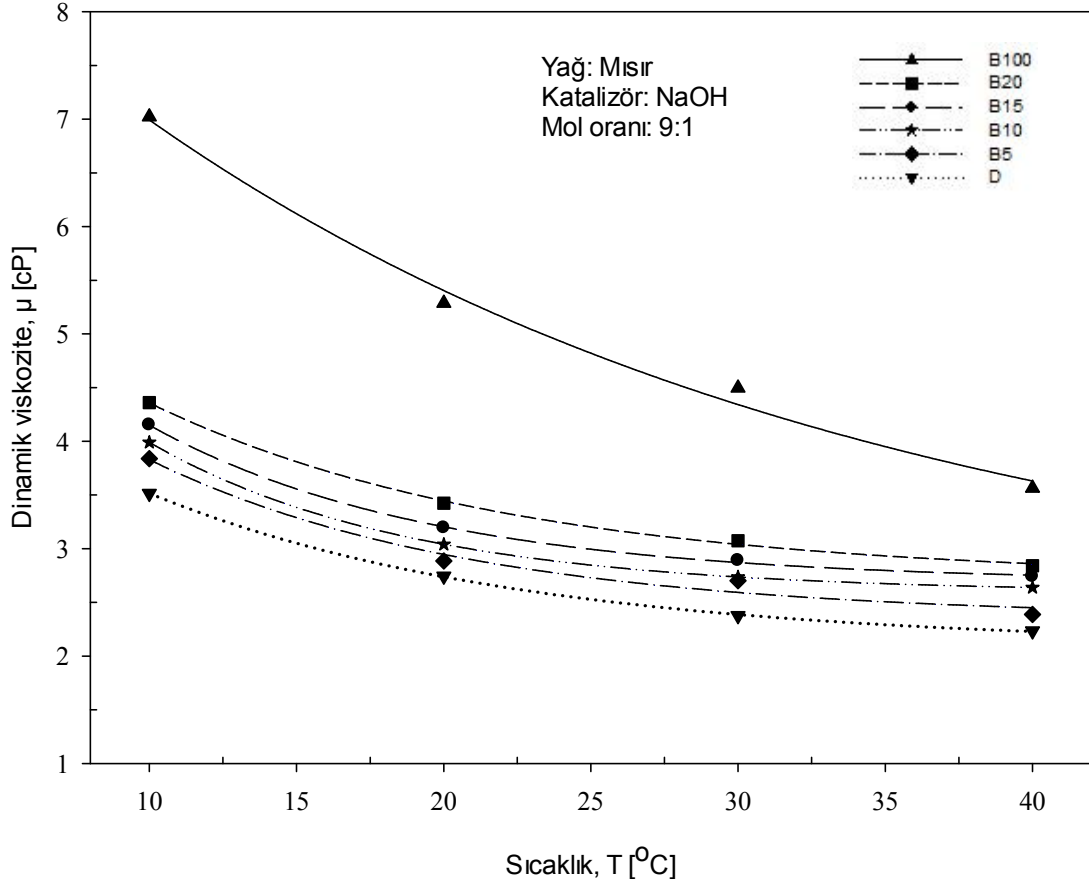
$$\rho = \rho(T) = y_0 + aT + bT^2 \quad (3.2)$$

şeklindeki bir-boyutlu parabolik bir fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ , a ve b sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

Şekil 3.63'te sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, yoğunluk değerlerinin sıcaklık ile değişimlerinin doğrusala yakın karakterde ve yatay eğilimli (Şekil 3.62) olması nedeniyle dinamik viskozite değerlerinin sabit yoğunluk değerlerine bölünüyormuş gibi bir etki yaratması sonucu, kinematik viskozitelerin sıcaklıkla değişimleri de dinamik viskozitelerin sıcaklık ile değişimlerine (Şekil 3.61) oldukça benzer karakterde olduğu görülebilir. Diğer bir ifade ile kinematik viskozitelerin de artan sıcaklıkla birlikte eksponansiyel olarak azaldığı belirlenmiştir. Söz konusu kinematik viskozite değerlerine

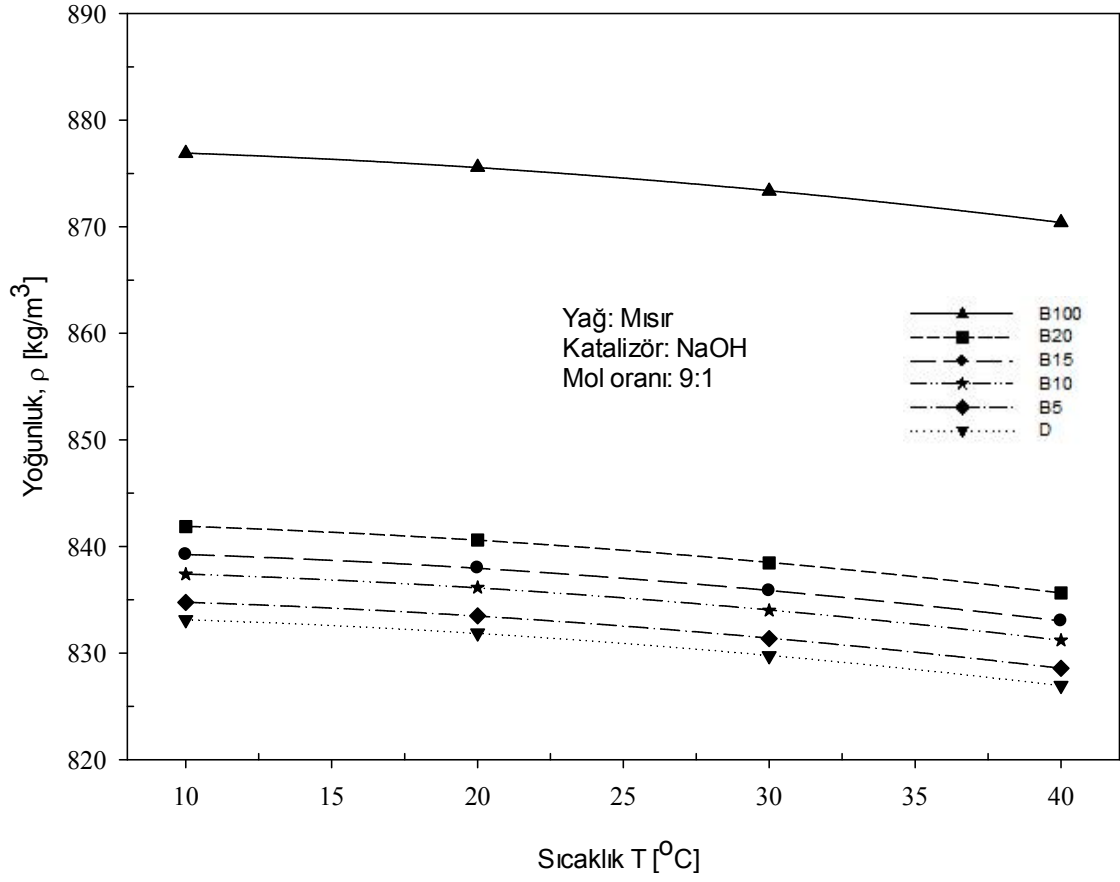
$$v = v(T) = y_0 + ae^{-bT} \quad (3.3)$$

şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ , a ve b sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ) ve ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

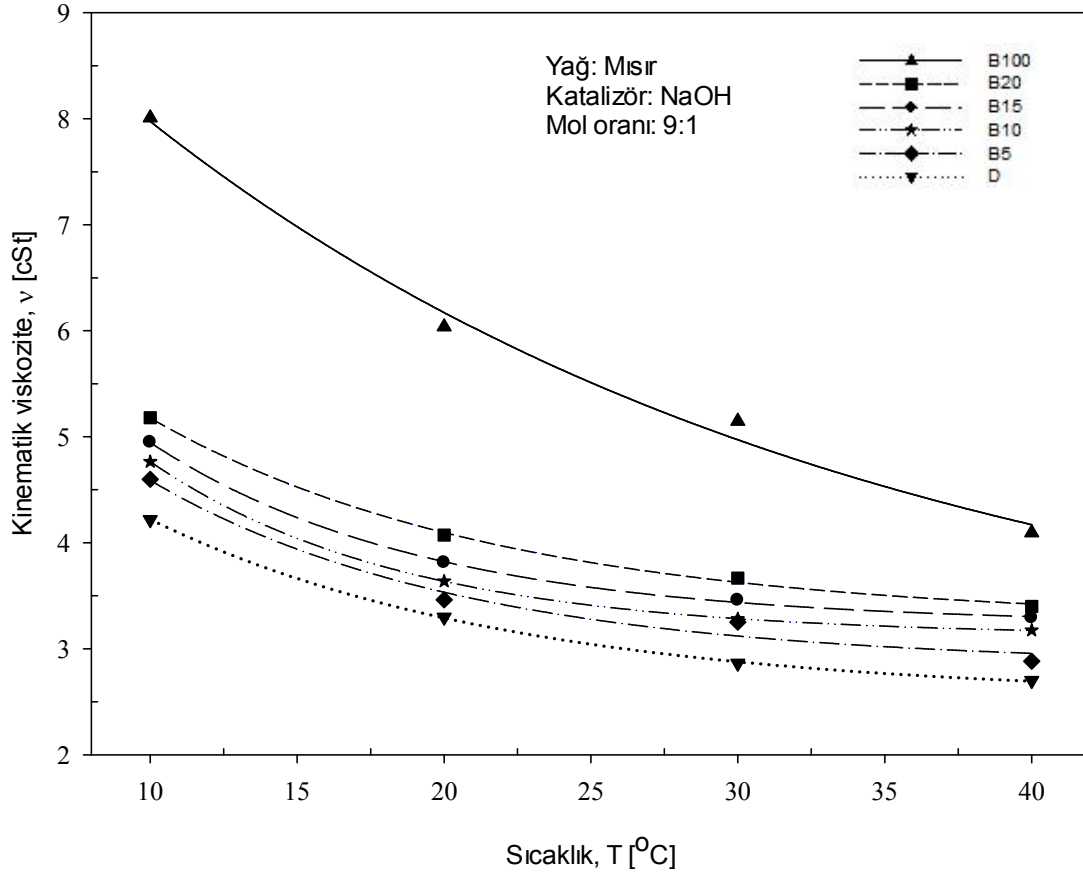


Şekil 3.61. Sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri





Şekil 3.62. Sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklığa göre değişimleri



Şekil 3.63. Sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri

#### 3.4.1.1.2. Karışımdaki Hacimsel Biyodizel Oranına Göre Değişimler

Söz konusu biyodizel-dizel yakıtı karışımları için dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.64, 3.65 ve 3.66'da verilmektedir.

Şekil 3.64'te sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için dinamik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri verilmiştir. Burada karışımdaki biyodizel oranının sıfır olması saf dizel yakıtına, 100 olması da saf biyodizele karşılık gelmektedir. Söz konusu şekil incelendiğinde, biyodizelin dinamik viskozitesinin dizel yakıtınkine göre yüksek olması nedeniyle karışımdaki hacimsel biyodizel oranı arttıkça biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının viskozite değerlerinin arttığı

görülmüştür. Viskozitelerin artan biyodizel oranı ile birlikte eksponansiyel olarak azalarak arttığı belirlenmiştir. Sıcaklık azaldıkça karışımdaki hacimsel biyodizel oranının artışı ile dinamik viskozitelerdeki değişimin doğrusal niteliğe yaklaştığı görülmüştür. Söz konusu dinamik viskozite değerlerine,

$$\mu = \mu(X) = y_0 + ae^{-bX} \quad (3.4)$$

şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

Şekil 3.65'te sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için yoğunluklarının karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri verilmiştir. Burada karışımdaki biyodizel oranının sıfır olması saf dizel yakıtına, 100 olması da saf biyodizele karşılık gelmektedir. Söz konusu şekil incelendiğinde, biyodizelin yoğunluğu dizel yakıtınıninkine göre yüksek olduğundan, karışımdaki hacimsel biyodizel oranı arttıkça biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluk değerlerinin beklendiği gibi doğrusal olarak arttığı görülmüştür. Ayrıca, belirli bir karışım oranı için sıcaklık azaldıkça yoğunluk değerleri birbirlerine yaklaşmaktadır. Söz konusu yoğunluk değerlerine,

$$\rho = \rho(X) = y_0 + aX \quad (3.5)$$

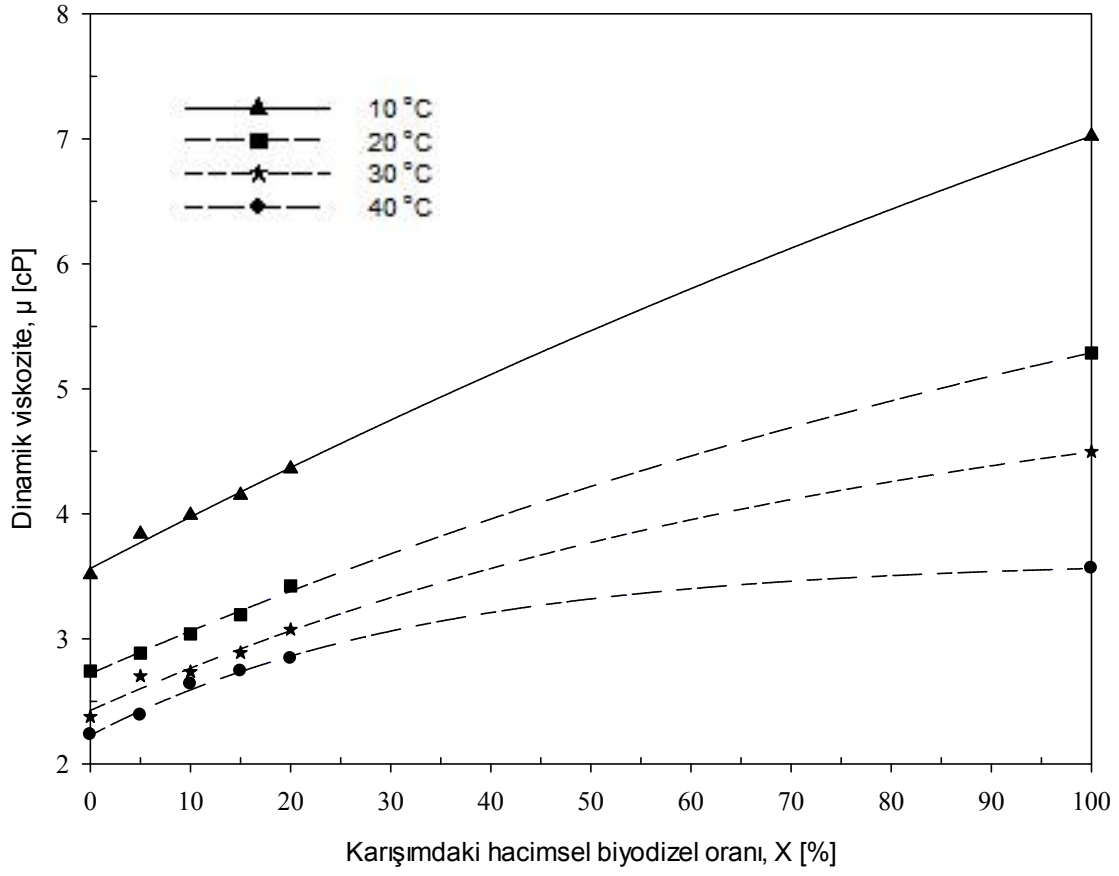
şeklindeki bir-boyutlu doğrusal fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$  ve  $a$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

Şekil 3.66'da sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için kinematik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri verilmiştir. Burada karışımdaki biyodizel oranının sıfır olması saf dizel yakıtına, 100

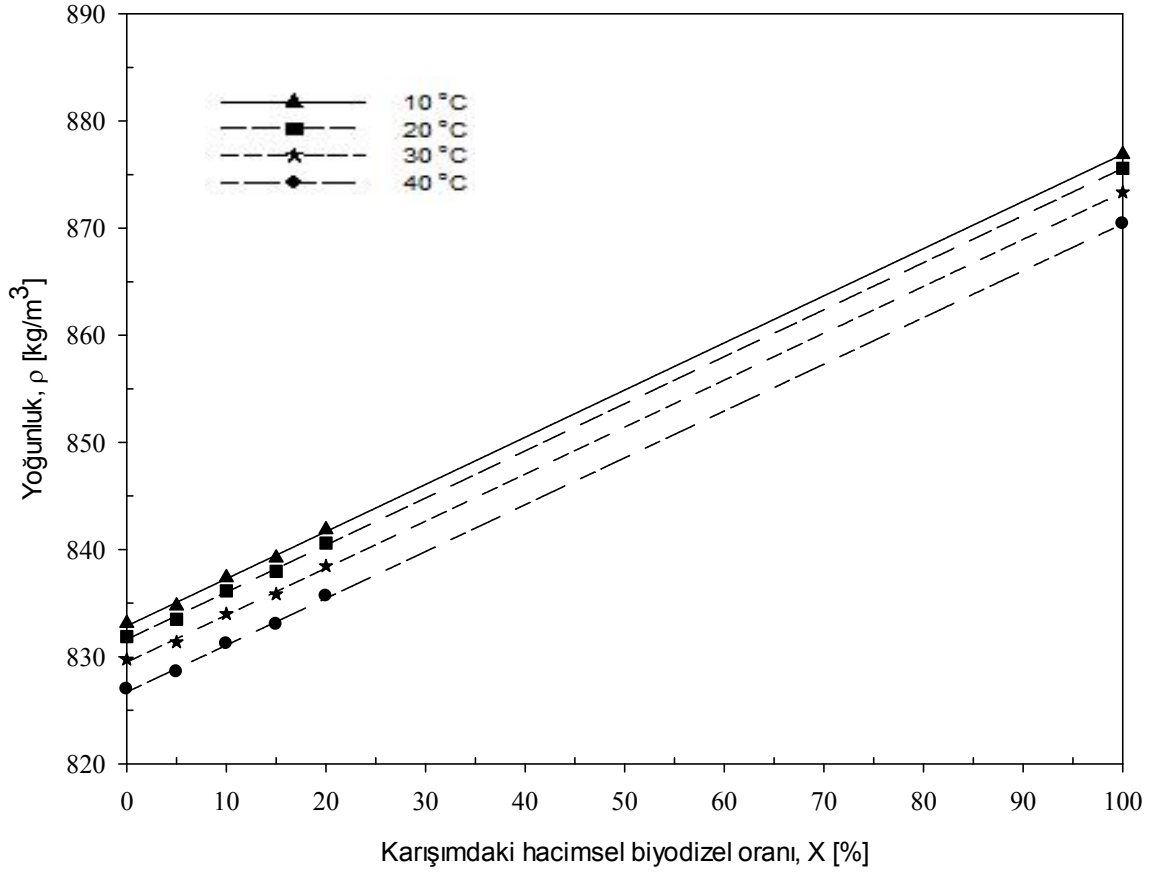
olması da saf biyodizele karşılık gelmektedir. Söz konusu şekil incelendiğinde, yoğunluk değerlerinin karışım oranı ile değişimlerinin (Şekil 3.65) doğrusal olmasıyla birlikte eğimlerinin çok küçük olması nedeniyle dinamik viskozite değerlerinin sabit yoğunluk değerlerine bölünüyormuş gibi bir etki yaratması sonucu kinematik viskozitelerin karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ile değişimleri de dinamik viskozitenin karışımdaki hacimsel biyodizel oranı (Şekil 3.64) ile değişimlerine oldukça benzer karakterde elde edilmiştir. Diğer bir ifade ile kinematik viskozitelerin de artan biyodizel oranı ile eksponansiyel olarak azalarak arttığı belirlenmiştir. Burada da sıcaklık azaldıkça karışımdaki hacimsel biyodizel oranının artışı ile kinematik viskozitelerdeki değişimin doğrusal niteliğe yaklaştığı görülmüştür. Söz konusu kinematik viskozite değerlerine,

$$v = v(X) = y_0 + ae^{-bX} \quad (3.6)$$

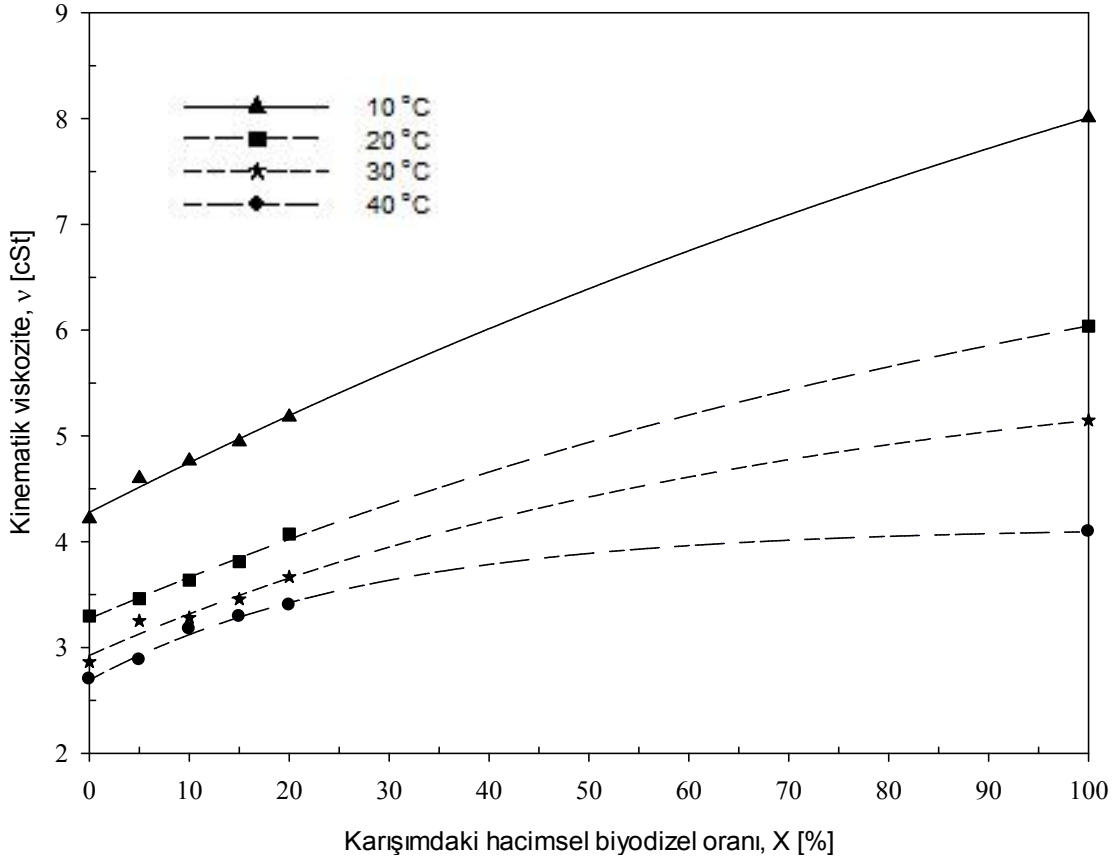
şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.



Şekil 3.64. Sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için dinamik viskozitelerinin karışımdeki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.65. Sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için yoğunluklarının karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.66. Sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için kinematik viskozitelerinin karışımdeki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri

#### 3.4.1.1.3. Karışımdeki Hacimsel Biyodizel Oranı ve Sıcaklığa Göre Değişimler

Şekil 3.67’de, ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdeki biyodizel oranına göre değişimleri iki-boyutlu eş-viskozite eğrileri şeklinde verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, farklı karakterdeki iki ayrı bölge görülebilir. Birinci bölge olarak adlandırılan yüksek sıcaklık ve düşük biyodizel oranı bölgesinde eş-viskozite eğrileri daha seyrek ve yataya yakın iken; ikinci bölge olarak adlandırılan düşük sıcaklık ve yüksek biyodizel oranı bölgesinde eğriler daha sık ve dikeye yakın karakterdedir. Buna göre, birinci bölgede sıcaklıktaki büyük bir değişime karşılık viskozitede küçük bir değişim görülürken, ikinci bölgede tam tersine

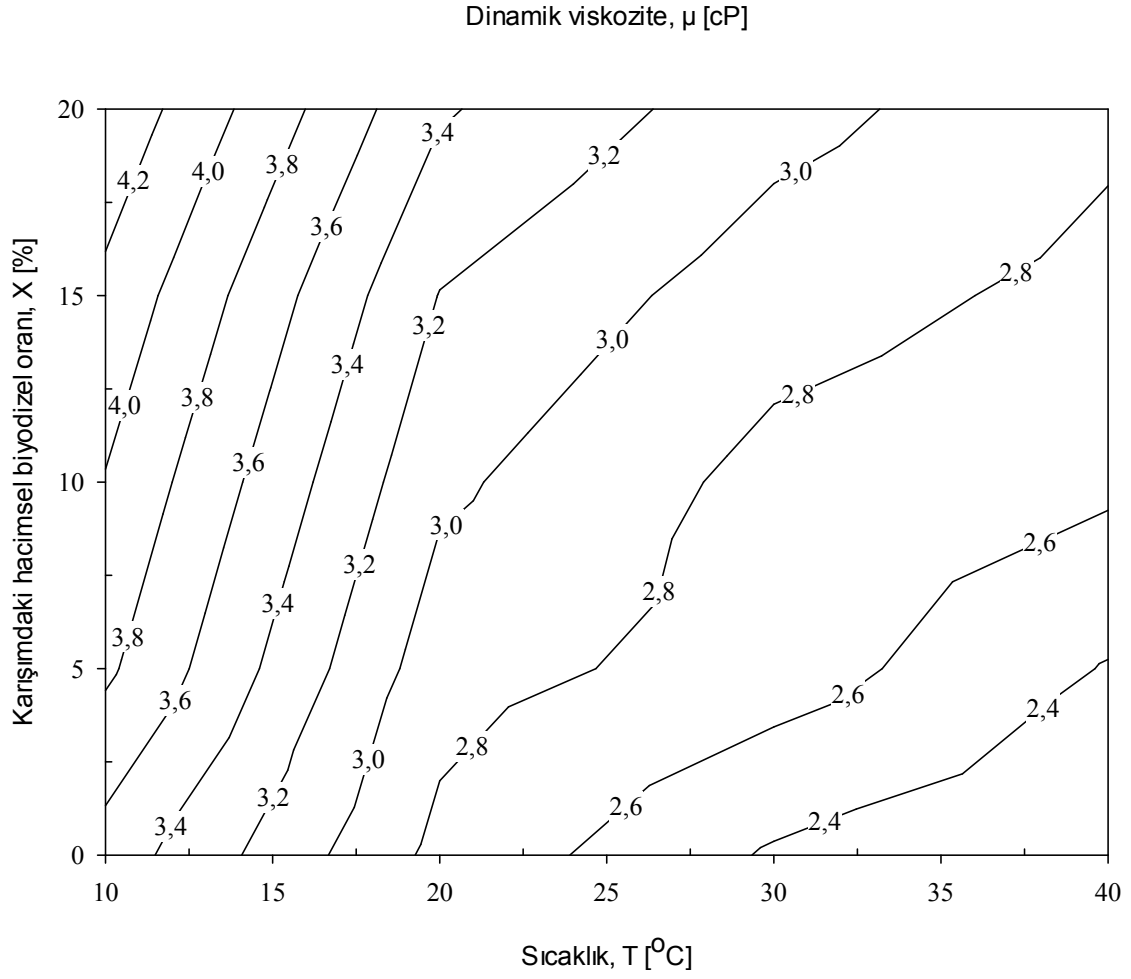
sıcaklıktaki küçük bir değişime karşılık viskozitede daha büyük değişim gözlemlenmektedir.

Şekil 3.68’de, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin ölçüm değerlerine uyumlanan iki-boyutlu  $\mu = \mu(T, X)$  fonksiyonundan elde edilen değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimlerine ilişkin eş-viskozite eğrileri verilmektedir. Hatırlanacağı üzere karışımdaki hacimsel biyodizel oranı olarak %0, 5, 10, 15, 20 ve 100 değerleri parametre olarak seçilmişti. Eğri uyumlarken % 20 ile % 100 arasındaki ölçüm yapılmamış geniş bölgenin hassasiyeti azaltmaması için söz konusu eğriler sadece sık ölçüm yapılan % 0-20 değerlerini kapsayacak şekilde çizilmiştir. Sıcaklıklar için ise yine ölçüm yapılmış olan 10-40°C aralığı dikkate alınmıştır. Deneysel veriler incelendiğinde, saf biyodizel ve dizel yakıtı ile biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranıyla değişimine,

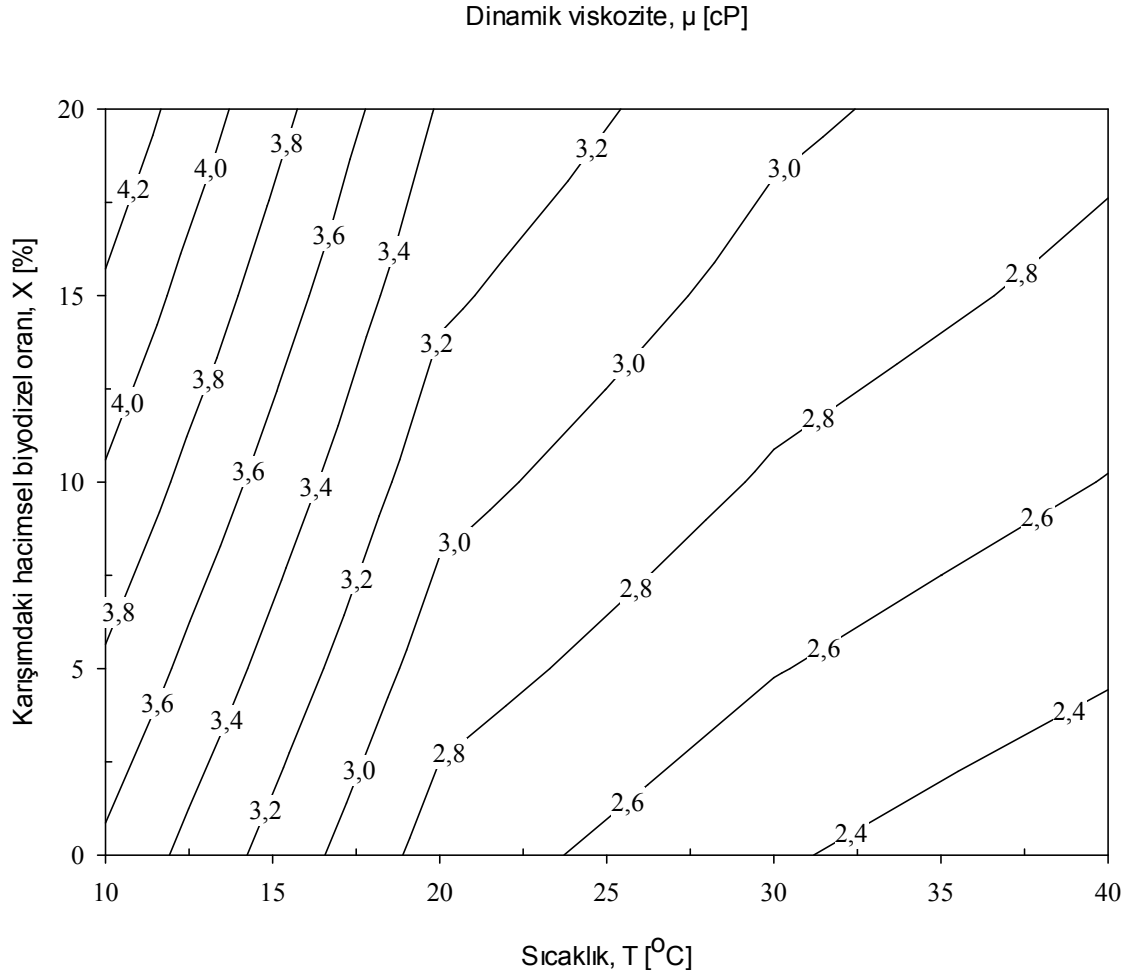
$$\mu = \mu(T, X) = a + bT + cX + dT^2 + eTX + fX^2 + gT^3 + hT^2X + kTX^2 \quad (3.7)$$

şeklinde X [%] karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre 2. dereceden, T [°C] sıcaklığına ise 3. dereceden bağımlı iki-boyutlu fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada a, b, ..., k sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir. Söz konusu eşitlikten elde edilen dinamik viskozite değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimi grafiği incelendiğinde, farklı karakterdeki iki ayrı bölge görülebilir. Birinci bölge olarak adlandırılan yüksek sıcaklık ve düşük biyodizel oranı bölgesinde eş-viskozite eğrileri daha seyrek ve yataya yakın iken; ikinci bölge olarak adlandırılan düşük sıcaklık ve yüksek biyodizel oranı bölgesinde eğriler daha sık ve dikeye yakın karakterdedir. Buna göre, birinci bölgede sıcaklıktaki büyük bir değişime karşılık viskozitede küçük bir değişim görülürken yani viskozite değişiminin sıcaklığa karşı hassasiyeti az iken, ikinci bölgede tam tersine sıcaklıktaki küçük bir değişime karşılık viskozitede daha büyük değişim gözlemlendiğinden viskozitenin sıcaklık değişimine karşı duyarlılığının daha fazla olduğu söylenebilir.





Şekil 3.67. Ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.68. Uymlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri

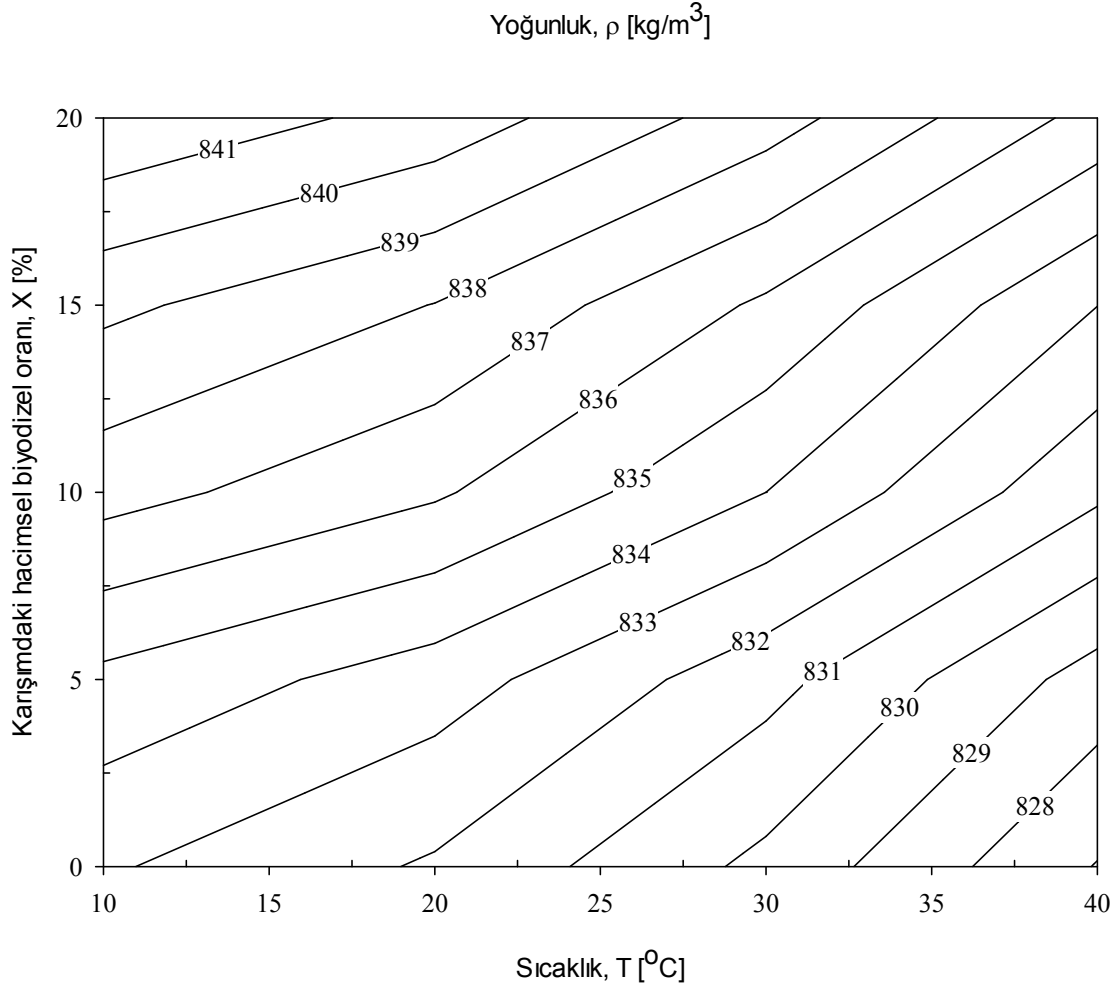
Şekil 3.69'da, ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluk değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri iki-boyutlu eş-yoğunluk eğrileri şeklinde verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, eş-yoğunluk eğrileri aralarındaki mesafeler yaklaşık olarak sabit olacak şekilde (sabit gradyana sahip), yoğunluğun karışımdaki biyodizel oranına göre değişiminin doğrusal, sıcaklığa göre değişiminin ise parabolik karakterde olduğu belirlenmiştir. Bu durum daha belirgin olarak Şekil 3.70'te görülmektedir.

Şekil 3.70'te, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının ölçüm değerlerine uymlanan iki-boyutlu  $\rho = \rho(T, X)$  fonksiyonundan elde edilen

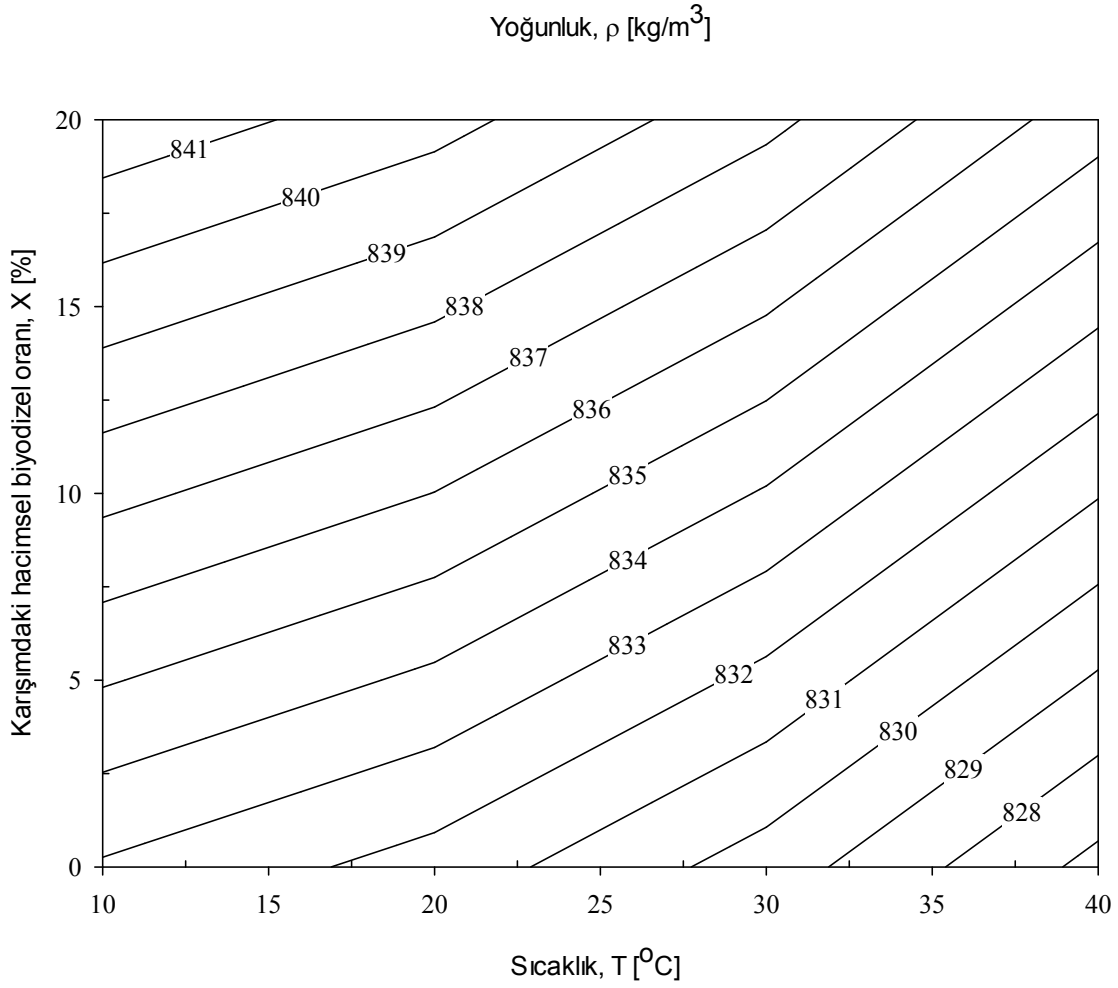
değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimlerine ilişkin eş-yoğunluk eğrileri verilmektedir. Yukarıda da belirtildiği gibi karışımdaki hacimsel biyodizel oranı olarak %0, 5, 10, 15, 20 ve 100 değerleri parametre olarak seçilmişti. Eğri uyumlarken % 20 ile % 100 arasındaki ölçüm yapılmamış geniş bölgenin hassasiyeti azaltmaması için söz konusu eğriler sadece sık ölçüm yapılan % 0-20 değerlerini kapsayacak şekilde çizilmiştir. Yoğunluk değerlerinin sıcaklığa göre değişiminin parabolik, karışımdaki biyodizel oranına göre değişiminin ise doğrusal olduğu belirtilmişti. Buna göre, sabit eş-yoğunluk eğrisi için, karışımın sıcaklığı arttıkça karışımdaki biyodizel oranı parabolik olarak artmaktadır. Ayrıca, sabit bir sıcaklıkta yoğunluğu bir birim değiştirmek için karışımdaki biyodizel oranının yaklaşık sabit bir değerde değiştirilmesi gerekirken, sabit bir karışım oranında yoğunluğu bir birim değiştirmek için düşük sıcaklıklarda daha fazla sıcaklık değişimi, yüksek sıcaklıklarda ise daha az sıcaklık değişimi gerekmektedir. Deney sonuçları incelendiğinde, yoğunlukların sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranıyla değişimine,

$$\rho = \rho(T, X) = a + bT + cX + dT^2 + eTX \quad (3.8)$$

şeklinde X [%] karışımdaki hacimsel biyodizel oranına 1. dereceden ve T [°C] sıcaklığına 2. dereceden bağımlı iki-boyutlu fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada a, b, c, d ve e sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.



Şekil 3.69. Ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımındaki biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.70. Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri

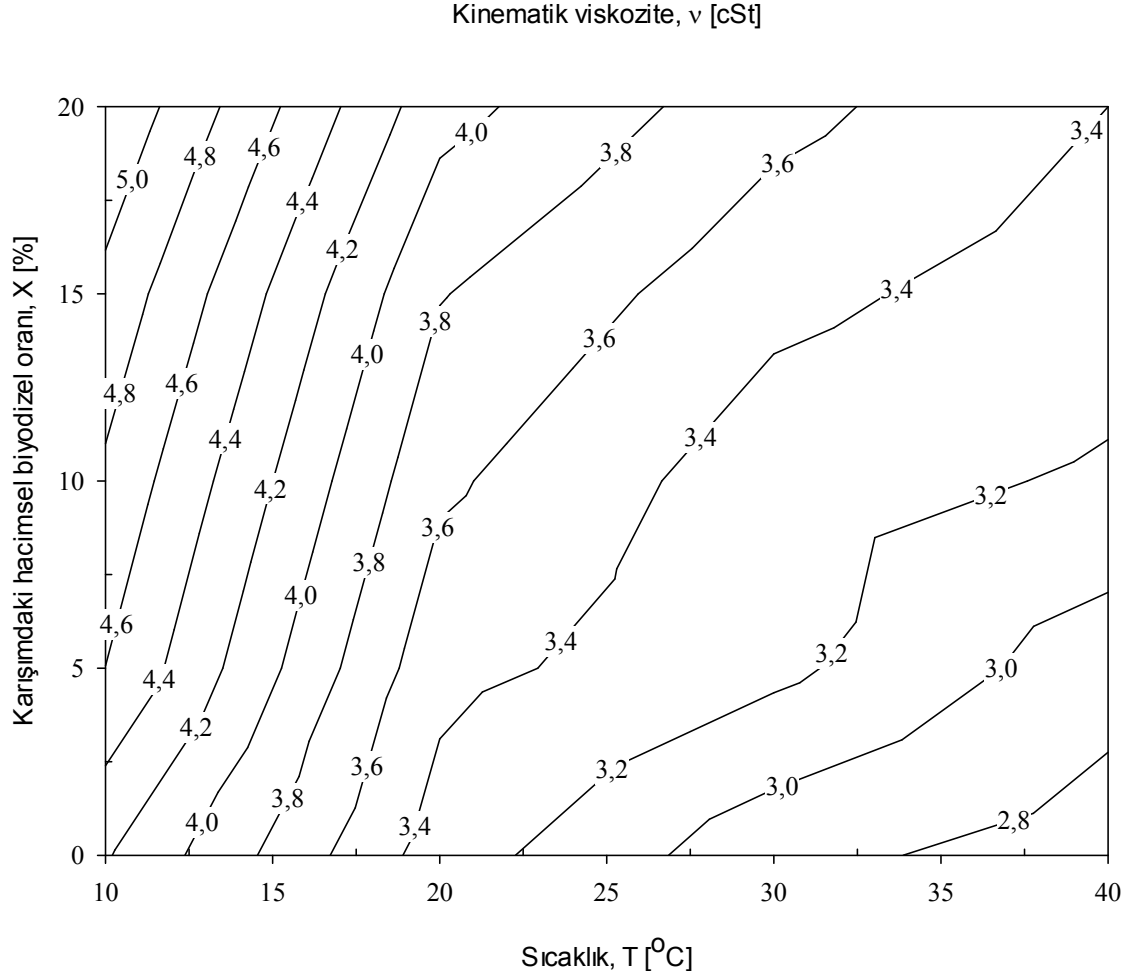
Şekil 3.71’de, ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri iki-boyutlu eş-viskozite eğrileri şeklinde verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, yoğunluk değerlerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimlerinin doğrusal, sıcaklığa göre değişimlerinin ise doğrusala yakın olması nedeniyle dinamik viskozite değerlerinin sabit yoğunluk değerlerine bölünüyormuş gibi bir etki yaratması sonucu, kinematik viskozitelerin sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri de dinamik viskozitelerin değişimlerine (Şekil 3.67) oldukça benzer karakterde olduğu görülebilir.

Şekil 3.72’de, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin ölçüm değerlerine uyumlanan iki-boyutlu  $v = v(T, X)$  fonksiyonundan elde edilen değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimlerine ilişkin eş-viskozite eğrileri verilmektedir. Hatırlanacağı üzere karışımdaki hacimsel biyodizel oranı olarak %0, 5, 10, 15, 20 ve 100 değerleri parametre olarak seçilmiştir. Eğri uyumlar için %20 ile %100 arasındaki ölçüm yapılmamış geniş bölgenin hassasiyeti azaltmaması için söz konusu eğriler sadece sık ölçüm yapılan %0-20 değerlerini kapsayacak şekilde çizilmiştir. Deneysel veriler incelendiğinde, saf biyodizel ve dizel yakıtı ile biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranıyla değişimine,

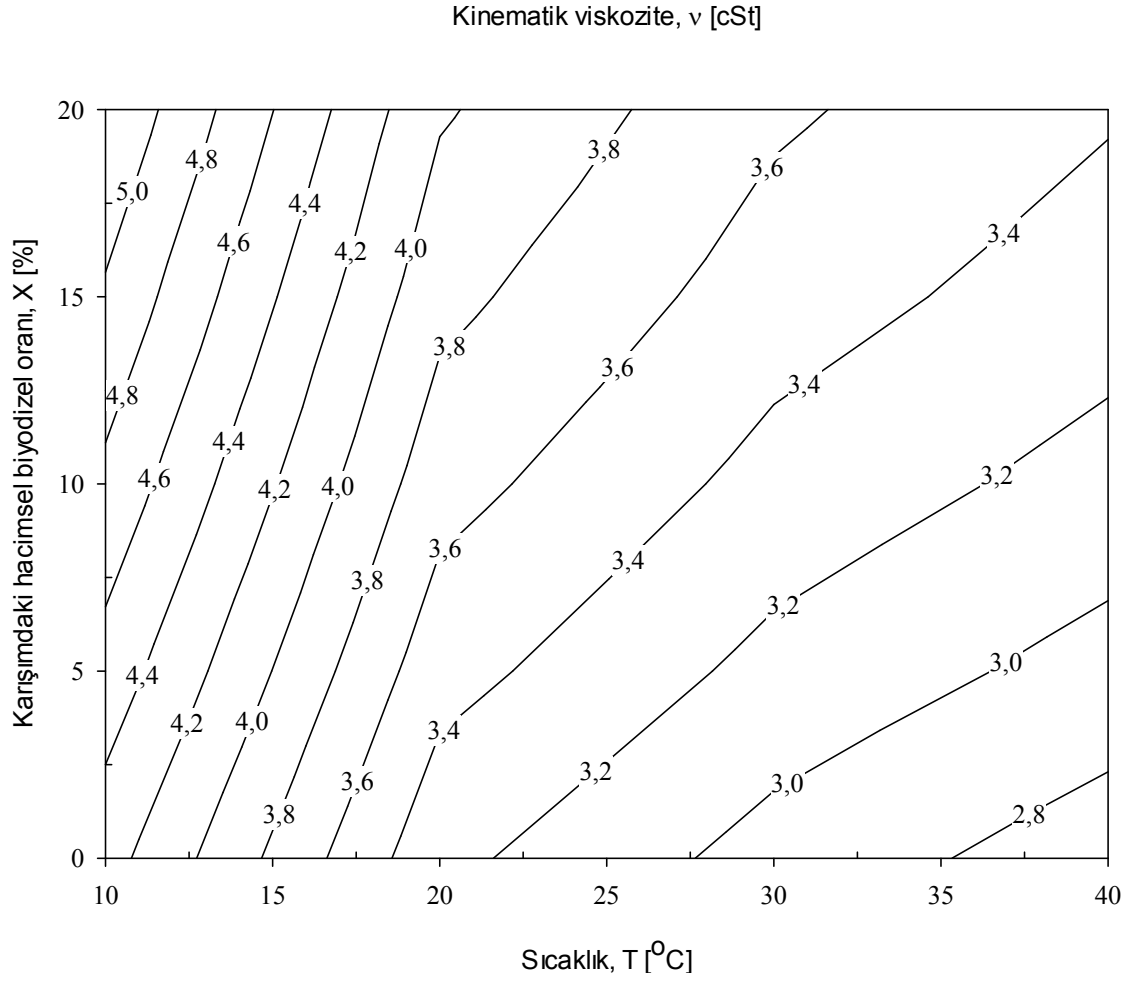
$$v = v(T, X) = a + bT + cX + dT^2 + eTX + fX^2 + gT^3 + hT^2X + kTX^2 \quad (3.9)$$

şeklinde X [%] karışımdaki hacimsel biyodizel oranına 2. dereceden, T [°C] sıcaklığına ise 3. dereceden bağımlı iki-boyutlu fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada a, b, ..., k sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, yoğunluk değerlerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimlerinin doğrusal, sıcaklığa göre değişimlerinin ise doğrusala yakın olması nedeniyle dinamik viskozite değerlerinin sabit yoğunluk değerlerine bölünüyormuş gibi bir etki yaratması sonucu, kinematik viskozitelerin sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri de dinamik viskozitelerin değişimlerine oldukça benzer karakterde olduğu söylenebilir. Şekil 3.68’de dinamik viskozitelerin sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimlerinde görüldüğü gibi, burada da farklı karakterdeki iki ayrı bölge görülebilir. Birinci bölge olarak adlandırılan yüksek sıcaklık ve düşük biyodizel oranı bölgesinde eş-viskozite eğrileri daha seyrek ve yataya yakın iken; ikinci bölge olarak adlandırılan düşük sıcaklık ve yüksek biyodizel oranı bölgesinde eğriler daha sık ve dikeye yakın karakterdedir. Buna göre, birinci bölgede sıcaklıktaki büyük bir değişime karşılık viskozitede küçük bir değişim görülürken yani viskozite değişiminin sıcaklığa karşı hassasiyeti az iken, ikinci bölgede tam tersine sıcaklıktaki küçük bir değişime karşılık

viskozitede daha büyük değişim gözlemlendiğinden viskozitenin sıcaklık değişimine karşı duyarlılığının daha fazla olduğu söylenebilir.



Şekil 3.71. Ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.72. Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri

### 3.4.1.2. Teorik Olarak En Yüksek Metil Ester Verimine Sahip Biyodizel İçin Değişimler

Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelleri içerisinde teorik olarak en yüksek metil ester verimine sahip biyodizel ile dizel yakıtı hacimsel olarak belirli oranlarda (% 5, 10, 15, 20) karıştırılarak elde edilen yakıt karışımlarının çeşitli sıcaklıklardaki (10, 20, 30, 40°C) dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerleri belirlenmiştir. Söz konusu biyodizelin üretim parametreleri aşağıdaki gibidir:

Yağ: Mısır yağı

Katalizör türü: NaOH



Katalizör oranı: %0,90

Reaksiyon sıcaklığı: 50°C

Reaksiyon süresi: 60 dakika

Kullanılan alkol/yağ mol oranı: 6:1

### 3.4.1.2.1. Sıcaklığa Göre Değişimler

Söz konusu biyodizel-dizel yakıtı karışımları için dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin sıcaklığa göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.73, 3.74 ve 3.75'te verilmektedir.

Şekil 3.73'te sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, Şekil 3.61'de olduğu gibi, saf biyodizel, biyodizel-dizel yakıtı karışımları ve saf dizel yakıtının viskozite değerlerinin sıcaklık arttıkça eksponansiyel olarak azaldığı görülmüştür. Burada da, düşük sıcaklıklarda saf biyodizel ve saf dizel yakıtının dinamik viskoziteleri arasındaki farkın daha fazla iken, artan sıcaklıkla birlikte eğrilerin birbirlerine eksponansiyel olarak yaklaştığı görülmüştür. Söz konusu dinamik viskozite değerlerine,

$$\mu = \mu(T) = y_0 + ae^{-bT} \quad (3.10)$$

şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

Şekil 3.74'te sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklığa göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, yoğunluk değerlerinin beklendiği gibi sıcaklık arttıkça azaldığı görülmüştür. Şekil 3.62'de olduğu gibi, yoğunluk değerlerinin artan sıcaklıkla birlikte azaldığı, ölçüm yapılan sıcaklık aralığında yoğunluk değerlerinin sıcaklık arttıkça doğrusala yakın olmakla birlikte ikinci

dereceden bir değişim gösterdiği belirlenmiştir. Bu nedenle söz konusu yoğunluk değerlerine,

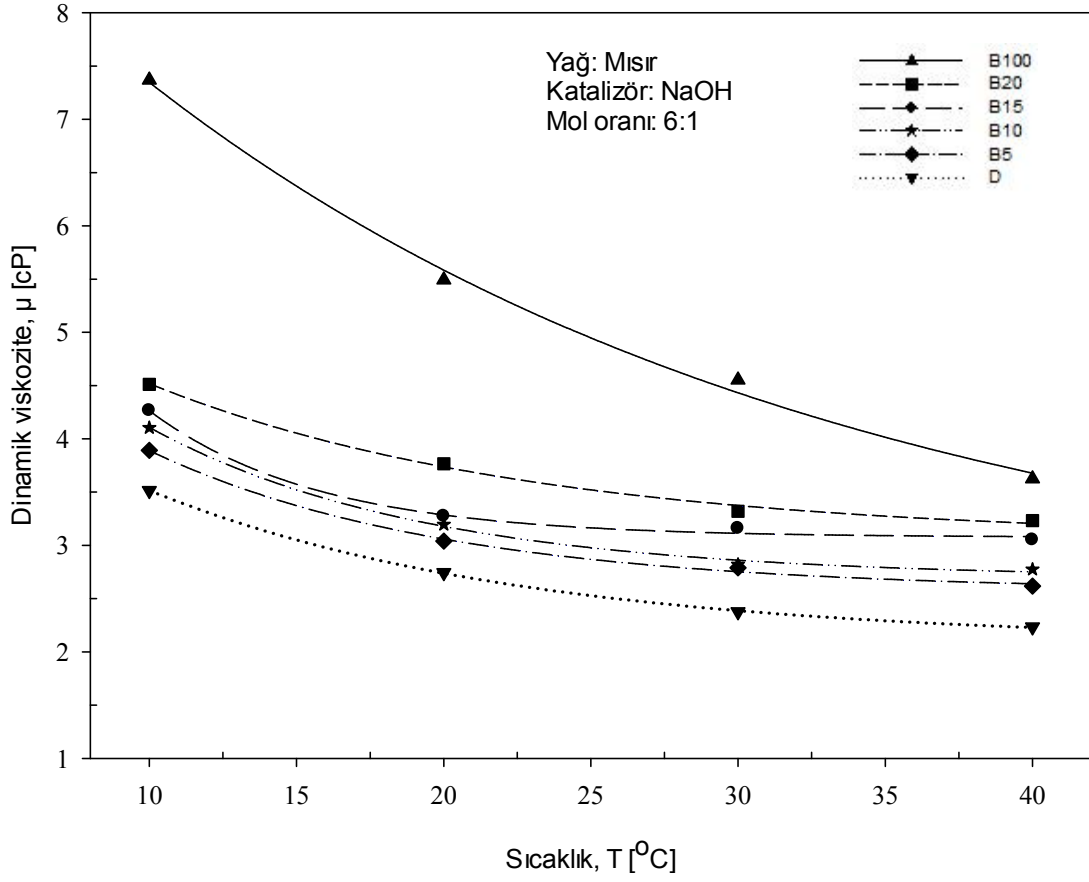
$$\rho = \rho(T) = y_0 + aT + bT^2 \quad (3.11)$$

şeklindeki bir-boyutlu parabolik bir fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

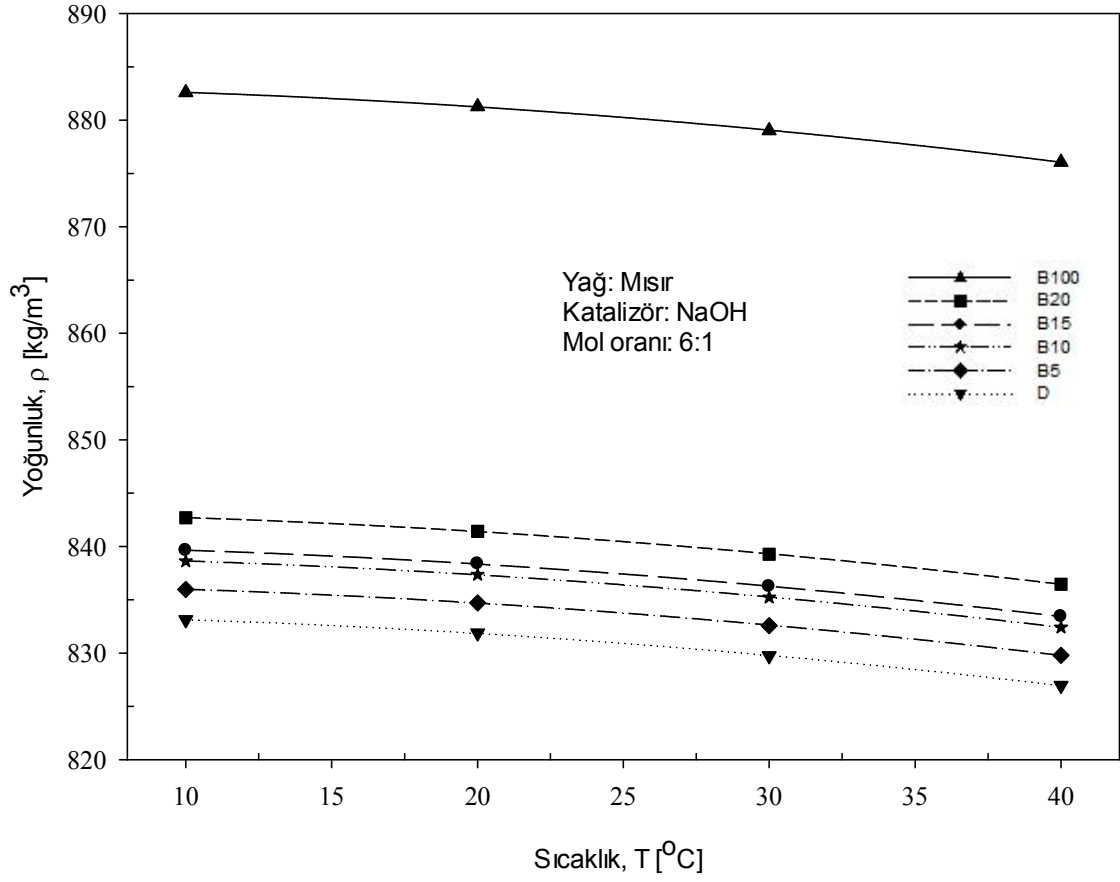
Şekil 3.75'te sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, yoğunluk değerlerinin sıcaklık ile değişimlerinin (Şekil 3.74) doğrusala yakın karakterde ve yatay eğilimli olması nedeniyle dinamik viskozite değerlerinin sabit yoğunluk değerlerine bölünüyormuş gibi bir etki yaratması sonucu, kinematik viskozitelerin sıcaklıkla değişimleri de dinamik viskozitelerin sıcaklık ile değişimlerine (Şekil 3.73) oldukça benzer karakterde olduğu görülebilir. Diğer bir ifade ile Şekil 3.63'de olduğu gibi, kinematik viskozitelerin de artan sıcaklıkla birlikte eksponansiyel olarak azaldığı belirlenmiştir. Söz konusu kinematik viskozite değerlerine,

$$v = v(T) = y_0 + ae^{-bT} \quad (3.12)$$

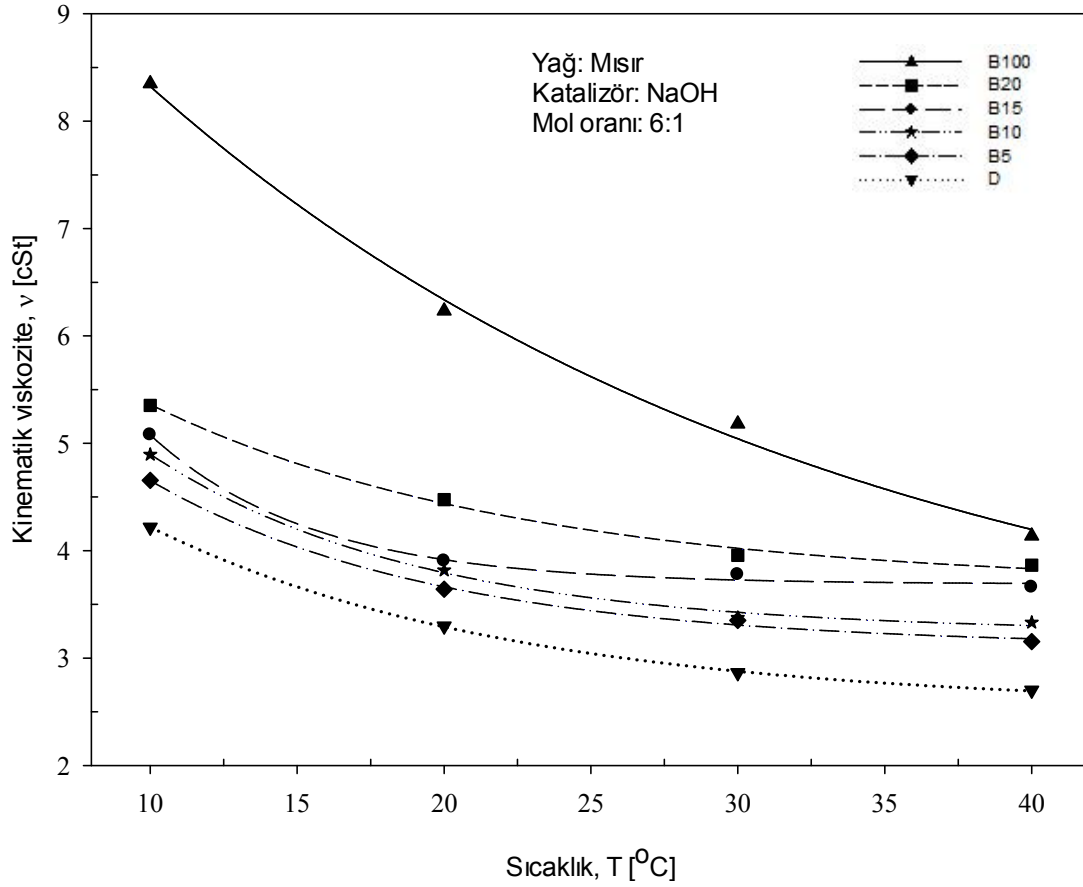
şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ) ve ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.



Şekil 3.73. Sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri



Şekil 3.74. Sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklığa göre değişimleri



Şekil 3.75. Sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri

#### 3.4.1.2.2. Karışımdaki Hacimsel Biyodizel Oranına Göre Değişimler

Söz konusu biyodizel-dizel yakıtı karışımları için dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.76, 3.77 ve 3.78’de verilmektedir.

Şekil 3.76’da sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için dinamik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri verilmiştir. Burada karışımdaki biyodizel oranının sıfır olması saf dizel yakıtına, 100 olması da saf biyodizele karşılık gelmektedir. Söz konusu şekil incelendiğinde, Şekil 3.64’te olduğu gibi, biyodizelin dinamik viskozitesinin dizel yakıtinkine göre yüksek olması nedeniyle karışımdaki hacimsel biyodizel oranı arttıkça biyodizel-dizel yakıtı

karışımlarının viskozite değerlerinin arttığı görülmüştür. Viskozitelerin artan biyodizel oranı ile birlikte eksponansiyel olarak azalarak arttığı belirlenmiştir. Sıcaklık azaldıkça karışımdaki hacimsel biyodizel oranının artışı ile dinamik viskozitelerdeki değişimin doğrusal niteliğe yaklaştığı görülmüştür. Ayrıca, 30 ve 40°C sıcaklıklarda %0, 5, 10 15 ve 20 hacimsel biyodizel oranlarındaki dinamik viskoziteler birbirlerine yakın değerler almıştır. Söz konusu dinamik viskozite değerlerine,

$$\mu = \mu(X) = y_0 + ae^{-bX} \quad (3.13)$$

şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

Şekil 3.77'de sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için yoğunluklarının karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri verilmiştir. Daha önceden bahsedildiği gibi, karışımdaki biyodizel oranının sıfır olması saf dizel yakıtına, 100 olması da saf biyodizele karşılık gelmektedir. Söz konusu şekil incelendiğinde, Şekil 3.65'te olduğu gibi, biyodizelin yoğunluğu dizel yakıtınıninkine göre yüksek olduğundan, karışımdaki hacimsel biyodizel oranı arttıkça biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluk değerlerinin beklendiği gibi doğrusal olarak arttığı görülmüştür. Ayrıca, belirli bir karışım oranı için sıcaklık azaldıkça yoğunluk değerleri birbirlerine yaklaşmaktadır. Söz konusu yoğunluk değerlerine,

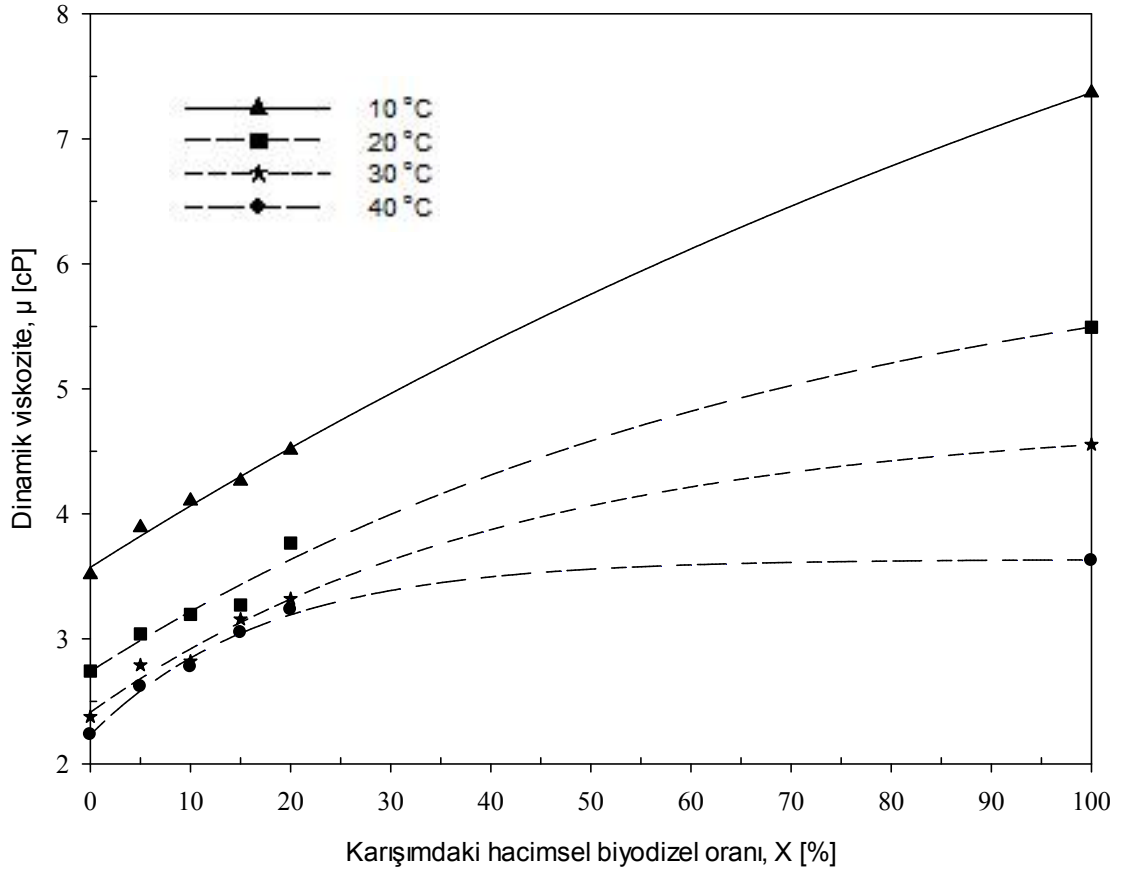
$$\rho = \rho(X) = y_0 + aX \quad (3.14)$$

şeklindeki bir-boyutlu doğrusal fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$  ve  $a$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

Şekil 3.78’de sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için kinematik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri verilmiştir. Burada karışımdaki biyodizel oranının sıfır olması saf dizel yakıtına, 100 olması da saf biyodizele karşılık gelmektedir. Söz konusu şekil incelendiğinde, yoğunluk değerlerinin karışım oranı ile değişimlerinin (Şekil 3.77) doğrusal olmasıyla birlikte eğimlerinin çok küçük olması nedeniyle dinamik viskozite değerlerinin sabit yoğunluk değerlerine bölünmüş gibi bir etki yaratması sonucu kinematik viskozitelerin karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ile değişimleri de dinamik viskozitenin karışımdaki hacimsel biyodizel oranı (Şekil 3.76) ile değişimlerine oldukça benzer karakterde elde edilmiştir. Diğer bir ifade ile Şekil 3.66’da olduğu gibi, kinematik viskozitelerin de artan biyodizel oranı ile eksponansiyel olarak azalarak arttığı belirlenmiştir. Yine burada da sıcaklık azaldıkça karışımdaki hacimsel biyodizel oranının artışı ile kinematik viskozitelerdeki değişimin doğrusal niteliğe yaklaştığı görülmüştür. Şekil 3.76’da olduğu gibi, 30 ve 40 °C sıcaklıklarda %0, 5, 10 15 ve 20 hacimsel biyodizel oranlarındaki kinematik viskoziteler birbirlerine yakın değerler almıştır. Söz konusu kinematik viskozite değerlerine,

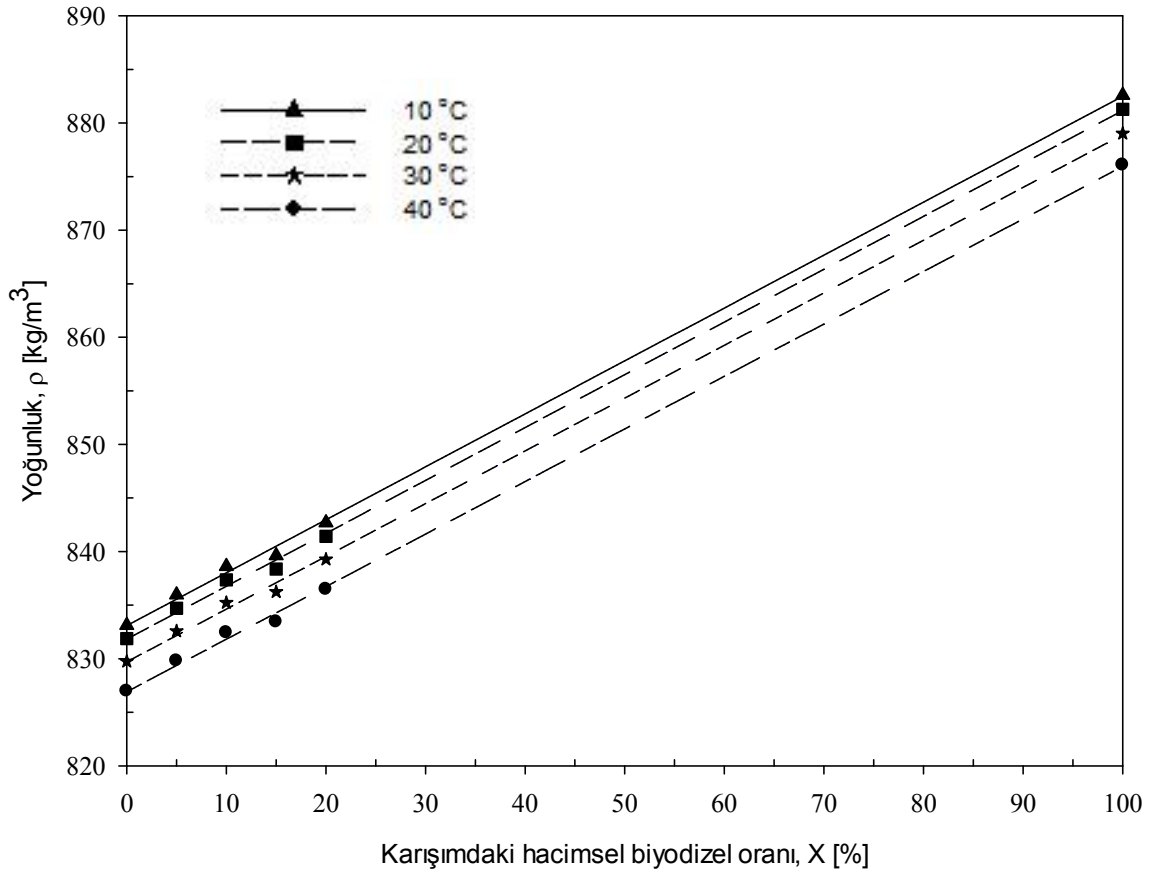
$$v = v(X) = y_0 + ae^{-bX} \quad (3.15)$$

şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

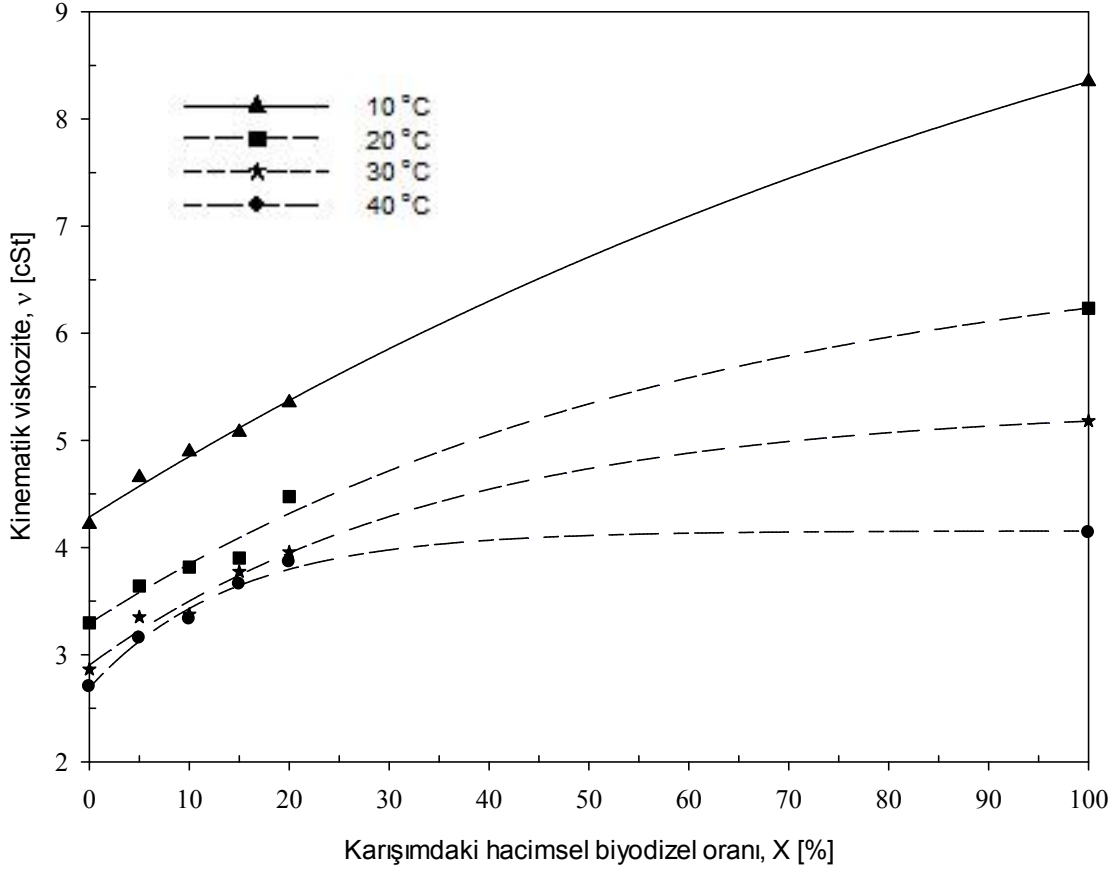


Şekil 3.76. Sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için dinamik viskozitelerinin karışımdeki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri





Şekil 3.77. Sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için yoğunluklarının karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.78. Sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için kinematik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri

#### 3.4.1.2.3. Karışımdaki Hacimsel Biyodizel Oranı ve Sıcaklığa Göre Değişimler

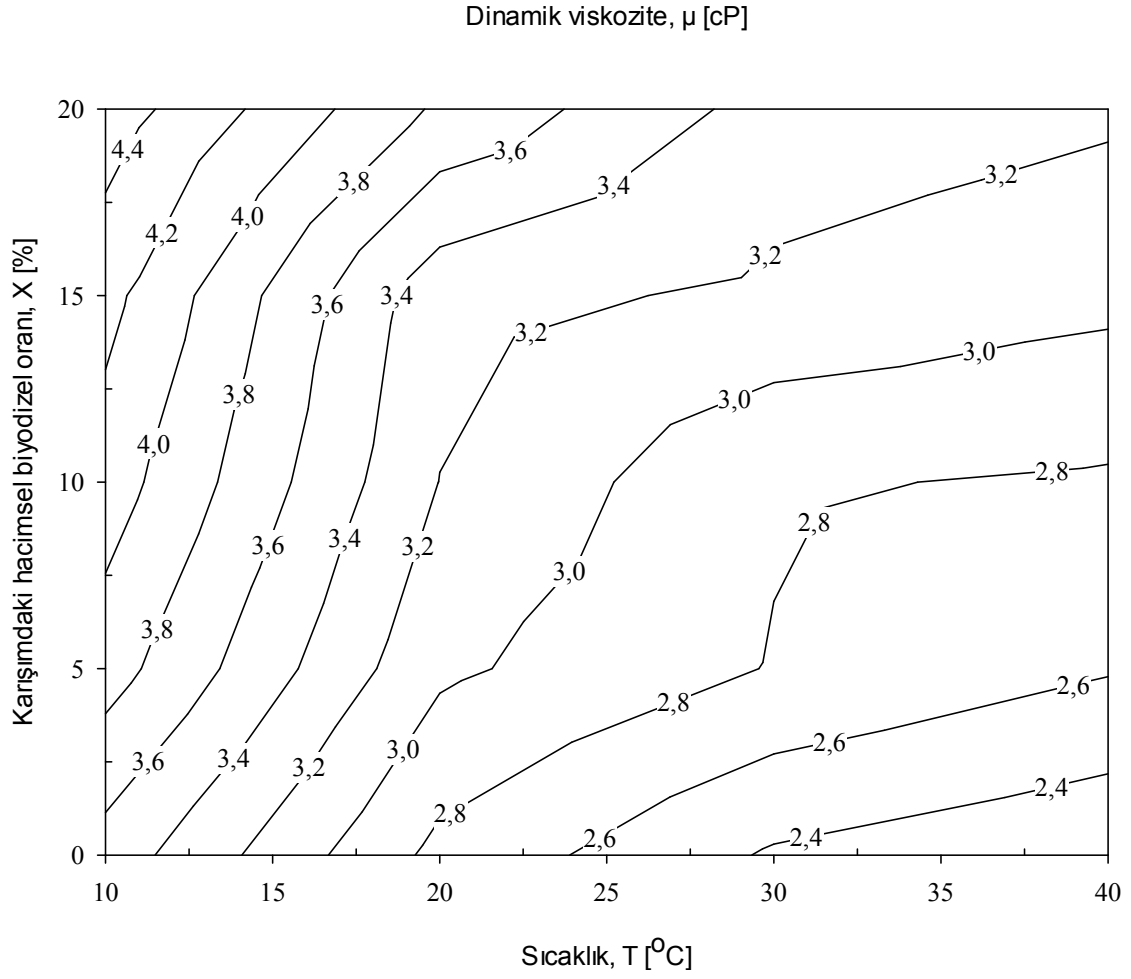
Şekil 3.79’da, ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri iki-boyutlu eş-viskozite eğrileri şeklinde verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, Şekil 3.67’de olduğu gibi, farklı karakterdeki iki ayrı bölge görülebilir. Birinci bölge olarak adlandırılan yüksek sıcaklık ve düşük biyodizel oranı bölgesinde eş-viskozite eğrileri daha seyrek ve yataya yakın iken; ikinci bölge olarak adlandırılan düşük sıcaklık ve yüksek biyodizel oranı bölgesinde eğriler daha sık ve dikeye yakın karakterdedir. Buna göre, birinci bölgede sıcaklıktaki büyük bir değişime karşılık viskozitede küçük bir değişim

görülürken, ikinci bölgede tam tersine sıcaklıktaki küçük bir değişime karşılık viskozitede daha büyük değişim gözlemlenmektedir.

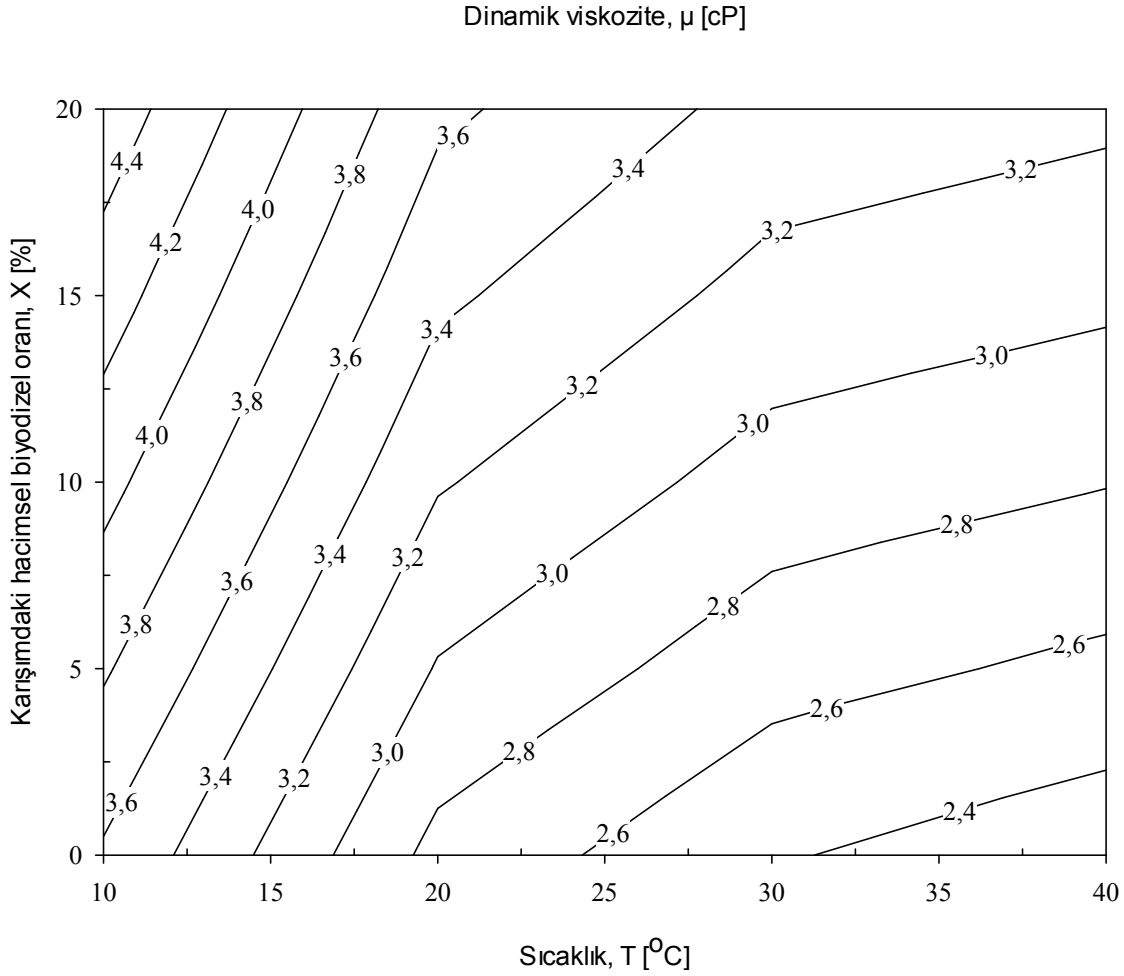
Şekil 3.80’de, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin ölçüm değerlerine uyumlanan iki-boyutlu  $\mu = \mu(T, X)$  fonksiyonundan elde edilen değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimlerine ilişkin eş-viskozite eğrileri verilmektedir. Hatırlanacağı üzere karışımdaki hacimsel biyodizel oranı olarak %0, 5, 10, 15, 20 ve 100 değerleri parametre olarak seçilmişti. Eğri uyumları % 20 ile % 100 arasındaki ölçüm yapılmamış geniş bölgenin hassasiyeti azaltmaması için söz konusu eğriler sadece sık ölçüm yapılan % 0-20 değerlerini kapsayacak şekilde çizilmiştir. Sıcaklıklar için ise yine ölçüm yapılmış olan 10-40°C aralığı dikkate alınmıştır. Deneysel veriler incelendiğinde, Şekil 3.68’de olduğu gibi, saf biyodizel ve dizel yakıtı ile biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranıyla değişimine,

$$\mu = \mu(T, X) = a + bT + cX + dT^2 + eTX + fX^2 + gT^3 + hT^2X + kTX^2 \quad (3.16)$$

şeklinde X [%] karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre 2. dereceden, T [°C] sıcaklığına ise 3. dereceden bağımlı iki-boyutlu fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada a, b, ..., k sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir. Söz konusu eşitlikten elde edilen dinamik viskozite değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimi grafiği incelendiğinde, farklı karakterdeki iki ayrı bölge görülebilir. Birinci bölge olarak adlandırılan yüksek sıcaklık ve düşük biyodizel oranı bölgesinde eş-viskozite eğrileri daha seyrek ve yataya yakın iken; ikinci bölge olarak adlandırılan düşük sıcaklık ve yüksek biyodizel oranı bölgesinde eğriler daha sık ve dikeye yakın karakterdedir. Buna göre, birinci bölgede sıcaklıktaki büyük bir değişime karşılık viskozitede küçük bir değişim görülürken yani viskozite değişiminin sıcaklığa karşı hassasiyeti az iken, ikinci bölgede tam tersine sıcaklıktaki küçük bir değişime karşılık viskozitede daha büyük değişim gözlemlendiğinden viskozitenin sıcaklık değişimine karşı duyarlılığının daha fazla olduğu söylenebilir.



Şekil 3.79. Ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.80. Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri

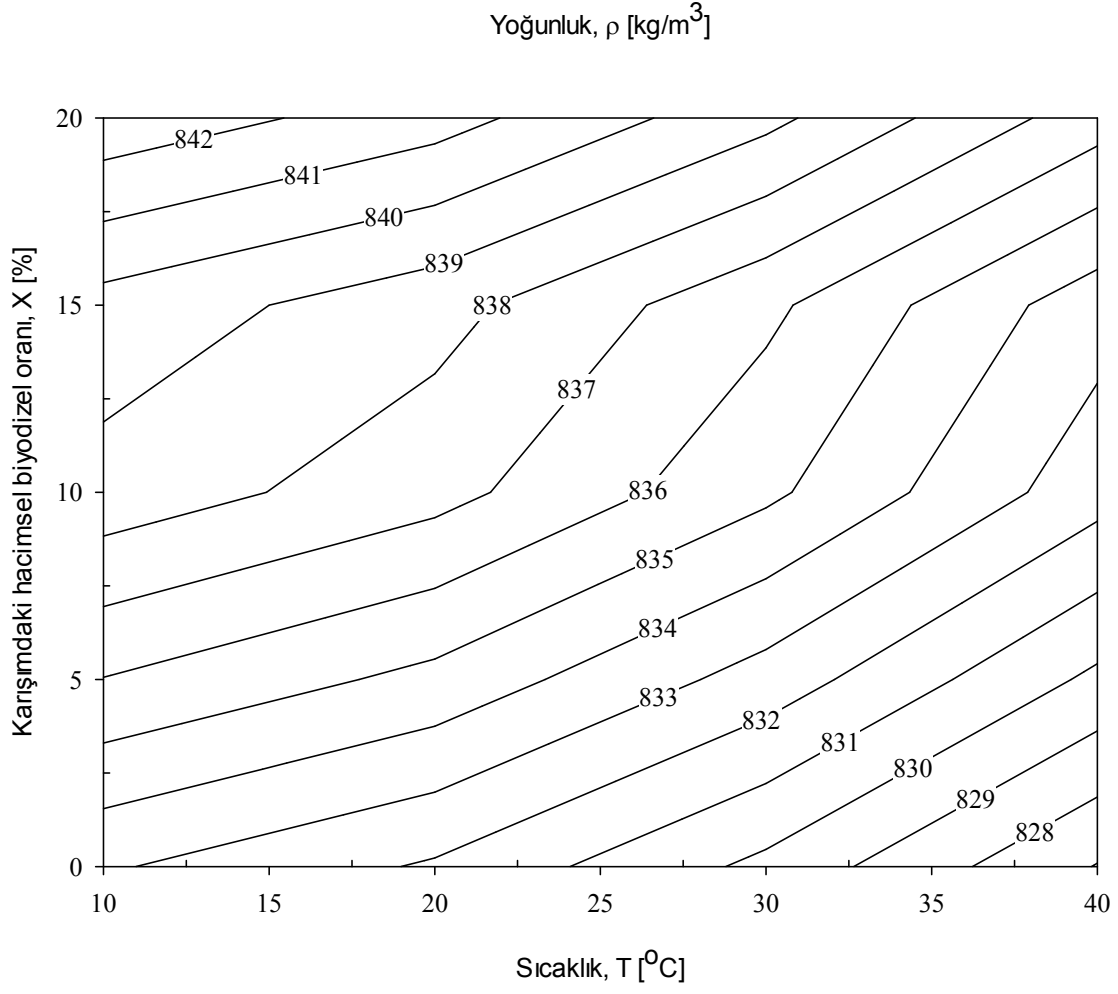
Şekil 3.81’de, ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluk değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri iki-boyutlu eş-yoğunluk eğrileri şeklinde verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, Şekil 3.69’da olduğu gibi, eş-yoğunluk eğrileri aralarındaki mesafeler yaklaşık olarak sabit olacak şekilde (sabit gradyana sahip), yoğunluğun karışımdaki biyodizel oranına göre değişiminin doğrusal, sıcaklığa göre değişiminin ise parabolik karakterde olduğu belirlenmiştir. Bu durum daha belirgin olarak Şekil 3.82’de görülmektedir.

Şekil 3.82’de, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluk değerlerinin ölçüm değerlerine uyumlanan iki-boyutlu  $\rho = \rho(T, X)$  fonksiyonundan elde edilen

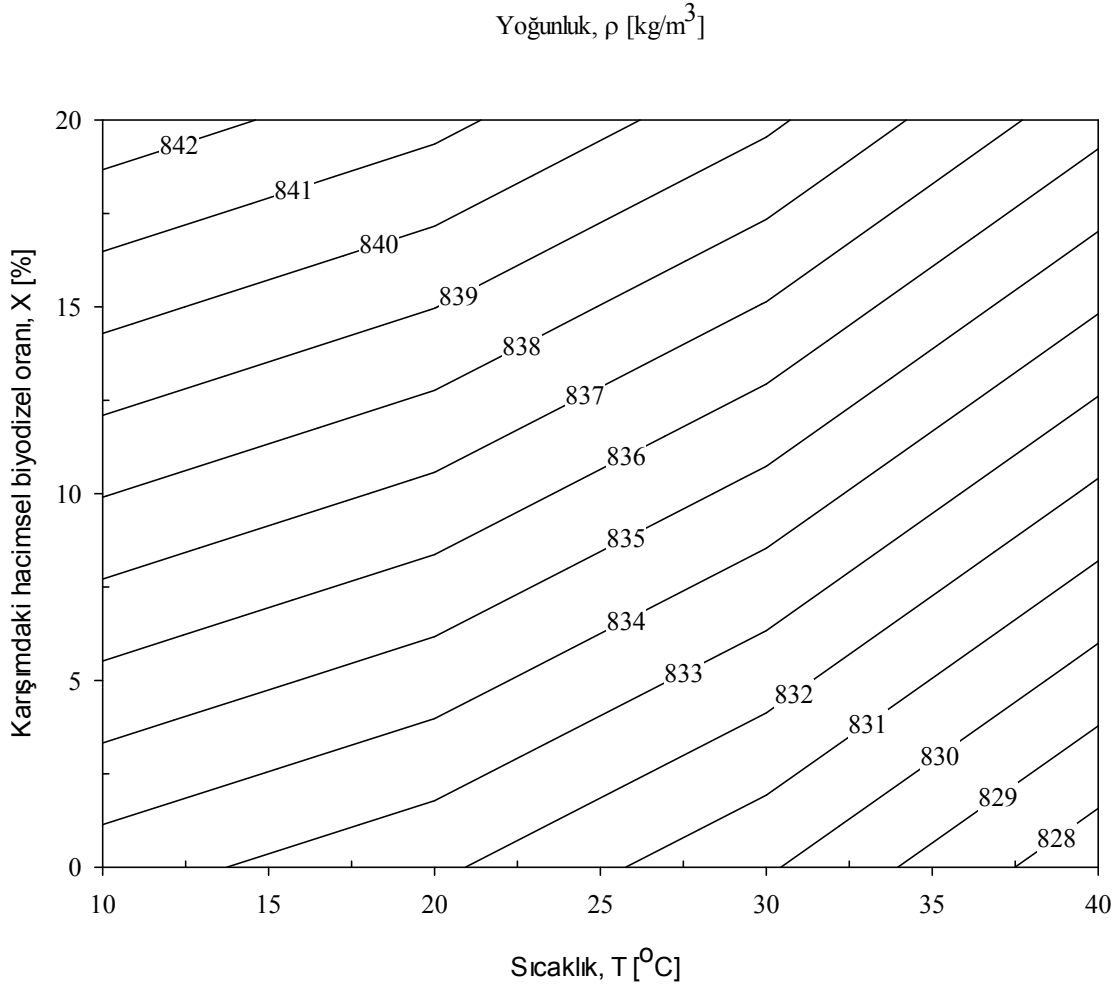
değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimlerine ilişkin eş-yoğunluk eğrileri verilmektedir. Daha önceden de belirtildiği gibi karışımdaki hacimsel biyodizel oranı olarak %0, 5, 10, 15, 20 ve 100 değerleri parametre olarak seçilmişti. Eğri uyumlarken % 20 ile % 100 arasındaki ölçüm yapılmamış geniş bölgenin hassasiyeti azaltmaması için söz konusu eğriler sadece sık ölçüm yapılan % 0-20 değerlerini kapsayacak şekilde çizilmiştir. Yoğunluk değerlerinin sıcaklığa göre değişiminin (Şekil 3.74) parabolik, karışımdaki biyodizel oranına göre değişiminin ise doğrusal (Şekil 3.77) olduğu belirtilmişti. Buna göre, Şekil 3.70'te olduğu gibi, sabit eş-yoğunluk eğrisi için, karışımın sıcaklığı arttıkça karışımdaki biyodizel oranı parabolik olarak artmaktadır. Ayrıca, sabit bir sıcaklıkta yoğunluğu bir birim değiştirmek için karışımdaki biyodizel oranının yaklaşık sabit bir değerde değiştirilmesi gerekirken, sabit bir karışım oranında yoğunluğu bir birim değiştirmek için düşük sıcaklıklarda daha fazla sıcaklık değişimi, yüksek sıcaklıklarda ise daha az sıcaklık değişimi gerekmektedir. Deney sonuçları incelendiğinde, yoğunlukların sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranıyla değişimine,

$$\rho = \rho(T, X) = a + bT + cX + dT^2 + eTX \quad (3.17)$$

şeklinde X [%] karışımdaki hacimsel biyodizel oranına 1. dereceden ve T [°C] sıcaklığına 2. dereceden bağımlı iki-boyutlu fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada a, b, c, d ve e sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.



Şekil 3.81. Ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımdeki biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.82. Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımındaki biyodizel oranına göre değişimleri

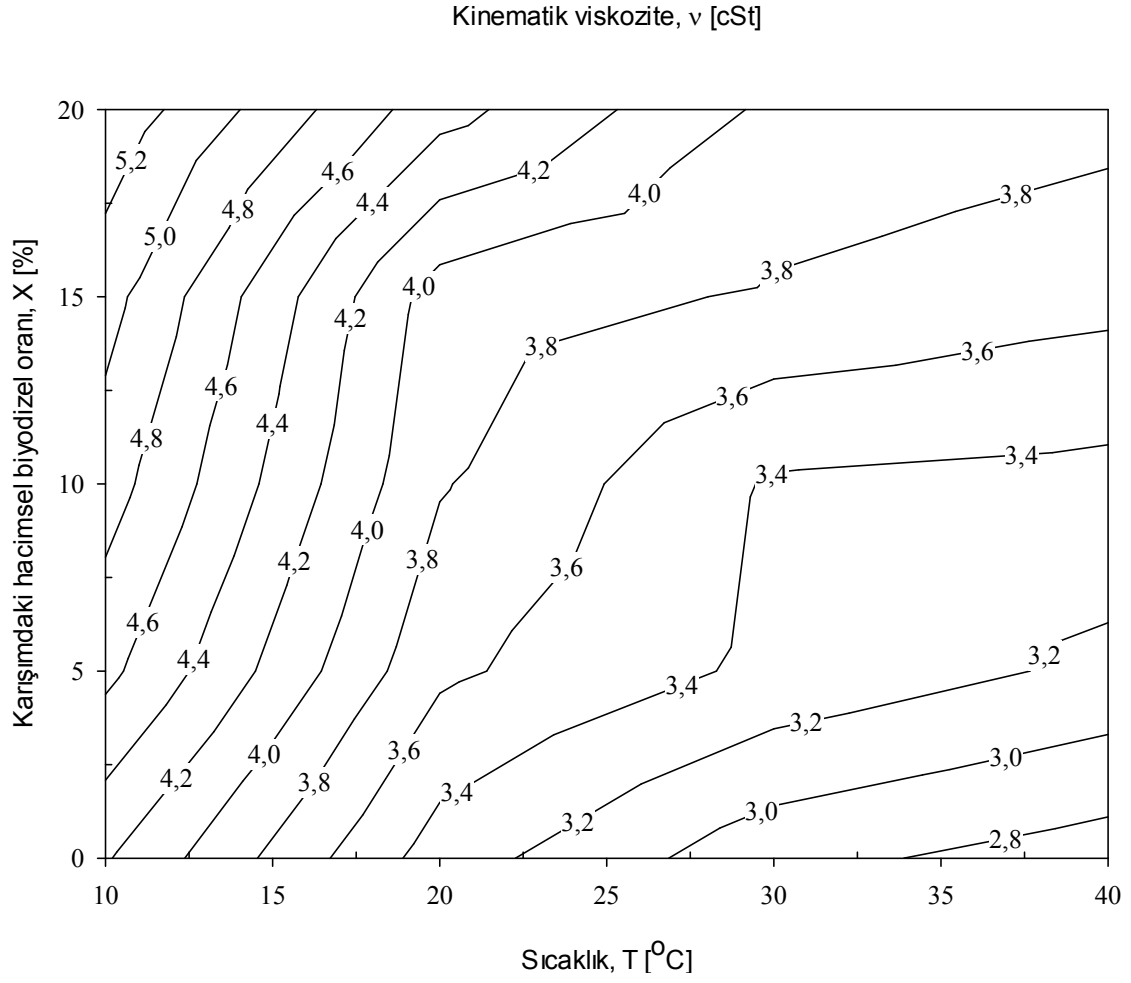
Şekil 3.83'te, ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımındaki biyodizel oranına göre değişimleri iki-boyutlu eş-viskozite eğrileri şeklinde verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, Şekil 3.71'de olduğu gibi, yoğunluk değerlerinin karışımındaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimlerinin doğrusal, sıcaklığa göre değişimlerinin ise doğrusala yakın olması nedeniyle dinamik viskozite değerlerinin sabit yoğunluk değerlerine bölünüyormuş gibi bir etki yaratması sonucu, kinematik viskozitelerin sıcaklık ve karışımındaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri de dinamik viskozitelerin değişimlerine (Şekil 3.79) oldukça benzer karakterde olduğu görülebilir.



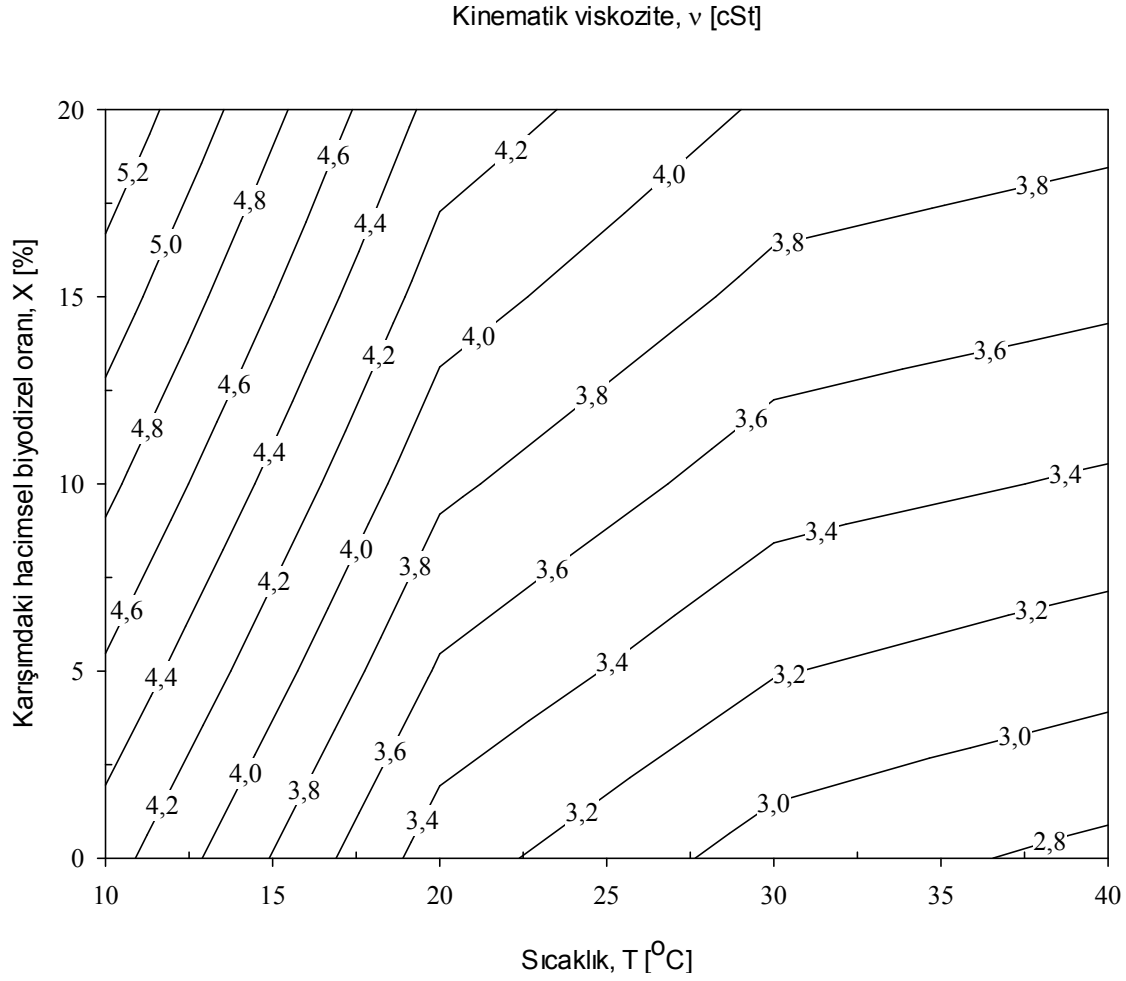
Şekil 3.84'te, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin ölçüm değerlerine uyumlanan iki-boyutlu  $v = v(T, X)$  fonksiyonundan elde edilen değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimlerine ilişkin eş-viskozite eğrileri verilmektedir. Daha önceden bahsedildiği gibi karışımdaki hacimsel biyodizel oranı olarak %0, 5, 10, 15, 20 ve 100 değerleri parametre olarak seçilmişti. Eğri uyumlarken % 20 ile % 100 arasındaki ölçüm yapılmamış geniş bölgenin hassasiyeti azaltmaması için söz konusu eğriler sadece sık ölçüm yapılan % 0-20 değerlerini kapsayacak şekilde çizilmiştir. Deneysel veriler incelendiğinde, saf biyodizel ve dizel yakıtı ile biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranıyla değişimine,

$$v = v(T, X) = a + bT + cX + dT^2 + eTX + fX^2 + gT^3 + hT^2X + kTX^2 \quad (3.18)$$

şeklinde X [%] karışımdaki hacimsel biyodizel oranına 2. dereceden, T [°C] sıcaklığına ise 3. dereceden bağımlı iki-boyutlu fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada a, b, ..., k sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin belirlenen değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, Şekil 3.80'de dinamik viskozitelerin sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimini gösteren şekilde olduğu gibi, söz konusu şekilde de farklı karakterdeki iki ayrı bölge görülebilir. Birinci bölge olarak adlandırılan yüksek sıcaklık ve düşük biyodizel oranı bölgesinde eş-viskozite eğrileri daha seyrek ve yataya yakın iken; ikinci bölge olarak adlandırılan düşük sıcaklık ve yüksek biyodizel oranı bölgesinde eğriler daha sık ve dikeye yakın karakterdedir. Buna göre, birinci bölgede sıcaklıktaki büyük bir değişime karşılık viskozitede küçük bir değişim görülürken yani viskozite değişiminin sıcaklığa karşı hassasiyeti az iken, ikinci bölgede tam tersine sıcaklıktaki küçük bir değişime karşılık viskozitede daha büyük değişim gözlemlendiğinden viskozitenin sıcaklık değişimine karşı duyarlılığının daha fazla olduğu söylenebilir.



Şekil 3.83. Ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımındaki biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.84. Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri

### 3.4.2. Potasyum Hidroksit Kullanılarak Üretilen Mısır Yağı Biyodizeli-Dizel Yakıtı Karışımları

#### 3.4.2.1. En Düşük Viskoziteye Sahip Biyodizel İçin Değişimler

Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelleri içerisinde en düşük viskoziteye sahip biyodizel ile dizel yakıtı hacimsel olarak belirli oranlarda (%5, 10, 15, 20) karıştırılarak elde edilen yakıt karışımlarının çeşitli sıcaklıklardaki (10, 20, 30, 40°C) dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerleri belirlenmiştir. Söz konusu biyodizelin üretim parametreleri aşağıdaki gibidir:

Yağ: Mısır yağı

Katalizör türü: KOH

Katalizör oranı: %1,10

Reaksiyon sıcaklığı: 60°C

Reaksiyon süresi: 60 dakika

Kullanılan alkol/yağ mol oranı: 9:1

### 3.4.2.1.1. Sıcaklığa Göre Değişimler

Söz konusu biyodizel-dizel yakıtı karışımları için dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin sıcaklığa göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.85, 3.86 ve 3.87’de verilmektedir.

Şekil 3.85’te potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, burada da diğer dinamik viskozite-sıcaklık değişimi şekillerinde olduğu gibi, saf biyodizel, biyodizel-dizel yakıtı karışımları ve saf dizel yakıtının viskozite değerlerinin sıcaklık arttıkça eksponansiyel olarak azaldığı görülmüştür. Düşük sıcaklıklarda saf biyodizel ve saf dizel yakıtının dinamik viskoziteleri arasındaki fark daha fazla iken, artan sıcaklıkla birlikte eğriler birbirlerine eksponansiyel olarak yaklaşmaktadır. Söz konusu dinamik viskozite değerlerine,

$$\mu = \mu(T) = y_0 + ae^{-bT} \quad (3.19)$$

şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

Şekil 3.86’da potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklığa göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, burada da diğer yoğunluk-sıcaklık değişimi şekillerinde olduğu gibi,

yoğunluk değerlerinin sıcaklık arttıkça azaldığı, ölçüm yapılan sıcaklık aralığında yoğunluk değerlerinin sıcaklık arttıkça doğrusala yakın olmakla birlikte ikinci dereceden bir değişim gösterdiği belirlenmiştir. Bu nedenle söz konusu yoğunluk değerlerine,

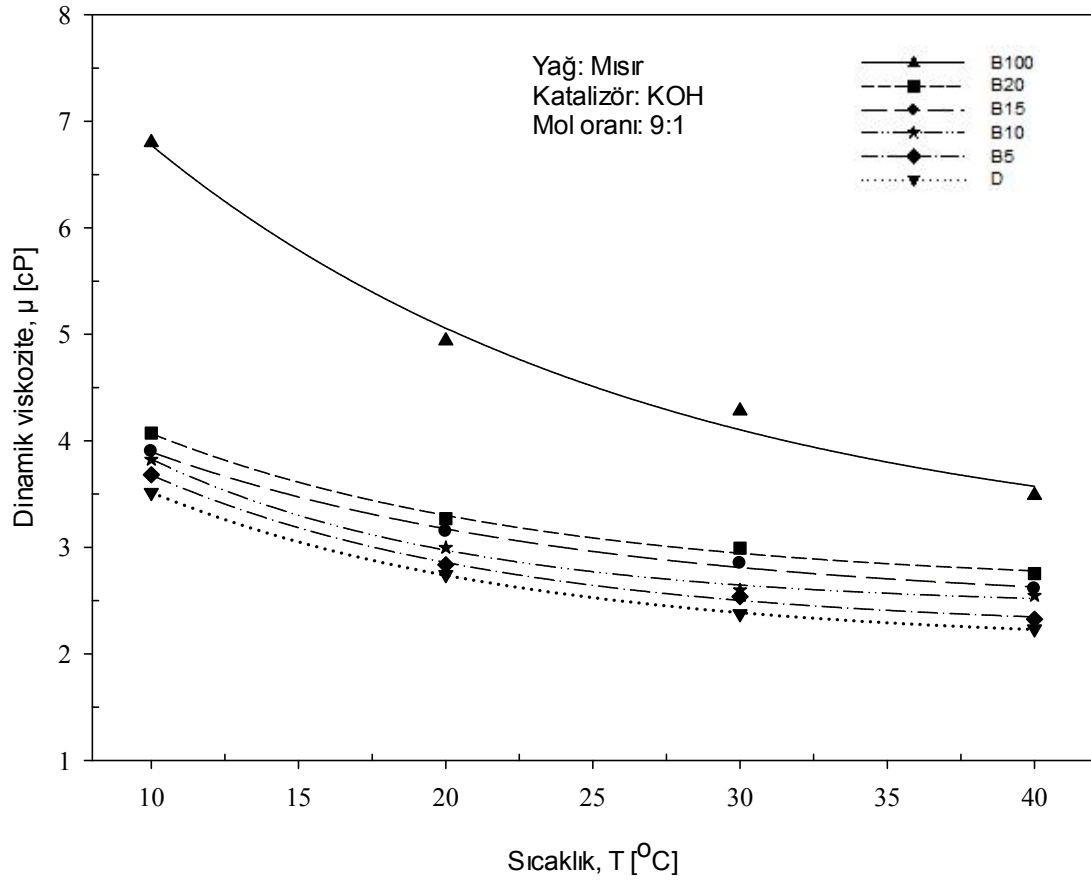
$$\rho = \rho(T) = y_0 + aT + bT^2 \quad (3.20)$$

şeklindeki bir-boyutlu parabolik bir fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

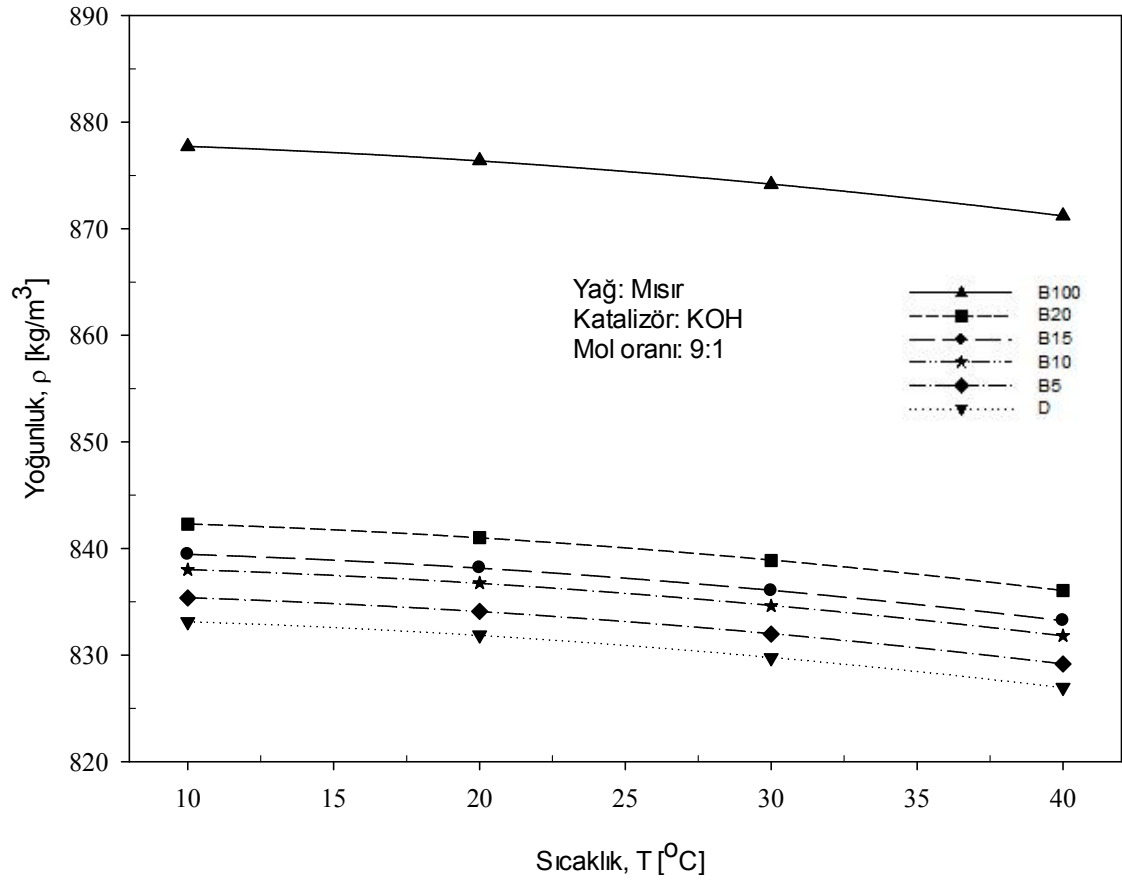
Şekil 3.87'de potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, burada da diğer kinematik viskozite-sıcaklık değişimi şekillerinde olduğu gibi, yoğunluk değerlerinin sıcaklık ile değişimlerinin doğrusala yakın karakterde ve yatay eğimli (Şekil 3.86) olması nedeniyle dinamik viskozite değerlerinin sabit yoğunluk değerlerine bölünüyormuş gibi bir etki yaratması sonucu, kinematik viskozitelerin sıcaklıkla değişimleri de dinamik viskozitelerin sıcaklık ile değişimlerine (Şekil 3.85) oldukça benzer karakterde olduğu görülebilir. Diğer bir ifade ile kinematik viskozitelerin de artan sıcaklıkla birlikte eksponansiyel olarak azaldığı belirlenmiştir. Söz konusu kinematik viskozite değerlerine,

$$v = v(T) = y_0 + ae^{-bT} \quad (3.21)$$

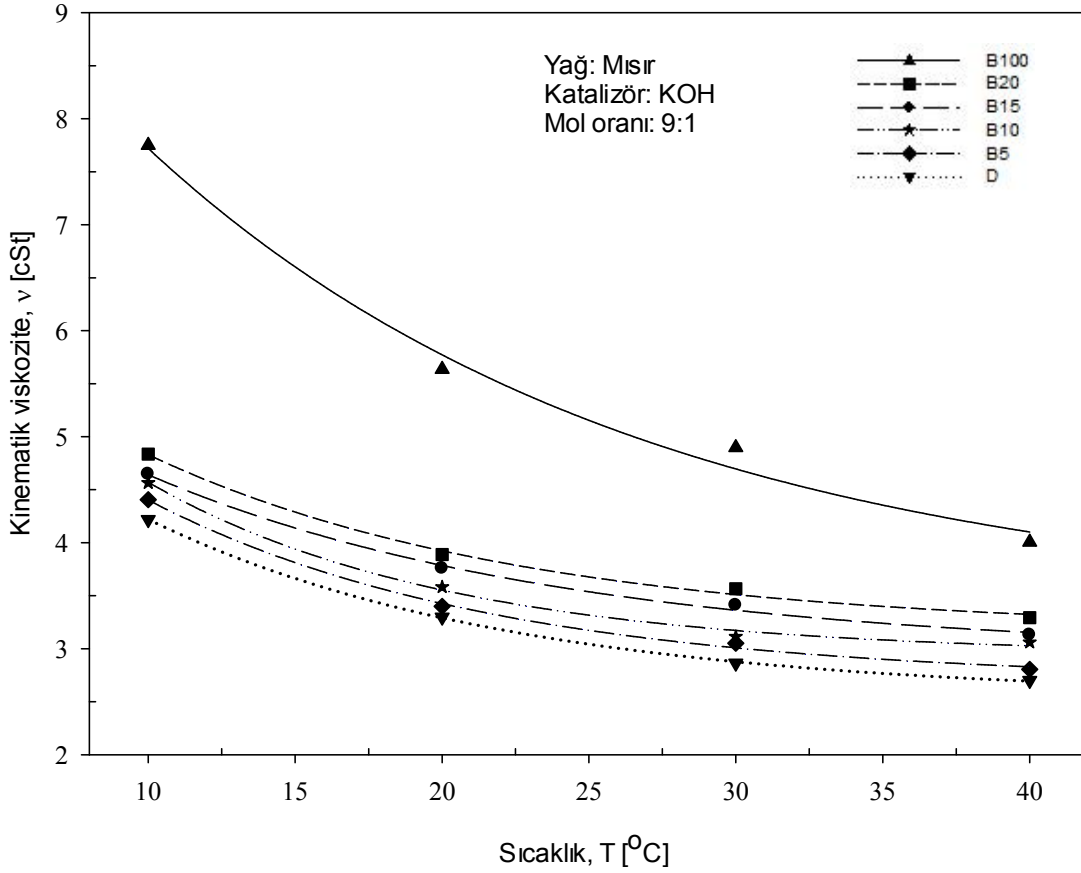
şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ) ve ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.



Şekil 3.85. Potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri



Şekil 3.86. Potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklığa göre değişimleri



Şekil 3.87. Potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri

#### 3.4.2.1.2. Karışımdaki Hacimsel Biyodizel Oranına Göre Değişimler

Söz konusu biyodizel-dizel yakıtı karışımları için dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.88, 3.89 ve 3.90'da verilmektedir.

Şekil 3.88'de potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için dinamik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri verilmiştir. Daha önceden bahsedildiği gibi karışımdaki biyodizel oranının sıfır olması saf dizel yakıtına, 100 olması da saf biyodizele karşılık gelmektedir. Söz konusu şekil incelendiğinde, burada da diğer dinamik viskozite-karışımdaki hacimsel biyodizel oranı değişimi şekillerinde olduğu gibi, biyodizelin dinamik viskozitesinin dizel yakıtinkine göre



yüksek olması nedeniyle karışımdaki hacimsel biyodizel oranı arttıkça biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının viskozite değerlerinin arttığı görülmüştür. Viskozitelerin artan biyodizel oranı ile birlikte eksponansiyel olarak azalarak arttığı belirlenmiştir. Sıcaklık azaldıkça karışımdaki hacimsel biyodizel oranının artışı ile dinamik viskozitelerdeki değişimin doğrusal niteliğe yaklaştığı görülmüştür. Söz konusu dinamik viskozite değerlerine,

$$\mu = \mu(X) = y_0 + ae^{-bX} \quad (3.22)$$

şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

Şekil 3.89'da potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için yoğunluklarının karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri verilmiştir. Daha önceden bahsedildiği gibi karışımdaki biyodizel oranının sıfır olması saf dizel yakıtına, 100 olması da saf biyodizele karşılık gelmektedir. Söz konusu şekil incelendiğinde, burada da diğer yoğunluk-karışımdaki hacimsel biyodizel oranı değişimi şekillerinde olduğu gibi, biyodizelin yoğunluğu dizel yakıtınıninkine göre yüksek olduğundan, karışımdaki hacimsel biyodizel oranı arttıkça biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluk değerlerinin beklendiği gibi doğrusal olarak arttığı görülmüştür. Ayrıca, belirli bir karışım oranı için sıcaklık azaldıkça yoğunluk değerleri birbirlerine yaklaşmaktadır. Söz konusu yoğunluk değerlerine,

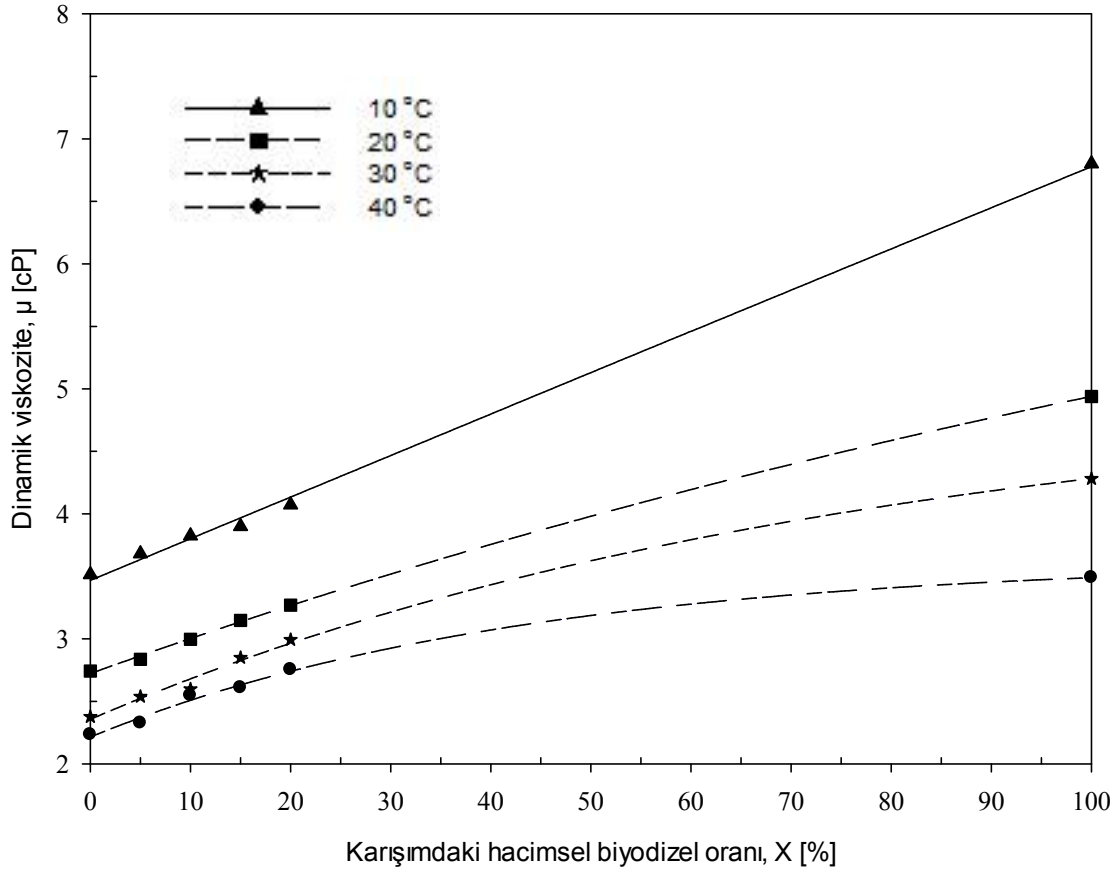
$$\rho = \rho(X) = y_0 + aX \quad (3.23)$$

şeklindeki bir-boyutlu doğrusal fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$  ve  $a$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

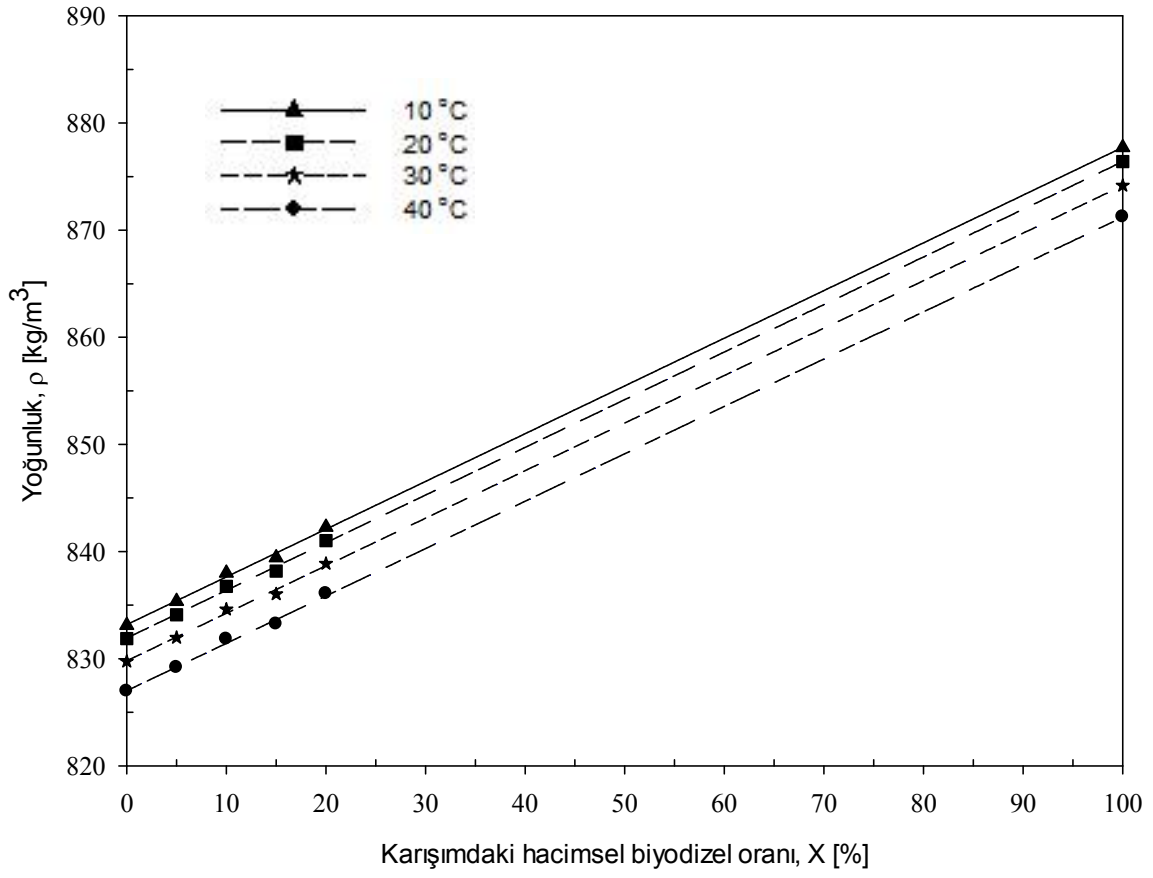
Şekil 3.90'da potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için kinematik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri verilmiştir. Burada da karışımdaki biyodizel oranının sıfır olması saf dizel yakıtına, 100 olması da saf biyodizele karşılık gelmektedir. Söz konusu şekil incelendiğinde, yoğunluk değerlerinin karışım oranı ile değişimlerinin (Şekil 3.89) doğrusal olmasıyla birlikte eğimlerinin çok küçük olması nedeniyle dinamik viskozite değerlerinin sabit yoğunluk değerlerine bölünmüş gibi bir etki yaratması sonucu kinematik viskozitelerin karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ile değişimleri de dinamik viskozitenin karışımdaki hacimsel biyodizel oranı (Şekil 3.88) ile değişimlerine oldukça benzer karakterde elde edilmiştir. Diğer bir ifade ile, burada da diğer kinematik viskozite-karışımdaki hacimsel biyodizel oranı değişimi şekillerinde olduğu gibi, kinematik viskozitelerin de artan biyodizel oranı ile eksponansiyel olarak azalarak arttığı belirlenmiştir. Ayrıca sıcaklık azaldıkça karışımdaki hacimsel biyodizel oranının artışı ile kinematik viskozitelerdeki değişimin doğrusal niteliğe yaklaştığı görülmüştür. Söz konusu kinematik viskozite değerlerine,

$$v = v(X) = y_0 + ae^{-bX} \quad (3.24)$$

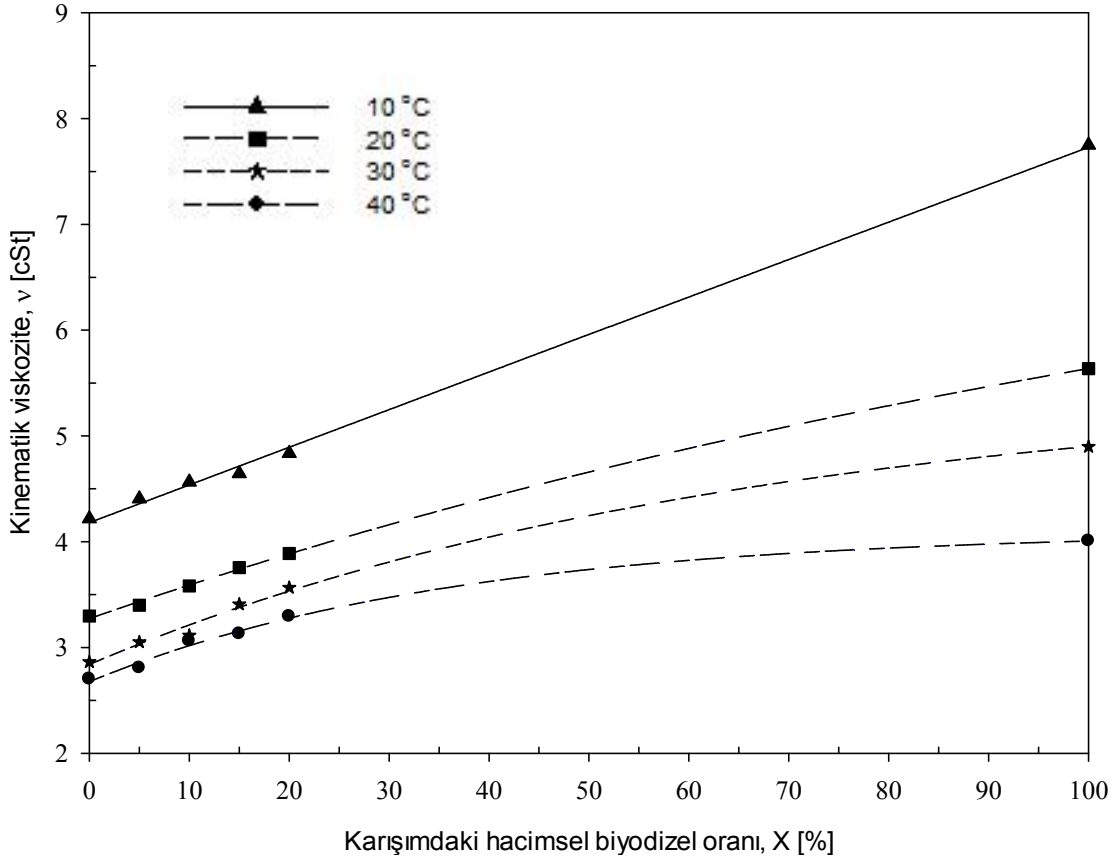
şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.



Şekil 3.88. Potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için dinamik viskozitelerinin karışımdeki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.89. Potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için yoğunluklarının karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.90. Potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için kinematik viskozitelerinin karışımındaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri

### 3.4.2.1.3. Karışımındaki Hacimsel Biyodizel Oranı ve Sıcaklığa Göre Değişimler

Şekil 3.91’de, ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımındaki biyodizel oranına göre değişimleri iki-boyutlu eş-viskozite eğrileri şeklinde verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, ölçülen değerlere göre dinamik viskozitelerin karışımındaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, farklı karakterdeki iki ayrı bölge görülebilir. Birinci bölge olarak adlandırılan yüksek sıcaklık ve düşük biyodizel oranı bölgesinde eş-viskozite eğrileri daha seyrek ve yataya yakın iken; ikinci bölge olarak adlandırılan düşük sıcaklık ve yüksek biyodizel oranı bölgesinde eğriler daha sık ve dikeye yakın karakterdedir. Buna göre, birinci bölgede sıcaklıktaki büyük bir değişime karşılık

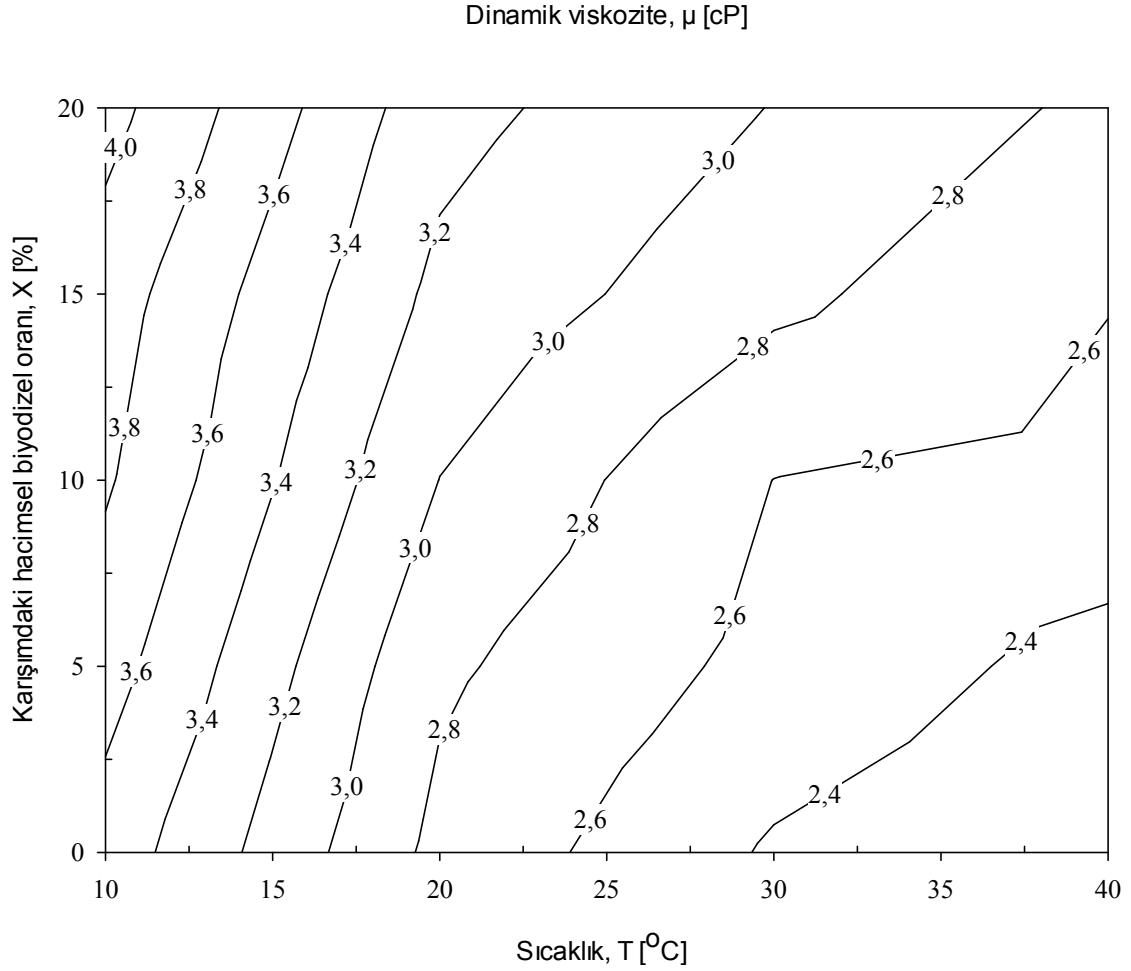
viskozitede küçük bir değişim görülürken, ikinci bölgede tam tersine sıcaklıktaki küçük bir değişime karşılık viskozitede daha büyük değişim gözlemlenmektedir.

Şekil 3.92’de, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin ölçüm değerlerine uyumlanan iki-boyutlu  $\mu = \mu(T, X)$  fonksiyonundan elde edilen değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimlerine ilişkin eş-viskozite eğrileri verilmektedir. Hatırlanacağı üzere karışımdaki hacimsel biyodizel oranı olarak %0, 5, 10, 15, 20 ve 100 değerleri parametre olarak seçilmişti. Eğri uyumlarken % 20 ile % 100 arasındaki ölçüm yapılmamış geniş bölgenin hassasiyeti azaltmaması için söz konusu eğriler sadece sık ölçüm yapılan % 0-20 değerlerini kapsayacak şekilde çizilmiştir. Sıcaklıklar için ise yine ölçüm yapılmış olan 10-40°C aralığı dikkate alınmıştır. Deneysel veriler incelendiğinde, saf biyodizel ve dizel yakıtı ile biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranıyla değişimine,

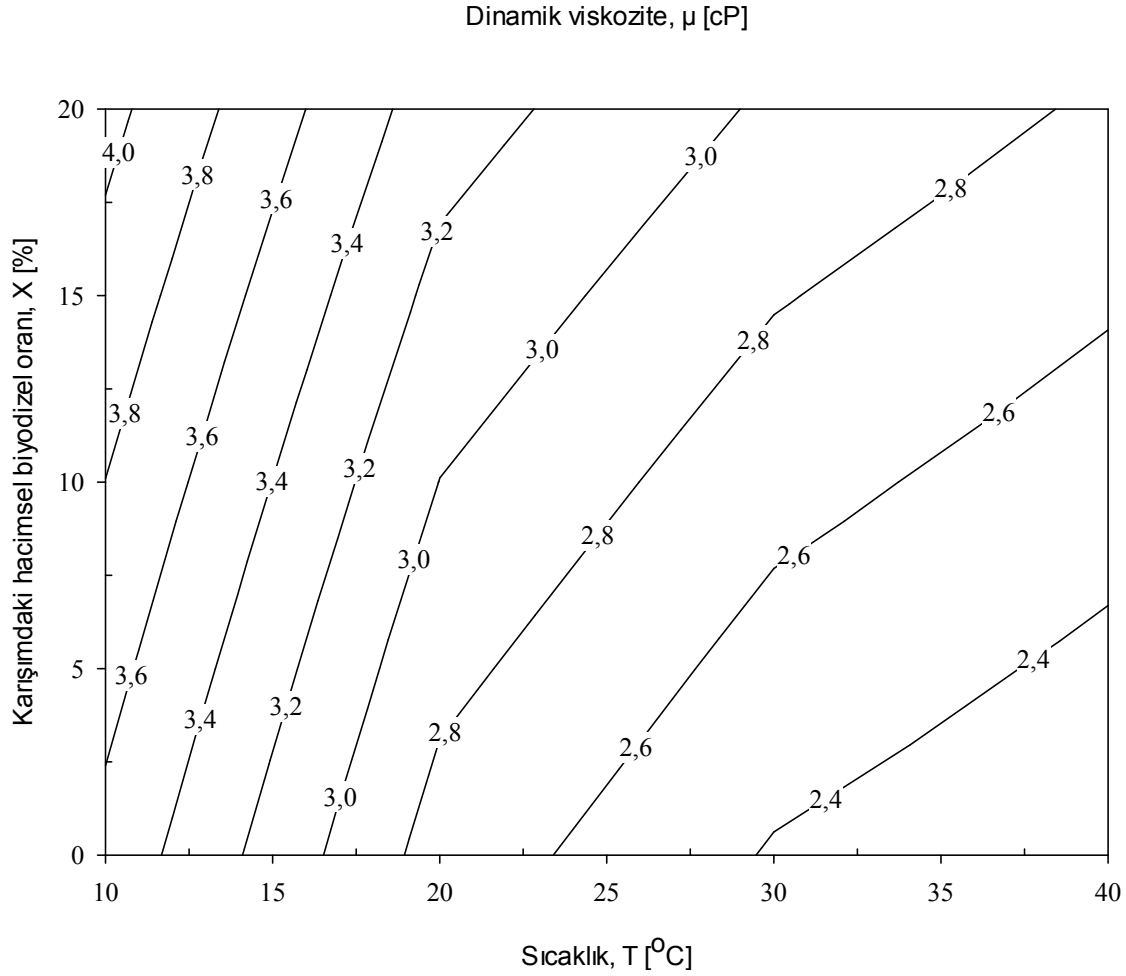
$$\mu = \mu(T, X) = a + bT + cX + dT^2 + eTX + fX^2 + gT^3 + hT^2X + kTX^2 \quad (3.25)$$

şeklinde X [%] karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre 2. dereceden, T [°C] sıcaklığına ise 3. dereceden bağımlı iki-boyutlu fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada a, b, ..., k sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir. Söz konusu eşitlikten elde edilen dinamik viskozite değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimi grafiği incelendiğinde, hesaplanan değerlere göre dinamik viskozitelerin karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, farklı karakterdeki iki ayrı bölge görülebilir. Birinci bölge olarak adlandırılan yüksek sıcaklık ve düşük biyodizel oranı bölgesinde eş-viskozite eğrileri daha seyrek ve yataya yakın iken; ikinci bölge olarak adlandırılan düşük sıcaklık ve yüksek biyodizel oranı bölgesinde eğriler daha sık ve dikeye yakın karakterdedir. Buna göre, birinci bölgede sıcaklıktaki büyük bir değişime karşılık viskozitede küçük bir değişim görülürken yani viskozite değişiminin sıcaklığa karşı hassasiyeti az iken, ikinci bölgede tam tersine sıcaklıktaki küçük bir değişime karşılık viskozitede daha büyük

değişim gözlemlendiğinden viskozitenin sıcaklık değişimine karşı duyarlılığının daha fazla olduğu söylenebilir.



Şekil 3.91. Ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.92. Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri

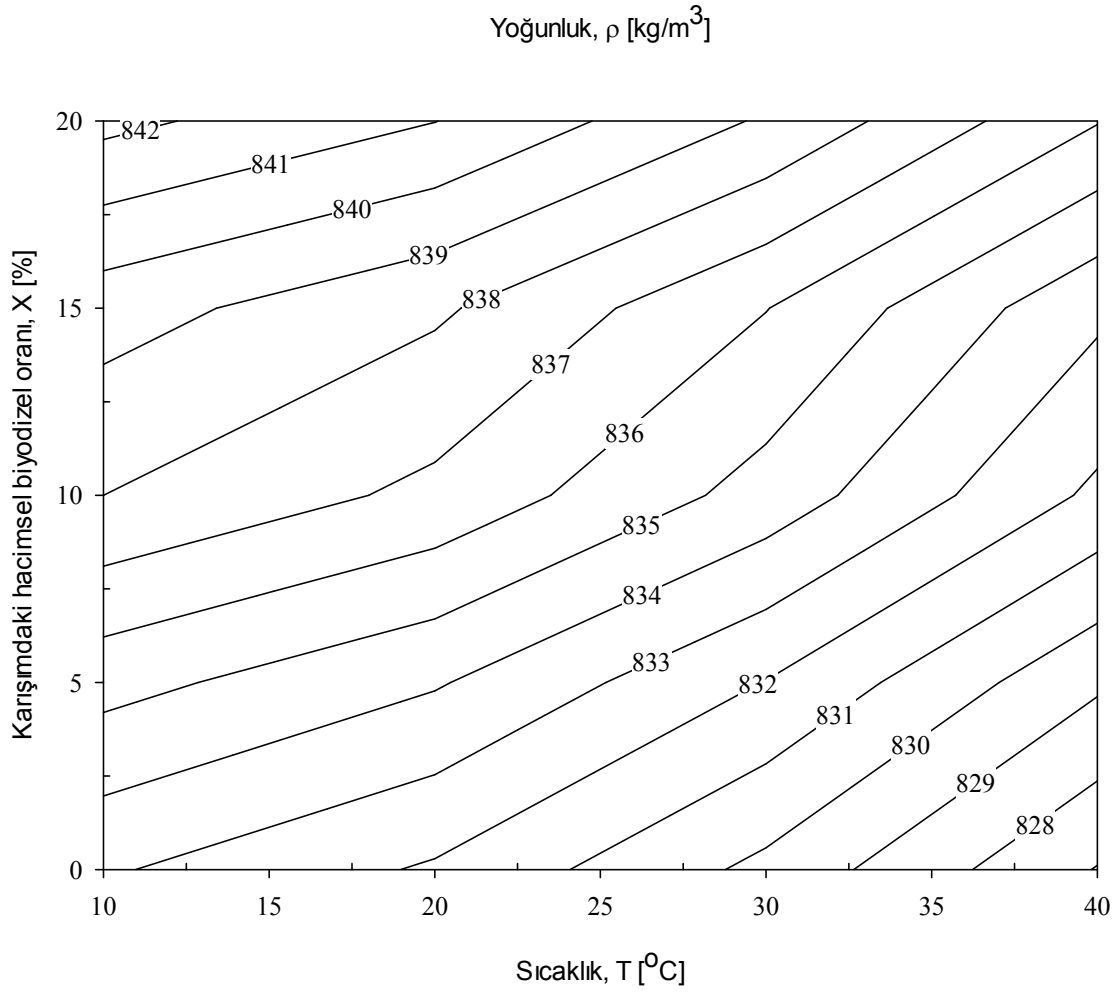
Şekil 3.93'te, ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluk değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri iki-boyutlu eş-yoğunluk eğrileri şeklinde verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, ölçülen değerlere göre yoğunlukların karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, eş-yoğunluk eğrileri aralarındaki mesafeler yaklaşık olarak sabit olacak şekilde (sabit gradyana sahip), yoğunluğun karışımdaki biyodizel oranına göre değişiminin doğrusal, sıcaklığa göre değişiminin ise parabolik karakterde olduğu belirlenmiştir. Bu durum daha belirgin olarak Şekil 3.94'te görülmektedir.



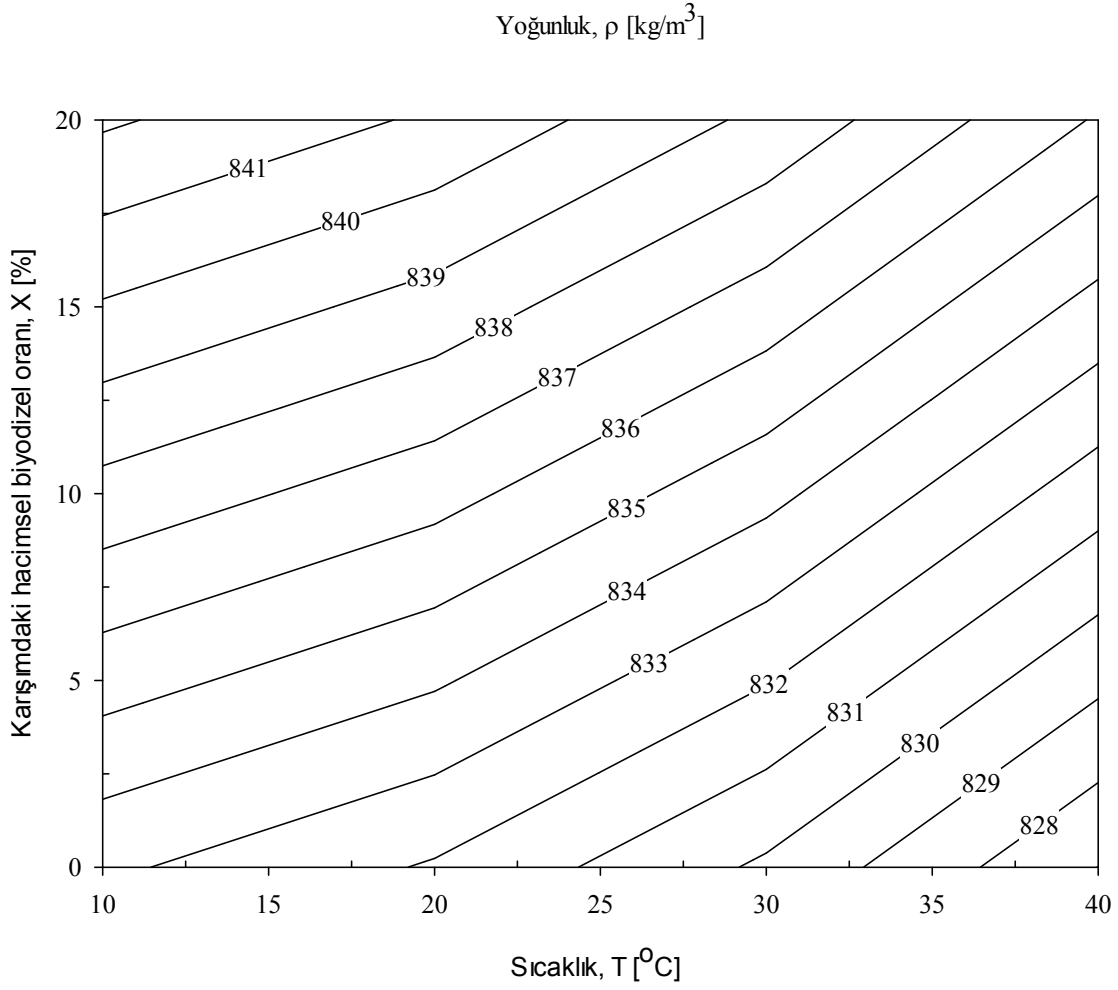
Şekil 3.94'te, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluk değerlerinin ölçüm değerlerine uyumlanan iki-boyutlu  $\rho = \rho(T, X)$  fonksiyonundan elde edilen değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimlerine ilişkin eş-yoğunluk eğrileri verilmektedir. Yukarıda da belirtildiği gibi karışımdaki hacimsel biyodizel oranı olarak %0, 5, 10, 15, 20 ve 100 değerleri parametre olarak seçilmiştir. Eğri uyumlarken % 20 ile % 100 arasındaki ölçüm yapılmamış geniş bölgenin hassasiyeti azaltmaması için söz konusu eğriler sadece sık ölçüm yapılan % 0-20 değerlerini kapsayacak şekilde çizilmiştir. Yoğunluk değerlerinin sıcaklığa göre değişiminin (Şekil 3.86) parabolik, karışımdaki biyodizel oranına göre değişiminin ise doğrusal (Şekil 3.89) olduğu belirtilmiştir. Buna göre, hesaplanan değerlere göre yoğunlukların karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, sabit eş-yoğunluk eğrisi için, karışımın sıcaklığı arttıkça karışımdaki biyodizel oranı parabolik olarak artmaktadır. Ayrıca, sabit bir sıcaklıkta yoğunluğu bir birim değiştirmek için karışımdaki biyodizel oranının yaklaşık sabit bir değerde değiştirilmesi gerekirken, sabit bir karışım oranında yoğunluğu bir birim değiştirmek için düşük sıcaklıklarda daha fazla sıcaklık değişimi, yüksek sıcaklıklarda ise daha az sıcaklık değişimi gerekmektedir. Deney sonuçları incelendiğinde, yoğunlukların sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranıyla değişimine,

$$\rho = \rho(T, X) = a + bT + cX + dT^2 + eTX \quad (3.26)$$

şeklinde X [%] karışımdaki hacimsel biyodizel oranına 1. dereceden ve T [°C] sıcaklığına 2. dereceden bağımlı iki-boyutlu fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada a, b, c, d ve e sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.



Şekil 3.93. Ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımdeki biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.94. Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri

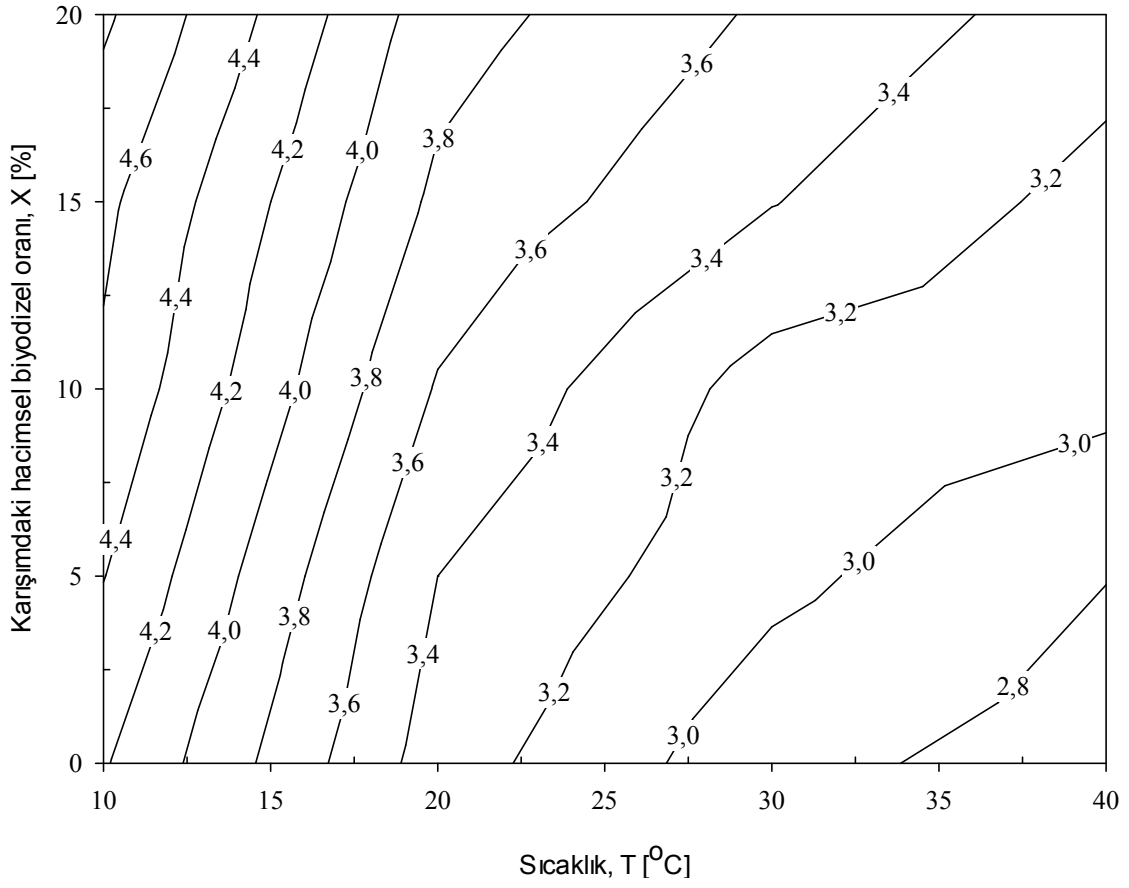
Şekil 3.95'te, ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri iki-boyutlu eş-viskozite eğrileri şeklinde verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, ölçülen değerlere göre kinematik viskozitelerin karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, yoğunluk değerlerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimlerinin doğrusal, sıcaklığa göre değişimlerinin ise doğrusala yakın olması nedeniyle dinamik viskozite değerlerinin sabit yoğunluk değerlerine bölünüyormuş gibi bir etki yaratması sonucu, kinematik viskozitelerin sıcaklık

ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri de dinamik viskozitelerin değişimlerine (Şekil 3.91) oldukça benzer karakterde olduğu görülebilir.

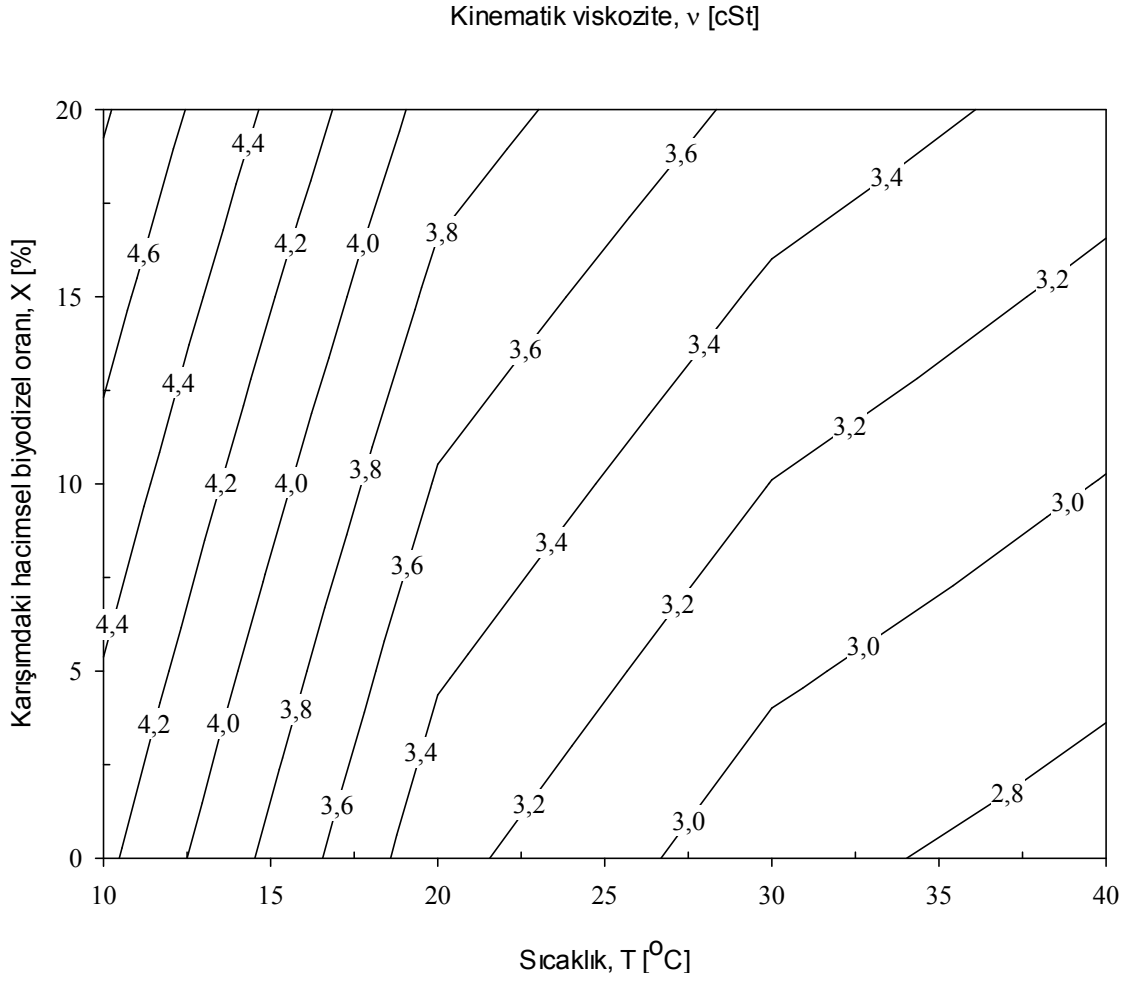
Şekil 3.96'da, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin ölçüm değerlerine uyumlanan iki-boyutlu  $v = v(T, X)$  fonksiyonundan elde edilen değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimlerine ilişkin eş-viskozite eğrileri verilmektedir. Hatırlanacağı üzere karışımdaki hacimsel biyodizel oranı olarak %0, 5, 10, 15, 20 ve 100 değerleri parametre olarak seçilmiştir. Eğri uyumlar için %20 ile %100 arasındaki ölçüm yapılmamış geniş bölgenin hassasiyeti azaltmaması için söz konusu eğriler sadece sık ölçüm yapılan % 0-20 değerlerini kapsayacak şekilde çizilmiştir. Deneysel veriler incelendiğinde, saf biyodizel ve dizel yakıtı ile biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranıyla değişimine,

$$v = v(T, X) = a + bT + cX + dT^2 + eTX + fX^2 + gT^3 + hT^2X + kTX^2 \quad (3.27)$$

şeklinde X [%] karışımdaki hacimsel biyodizel oranına 2. dereceden, T [°C] sıcaklığına ise 3. dereceden bağımlı iki-boyutlu fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada a, b, ..., k sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, hesaplanan değerlere göre kinematik viskoziteleri karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, söz konusu şekilde de farklı karakterdeki iki ayrı bölge görülebilir. Birinci bölge olarak adlandırılan yüksek sıcaklık ve düşük biyodizel oranı bölgesinde eş-viskozite eğrileri daha seyrek ve yataya yakın iken; ikinci bölge olarak adlandırılan düşük sıcaklık ve yüksek biyodizel oranı bölgesinde eğriler daha sık ve dikeye yakın karakterdedir. Buna göre, birinci bölgede sıcaklıktaki büyük bir değişime karşılık viskozitede küçük bir değişim görülürken yani viskozite değişiminin sıcaklığa karşı hassasiyeti az iken, ikinci bölgede tam tersine sıcaklıktaki küçük bir değişime karşılık viskozitede daha büyük değişim gözlemlendiğinden viskozitenin sıcaklık değişimine karşı duyarlılığının daha fazla olduğu söylenebilir.

Kinematik viskozite,  $\nu$  [cSt]

Şekil 3.95. Ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdeki biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.96. Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri

### 3.4.2.2. Teorik Olarak En Yüksek Metil Ester Verimine Sahip Biyodizel İçin Değişimler

Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelleri içerisinde teorik olarak en yüksek metil ester verimine sahip biyodizel ile dizel yakıtı hacimsel olarak belirli oranlarda (% 5, 10, 15, 20) karıştırılarak elde edilen yakıt karışımlarının çeşitli sıcaklıklardaki (10, 20, 30, 40°C) dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerleri belirlenmiştir. Söz konusu biyodizelin üretim parametreleri aşağıdaki gibidir:

Yağ: Mısır yağı

Katalizör türü: KOH

Katalizör oranı: %1,10

Reaksiyon sıcaklığı: 60°C

Reaksiyon süresi: 60 dakika

Kullanılan alkol/yağ mol oranı: 6:1

### 3.4.2.2.1. Sıcaklığa Göre Değişimler

Söz konusu biyodizel-dizel yakıtı karışımları için dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin sıcaklığa göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.97, 3.98 ve 3.99'da verilmektedir.

Şekil 3.97'de potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, burada da diğer dinamik viskozite-sıcaklık değişimi şekillerinde olduğu gibi, saf biyodizel, biyodizel-dizel yakıtı karışımları ve saf dizel yakıtının viskozite değerlerinin sıcaklık arttıkça eksponansiyel olarak azaldığı görülmüştür. Düşük sıcaklıklarda saf biyodizel ve saf dizel yakıtının dinamik viskoziteleri arasındaki fark daha fazla iken, artan sıcaklıkla birlikte eğriler birbirlerine eksponansiyel olarak yaklaşmaktadır. Söz konusu dinamik viskozite değerlerine,

$$\mu = \mu(T) = y_0 + ae^{-bT} \quad (3.28)$$

şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

Şekil 3.98'de potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklığa göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, burada da diğer yoğunluk-sıcaklık değişimi şekillerinde olduğu gibi, yoğunluk değerlerinin sıcaklık arttıkça azaldığı, ölçüm yapılan sıcaklık aralığında

yoğunluk değerlerinin sıcaklık arttıkça doğrusala yakın olmakla birlikte ikinci dereceden bir değişim gösterdiği belirlenmiştir. Bu nedenle söz konusu yoğunluk değerlerine,

$$\rho = \rho(T) = y_0 + aT + bT^2 \quad (3.29)$$

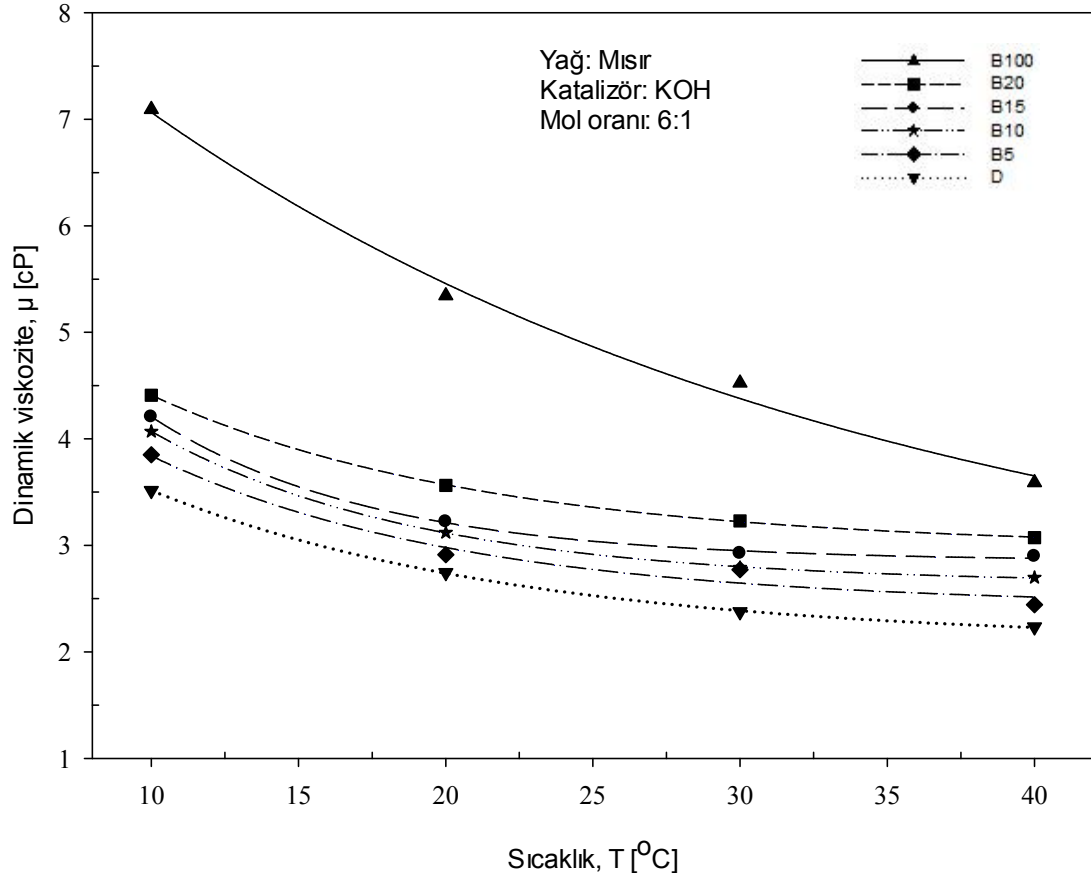
şeklindeki bir-boyutlu parabolik bir fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

Şekil 3.99'da potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, burada da diğer kinematik viskozite-sıcaklık değişimi şekillerinde olduğu gibi, yoğunluk değerlerinin sıcaklık ile değişimlerinin doğrusala yakın karakterde ve yatay eğilimli (Şekil 3.98) olması nedeniyle dinamik viskozite değerlerinin sabit yoğunluk değerlerine bölünüyormuş gibi bir etki yaratması sonucu, kinematik viskozitelerin sıcaklıkla değişimleri de dinamik viskozitelerin sıcaklık ile değişimlerine (Şekil 3.97) oldukça benzer karakterde olduğu görülebilir. Diğer bir ifade ile kinematik viskozitelerin de artan sıcaklıkla birlikte eksponansiyel olarak azaldığı belirlenmiştir. Söz konusu kinematik viskozite değerlerine,

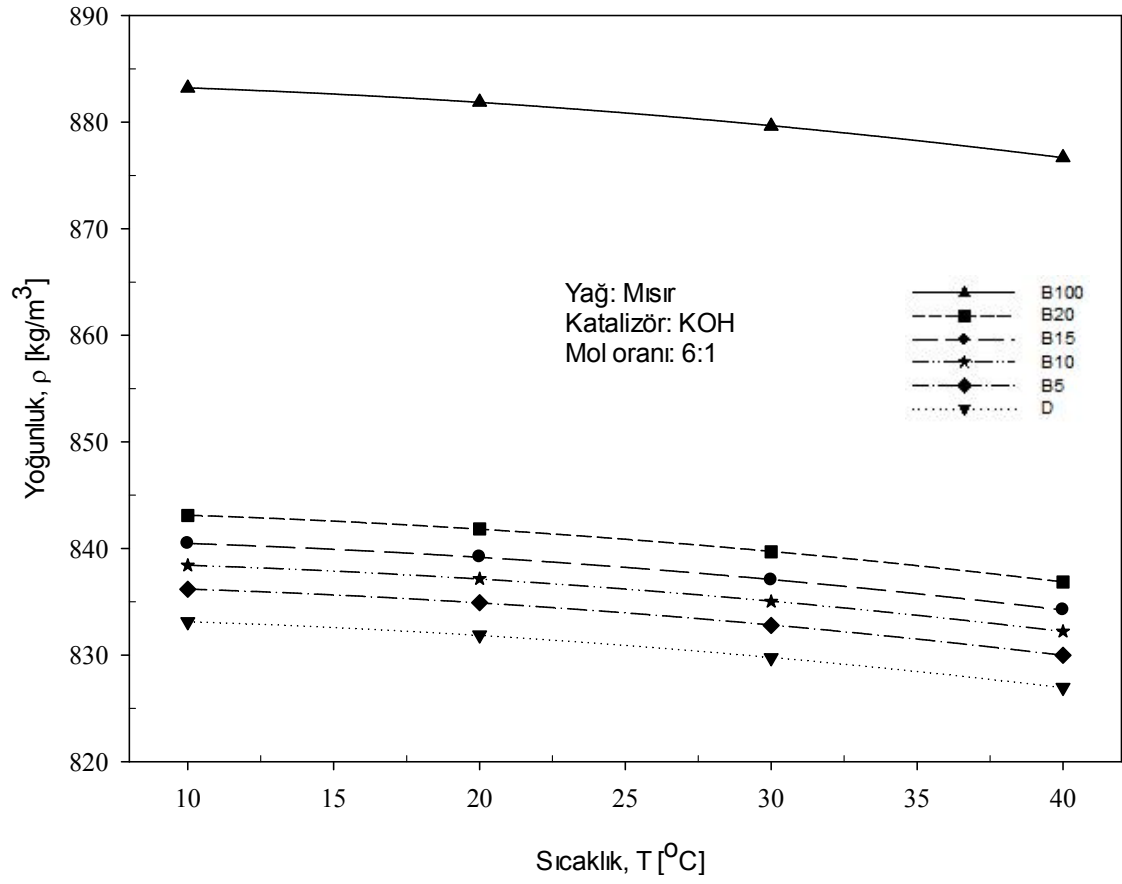
$$v = v(T) = y_0 + ae^{-bT} \quad (3.30)$$

şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ) ve ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

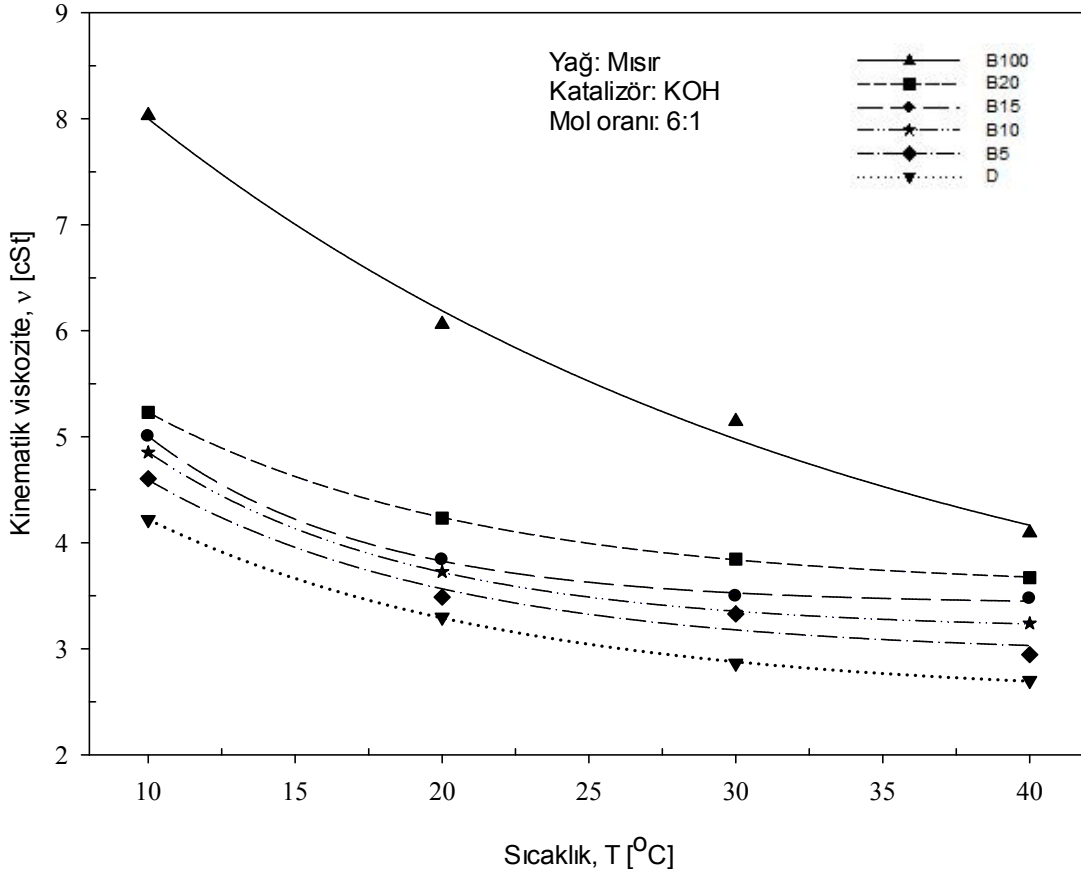




Şekil 3.97. Potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri



Şekil 3.98. Potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklığa göre değişimleri



Şekil 3.99. Potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri

#### 3.4.2.2.2. Karışımdaki Hacimsel Biyodizel Oranına Göre Değişimler

Söz konusu biyodizel-dizel yakıtı karışımları için dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.100, 3.101 ve 3.102’de verilmektedir.

Şekil 3.100’de potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için dinamik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri verilmiştir. Daha önceden bahsedildiği gibi karışımdaki biyodizel oranının sıfır olması saf dizel yakıtına, 100 olması da saf biyodizele karşılık gelmektedir. Söz konusu şekil incelendiğinde, burada da diğer dinamik viskozite-karışımdaki hacimsel biyodizel oranı değişimi şekillerinde olduğu gibi, biyodizelin dinamik viskozitesinin dizel yakıtına göre

yüksek olması nedeniyle karışımdaki hacimsel biyodizel oranı arttıkça biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının viskozite değerlerinin arttığı görülmüştür. Viskozitelerin artan biyodizel oranı ile birlikte eksponansiyel olarak azalarak arttığı belirlenmiştir. Sıcaklık azaldıkça karışımdaki hacimsel biyodizel oranının artışı ile dinamik viskozitelerdeki değişimin doğrusal niteliğe yaklaştığı görülmüştür. Ayrıca, 30 ve 40°C sıcaklıklarda %0, 5, 10 15 ve 20 hacimsel biyodizel oranlarındaki dinamik viskoziteler birbirlerine yakın değerler almıştır. Söz konusu dinamik viskozite değerlerine,

$$\mu = \mu(X) = y_0 + ae^{-bX} \quad (3.31)$$

şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

Şekil 3.101'de potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için yoğunluklarının karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri verilmiştir. Daha önceden bahsedildiği gibi karışımdaki biyodizel oranının sıfır olması saf dizel yakıtına, 100 olması da saf biyodizele karşılık gelmektedir. Söz konusu şekil incelendiğinde, burada da diğer yoğunluk-karışımdaki hacimsel biyodizel oranı değişimi şekillerinde olduğu gibi, biyodizelin yoğunluğu dizel yakıtınıninkine göre yüksek olduğundan, karışımdaki hacimsel biyodizel oranı arttıkça biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluk değerlerinin beklendiği gibi doğrusal olarak arttığı görülmüştür. Ayrıca, belirli bir karışım oranı için sıcaklık azaldıkça yoğunluk değerleri birbirlerine yaklaşmaktadır. Söz konusu yoğunluk değerlerine,

$$\rho = \rho(X) = y_0 + aX \quad (3.32)$$

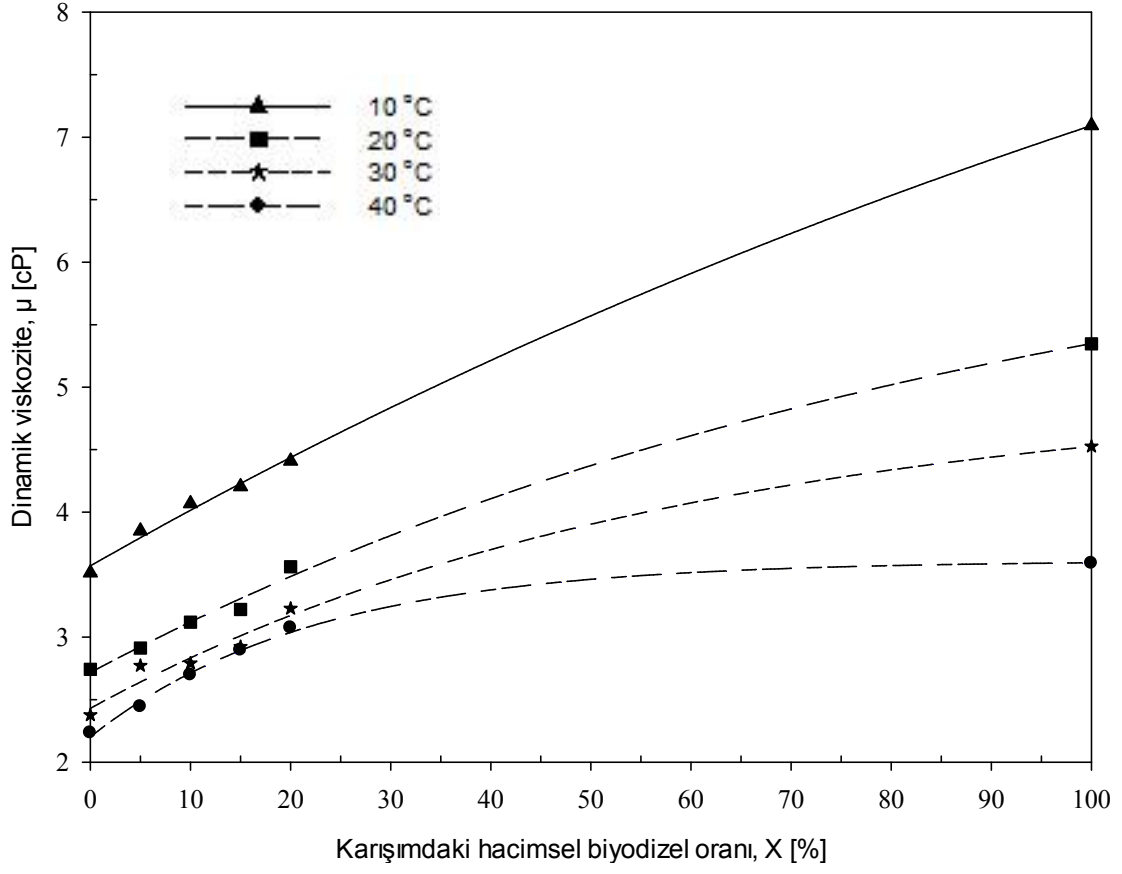
şeklindeki bir-boyutlu doğrusal fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$  ve  $a$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri,

korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

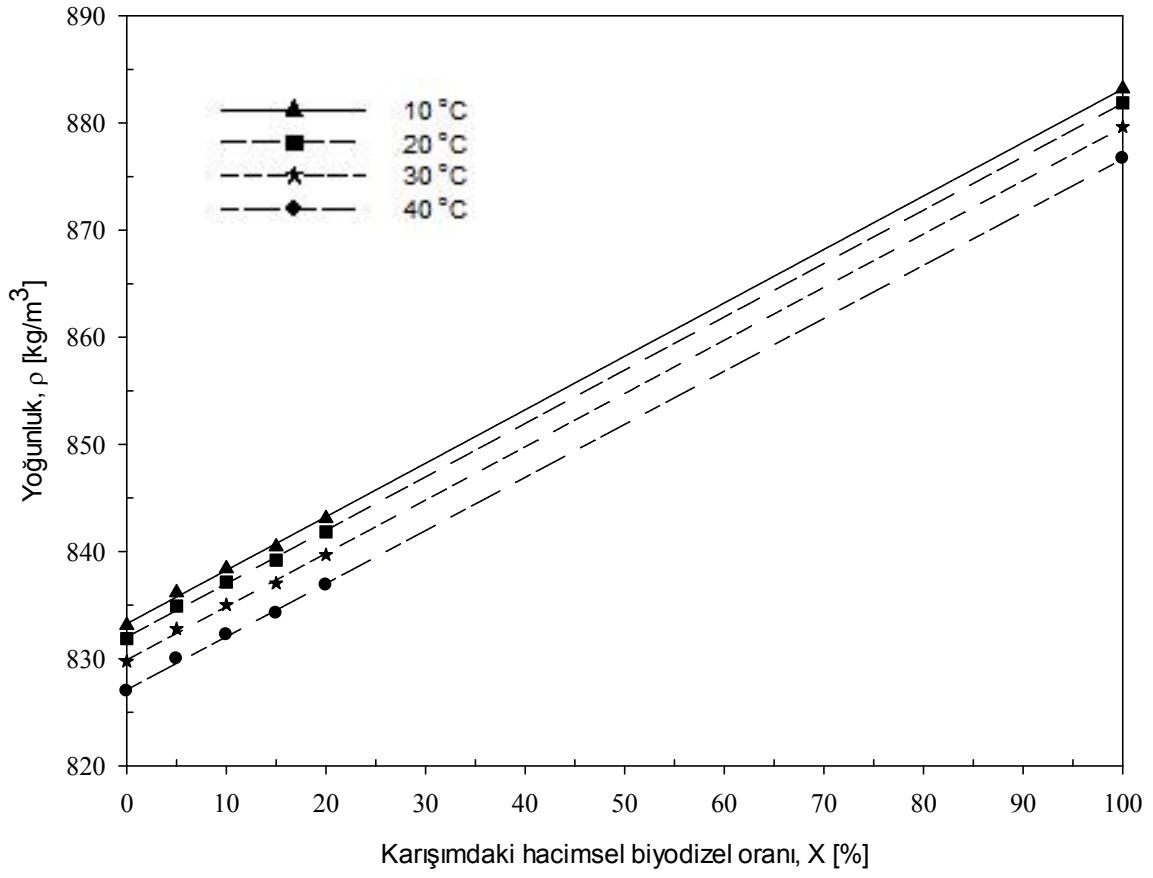
Şekil 3.102’de potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için kinematik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri verilmiştir. Burada da karışımdaki biyodizel oranının sıfır olması saf dizel yakıtına, 100 olması da saf biyodizele karşılık gelmektedir. Söz konusu şekil incelendiğinde, yoğunluk değerlerinin karışım oranı ile değişimlerinin (Şekil 3.101) doğrusal olmasıyla birlikte eğimlerinin çok küçük olması nedeniyle dinamik viskozite değerlerinin sabit yoğunluk değerlerine bölünüyormuş gibi bir etki yaratması sonucu kinematik viskozitelerin karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ile değişimleri de dinamik viskozitenin karışımdaki hacimsel biyodizel oranı (Şekil 3.100) ile değişimlerine oldukça benzer karakterde elde edilmiştir. Diğer bir ifade ile, burada da diğer kinematik viskozite-karışımdaki hacimsel biyodizel oranı değişimi şekillerinde olduğu gibi, kinematik viskozitelerin de artan biyodizel oranı ile eksponansiyel olarak azalarak arttığı belirlenmiştir. Burada da sıcaklık azaldıkça karışımdaki hacimsel biyodizel oranının artışı ile kinematik viskozitelerdeki değişimin doğrusal niteliğe yaklaştığı görülmüştür. Ayrıca Şekil 3.100’de olduğu gibi, 30 ve 40°C sıcaklıklarda %0, 5, 10 15 ve 20 hacimsel biyodizel oranlarındaki kinematik viskoziteler birbirlerine yakın değerler almıştır. Söz konusu kinematik viskozite değerlerine,

$$v = v(X) = y_0 + ae^{-bX} \quad (3.33)$$

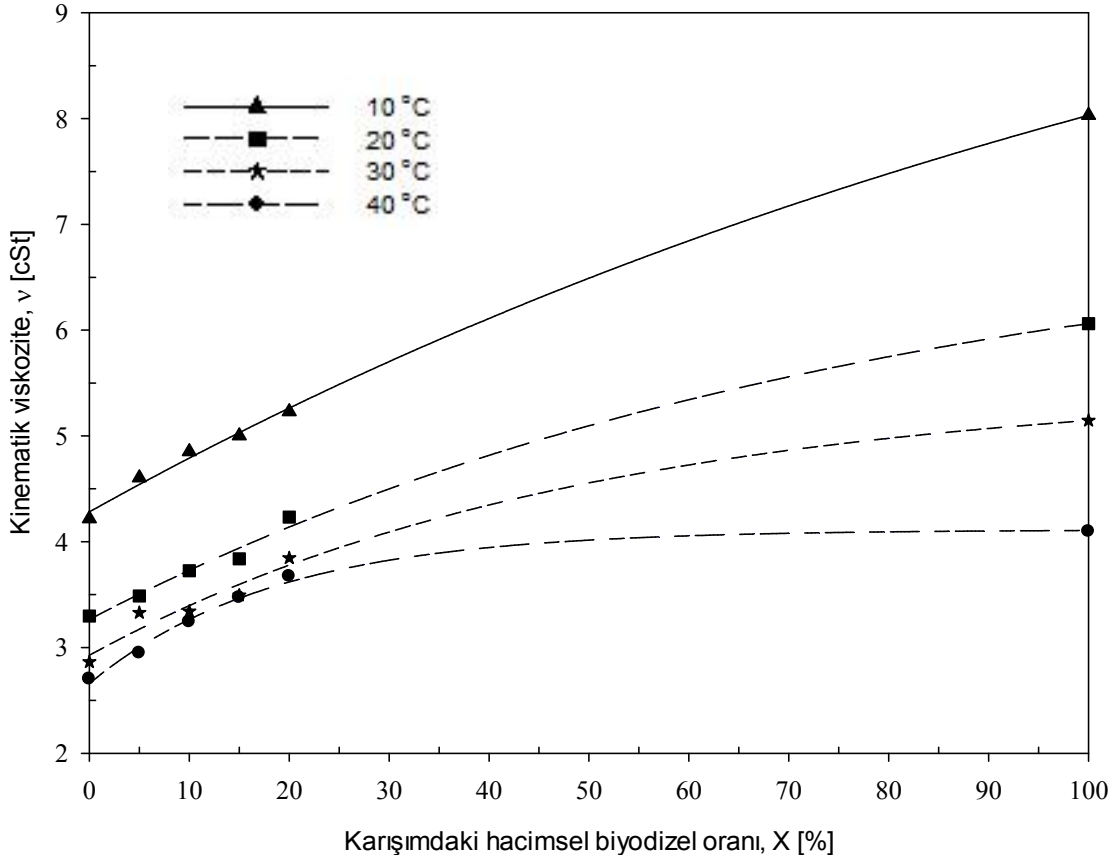
şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ , a ve b sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.



Şekil 3.100. Potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için dinamik viskozitelerinin karışımındaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.101. Potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için yoğunluklarının karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.102. Potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için kinematik viskozitelerinin karışımındaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri

### 3.4.2.2.3. Karışımındaki Hacimsel Biyodizel Oranı ve Sıcaklığa Göre Değişimler

Şekil 3.103'te, ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımındaki biyodizel oranına göre değişimleri iki-boyutlu eş-viskozite eğrileri şeklinde verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, ölçülen değerlere göre dinamik viskozitelerin karışımındaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, farklı karakterdeki iki ayrı bölge görülebilir. Birinci bölge olarak adlandırılan yüksek sıcaklık ve düşük biyodizel oranı bölgesinde eş-viskozite eğrileri daha seyrek ve yataya yakın iken; ikinci bölge olarak adlandırılan düşük sıcaklık ve yüksek biyodizel oranı bölgesinde eğriler daha sık ve dikeye yakın karakterdedir. Buna göre, birinci bölgede sıcaklıktaki büyük bir değişime karşılık



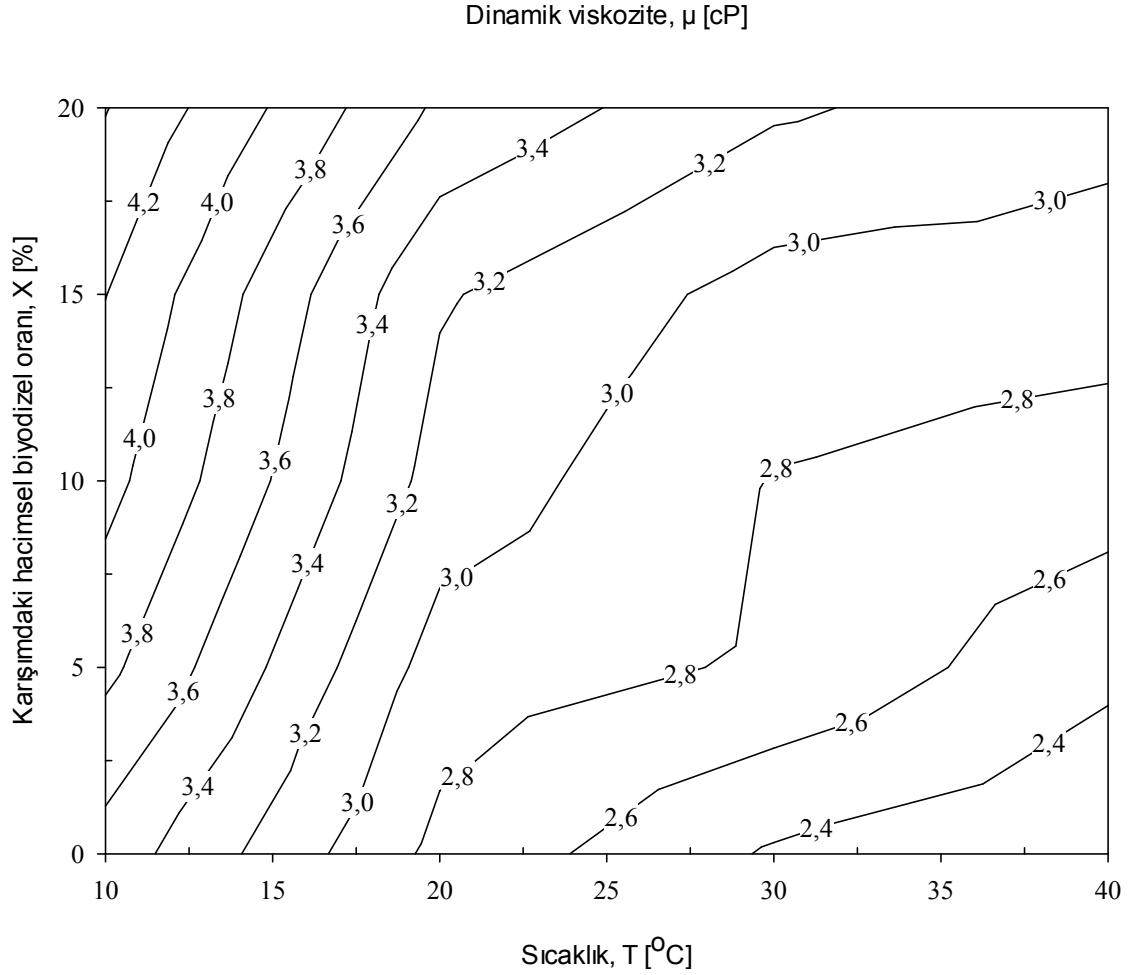
viskozitede küçük bir değişim görülürken, ikinci bölgede tam tersine sıcaklıktaki küçük bir değişime karşılık viskozitede daha büyük değişim gözlemlenmektedir.

Şekil 3.104'te, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin ölçüm değerlerine uyumlanan iki-boyutlu  $\mu = \mu(T, X)$  fonksiyonundan elde edilen değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimlerine ilişkin eş-viskozite eğrileri verilmektedir. Hatırlanacağı üzere karışımdaki hacimsel biyodizel oranı olarak %0, 5, 10, 15, 20 ve 100 değerleri parametre olarak seçilmişti. Eğri uyumları % 20 ile % 100 arasındaki ölçüm yapılmamış geniş bölgenin hassasiyeti azaltmaması için söz konusu eğriler sadece sık ölçüm yapılan % 0-20 değerlerini kapsayacak şekilde çizilmiştir. Sıcaklıklar için ise yine ölçüm yapılmış olan 10-40°C aralığı dikkate alınmıştır. Deneysel veriler incelendiğinde, saf biyodizel ve dizel yakıtı ile biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranıyla değişimine,

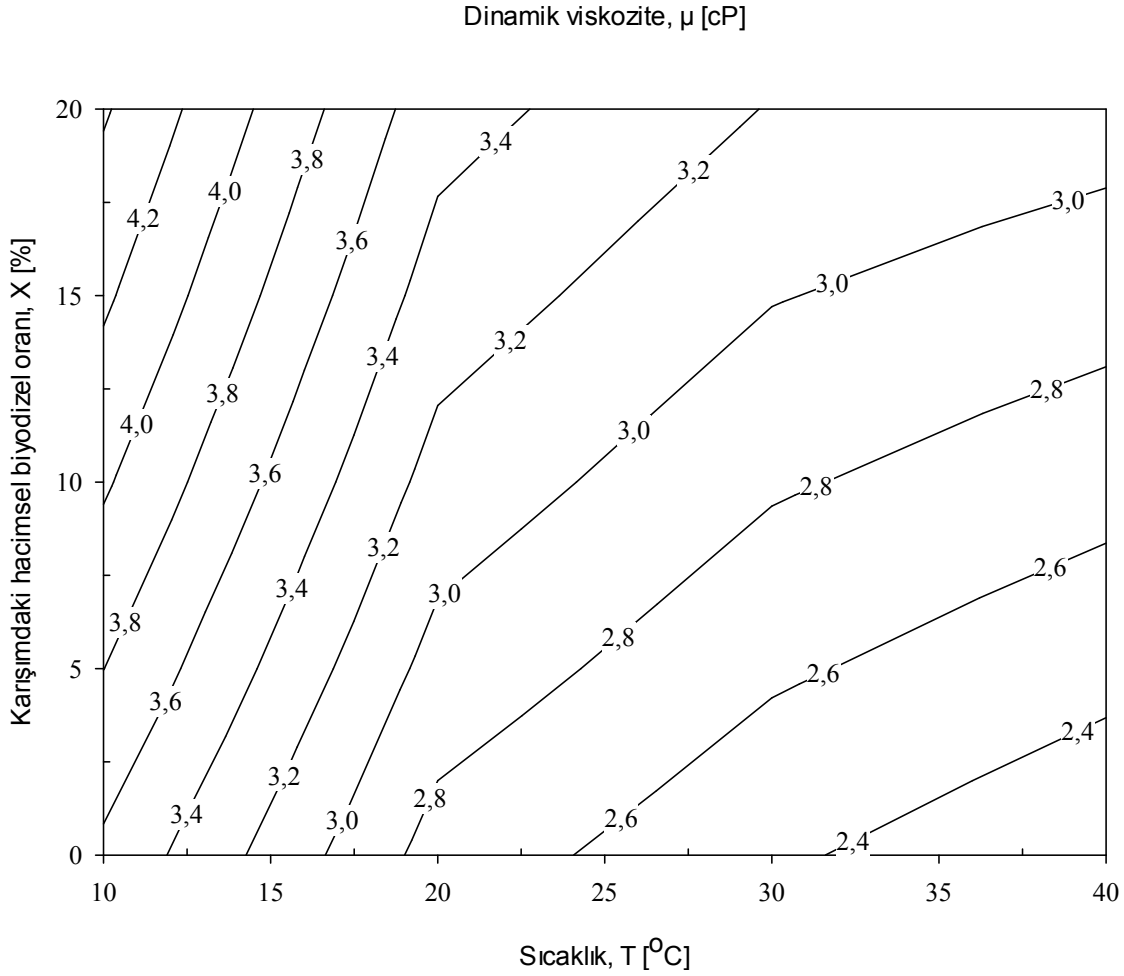
$$\mu = \mu(T, X) = a + bT + cX + dT^2 + eTX + fX^2 + gT^3 + hT^2X + kTX^2 \quad (3.34)$$

şeklinde X [%] karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre 2. dereceden, T [°C] sıcaklığına ise 3. dereceden bağımlı iki-boyutlu fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada a, b, ..., k sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir. Söz konusu eşitlikten elde edilen dinamik viskozite değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimi grafiği incelendiğinde, hesaplanan değerlere göre dinamik viskozitelerin karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, farklı karakterdeki iki ayrı bölge görülebilir. Birinci bölge olarak adlandırılan yüksek sıcaklık ve düşük biyodizel oranı bölgesinde eş-viskozite eğrileri daha seyrek ve yataya yakın iken; ikinci bölge olarak adlandırılan düşük sıcaklık ve yüksek biyodizel oranı bölgesinde eğriler daha sık ve dikeye yakın karakterdedir. Buna göre, birinci bölgede sıcaklıktaki büyük bir değişime karşılık viskozitede küçük bir değişim görülürken yani viskozite değişiminin sıcaklığa karşı hassasiyeti az iken, ikinci bölgede tam tersine sıcaklıktaki küçük bir değişime karşılık viskozitede daha büyük

değişim gözlemlendiğinden viskozitenin sıcaklık değişimine karşı duyarlılığının daha fazla olduğu söylenebilir.



Şekil 3.103. Ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri



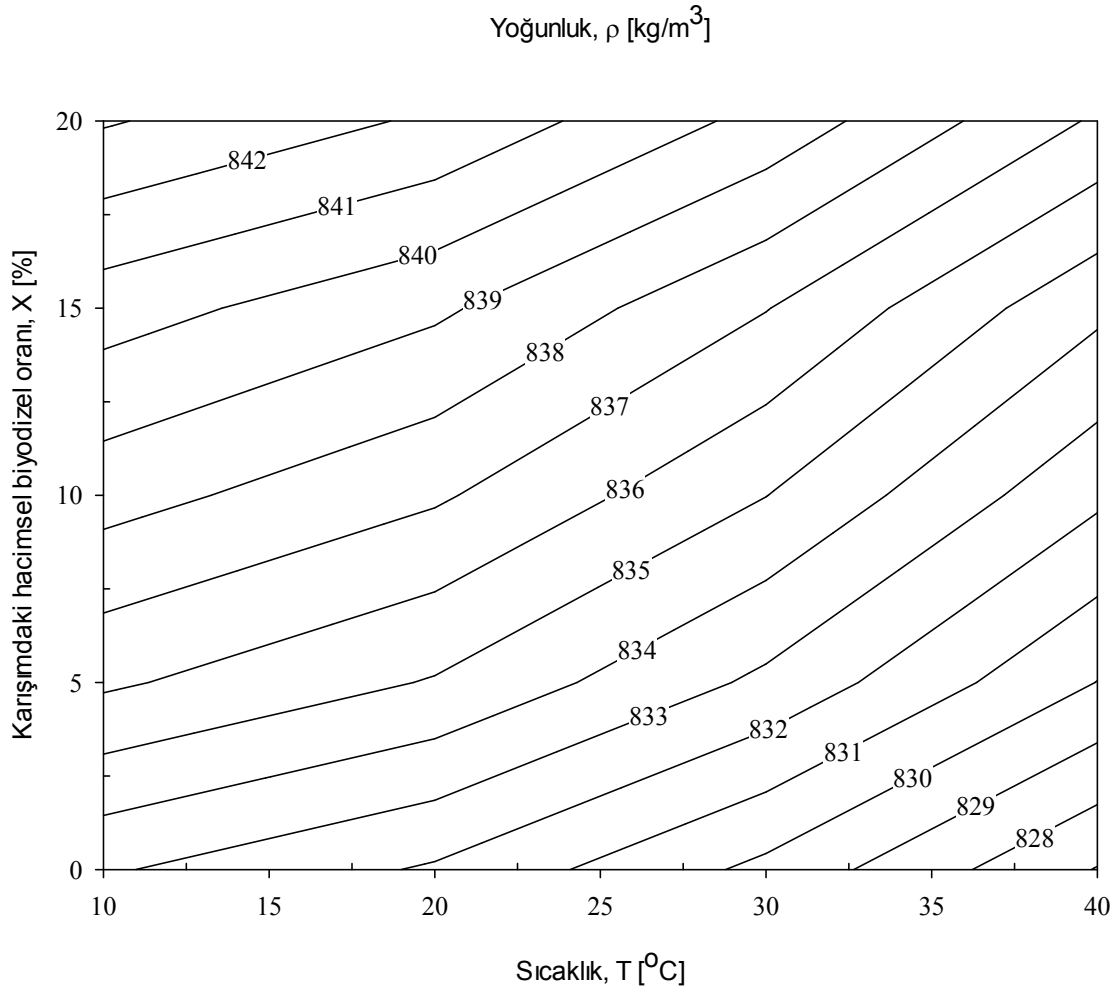
Şekil 3.104. Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri

Şekil 3.105'te, ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluk değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri iki-boyutlu eş-yoğunluk eğrileri şeklinde verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, ölçülen değerlere göre yoğunlukların karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, eş-yoğunluk eğrileri aralarındaki mesafeler yaklaşık olarak sabit olacak şekilde (sabit gradyana sahip), yoğunluğun karışımdaki biyodizel oranına göre değişiminin doğrusal, sıcaklığa göre değişiminin ise parabolik karakterde olduğu belirlenmiştir. Bu durum daha belirgin olarak Şekil 3.106'da görülmektedir.

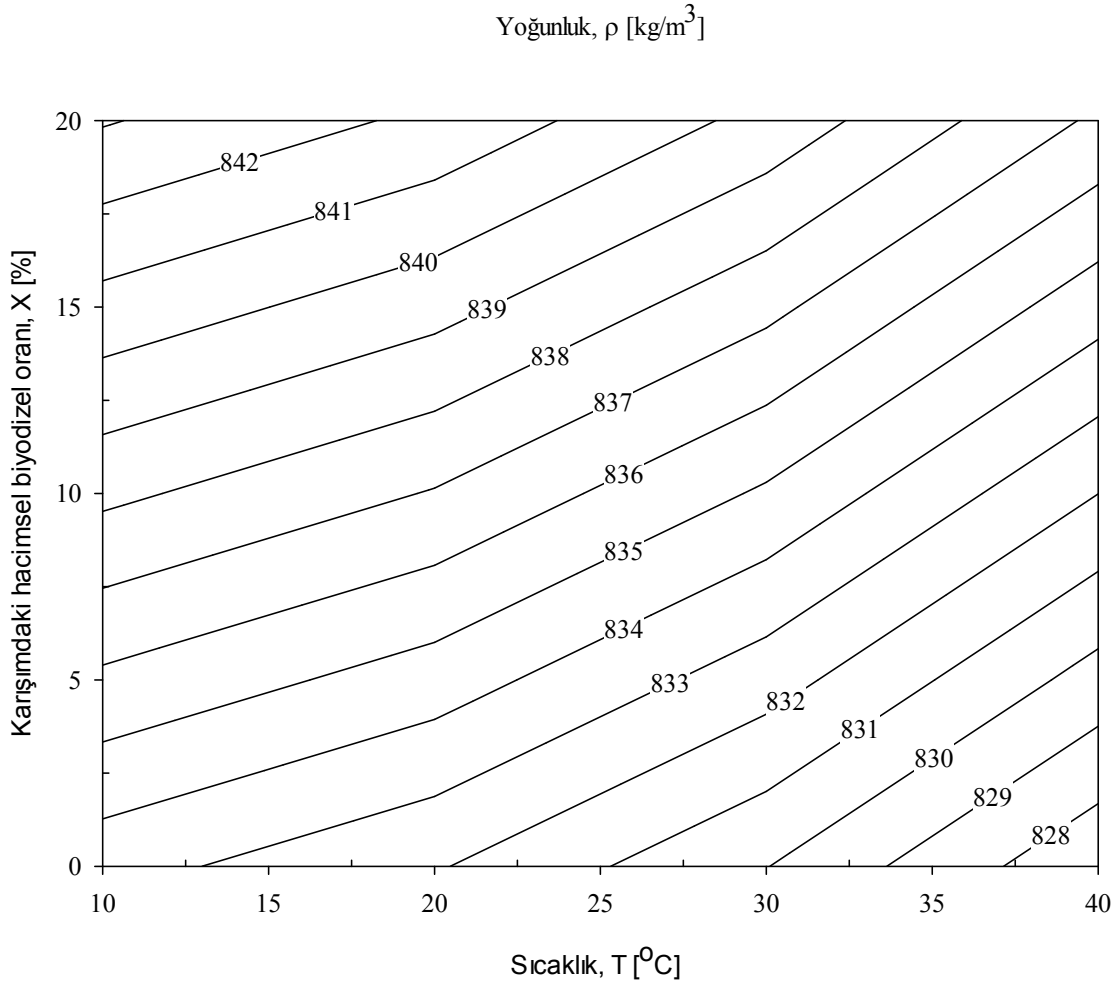
Şekil 3.106'da, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluk değerlerinin ölçüm değerlerine uyumlanan iki-boyutlu  $\rho = \rho(T, X)$  fonksiyonundan elde edilen değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimlerine ilişkin eş-yoğunluk eğrileri verilmektedir. Yukarıda da belirtildiği gibi karışımdaki hacimsel biyodizel oranı olarak %0, 5, 10, 15, 20 ve 100 değerleri parametre olarak seçilmiştir. Eğri uyumlarken % 20 ile % 100 arasındaki ölçüm yapılmamış geniş bölgenin hassasiyeti azaltmaması için söz konusu eğriler sadece sık ölçüm yapılan % 0-20 değerlerini kapsayacak şekilde çizilmiştir. Yoğunluk değerlerinin sıcaklığa göre değişiminin (Şekil 3.98) parabolik, karışımdaki biyodizel oranına göre değişiminin ise doğrusal (Şekil 3.101) olduğu belirtilmiştir. Buna göre, hesaplanan değerlere göre yoğunlukların karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, sabit eş-yoğunluk eğrisi için, karışımın sıcaklığı arttıkça karışımdaki biyodizel oranı parabolik olarak artmaktadır. Ayrıca, sabit bir sıcaklıkta yoğunluğu bir birim değiştirmek için karışımdaki biyodizel oranının yaklaşık sabit bir değerde değiştirilmesi gerekirken, sabit bir karışım oranında yoğunluğu bir birim değiştirmek için düşük sıcaklıklarda daha fazla sıcaklık değişimi, yüksek sıcaklıklarda ise daha az sıcaklık değişimi gerekmektedir. Deney sonuçları incelendiğinde, yoğunlukların sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranıyla değişimine,

$$\rho = \rho(T, X) = a + bT + cX + dT^2 + eTX \quad (3.35)$$

şeklinde X [%] karışımdaki hacimsel biyodizel oranına 1. dereceden ve T [°C] sıcaklığına 2. dereceden bağımlı iki-boyutlu fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada a, b, c, d ve e sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.



Şekil 3.105. Ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımındaki biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.106. Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri

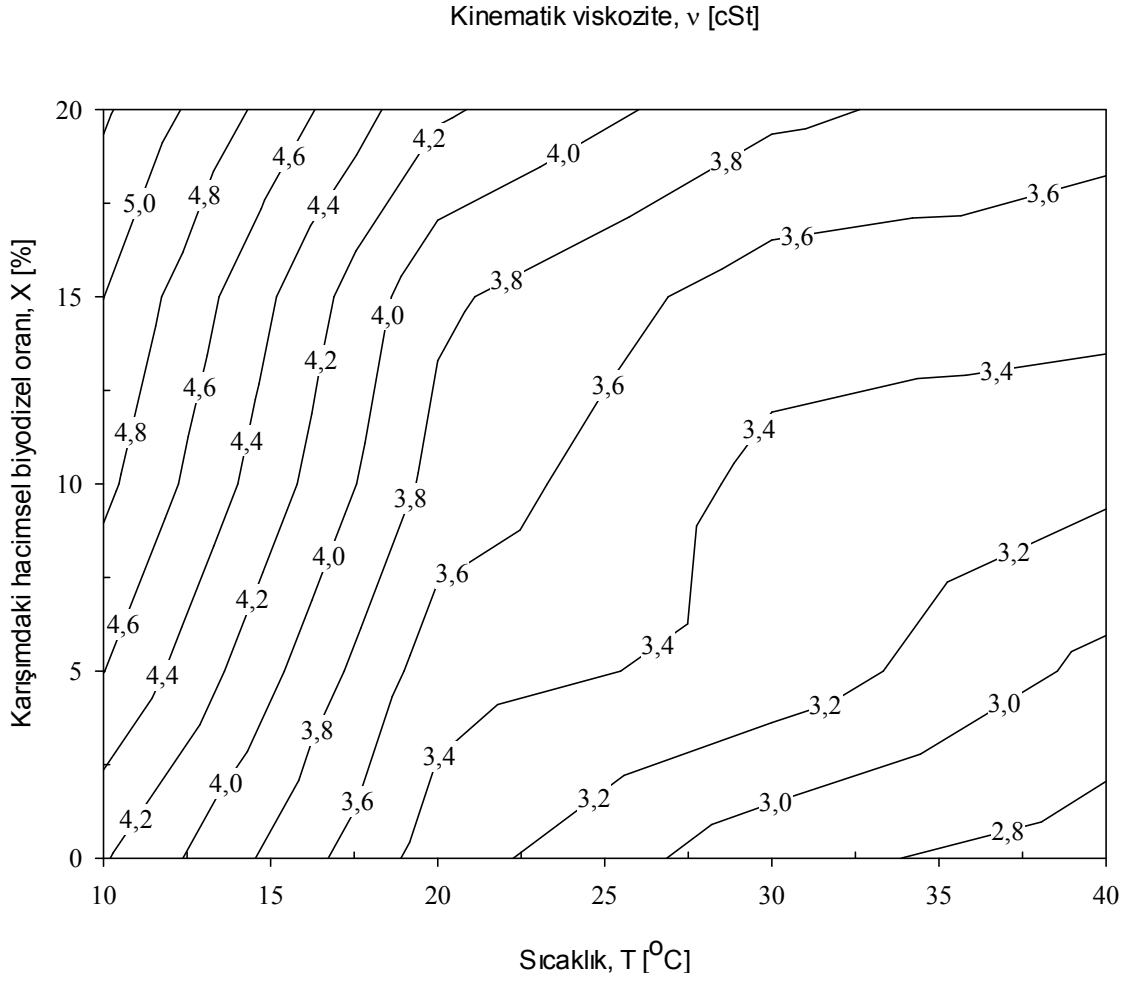
Şekil 3.107’de, ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri iki-boyutlu eş-viskozite eğrileri şeklinde verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, ölçülen değerlere göre kinematik viskozitelerin karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, yoğunluk değerlerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimlerinin doğrusal, sıcaklığa göre değişimlerinin ise doğrusala yakın olması nedeniyle dinamik viskozite değerlerinin sabit yoğunluk değerlerine bölünüyormuş gibi bir etki yaratması sonucu, kinematik viskozitelerin sıcaklık

ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri de dinamik viskozitelerin değişimlerine (Şekil 3.103) oldukça benzer karakterde olduğu görülebilir.

Şekil 3.108’de, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin ölçüm değerlerine uyumlanan iki-boyutlu  $v = v(T, X)$  fonksiyonundan elde edilen değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimlerine ilişkin eş-viskozite eğrileri verilmektedir. Hatırlanacağı üzere karışımdaki hacimsel biyodizel oranı olarak %0, 5, 10, 15, 20 ve 100 değerleri parametre olarak seçilmiştir. Eğri uyumlar için %20 ile %100 arasındaki ölçüm yapılmamış geniş bölgenin hassasiyeti azaltmaması için söz konusu eğriler sadece sık ölçüm yapılan % 0-20 değerlerini kapsayacak şekilde çizilmiştir. Deneysel veriler incelendiğinde, saf biyodizel ve dizel yakıtı ile biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranıyla değişimine,

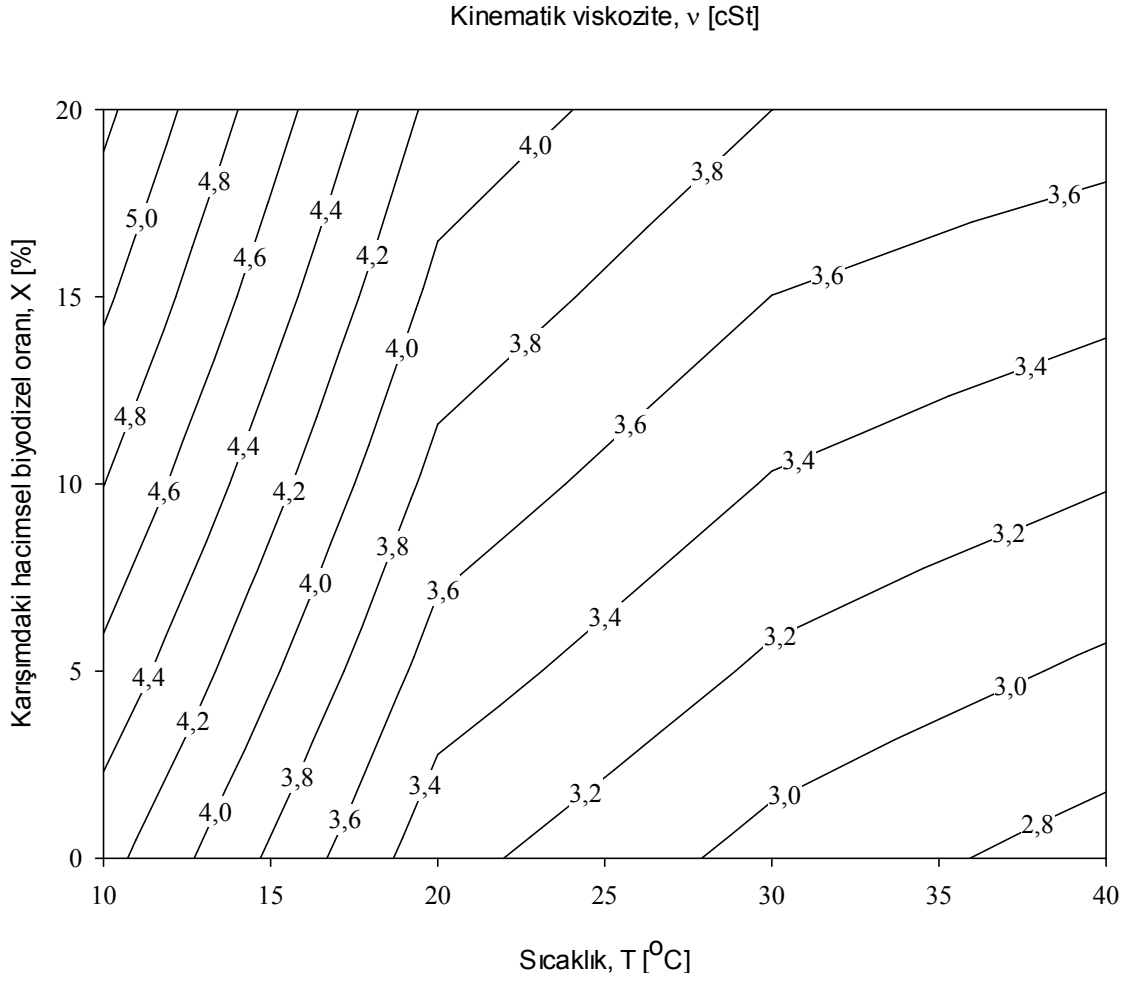
$$v = v(T, X) = a + bT + cX + dT^2 + eTX + fX^2 + gT^3 + hT^2X + kTX^2 \quad (3.36)$$

şeklinde X [%] karışımdaki hacimsel biyodizel oranına 2. dereceden, T [°C] sıcaklığına ise 3. dereceden bağımlı iki-boyutlu fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada a, b, ..., k sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, hesaplanan değerlere göre kinematik viskoziteleri karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, söz konusu şekilde de farklı karakterdeki iki ayrı bölge görülebilir. Birinci bölge olarak adlandırılan yüksek sıcaklık ve düşük biyodizel oranı bölgesinde eş-viskozite eğrileri daha seyrek ve yataya yakın iken; ikinci bölge olarak adlandırılan düşük sıcaklık ve yüksek biyodizel oranı bölgesinde eğriler daha sık ve dikeye yakın karakterdedir. Buna göre, birinci bölgede sıcaklıktaki büyük bir değişime karşılık viskozitede küçük bir değişim görülürken yani viskozite değişiminin sıcaklığa karşı hassasiyeti az iken, ikinci bölgede tam tersine sıcaklıktaki küçük bir değişime karşılık viskozitede daha büyük değişim gözlemlendiğinden viskozitenin sıcaklık değişimine karşı duyarlılığının daha fazla olduğu söylenebilir.



Şekil 3.107. Ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri





Şekil 3.108. Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri

### 3.5. Fındık Yağı Biyodizeli-Dizel Yakıtı Karışımlarının Dinamik Viskozite, Yoğunluk ve Kinematik Viskozitelerinin Belirlenmesi

#### 3.5.1. Sodyum Hidroksit Kullanılarak Üretilen Fındık Yağı Biyodizeli-Dizel Yakıtı Karışımları

##### 3.5.1.1. En Düşük Viskoziteye Sahip Biyodizel İçin Değişimler

Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelleri içerisinde en düşük viskoziteye sahip biyodizel ile dizel yakıtı hacimsel olarak belirli oranlarda (%5, 10, 15, 20) karıştırılarak elde edilen yakıt karışımlarının çeşitli sıcaklıklardaki (10, 20, 30, 40°C)

dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerleri belirlenmiştir. Söz konusu biyodizelin üretim parametreleri aşağıdaki gibidir:

Yağ: Fındık yağı

Katalizör türü: NaOH

Katalizör oranı: %1,00

Reaksiyon sıcaklığı: 50°C

Reaksiyon süresi: 60 dakika

Kullanılan alkol/yağ mol oranı: 9:1

### 3.5.1.1.1. Sıcaklığa Göre Değişimler

Söz konusu biyodizel-dizel yakıtı karışımları için dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin sıcaklığa göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.109, 3.110 ve 3.111'de verilmektedir.

Şekil 3.109'da sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, burada da diğer dinamik viskozite-sıcaklık değişimi şekillerinde olduğu gibi, saf biyodizel, biyodizel-dizel yakıtı karışımları ve saf dizel yakıtının viskozite değerlerinin sıcaklık arttıkça eksponansiyel olarak azaldığı görülmüştür. Düşük sıcaklıklarda saf biyodizel ve saf dizel yakıtının dinamik viskoziteleri arasındaki fark daha fazla iken, artan sıcaklıkla birlikte eğriler birbirlerine eksponansiyel olarak yaklaşmaktadır. Saf fındık yağı biyodizelinin dinamik viskozitesinin sıcaklıkla eksponansiyel değişiminin, mısır yağı biyodizelinden farklı olarak doğrusala oldukça yakın bir karakterde olduğu gözlenmektedir. Söz konusu dinamik viskozite değerlerine,

$$\mu = \mu(T) = y_0 + ae^{-bT} \quad (3.37)$$

şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki

sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

Şekil 3.110'da sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklığa göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, burada da diğer yoğunluk-sıcaklık değişimi şekillerinde olduğu gibi, yoğunluk değerlerinin sıcaklık arttıkça azaldığı, ölçüm yapılan sıcaklık aralığında yoğunluk değerlerinin sıcaklık arttıkça doğrusala yakın olmakla birlikte ikinci dereceden bir değişim gösterdiği belirlenmiştir. Bu nedenle söz konusu yoğunluk değerlerine,

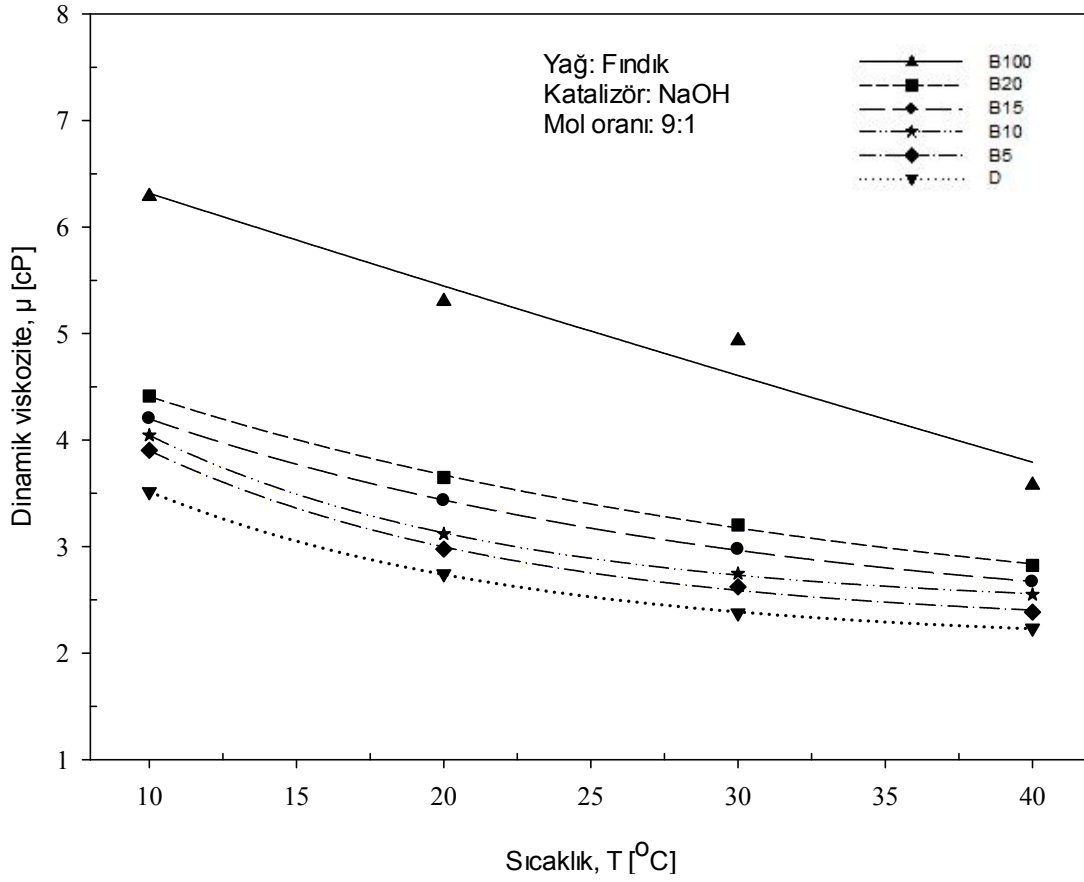
$$\rho = \rho(T) = y_0 + aT + bT^2 \quad (3.38)$$

şeklindeki bir-boyutlu parabolik bir fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ , a ve b sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

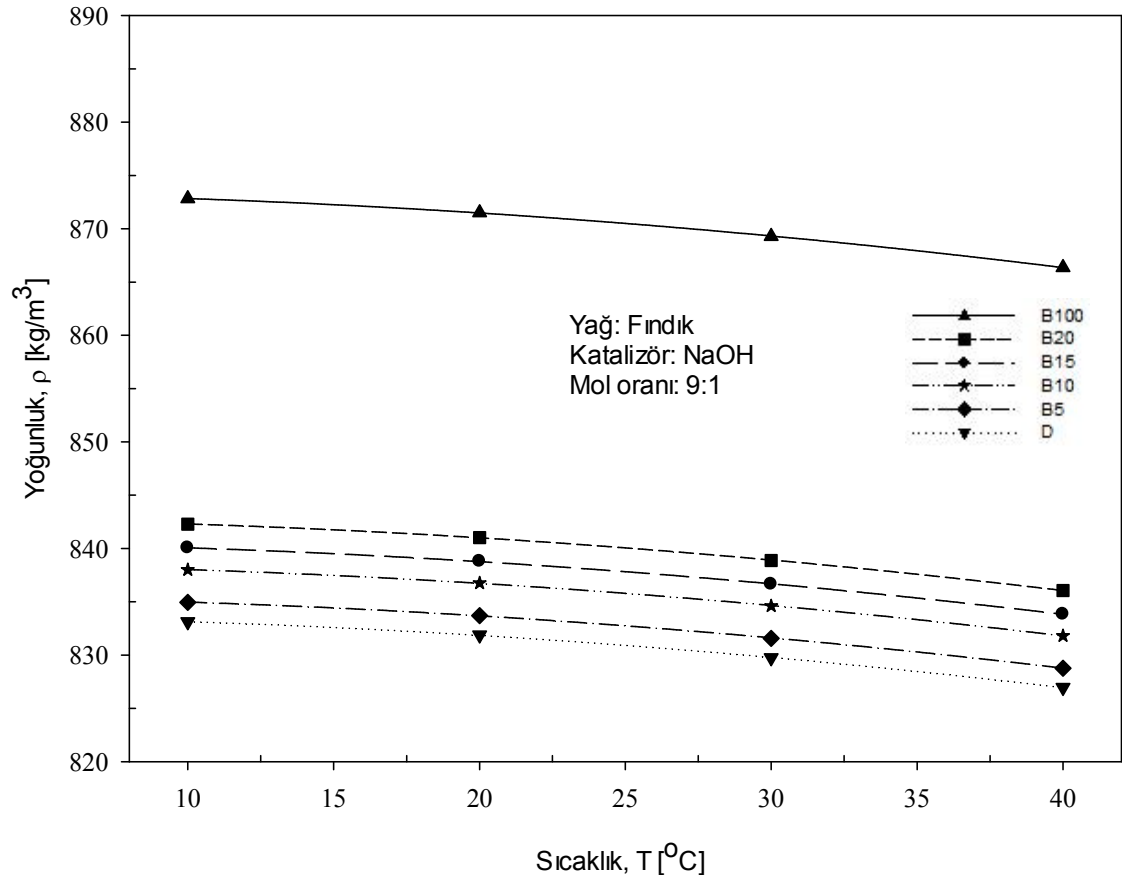
Şekil 3.111'de sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, burada da diğer kinematik viskozite-sıcaklık değişimi şekillerinde olduğu gibi, yoğunluk değerlerinin sıcaklık ile değişimlerinin doğrusala yakın karakterde ve yatay eğilimli (Şekil 3.110) olması nedeniyle dinamik viskozite değerlerinin sabit yoğunluk değerlerine bölünüyormuş gibi bir etki yaratması sonucu, kinematik viskozitelerin sıcaklıkla değişimleri de dinamik viskozitelerin sıcaklık ile değişimlerine (Şekil 3.109) oldukça benzer karakterde olduğu görülebilir. Diğer bir ifade ile kinematik viskozitelerin de artan sıcaklıkla birlikte eksponansiyel olarak azaldığı belirlenmiştir. Saf fındık yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin sıcaklıkla eksponansiyel değişiminin, mısır yağı biyodizelinden farklı olarak doğrusala oldukça yakın bir karakterde olduğu gözlenmektedir. Söz konusu kinematik viskozite değerlerine,

$$v = v(T) = y_0 + ae^{-bT} \quad (3.39)$$

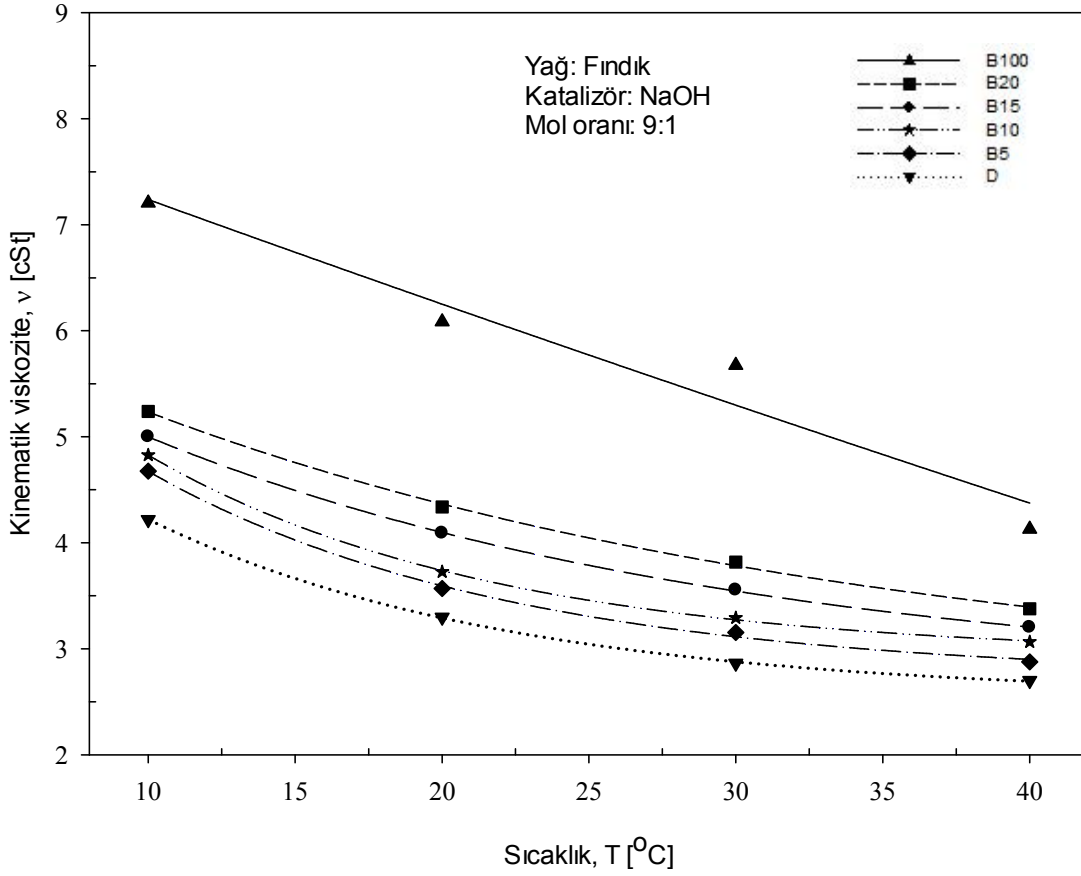
şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ , a ve b sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin belirlenen değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ) ve ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.



Şekil 3.109. Sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri



Şekil 3.110. Sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklığa göre değişimleri



Şekil 3.111. Sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri

### 3.5.1.1.2. Karışımdaki Hacimsel Biyodizel Oranına Göre Değişimler

Söz konusu biyodizel-dizel yakıtı karışımları için dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.112, 3.113 ve 3.114'te verilmektedir.

Şekil 3.112'de sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için dinamik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri verilmiştir. Daha önceden bahsedildiği gibi karışımdaki biyodizel oranının sıfır olması saf dizel yakıtına, 100 olması da saf biyodizele karşılık gelmektedir. Söz konusu şekil incelendiğinde, burada da diğer dinamik viskozite-karışımdaki hacimsel biyodizel oranı değişimi şekillerinde olduğu gibi, biyodizelin dinamik viskozitesinin dizel yakıtına göre

yüksek olması nedeniyle karışımdaki hacimsel biyodizel oranı arttıkça biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının viskozite değerlerinin arttığı görülmüştür. Viskozitelerin artan biyodizel oranı ile birlikte eksponansiyel olarak azalarak arttığı belirlenmiştir. Sıcaklık azaldıkça karışımdaki hacimsel biyodizel oranının artışı ile dinamik viskozitelerdeki değişimin doğrusal niteliğe yaklaştığı görülmüştür. Söz konusu dinamik viskozite değerlerine,

$$\mu = \mu(X) = y_0 + ae^{-bX} \quad (3.40)$$

şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

Şekil 3.113'te sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için yoğunluklarının karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri verilmiştir. Daha önceden bahsedildiği gibi karışımdaki biyodizel oranının sıfır olması saf dizel yakıtına, 100 olması da saf biyodizele karşılık gelmektedir. Söz konusu şekil incelendiğinde, burada da diğer yoğunluk-karışımdaki hacimsel biyodizel oranı değişimi şekillerinde olduğu gibi, biyodizelin yoğunluğu dizel yakıtınıninkine göre yüksek olduğundan, karışımdaki hacimsel biyodizel oranı arttıkça biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluk değerlerinin beklendiği gibi doğrusal olarak arttığı görülmüştür. Ayrıca, belirli bir karışım oranı için sıcaklık azaldıkça yoğunluk değerleri birbirlerine yaklaşmaktadır. Söz konusu yoğunluk değerlerine,

$$\rho = \rho(X) = y_0 + aX \quad (3.41)$$

şeklindeki bir-boyutlu doğrusal fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$  ve  $a$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri,

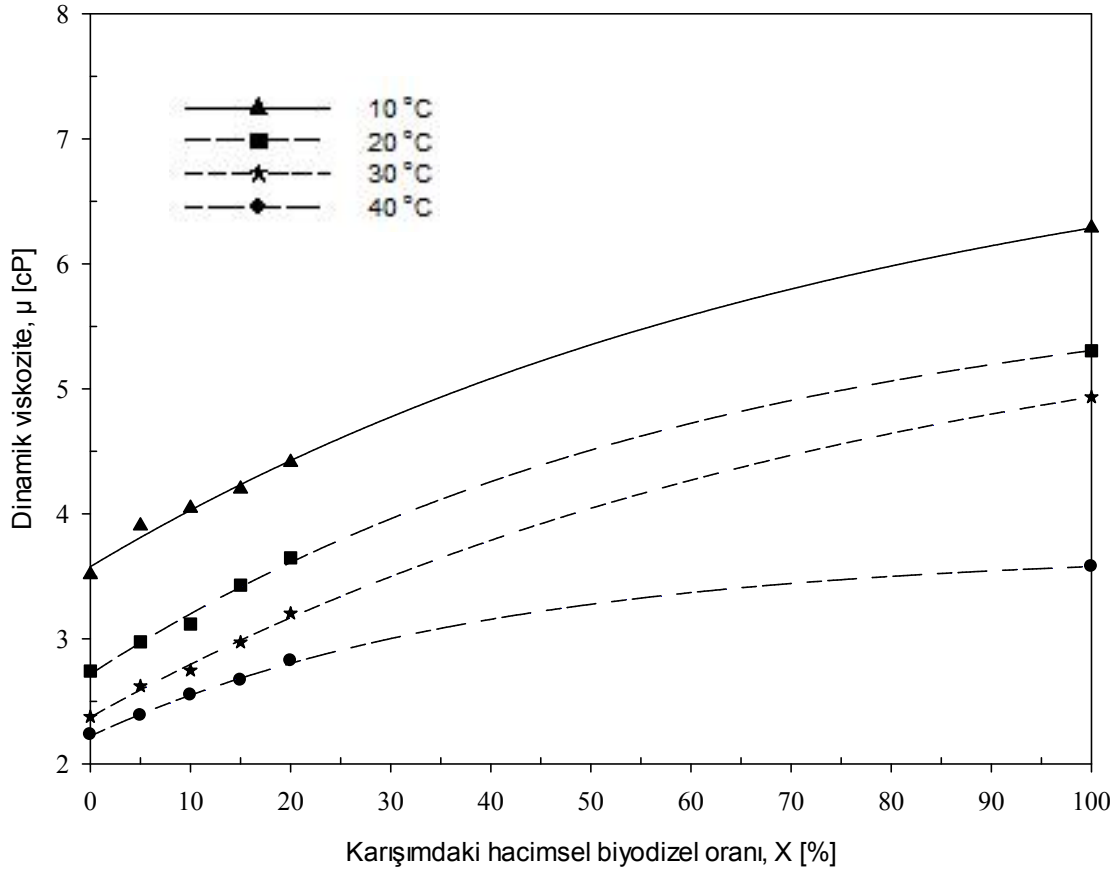
korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

Şekil 3.114'te sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için kinematik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri verilmiştir. Burada da karışımdaki biyodizel oranının sıfır olması saf dizel yakıtına, 100 olması da saf biyodizele karşılık gelmektedir. Söz konusu şekil incelendiğinde, yoğunluk değerlerinin karışım oranı ile değişimlerinin (Şekil 3.113) doğrusal olmasıyla birlikte eğimlerinin çok küçük olması nedeniyle dinamik viskozite değerlerinin sabit yoğunluk değerlerine bölünüyormuş gibi bir etki yaratması sonucu kinematik viskozitelerin karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ile değişimleri de dinamik viskozitenin karışımdaki hacimsel biyodizel oranı (Şekil 3.112) ile değişimlerine oldukça benzer karakterde elde edilmiştir. Diğer bir ifade ile, burada da diğer kinematik viskozite-karışımdaki hacimsel biyodizel oranı değişimi şekillerinde olduğu gibi, kinematik viskozitelerin de artan biyodizel oranı ile eksponansiyel olarak azalarak arttığı belirlenmiştir. Burada da sıcaklık azaldıkça karışımdaki hacimsel biyodizel oranının artışı ile kinematik viskozitelerdeki değişimin doğrusal niteliğe yaklaştığı görülmüştür. Söz konusu kinematik viskozite değerlerine,

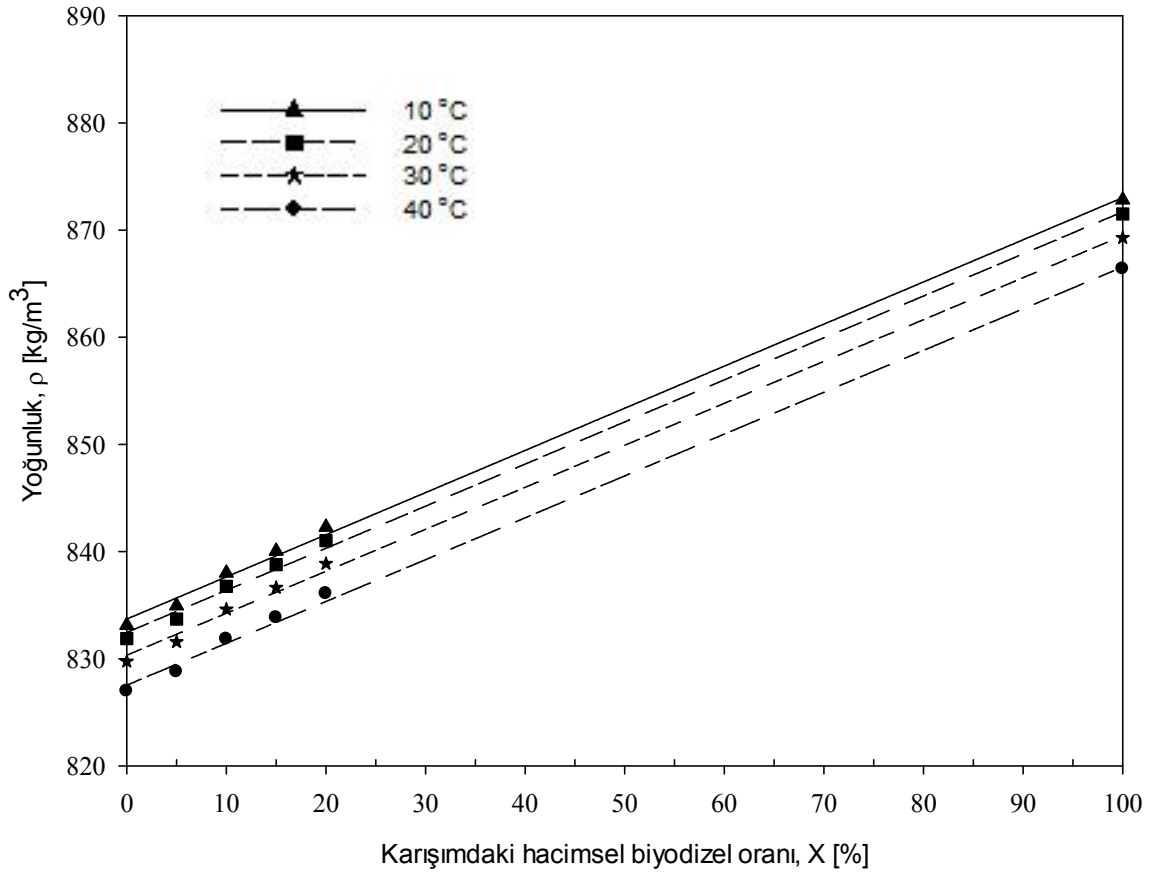
$$v = v(X) = y_0 + ae^{-bX} \quad (3.42)$$

şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

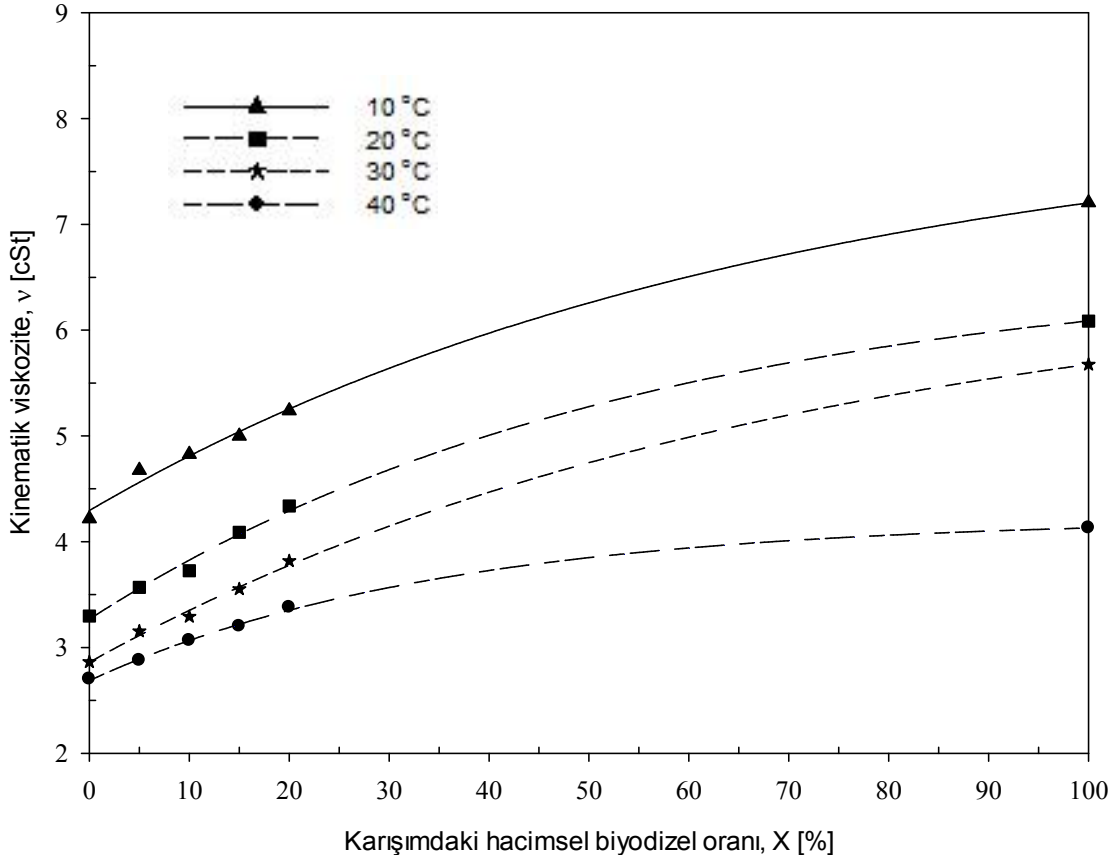




Şekil 3.112. Sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için dinamik viskozitelerinin karışımdeki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.113. Sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için yoğunluklarının karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.114. Sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için kinematik viskozitelerinin karışımdeki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri

### 3.5.1.1.3. Karışımdeki Hacimsel Biyodizel Oranı ve Sıcaklığa Göre Değişimler

Şekil 3.115'te, ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdeki biyodizel oranına göre değişimleri iki-boyutlu eş-viskozite eğrileri şeklinde verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, ölçülen değerlere göre dinamik viskozitelerin karışımdeki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, farklı karakterdeki iki ayrı bölge görülebilir. Birinci bölge olarak adlandırılan yüksek sıcaklık ve düşük biyodizel oranı bölgesinde eş-viskozite eğrileri daha seyrek ve yataya yakın iken; ikinci bölge olarak adlandırılan düşük sıcaklık ve yüksek biyodizel oranı bölgesinde eğriler daha sık ve dikeye yakın karakterdedir. Buna göre, birinci bölgede sıcaklıktaki büyük bir değişime karşılık

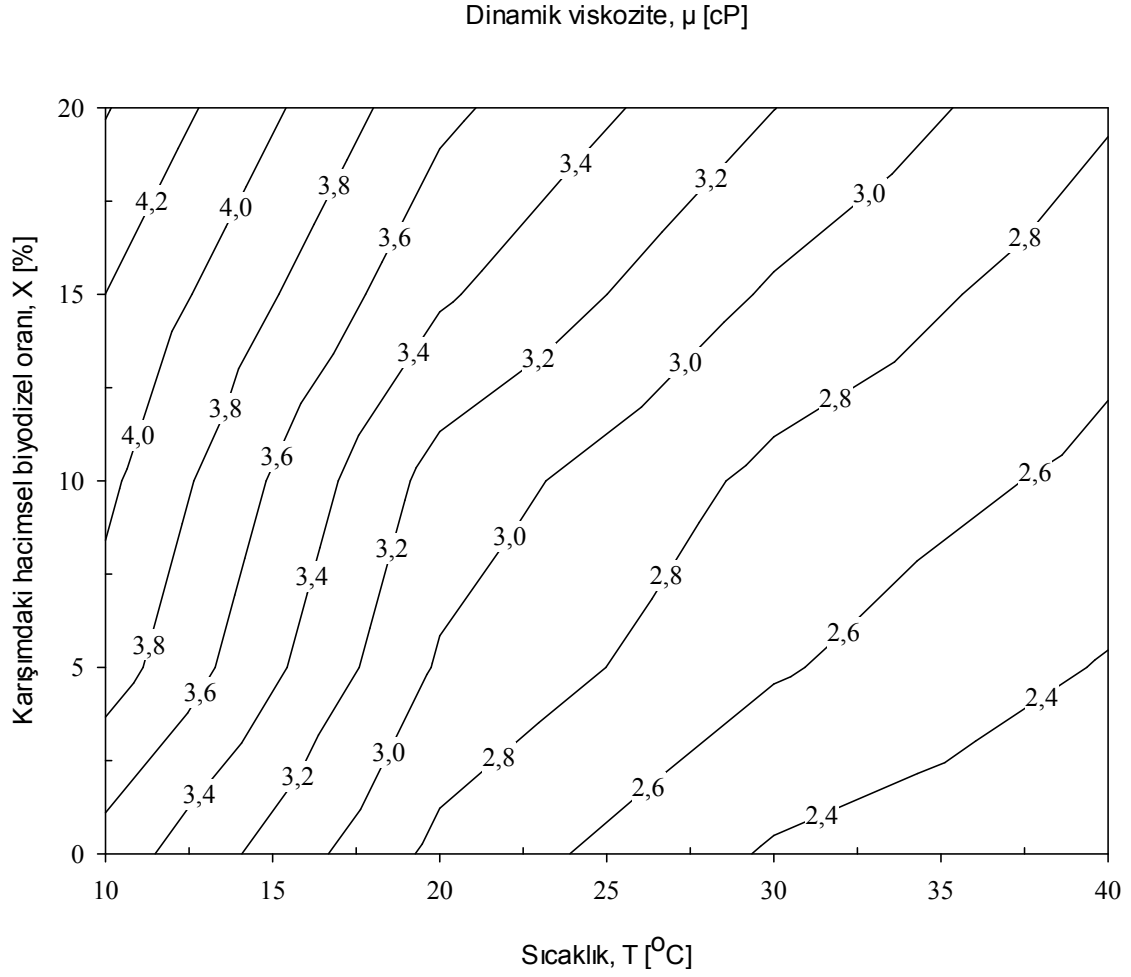
viskozitede küçük bir değişim görülürken, ikinci bölgede tam tersine sıcaklıktaki küçük bir değişime karşılık viskozitede daha büyük değişim gözlemlenmektedir.

Şekil 3.116'da, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin ölçüm değerlerine uyumlanan iki-boyutlu  $\mu = \mu(T, X)$  fonksiyonundan elde edilen değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimlerine ilişkin eş-viskozite eğrileri verilmektedir. Hatırlanacağı üzere karışımdaki hacimsel biyodizel oranı olarak %0, 5, 10, 15, 20 ve 100 değerleri parametre olarak seçilmişti. Eğri uyumları için % 20 ile % 100 arasındaki ölçüm yapılmamış geniş bölgenin hassasiyeti azaltmaması için söz konusu eğriler sadece sık ölçüm yapılan % 0-20 değerlerini kapsayacak şekilde çizilmiştir. Sıcaklıklar için ise yine ölçüm yapılmış olan 10-40°C aralığı dikkate alınmıştır. Deneysel veriler incelendiğinde, saf biyodizel ve dizel yakıtı ile biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranıyla değişimine,

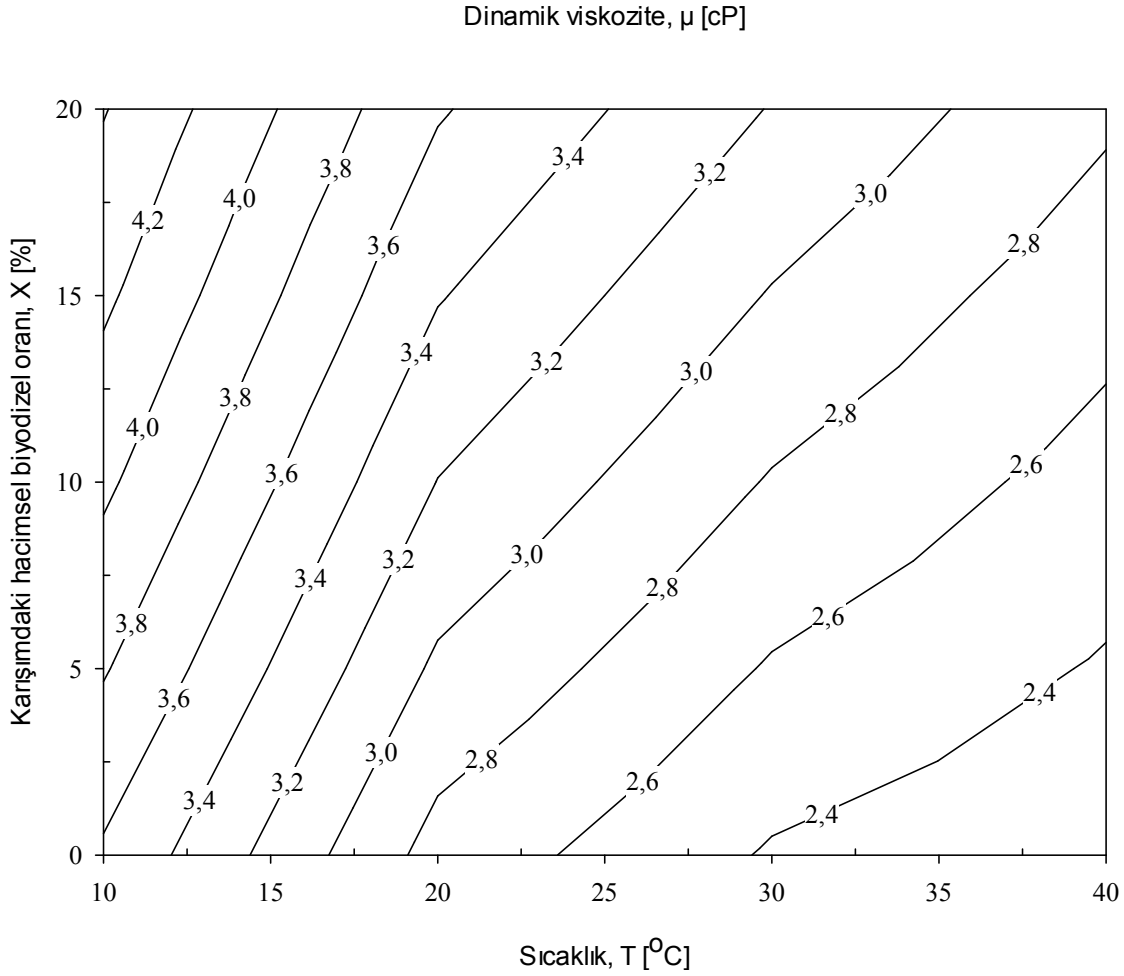
$$\mu = \mu(T, X) = a + bT + cX + dT^2 + eTX + fX^2 + gT^3 + hT^2X + kTX^2 \quad (3.43)$$

şeklinde X [%] karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre 2. dereceden, T [°C] sıcaklığına ise 3. dereceden bağımlı iki-boyutlu fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada a, b, ..., k sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir. Söz konusu eşitlikten elde edilen dinamik viskozite değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimi grafiği incelendiğinde, hesaplanan değerlere göre dinamik viskozitelerin karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, farklı karakterdeki iki ayrı bölge görülebilir. Birinci bölge olarak adlandırılan yüksek sıcaklık ve düşük biyodizel oranı bölgesinde eş-viskozite eğrileri daha seyrek ve yataya yakın iken; ikinci bölge olarak adlandırılan düşük sıcaklık ve yüksek biyodizel oranı bölgesinde eğriler daha sık ve dikeye yakın karakterdedir. Buna göre, birinci bölgede sıcaklıktaki büyük bir değişime karşılık viskozitede küçük bir değişim görülürken yani viskozite değişiminin sıcaklığa karşı hassasiyeti az iken, ikinci bölgede tam tersine sıcaklıktaki küçük bir değişime karşılık viskozitede daha büyük

değişim gözlemlendiğinden viskozitenin sıcaklık değişimine karşı duyarlılığının daha fazla olduğu söylenebilir.



Şekil 3.115. Ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri



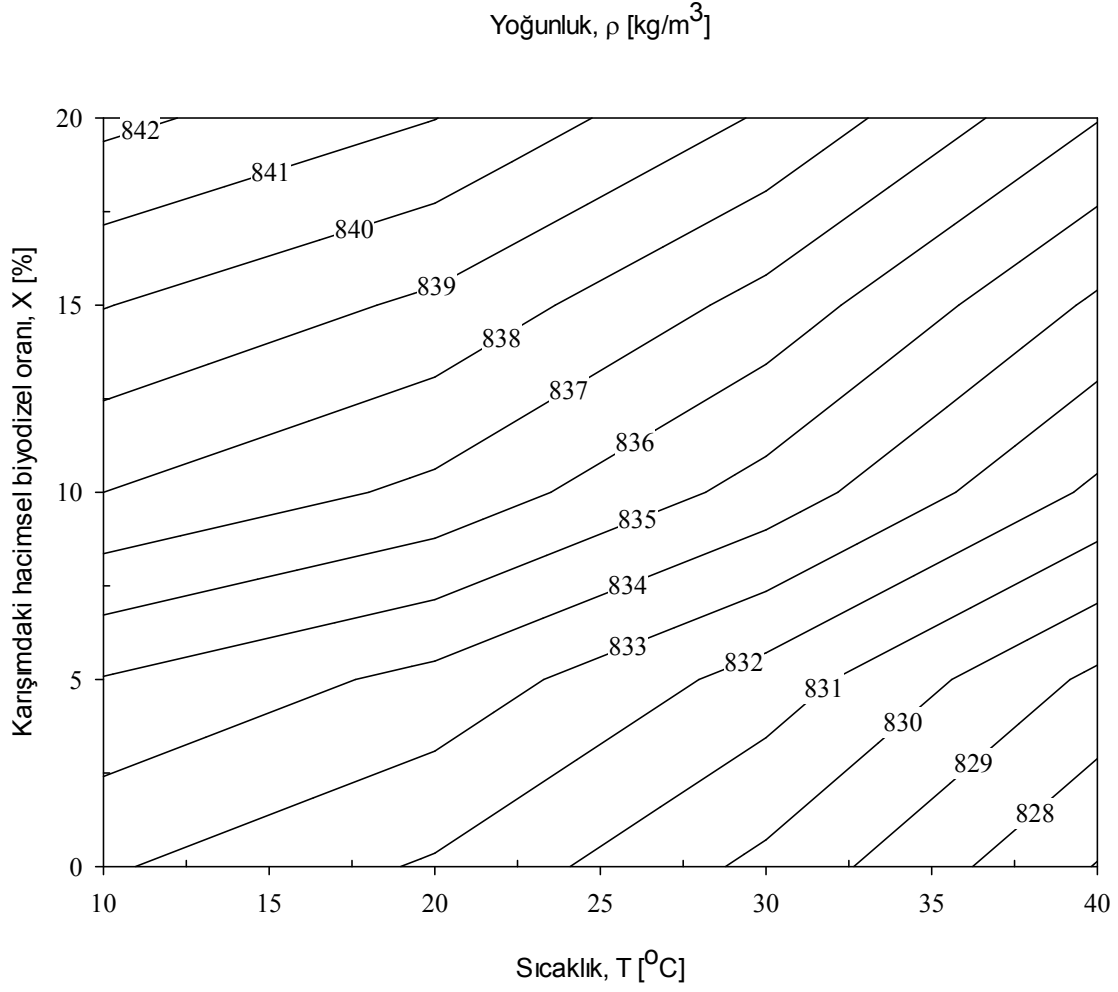
Şekil 3.116. Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri

Şekil 3.117’de, ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluk değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri iki-boyutlu eş-yoğunluk eğrileri şeklinde verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, ölçülen değerlere göre yoğunlukların karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, eş-yoğunluk eğrileri aralarındaki mesafeler yaklaşık olarak sabit olacak şekilde (sabit gradyana sahip), yoğunluğun karışımdaki biyodizel oranına göre değişiminin doğrusal, sıcaklığa göre değişiminin ise parabolik karakterde olduğu belirlenmiştir. Bu durum daha belirgin olarak Şekil 3.118’de görülmektedir.

Şekil 3.118’de, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluk değerlerinin ölçüm değerlerine uyumlanan iki-boyutlu  $\rho = \rho(T, X)$  fonksiyonundan elde edilen değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimlerine ilişkin eş-yoğunluk eğrileri verilmektedir. Yukarıda da belirtildiği gibi karışımdaki hacimsel biyodizel oranı olarak %0, 5, 10, 15, 20 ve 100 değerleri parametre olarak seçilmiştir. Eğri uyumlarken % 20 ile % 100 arasındaki ölçüm yapılmamış geniş bölgenin hassasiyeti azaltmaması için söz konusu eğriler sadece sık ölçüm yapılan % 0-20 değerlerini kapsayacak şekilde çizilmiştir. Yoğunluk değerlerinin sıcaklığa göre değişiminin (Şekil 3.110) parabolik, karışımdaki biyodizel oranına göre değişiminin ise doğrusal (Şekil 3.113) olduğu belirtilmiştir. Buna göre, hesaplanan değerlere göre yoğunlukların karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, sabit eş-yoğunluk eğrisi için, karışımın sıcaklığı arttıkça karışımdaki biyodizel oranı parabolik olarak artmaktadır. Ayrıca, sabit bir sıcaklıkta yoğunluğu bir birim değiştirmek için karışımdaki biyodizel oranının yaklaşık sabit bir değerde değiştirilmesi gerekirken, sabit bir karışım oranında yoğunluğu bir birim değiştirmek için düşük sıcaklıklarda daha fazla sıcaklık değişimi, yüksek sıcaklıklarda ise daha az sıcaklık değişimi gerekmektedir. Deney sonuçları incelendiğinde, yoğunlukların sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranıyla değişimine,

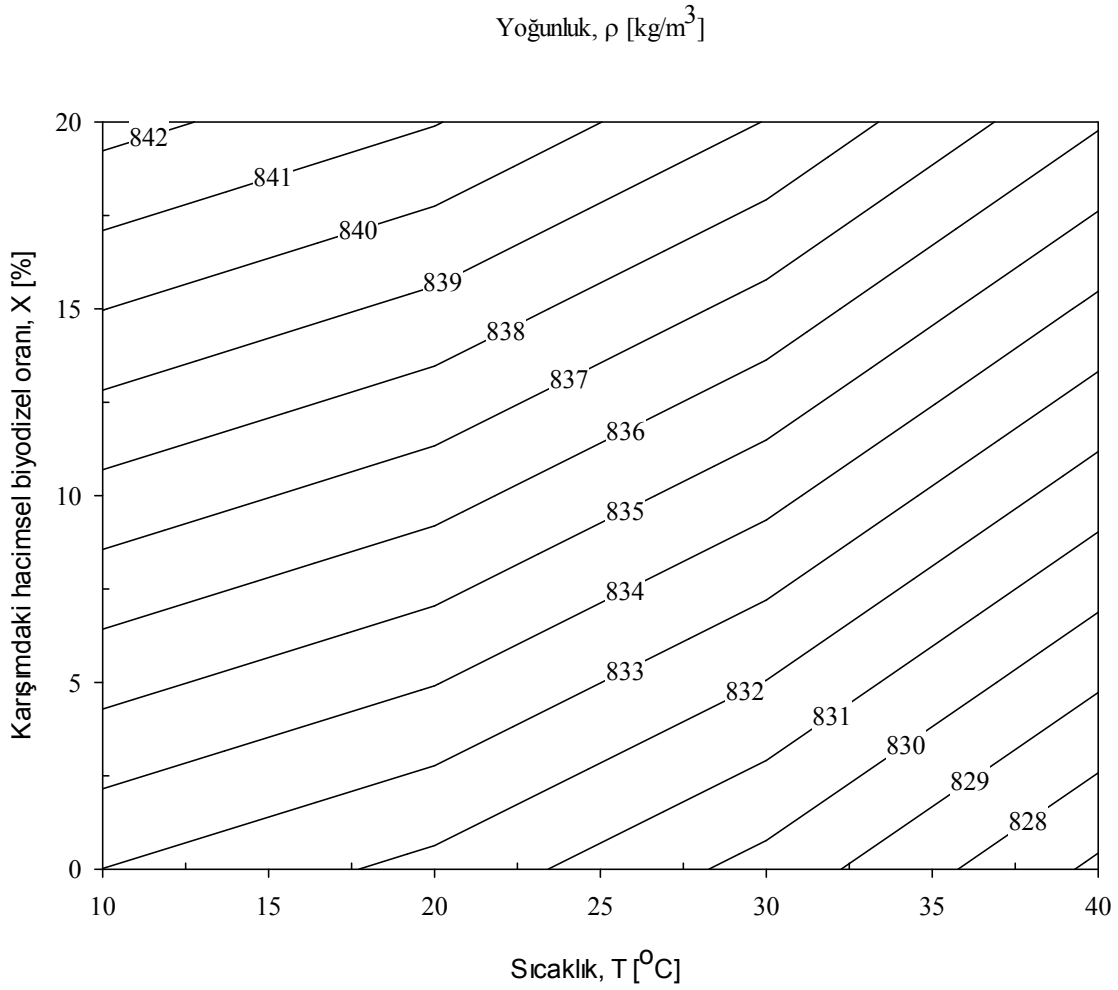
$$\rho = \rho(T, X) = a + bT + cX + dT^2 + eTX \quad (3.44)$$

şeklinde X [%] karışımdaki hacimsel biyodizel oranına 1. dereceden ve T [°C] sıcaklığına 2. dereceden bağımlı iki-boyutlu fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada a, b, c, d ve e sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.



Şekil 3.117. Ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımdeki biyodizel oranına göre değişimleri





Şekil 3.118. Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri

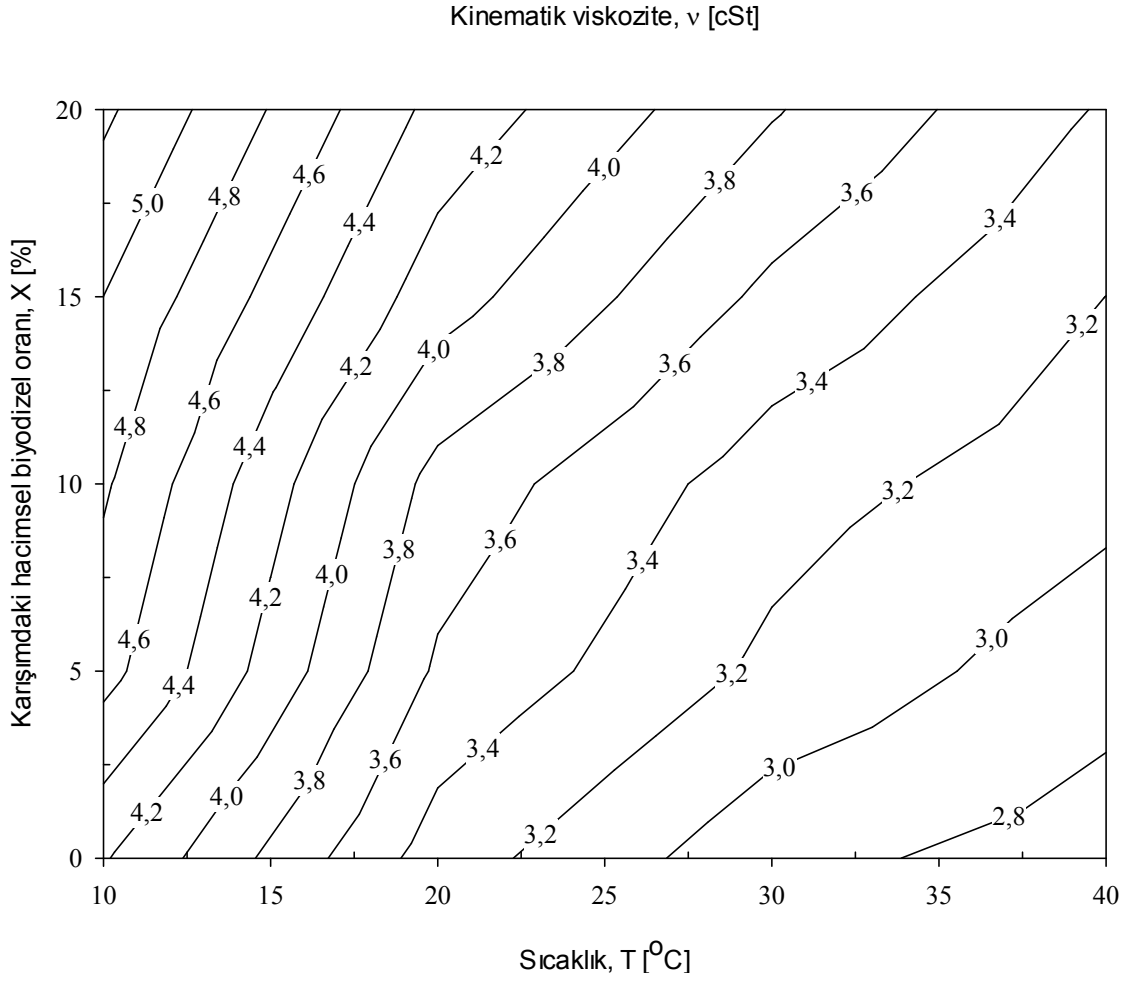
Şekil 3.119’da, ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri iki-boyutlu eş-viskozite eğrileri şeklinde verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, ölçülen değerlere göre kinematik viskozitelerin karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, yoğunluk değerlerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimlerinin doğrusal, sıcaklığa göre değişimlerinin ise doğrusala yakın olması nedeniyle dinamik viskozite değerlerinin sabit yoğunluk değerlerine bölünüyormuş gibi bir etki yaratması sonucu, kinematik viskozitelerin sıcaklık

ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri de dinamik viskozitelerin değişimlerine (Şekil 3.115) oldukça benzer karakterde olduğu görülebilir.

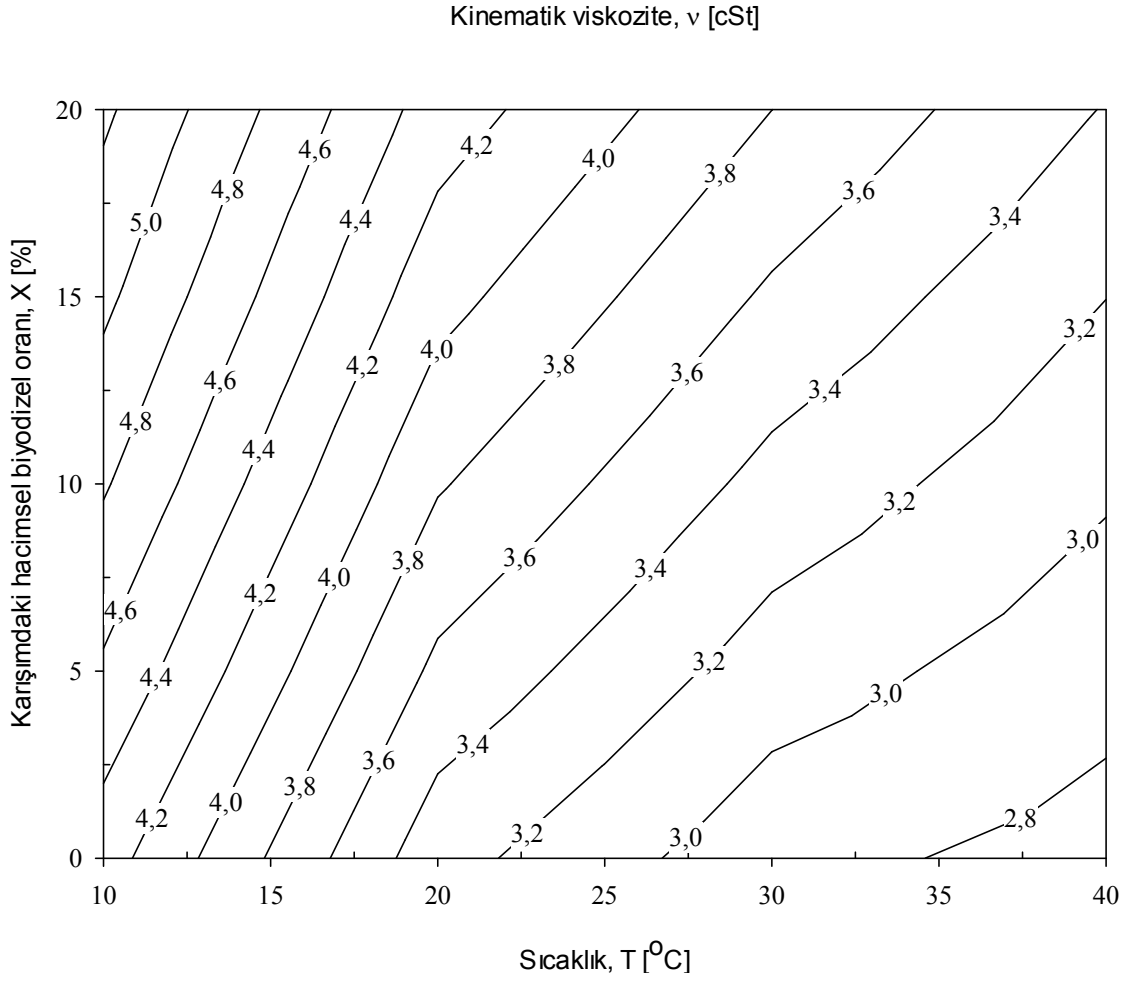
Şekil 3.120’de, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin ölçüm değerlerine uyumlanan iki-boyutlu  $v = v(T, X)$  fonksiyonundan elde edilen değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimlerine ilişkin eş-viskozite eğrileri verilmektedir. Hatırlanacağı üzere karışımdaki hacimsel biyodizel oranı olarak %0, 5, 10, 15, 20 ve 100 değerleri parametre olarak seçilmiştir. Eğri uyumlar için %20 ile %100 arasındaki ölçüm yapılmamış geniş bölgenin hassasiyeti azaltmaması için söz konusu eğriler sadece sık ölçüm yapılan % 0-20 değerlerini kapsayacak şekilde çizilmiştir. Deneysel veriler incelendiğinde, saf biyodizel ve dizel yakıtı ile biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranıyla değişimine,

$$v = v(T, X) = a + bT + cX + dT^2 + eTX + fX^2 + gT^3 + hT^2X + kTX^2 \quad (3.45)$$

şeklinde X [%] karışımdaki hacimsel biyodizel oranına 2. dereceden, T [°C] sıcaklığına ise 3. dereceden bağımlı iki-boyutlu fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada a, b, ..., k sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, hesaplanan değerlere göre kinematik viskoziteleri karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, söz konusu şekilde de farklı karakterdeki iki ayrı bölge görülebilir. Birinci bölge olarak adlandırılan yüksek sıcaklık ve düşük biyodizel oranı bölgesinde eş-viskozite eğrileri daha seyrek ve yataya yakın iken; ikinci bölge olarak adlandırılan düşük sıcaklık ve yüksek biyodizel oranı bölgesinde eğriler daha sık ve dikeye yakın karakterdedir. Buna göre, birinci bölgede sıcaklıktaki büyük bir değişime karşılık viskozitede küçük bir değişim görülürken yani viskozite değişiminin sıcaklığa karşı hassasiyeti az iken, ikinci bölgede tam tersine sıcaklıktaki küçük bir değişime karşılık viskozitede daha büyük değişim gözlemlendiğinden viskozitenin sıcaklık değişimine karşı duyarlılığının daha fazla olduğu söylenebilir.



Şekil 3.119. Ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.120. Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, sodyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri

### 3.5.1.2. Teorik Olarak En Yüksek Metil Ester Verimine Sahip Biyodizel İçin Değişimler

Sodyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelleri içerisinde teorik olarak en yüksek metil ester verimine sahip biyodizel ile dizel yakıtı hacimsel olarak belirli oranlarda (% 5, 10, 15, 20) karıştırılarak elde edilen yakıt karışımlarının çeşitli sıcaklıklardaki (10, 20, 30, 40 $^{\circ}$ C) dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerleri belirlenmiştir. Söz konusu biyodizelin üretim parametreleri aşağıdaki gibidir:

Yağ: Fındık yağı

Katalizör türü: NaOH

Katalizör oranı: %1,00

Reaksiyon sıcaklığı: 50°C

Reaksiyon süresi: 60 dakika

Kullanılan alkol/yağ mol oranı: 6:1

### 3.5.1.2.1. Sıcaklığa Göre Değişimler

Söz konusu biyodizel-dizel yakıtı karışımları için dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin sıcaklığa göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.121, 3.122 ve 3.123'te verilmektedir.

Şekil 3.121'de sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, burada da diğer dinamik viskozite-sıcaklık değişimi şekillerinde olduğu gibi, saf biyodizel, biyodizel-dizel yakıtı karışımları ve saf dizel yakıtının viskozite değerlerinin sıcaklık arttıkça eksponansiyel olarak azaldığı görülmüştür. Düşük sıcaklıklarda saf biyodizel ve saf dizel yakıtının dinamik viskoziteleri arasındaki fark daha fazla iken, artan sıcaklıkla birlikte eğriler birbirlerine eksponansiyel olarak yaklaşmaktadır. Belirtilen mol oranı kullanılarak (6:1) üretilen saf fındık yağı biyodizelinin de dinamik viskozitesinin sıcaklıkla eksponansiyel değişiminin, mısır yağı biyodizelinden farklı olarak doğrusala oldukça yakın bir karakterde olduğu gözlenmektedir. Söz konusu dinamik viskozite değerlerine,

$$\mu = \mu(T) = y_0 + ae^{-bT} \quad (3.46)$$

şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

Şekil 3.122'de sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklığa göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil

incelendiğinde, burada da diğer yoğunluk-sıcaklık değişimi şekillerinde olduğu gibi, yoğunluk değerlerinin sıcaklık arttıkça azaldığı, ölçüm yapılan sıcaklık aralığında yoğunluk değerlerinin sıcaklık arttıkça doğrusala yakın olmakla birlikte ikinci dereceden bir değişim gösterdiği belirlenmiştir. Bu nedenle söz konusu yoğunluk değerlerine,

$$\rho = \rho(T) = y_0 + aT + bT^2 \quad (3.47)$$

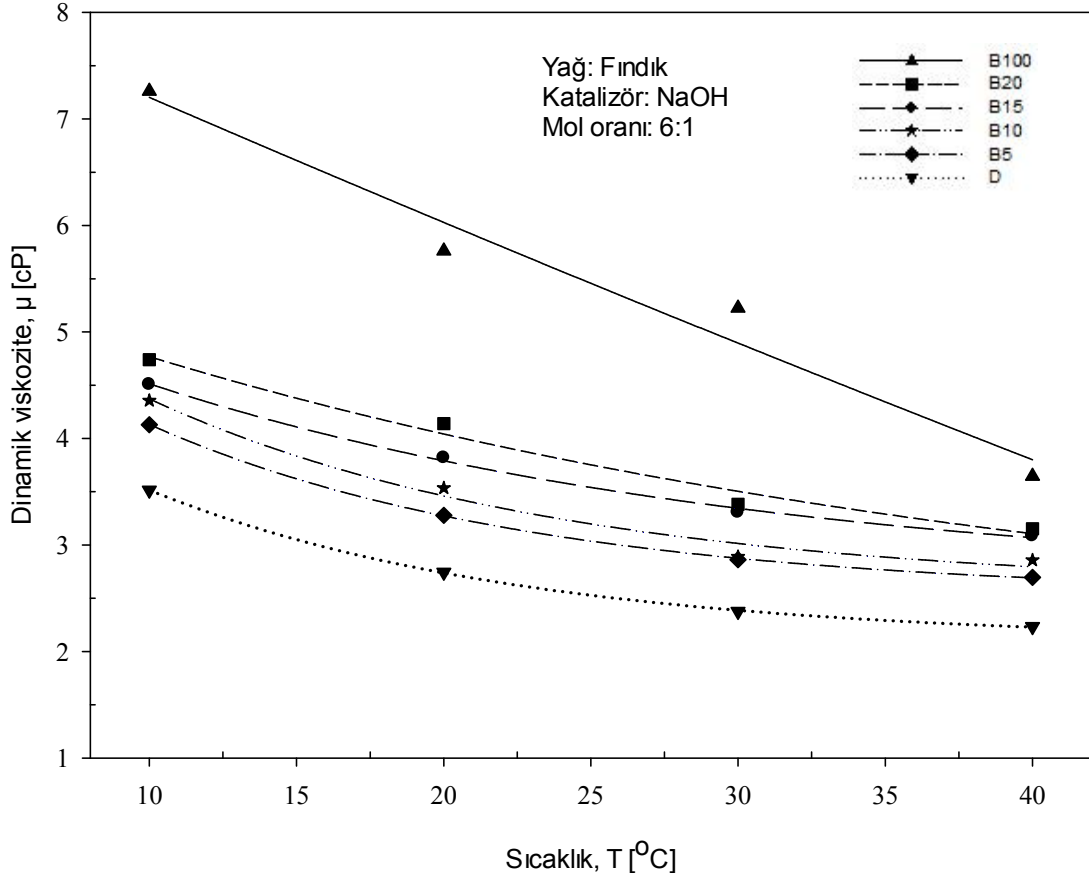
şeklindeki bir-boyutlu parabolik bir fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

Şekil 3.123'te sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, burada da diğer kinematik viskozite-sıcaklık değişimi şekillerinde olduğu gibi, yoğunluk değerlerinin sıcaklık ile değişimlerinin doğrusala yakın karakterde ve yatay eğilimli (Şekil 3.122) olması nedeniyle dinamik viskozite değerlerinin sabit yoğunluk değerlerine bölünüyormuş gibi bir etki yaratması sonucu, kinematik viskozitelerin sıcaklıkla değişimleri de dinamik viskozitelerin sıcaklık ile değişimlerine (Şekil 3.121) oldukça benzer karakterde olduğu görülebilir. Diğer bir ifade ile kinematik viskozitelerin de artan sıcaklıkla birlikte eksponansiyel olarak azaldığı belirlenmiştir. Belirtilen mol oranı kullanılarak (6:1) üretilen saf fındık yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin sıcaklıkla eksponansiyel değişiminin, mısır yağı biyodizelinden farklı olarak doğrusala oldukça yakın bir karakterde olduğu gözlenmektedir. Söz konusu kinematik viskozite değerlerine,

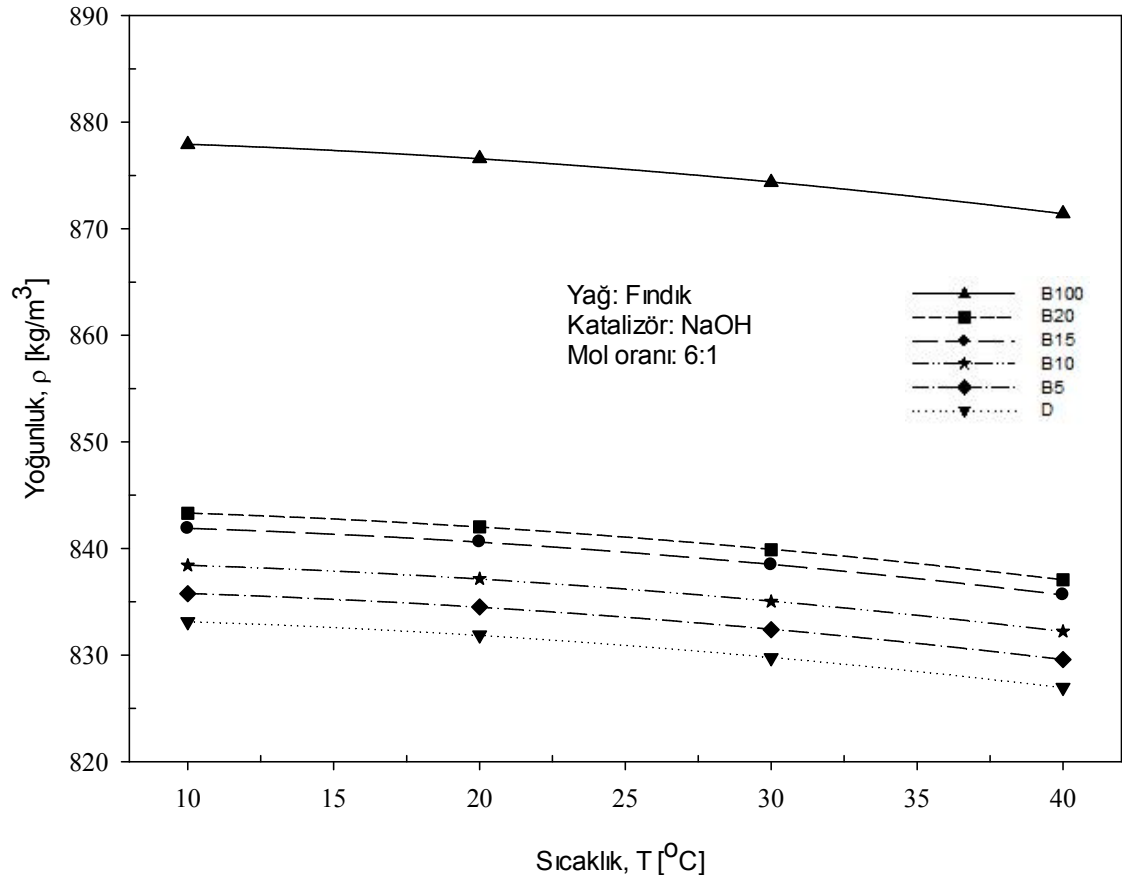
$$v = v(T) = y_0 + ae^{-bT} \quad (3.48)$$

şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki

sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ) ve ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

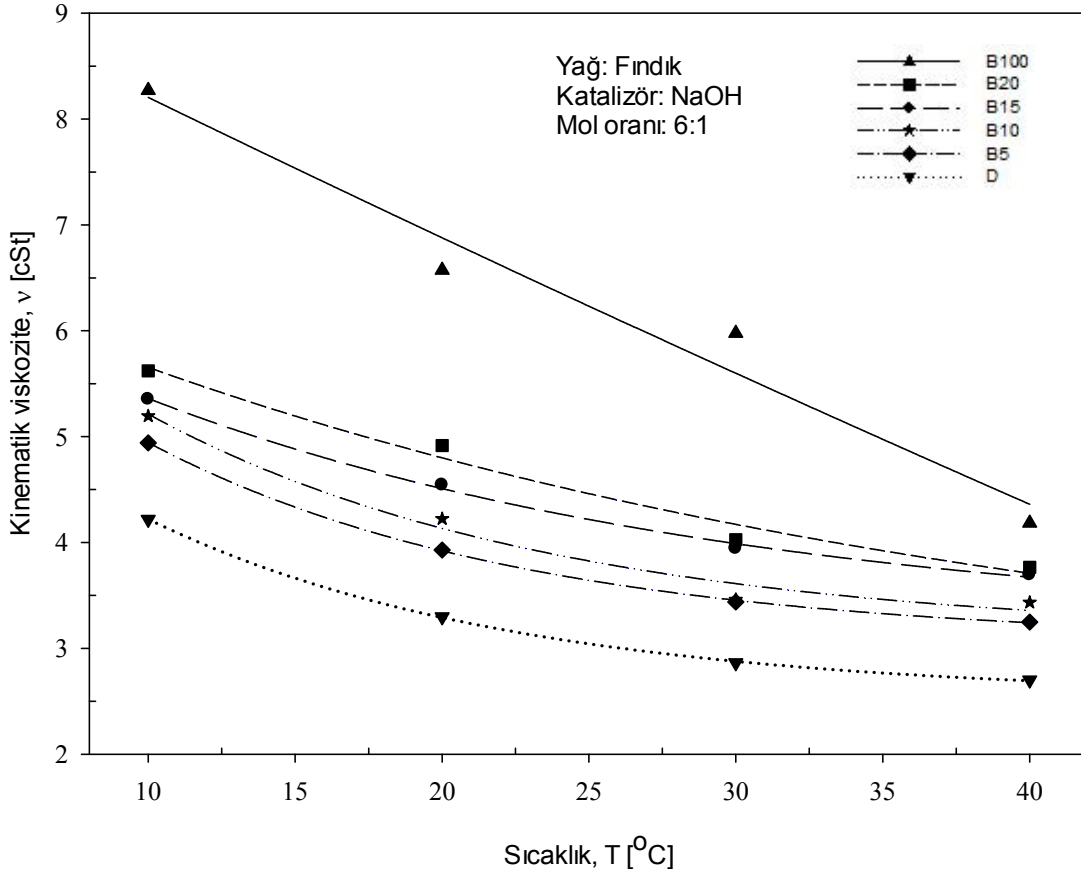


Şekil 3.121. Sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri



Şekil 3.122. Sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklığa göre değişimleri





Şekil 3.123. Sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri

### 3.5.1.2.2. Karışımdaki Hacimsel Biyodizel Oranına Göre Değişimler

Söz konusu biyodizel-dizel yakıtı karışımları için dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.124, 3.125 ve 3.126'da verilmektedir.

Şekil 3.124'te sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için dinamik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri verilmiştir. Daha önceden bahsedildiği gibi karışımdaki biyodizel oranının sıfır olması saf dizel yakıtına, 100 olması da saf biyodizele karşılık gelmektedir. Söz konusu şekil incelendiğinde, burada da diğer dinamik viskozite-karışımdaki hacimsel biyodizel oranı değişimi şekillerinde olduğu gibi, biyodizelin dinamik viskozitesinin dizel yakıtına göre

yüksek olması nedeniyle karışımdaki hacimsel biyodizel oranı arttıkça biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının viskozite değerlerinin arttığı görülmüştür. Viskozitelerin artan biyodizel oranı ile birlikte eksponansiyel olarak azalarak arttığı belirlenmiştir. Sıcaklık azaldıkça karışımdaki hacimsel biyodizel oranının artışı ile dinamik viskozitelerdeki değişimin doğrusal niteliğe yaklaştığı görülmüştür. Ayrıca, 30 ve 40°C sıcaklıklarda %0, 10 ve 15 hacimsel biyodizel oranlarındaki dinamik viskoziteler birbirlerine yakın değerler almıştır. Söz konusu dinamik viskozite değerlerine,

$$\mu = \mu(X) = y_0 + ae^{-bX} \quad (3.49)$$

şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

Şekil 3.125'te sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için yoğunluklarının karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri verilmiştir. Daha önceden bahsedildiği gibi karışımdaki biyodizel oranının sıfır olması saf dizel yakıtına, 100 olması da saf biyodizele karşılık gelmektedir. Söz konusu şekil incelendiğinde, burada da diğer yoğunluk-karışımdaki hacimsel biyodizel oranı değişimi şekillerinde olduğu gibi, biyodizelin yoğunluğu dizel yakıtınıninkine göre yüksek olduğundan, karışımdaki hacimsel biyodizel oranı arttıkça biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluk değerlerinin beklendiği gibi doğrusal olarak arttığı görülmüştür. Ayrıca, belirli bir karışım oranı için sıcaklık azaldıkça yoğunluk değerleri birbirlerine yaklaşmaktadır. Söz konusu yoğunluk değerlerine,

$$\rho = \rho(X) = y_0 + aX \quad (3.50)$$

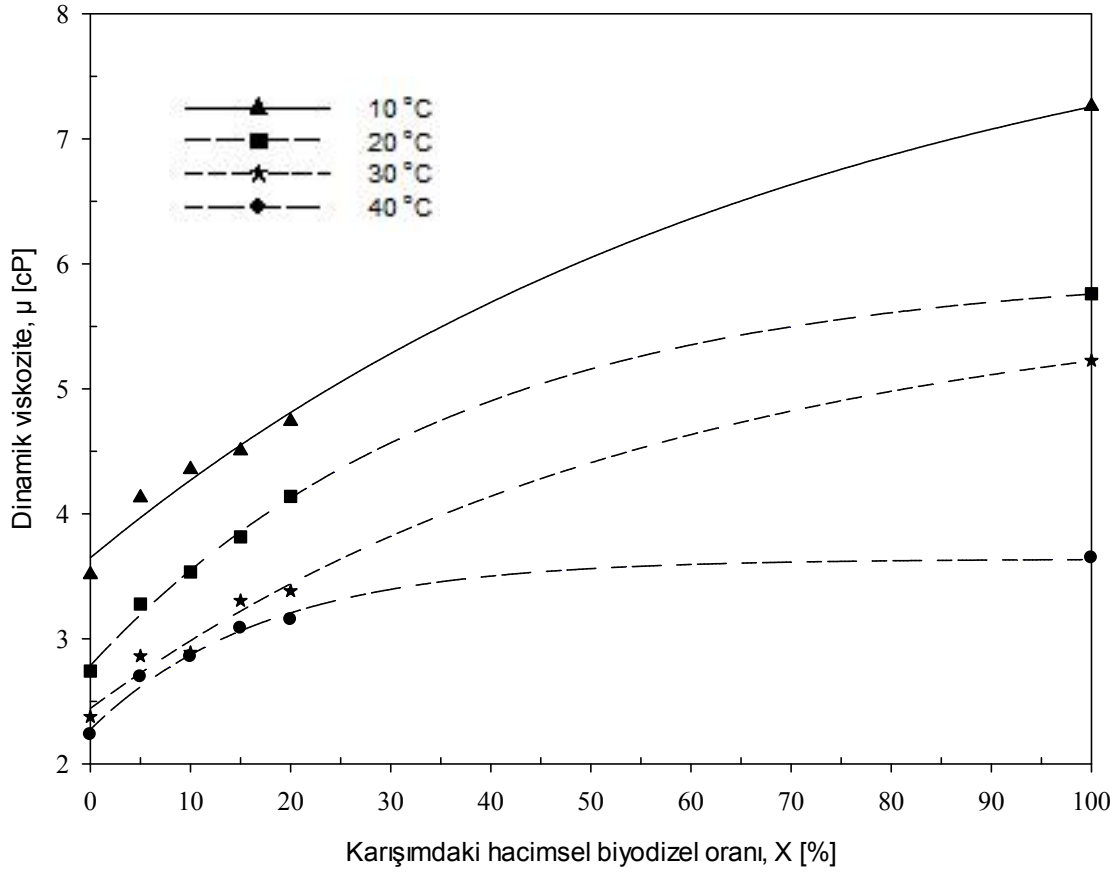
şeklindeki bir-boyutlu doğrusal fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$  ve  $a$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri,

korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

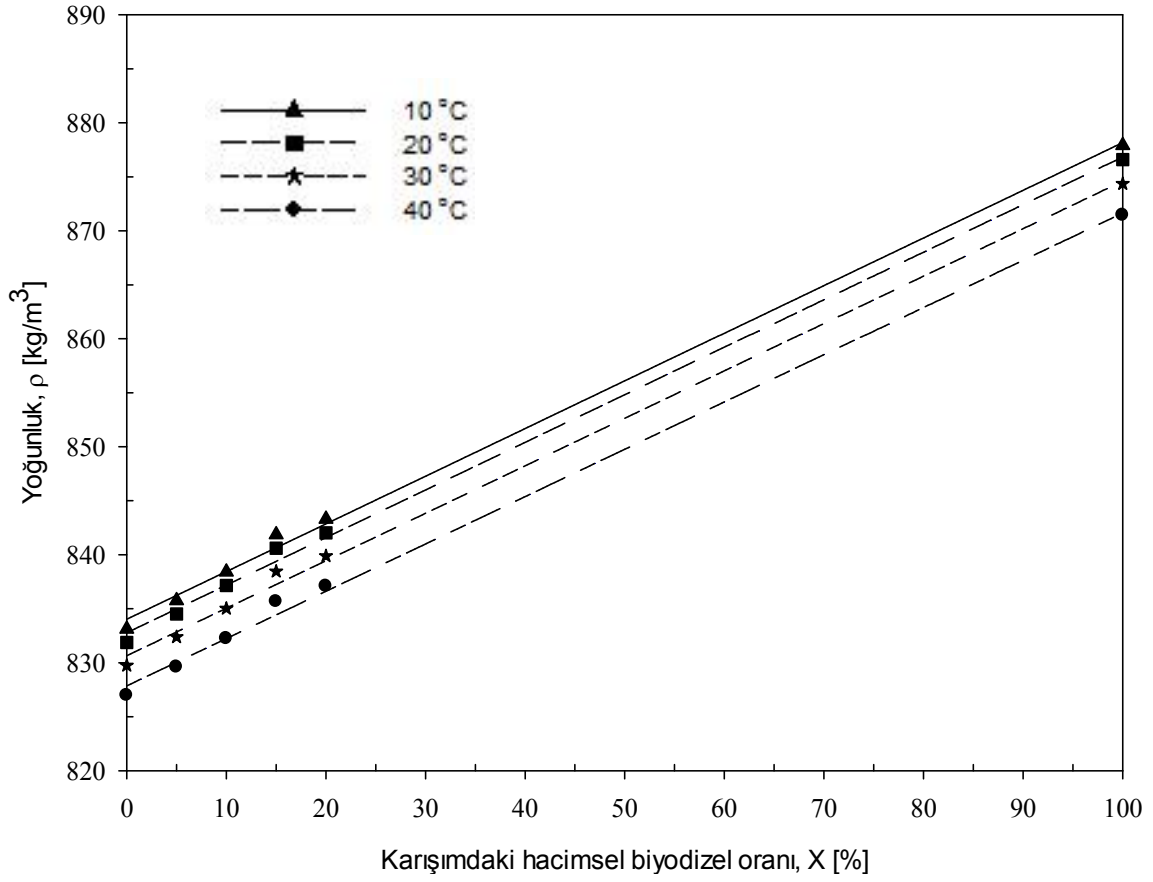
Şekil 3.126'da sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için kinematik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri verilmiştir. Burada da karışımdaki biyodizel oranının sıfır olması saf dizel yakıtına, 100 olması da saf biyodizele karşılık gelmektedir. Söz konusu şekil incelendiğinde, yoğunluk değerlerinin karışım oranı ile değişimlerinin (Şekil 3.125) doğrusal olmasıyla birlikte eğimlerinin çok küçük olması nedeniyle dinamik viskozite değerlerinin sabit yoğunluk değerlerine bölünüyormuş gibi bir etki yaratması sonucu kinematik viskozitelerin karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ile değişimleri de dinamik viskozitenin karışımdaki hacimsel biyodizel oranı (Şekil 3.124) ile değişimlerine oldukça benzer karakterde elde edilmiştir. Diğer bir ifade ile, burada da diğer kinematik viskozite-karışımdaki hacimsel biyodizel oranı değişimi şekillerinde olduğu gibi, kinematik viskozitelerin de artan biyodizel oranı ile eksponansiyel olarak azalarak arttığı belirlenmiştir. Burada da sıcaklık azaldıkça karışımdaki hacimsel biyodizel oranının artışı ile kinematik viskozitelerdeki değişimin doğrusal niteliğe yaklaştığı görülmüştür. Ayrıca, 30 ve 40°C sıcaklıklarda %0, 10 ve 15 hacimsel biyodizel oranlarındaki kinematik viskoziteler birbirlerine yakın değerler almıştır Söz konusu kinematik viskozite değerlerine,

$$v = v(X) = y_0 + ae^{-bX} \quad (3.51)$$

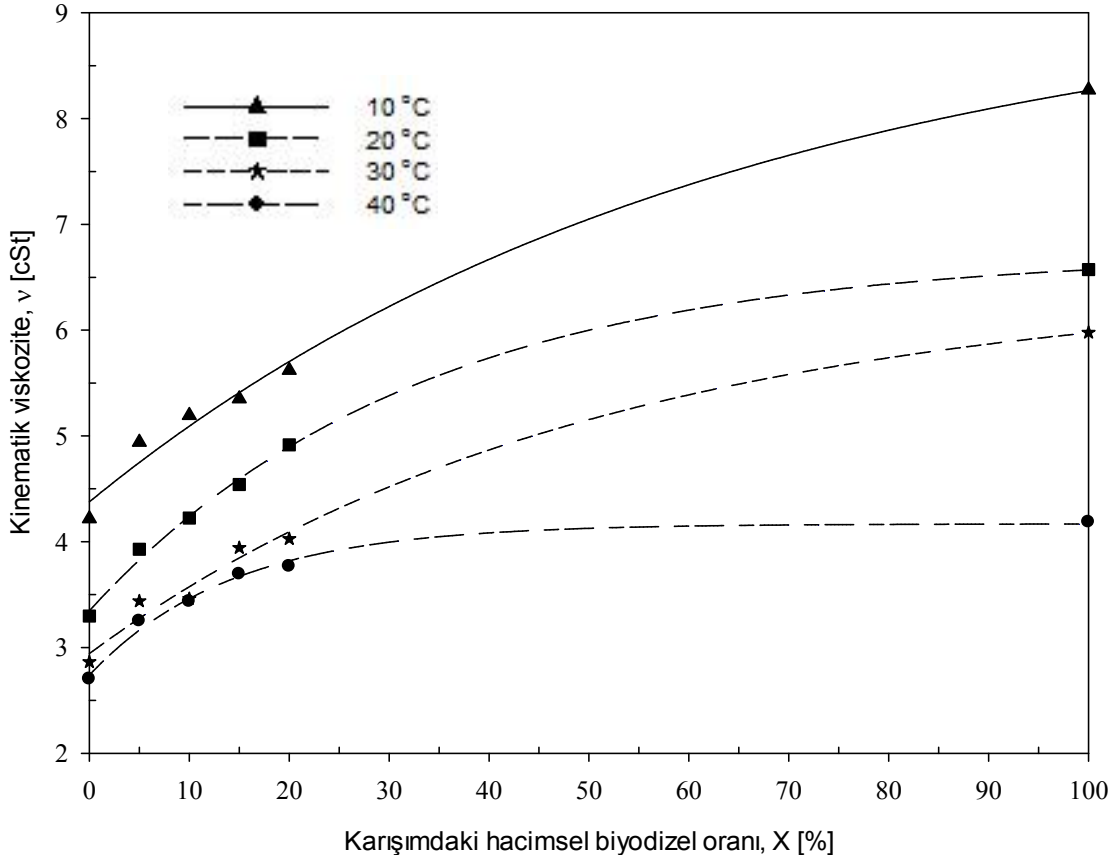
şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.



Şekil 3.124. Sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için dinamik viskozitelerinin karışımdeki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.125. Sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için yoğunluklarının karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.126. Sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için kinematik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri

### 3.5.1.2.3. Karışımdaki Hacimsel Biyodizel Oranı ve Sıcaklığa Göre Değişimler

Şekil 3.127’de, ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri iki-boyutlu eş-viskozite eğrileri şeklinde verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, ölçülen değerlere göre dinamik viskozitelerin karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, farklı karakterdeki iki ayrı bölge görülebilir. Birinci bölge olarak adlandırılan yüksek sıcaklık ve düşük biyodizel oranı bölgesinde eş-viskozite eğrileri daha seyrek ve yataya yakın iken; ikinci bölge olarak adlandırılan düşük sıcaklık ve yüksek biyodizel oranı bölgesinde eğriler daha sık ve dikeye yakın karakterdedir. Buna göre, birinci bölgede sıcaklıktaki büyük bir değişime karşılık

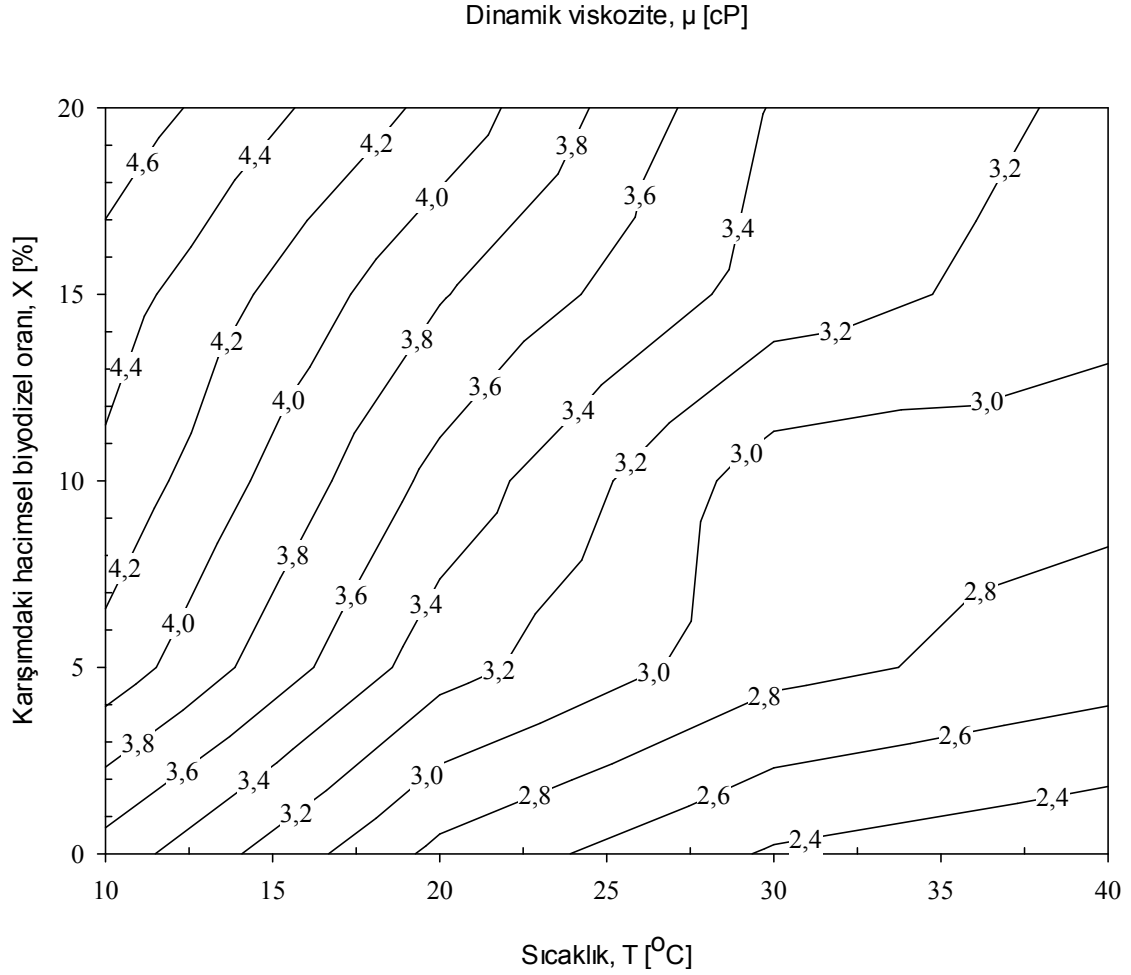
viskozitede küçük bir değişim görülürken, ikinci bölgede tam tersine sıcaklıktaki küçük bir değişime karşılık viskozitede daha büyük değişim gözlemlenmektedir.

Şekil 3.128’de, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin ölçüm değerlerine uyumlanan iki-boyutlu  $\mu = \mu(T, X)$  fonksiyonundan elde edilen değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimlerine ilişkin eş-viskozite eğrileri verilmektedir. Hatırlanacağı üzere karışımdaki hacimsel biyodizel oranı olarak %0, 5, 10, 15, 20 ve 100 değerleri parametre olarak seçilmişti. Eğri uyumlarken % 20 ile % 100 arasındaki ölçüm yapılmamış geniş bölgenin hassasiyeti azaltmaması için söz konusu eğriler sadece sık ölçüm yapılan % 0-20 değerlerini kapsayacak şekilde çizilmiştir. Sıcaklıklar için ise yine ölçüm yapılmış olan 10-40°C aralığı dikkate alınmıştır. Deneysel veriler incelendiğinde, saf biyodizel ve dizel yakıtı ile biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranıyla değişimine,

$$\mu = \mu(T, X) = a + bT + cX + dT^2 + eTX + fX^2 + gT^3 + hT^2X + kTX^2 \quad (3.52)$$

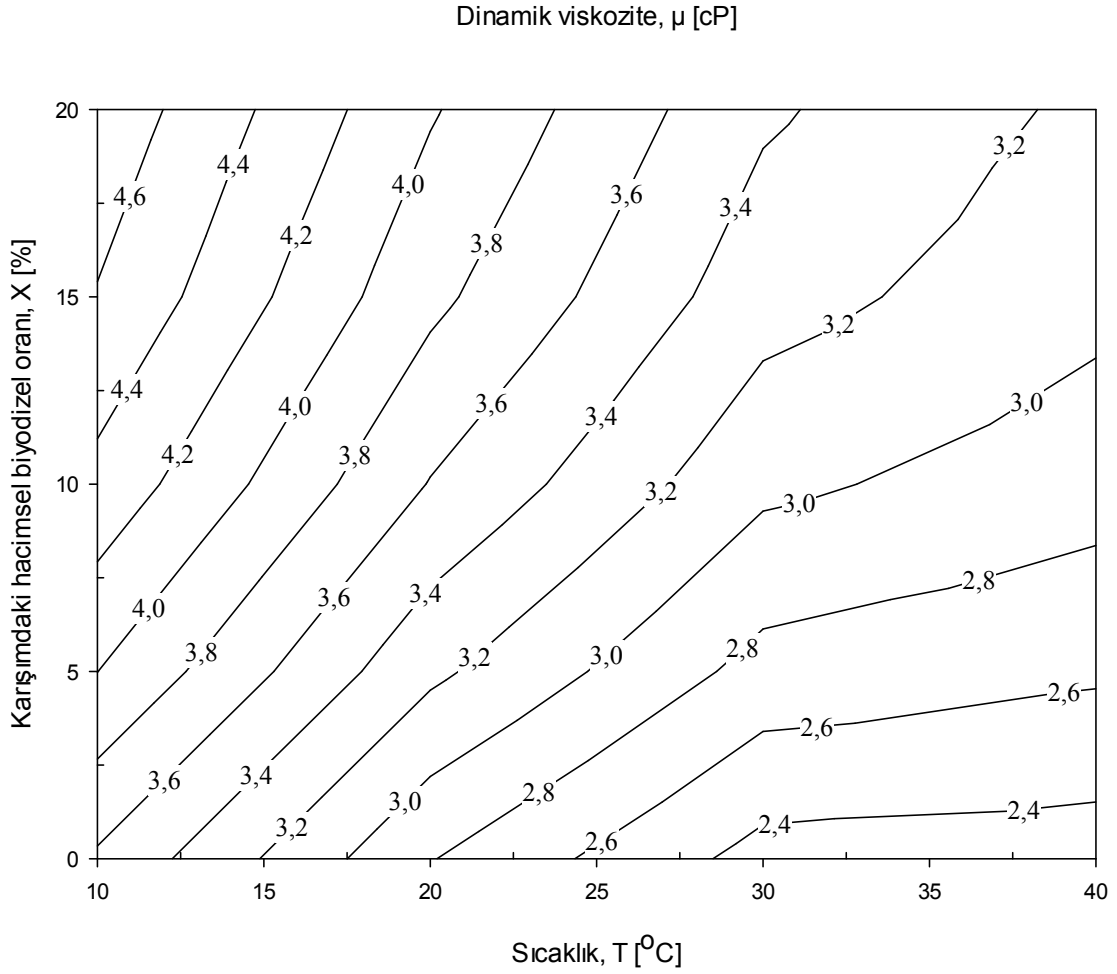
şeklinde X [%] karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre 2. dereceden, T [°C] sıcaklığına ise 3. dereceden bağımlı iki-boyutlu fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada a, b, ..., k sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir. Söz konusu eşitlikten elde edilen dinamik viskozite değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimi grafiği incelendiğinde, hesaplanan değerlere göre dinamik viskozitelerin karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, farklı karakterdeki iki ayrı bölge görülebilir. Birinci bölge olarak adlandırılan yüksek sıcaklık ve düşük biyodizel oranı bölgesinde eş-viskozite eğrileri daha seyrek ve yataya yakın iken; ikinci bölge olarak adlandırılan düşük sıcaklık ve yüksek biyodizel oranı bölgesinde eğriler daha sık ve dikeye yakın karakterdedir. Buna göre, birinci bölgede sıcaklıktaki büyük bir değişime karşılık viskozitede küçük bir değişim görülürken yani viskozite değişiminin sıcaklığa karşı hassasiyeti az iken, ikinci bölgede tam tersine sıcaklıktaki küçük bir değişime karşılık viskozitede daha büyük

değişim gözlemlendiğinden viskozitenin sıcaklık değişimine karşı duyarlılığının daha fazla olduğu söylenebilir.



Şekil 3.127. Ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri





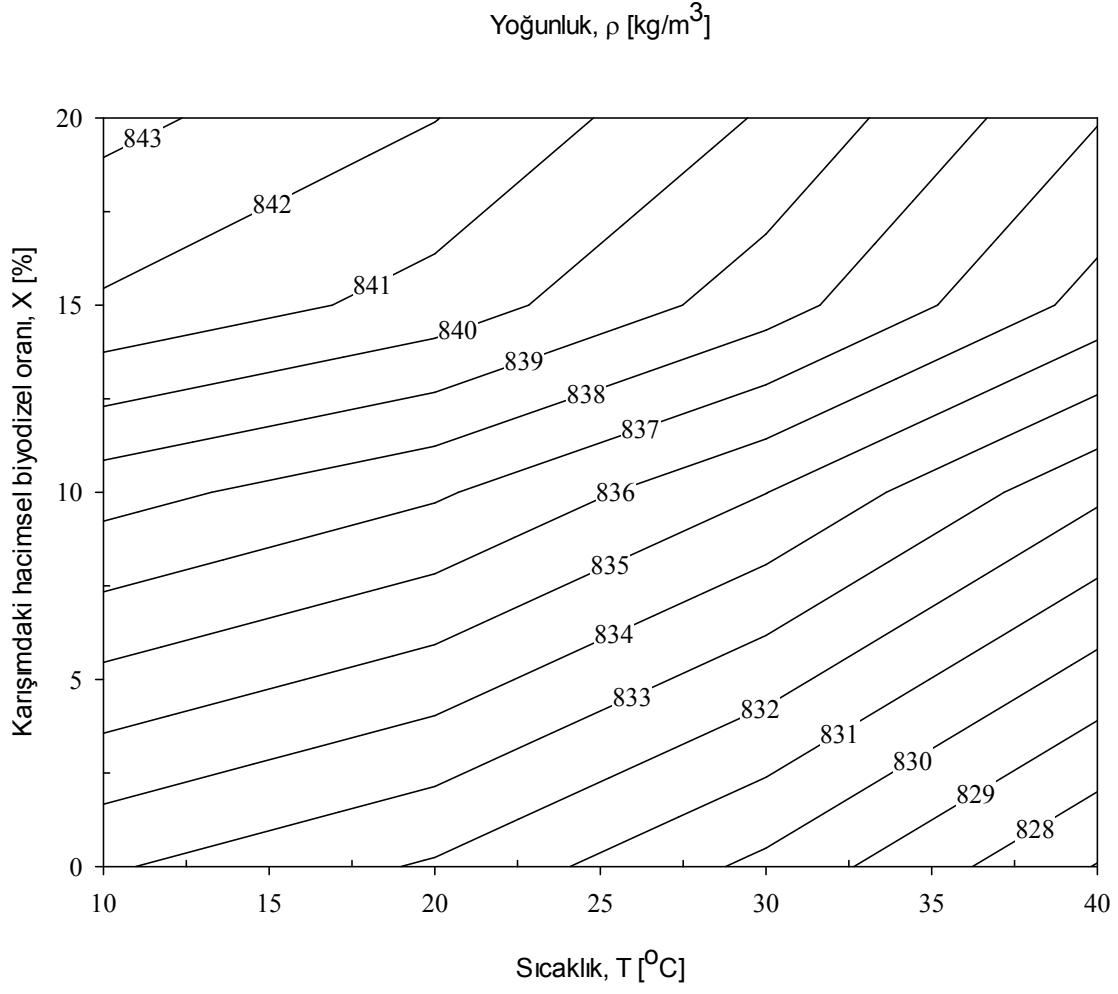
Şekil 3.128. Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri

Şekil 3.129'da, ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluk değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri iki-boyutlu eş-yoğunluk eğrileri şeklinde verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, ölçülen değerlere göre yoğunlukların karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, eş-yoğunluk eğrileri aralarındaki mesafeler yaklaşık olarak sabit olacak şekilde (sabit gradyana sahip), yoğunluğun karışımdaki biyodizel oranına göre değişiminin doğrusal, sıcaklığa göre değişiminin ise parabolik karakterde olduğu belirlenmiştir. Bu durum daha belirgin olarak Şekil 3.130'da görülmektedir.

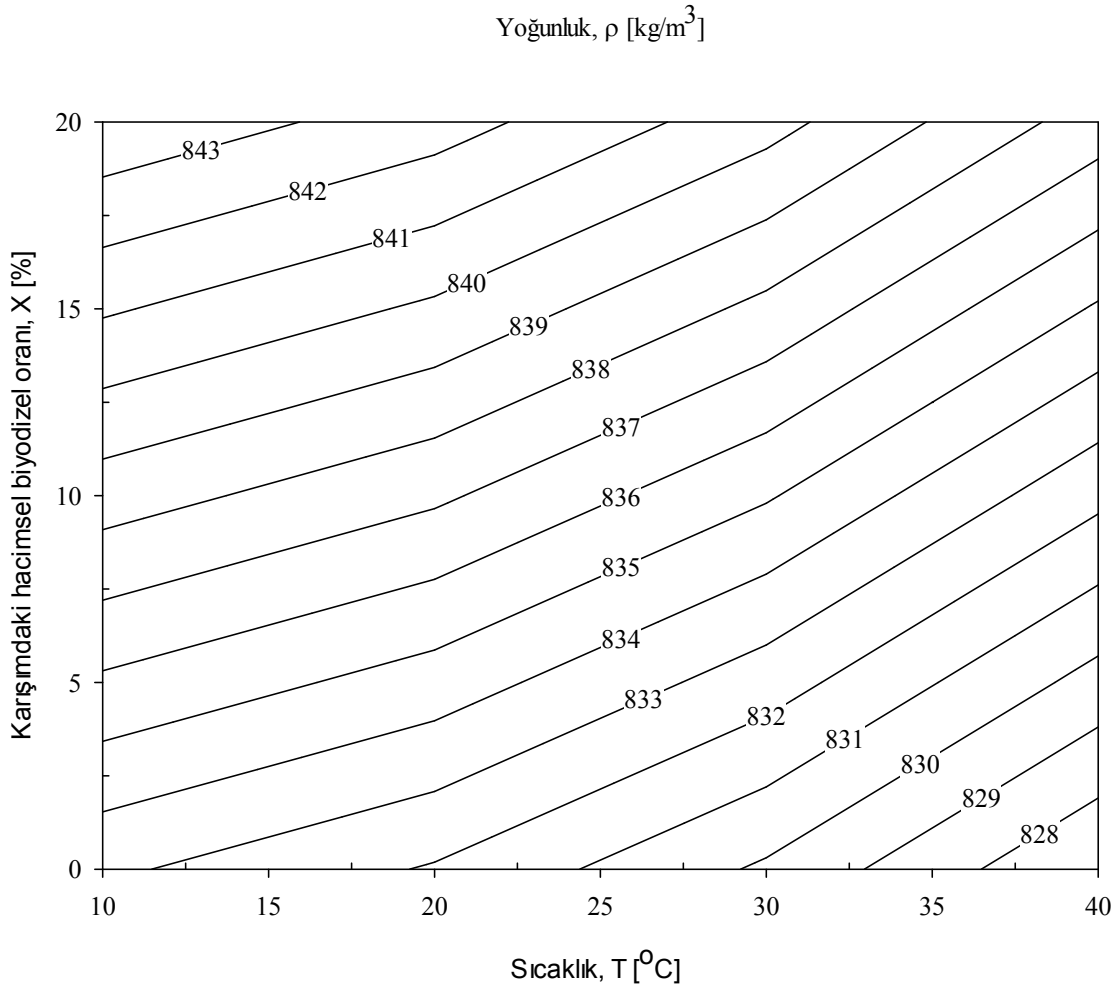
Şekil 3.130'da, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluk değerlerinin ölçüm değerlerine uyumlanan iki-boyutlu  $\rho = \rho(T, X)$  fonksiyonundan elde edilen değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimlerine ilişkin eş-yoğunluk eğrileri verilmektedir. Yukarıda da belirtildiği gibi karışımdaki hacimsel biyodizel oranı olarak %0, 5, 10, 15, 20 ve 100 değerleri parametre olarak seçilmiştir. Eğri uyumlarken % 20 ile % 100 arasındaki ölçüm yapılmamış geniş bölgenin hassasiyeti azaltmaması için söz konusu eğriler sadece sık ölçüm yapılan % 0-20 değerlerini kapsayacak şekilde çizilmiştir. Buna göre, hesaplanan değerlere göre yoğunlukların karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, sabit eş-yoğunluk eğrisi için, karışımın sıcaklığı arttıkça karışımdaki biyodizel oranı parabolik olarak artmaktadır. Ayrıca, sabit bir sıcaklıkta yoğunluğu bir birim değiştirmek için karışımdaki biyodizel oranının yaklaşık sabit bir değerde değiştirilmesi gerekirken, sabit bir karışım oranında yoğunluğu bir birim değiştirmek için düşük sıcaklıklarda daha fazla sıcaklık değişimi, yüksek sıcaklıklarda ise daha az sıcaklık değişimi gerekmektedir. Deney sonuçları incelendiğinde, yoğunlukların sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranıyla değişimine,

$$\rho = \rho(T, X) = a + bT + cX + dT^2 + eTX \quad (3.53)$$

şeklinde X [%] karışımdaki hacimsel biyodizel oranına 1. dereceden ve T [°C] sıcaklığına 2. dereceden bağımlı iki-boyutlu fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada a, b, c, d ve e sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.



Şekil 3.129. Ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımdeki biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.130. Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri

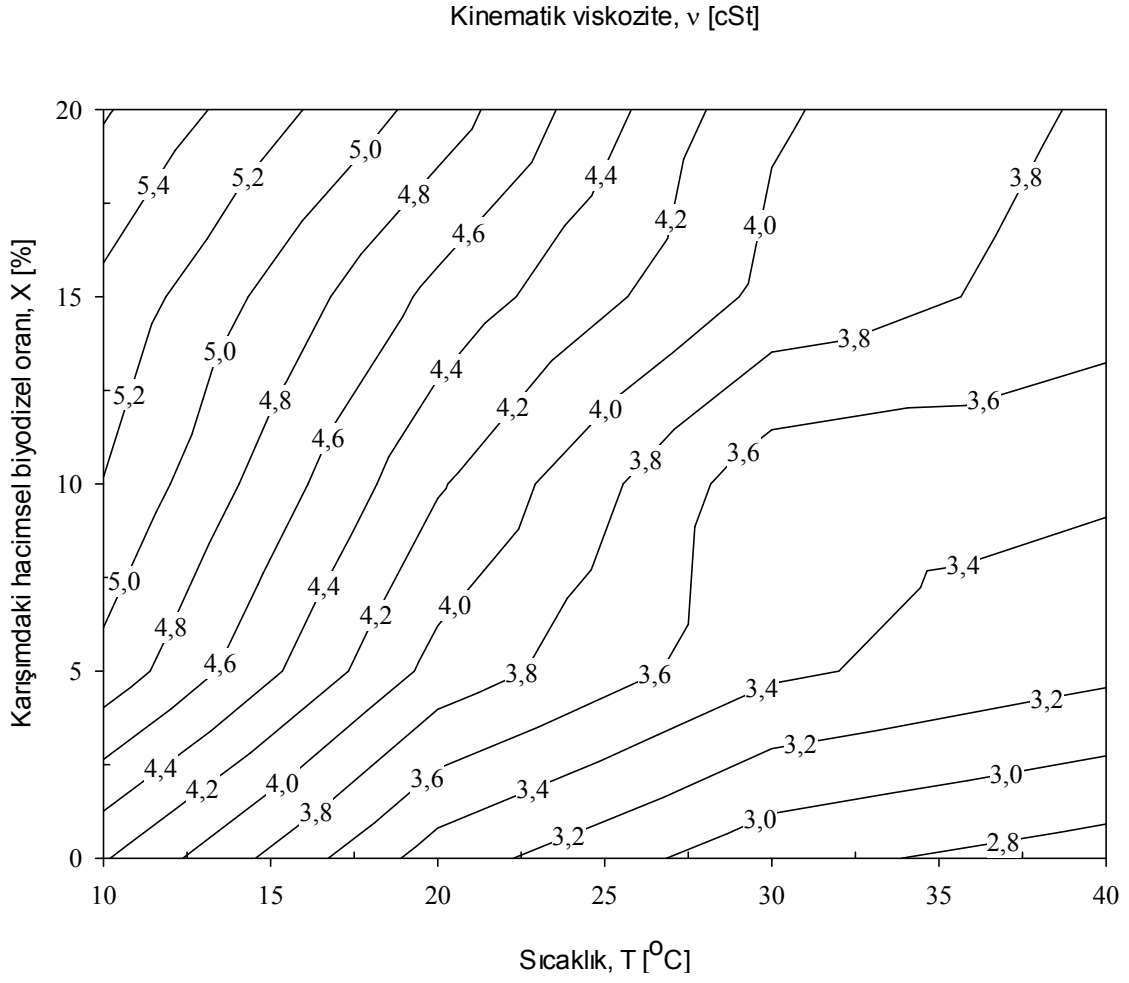
Şekil 3.131’de, ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri iki-boyutlu eş-viskozite eğrileri şeklinde verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, ölçülen değerlere göre kinematik viskozitelerin karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, yoğunluk değerlerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimlerinin doğrusal, sıcaklığa göre değişimlerinin ise doğrusala yakın olması nedeniyle dinamik viskozite değerlerinin sabit yoğunluk değerlerine bölünüyormuş gibi bir etki yaratması sonucu, kinematik viskozitelerin sıcaklık

ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri de dinamik viskozitelerin değişimlerine (Şekil 3.127) oldukça benzer karakterde olduğu görülebilir.

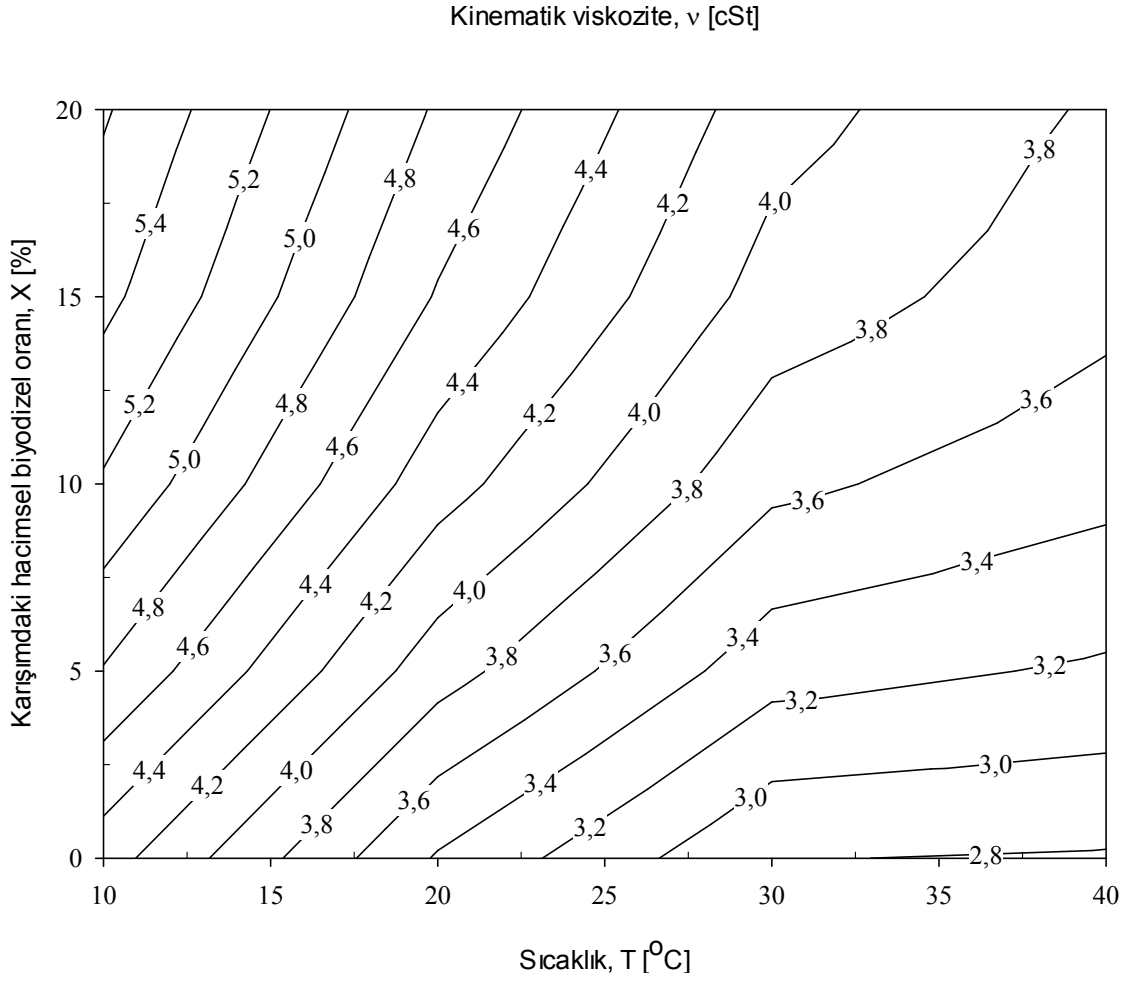
Şekil 3.132’de, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin ölçüm değerlerine uyumlanan iki-boyutlu  $v = v(T, X)$  fonksiyonundan elde edilen değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimlerine ilişkin eş-viskozite eğrileri verilmektedir. Hatırlanacağı üzere karışımdaki hacimsel biyodizel oranı olarak %0, 5, 10, 15, 20 ve 100 değerleri parametre olarak seçilmiştir. Eğri uyumlar için %20 ile %100 arasındaki ölçüm yapılmamış geniş bölgenin hassasiyeti azaltmaması için söz konusu eğriler sadece sık ölçüm yapılan % 0-20 değerlerini kapsayacak şekilde çizilmiştir. Deneysel veriler incelendiğinde, saf biyodizel ve dizel yakıtı ile biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranıyla değişimine,

$$v = v(T, X) = a + bT + cX + dT^2 + eTX + fX^2 + gT^3 + hT^2X + kTX^2 \quad (3.54)$$

şeklinde X [%] karışımdaki hacimsel biyodizel oranına 2. dereceden, T [°C] sıcaklığına ise 3. dereceden bağımlı iki-boyutlu fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada a, b, ..., k sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, hesaplanan değerlere göre kinematik viskoziteleri karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, söz konusu şekilde de farklı karakterdeki iki ayrı bölge görülebilir. Birinci bölge olarak adlandırılan yüksek sıcaklık ve düşük biyodizel oranı bölgesinde eş-viskozite eğrileri daha seyrek ve yataya yakın iken; ikinci bölge olarak adlandırılan düşük sıcaklık ve yüksek biyodizel oranı bölgesinde eğriler daha sık ve dikeye yakın karakterdedir. Buna göre, birinci bölgede sıcaklıktaki büyük bir değişime karşılık viskozitede küçük bir değişim görülürken yani viskozite değişiminin sıcaklığa karşı hassasiyeti az iken, ikinci bölgede tam tersine sıcaklıktaki küçük bir değişime karşılık viskozitede daha büyük değişim gözlemlendiğinden viskozitenin sıcaklık değişimine karşı duyarlılığının daha fazla olduğu söylenebilir.



Şekil 3.131. Ölçüm değerlerine göre, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.132. Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri

### 3.5.2. Potasyum Hidroksit Kullanılarak Üretilen Fındık Yağı Biyodizeli-Dizel Yakıtı Karışımları

#### 3.5.2.1. En Düşük Viskoziteye Sahip Biyodizel İçin Değişimler

Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelleri içerisinde en düşük viskoziteye sahip biyodizel ile dizel yakıtı hacimsel olarak belirli oranlarda (%5, 10, 15, 20) karıştırılarak elde edilen yakıt karışımlarının çeşitli sıcaklıklardaki (10, 20, 30, 40°C) dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerleri belirlenmiştir. Söz konusu biyodizelin üretim parametreleri aşağıdaki gibidir:

Yağ: Fındık yağı

Katalizör türü: KOH

Katalizör oranı: %1,25

Reaksiyon sıcaklığı: 60°C

Reaksiyon süresi: 60 dakika

Kullanılan alkol/yağ mol oranı: 9:1

### 3.5.2.1.1. Sıcaklığa Göre Değişimler

Söz konusu biyodizel-dizel yakıtı karışımları için dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin sıcaklığa göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.133, 3.134 ve 3.135'te verilmektedir.

Şekil 3.133'de potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, burada da diğer dinamik viskozite-sıcaklık değişimi şekillerinde olduğu gibi, saf biyodizel, biyodizel-dizel yakıtı karışımları ve saf dizel yakıtının viskozite değerlerinin sıcaklık arttıkça eksponansiyel olarak azaldığı görülmüştür. Düşük sıcaklıklarda saf biyodizel ve saf dizel yakıtının dinamik viskoziteleri arasındaki fark daha fazla iken, artan sıcaklıkla birlikte eğriler birbirlerine eksponansiyel olarak yaklaşmaktadır. Belirtilen mol oranı kullanılarak (9:1) üretilen saf fındık yağı biyodizelinin de dinamik viskozitesinin sıcaklıkla eksponansiyel değişiminin, mısır yağı biyodizelinden farklı olarak doğrusala oldukça yakın bir karakterde olduğu gözlenmektedir. Söz konusu dinamik viskozite değerlerine,

$$\mu = \mu(T) = y_0 + ae^{-bT} \quad (3.55)$$

şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.



Şekil 3.134'te potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklığa göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, burada da diğer yoğunluk-sıcaklık değişimi şekillerinde olduğu gibi, yoğunluk değerlerinin beklendiği gibi sıcaklık arttıkça azaldığı, ölçüm yapılan sıcaklık aralığında yoğunluk değerlerinin sıcaklık arttıkça doğrusala yakın olmakla birlikte ikinci dereceden bir değişim gösterdiği belirlenmiştir. Bu nedenle söz konusu yoğunluk değerlerine,

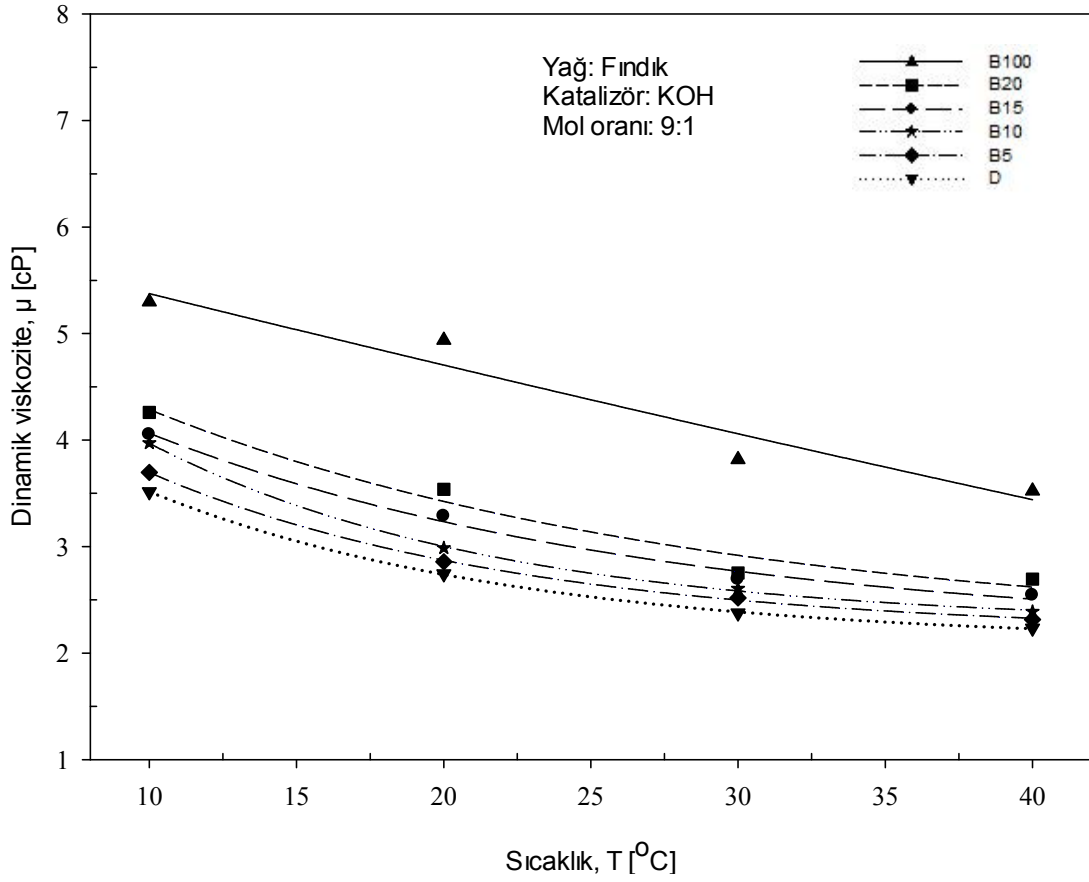
$$\rho = \rho(T) = y_0 + aT + bT^2 \quad (3.56)$$

şeklindeki bir-boyutlu parabolik bir fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

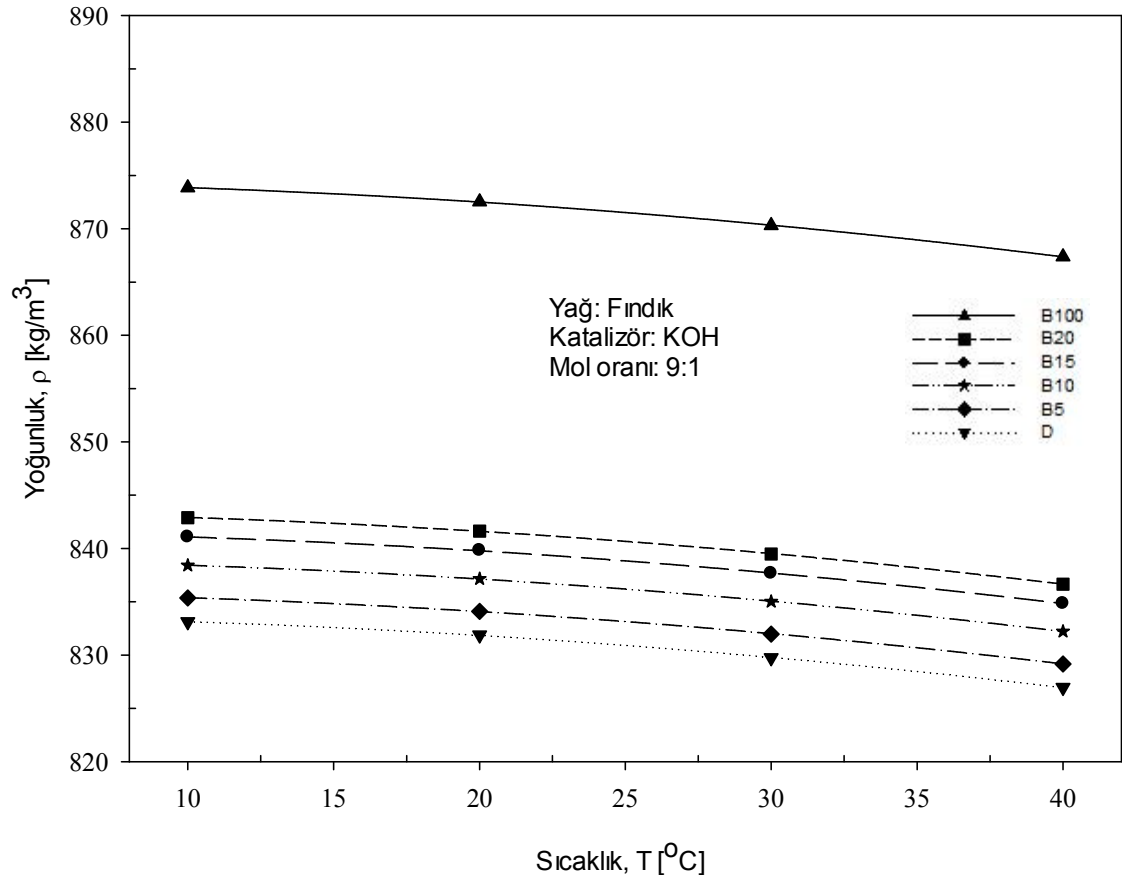
Şekil 3.135'te potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, burada da diğer kinematik viskozite-sıcaklık değişimi şekillerinde olduğu gibi, yoğunluk değerlerinin sıcaklık ile değişimlerinin doğrusala yakın karakterde ve yatay eğilimli (Şekil 3.134) olması nedeniyle dinamik viskozite değerlerinin sabit yoğunluk değerlerine bölünüyormuş gibi bir etki yaratması sonucu, kinematik viskozitelerin sıcaklıkla değişimleri de dinamik viskozitelerin sıcaklık ile değişimlerine (Şekil 3.133) oldukça benzer karakterde olduğu görülebilir. Diğer bir ifade ile kinematik viskozitelerin de artan sıcaklıkla birlikte eksponansiyel olarak azaldığı belirlenmiştir. Belirtilen mol oranı kullanılarak (9:1) üretilen saf fındık yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin sıcaklıkla eksponansiyel değişiminin, mısır yağı biyodizelinden farklı olarak doğrusala oldukça yakın bir karakterde olduğu gözlenmektedir. Söz konusu kinematik viskozite değerlerine,

$$v = v(T) = y_0 + ae^{-bT} \quad (3.57)$$

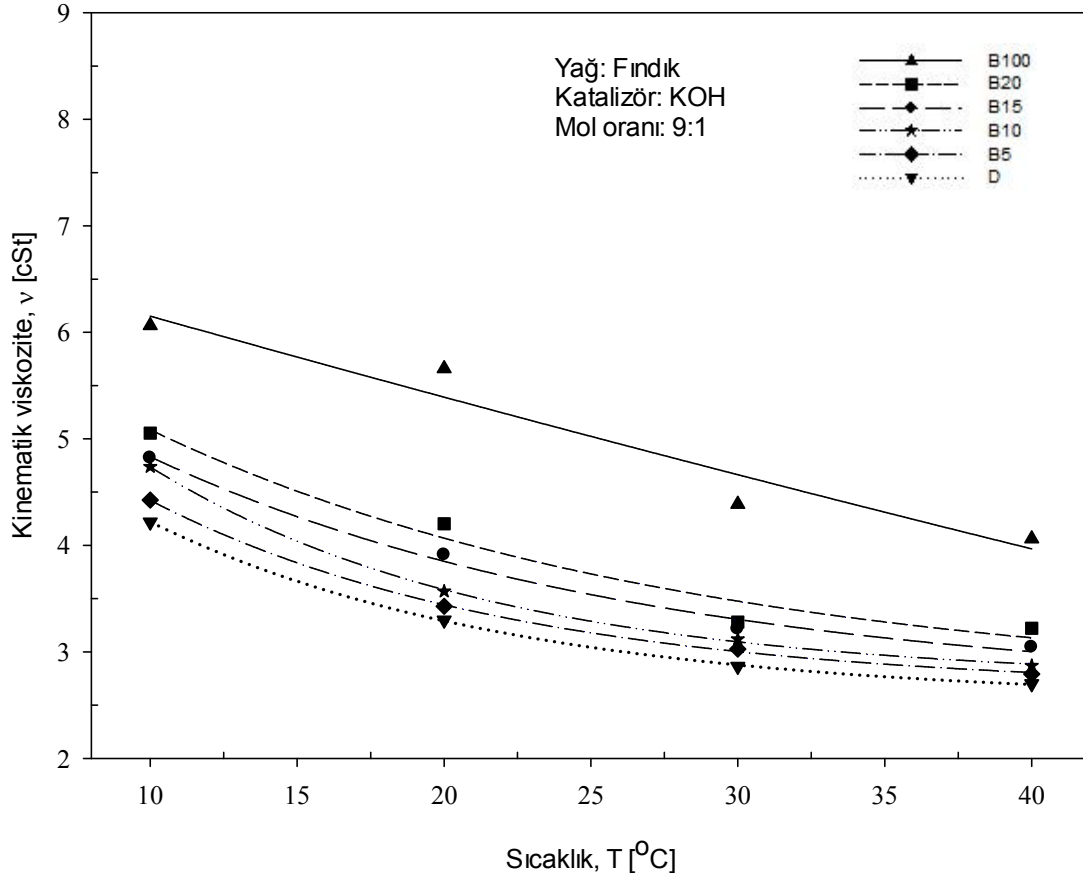
şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ , a ve b sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ) ve ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.



Şekil 3.133. Potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri



Şekil 3.134. Potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklığa göre değişimleri



Şekil 3.135. Potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri

### 3.5.2.1.2. Karışımdaki Hacimsel Biyodizel Oranına Göre Değişimler

Söz konusu biyodizel-dizel yakıtı karışımları için dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.136, 3.137 ve 3.138’de verilmektedir.

Şekil 3.136’da potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için dinamik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri verilmiştir. Daha önceden bahsedildiği gibi karışımdaki biyodizel oranının sıfır olması saf dizel yakıtına, 100 olması da saf biyodizel karşılık gelmektedir. Söz konusu şekil incelendiğinde, burada da diğer dinamik viskozite-karışımdaki hacimsel biyodizel oranı değişimi şekillerinde olduğu gibi, biyodizelin dinamik viskozitesinin dizel yakıtına göre

yüksek olması nedeniyle karışımdaki hacimsel biyodizel oranı arttıkça biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının viskozite değerlerinin arttığı görülmüştür. Viskozitelerin artan biyodizel oranı ile birlikte eksponansiyel olarak azalarak arttığı belirlenmiştir. Sıcaklık azaldıkça karışımdaki hacimsel biyodizel oranının artışı ile dinamik viskozitelerdeki değişimin doğrusal niteliğe yaklaştığı görülmüştür. Söz konusu dinamik viskozite değerlerine,

$$\mu = \mu(X) = y_0 + ae^{-bX} \quad (3.58)$$

şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

Şekil 3.137'de potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için yoğunluklarının karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri verilmiştir. Daha önceden bahsedildiği gibi karışımdaki biyodizel oranının sıfır olması saf dizel yakıtına, 100 olması da saf biyodizele karşılık gelmektedir. Söz konusu şekil incelendiğinde, burada da diğer yoğunluk-karışımdaki hacimsel biyodizel oranı değişimi şekillerinde olduğu gibi, biyodizelin yoğunluğu dizel yakıtınıninkine göre yüksek olduğundan, karışımdaki hacimsel biyodizel oranı arttıkça biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluk değerlerinin beklendiği gibi doğrusal olarak arttığı görülmüştür. Ayrıca, belirli bir karışım oranı için sıcaklık azaldıkça yoğunluk değerleri birbirlerine yaklaşmaktadır. Söz konusu yoğunluk değerlerine,

$$\rho = \rho(X) = y_0 + aX \quad (3.59)$$

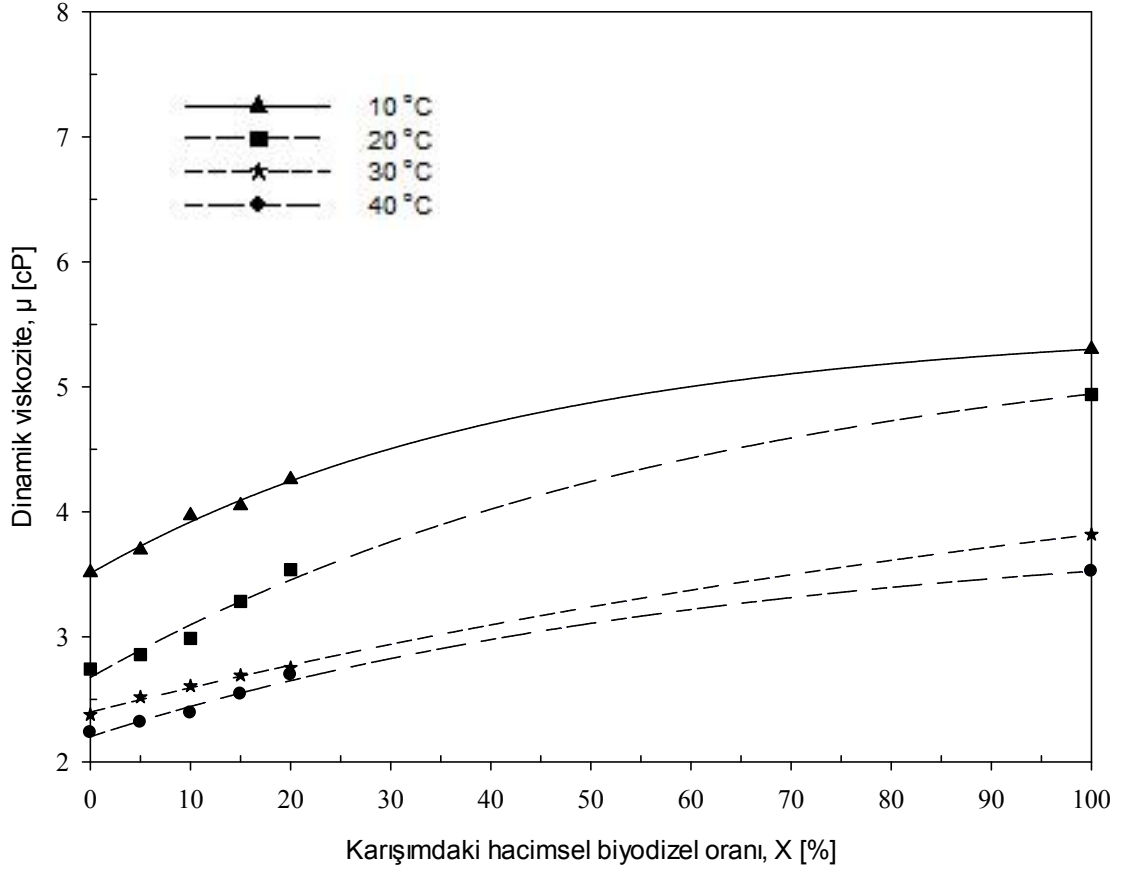
şeklindeki bir-boyutlu doğrusal fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$  ve  $a$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri,

korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

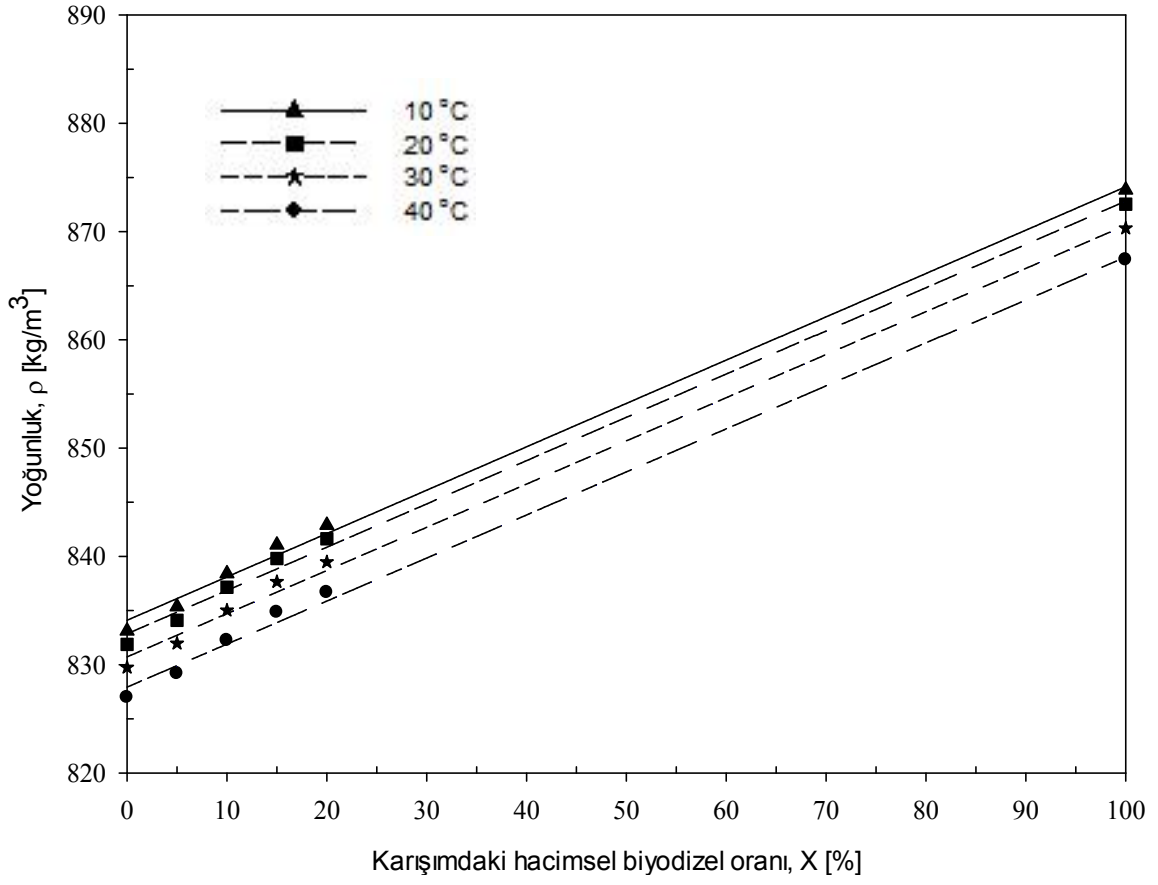
Şekil 3.138’de potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için kinematik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri verilmiştir. Burada da karışımdaki biyodizel oranının sıfır olması saf dizel yakıtına, 100 olması da saf biyodizele karşılık gelmektedir. Söz konusu şekil incelendiğinde, yoğunluk değerlerinin karışım oranı ile değişimlerinin (Şekil 3.137) doğrusal olmasıyla birlikte eğimlerinin çok küçük olması nedeniyle dinamik viskozite değerlerinin sabit yoğunluk değerlerine bölünüyormuş gibi bir etki yaratması sonucu kinematik viskozitelerin karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ile değişimleri de dinamik viskozitenin karışımdaki hacimsel biyodizel oranı (Şekil 3.136) ile değişimlerine oldukça benzer karakterde elde edilmiştir. Diğer bir ifade ile, burada da diğer kinematik viskozite-karışımdaki hacimsel biyodizel oranı değişimi şekillerinde olduğu gibi, kinematik viskozitelerin de artan biyodizel oranı ile eksponansiyel olarak azalarak arttığı belirlenmiştir. Burada da sıcaklık azaldıkça karışımdaki hacimsel biyodizel oranının artışı ile kinematik viskozitelerdeki değişimin doğrusal niteliğe yaklaştığı görülmüştür. Söz konusu kinematik viskozite değerlerine,

$$v = v(X) = y_0 + ae^{-bX} \quad (3.60)$$

şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

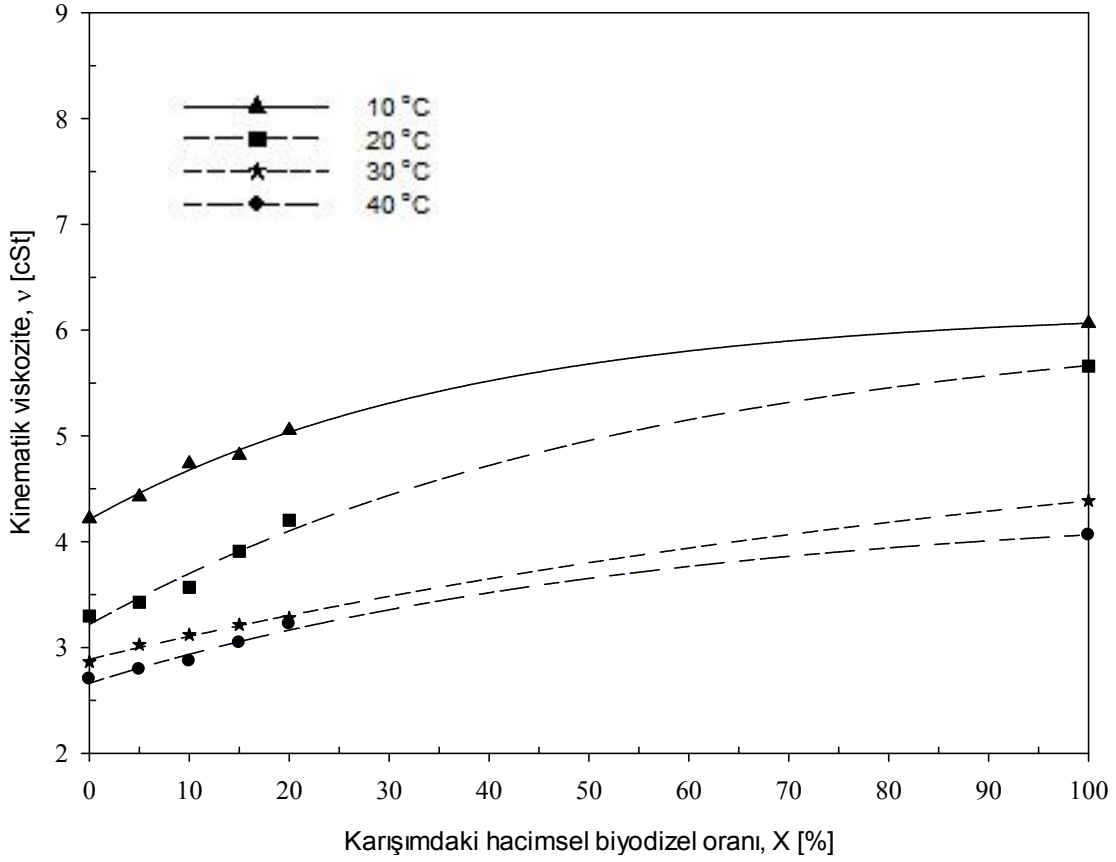


Şekil 3.136. Potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için dinamik viskozitelerinin karışımdeki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.137. Potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için yoğunluklarının karışımındaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri





Şekil 3.138. Potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için kinematik viskozitelerinin karışımındaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri

### 3.5.2.1.3. Karışımındaki Hacimsel Biyodizel Oranı ve Sıcaklığa Göre Değişimler

Şekil 3.139’da, ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımındaki biyodizel oranına göre değişimleri iki-boyutlu eş-viskozite eğrileri şeklinde verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, ölçülen değerlere göre dinamik viskozitelerin karışımındaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, farklı karakterdeki iki ayrı bölge görülebilir. Birinci bölge olarak adlandırılan yüksek sıcaklık ve düşük biyodizel oranı bölgesinde eş-viskozite eğrileri daha seyrek ve yataya yakın iken; ikinci bölge olarak adlandırılan düşük sıcaklık ve yüksek biyodizel oranı bölgesinde eğriler daha sık ve dikeye yakın karakterdedir. Buna göre, birinci bölgede sıcaklıktaki büyük bir değişime karşılık

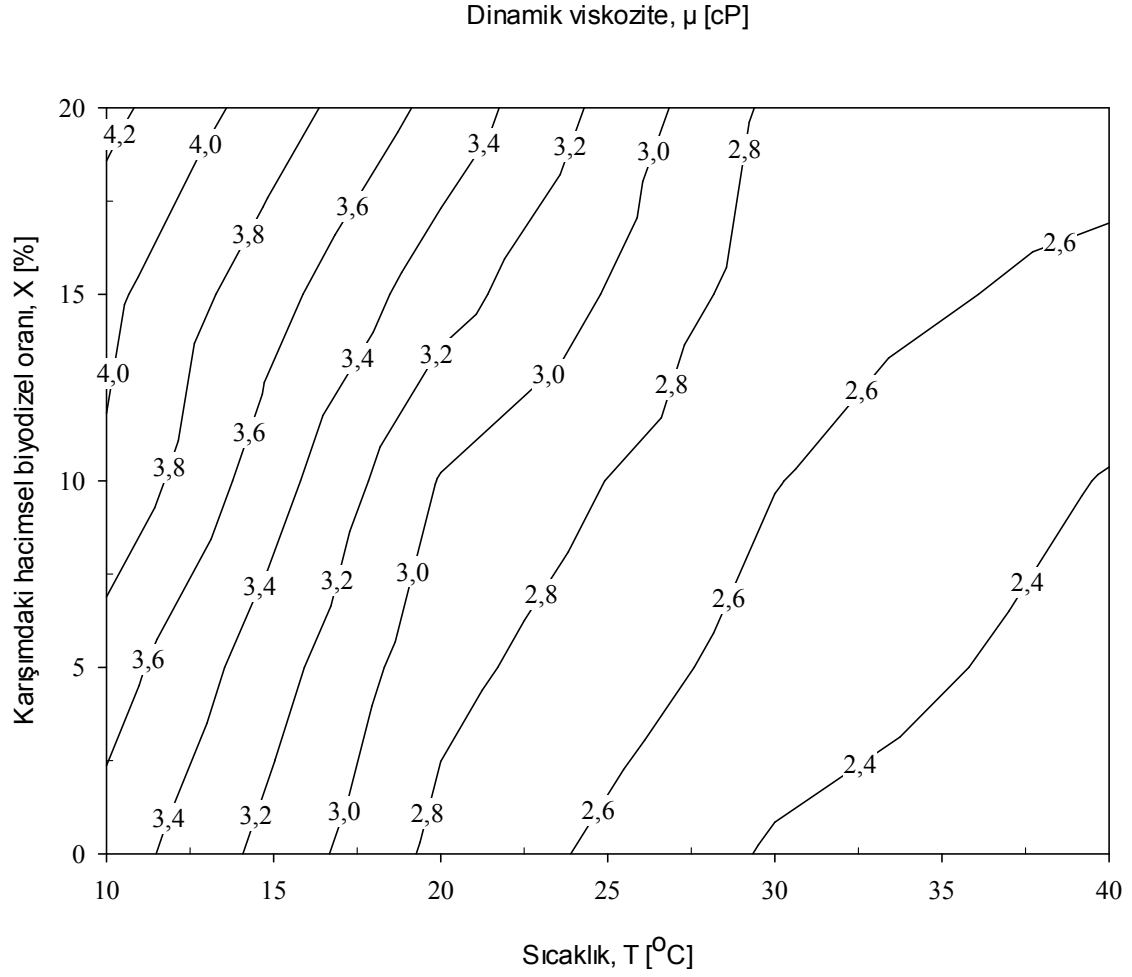
viskozitede küçük bir değişim görülürken, ikinci bölgede tam tersine sıcaklıktaki küçük bir değişime karşılık viskozitede daha büyük değişim gözlemlenmektedir.

Şekil 3.140'da, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin ölçüm değerlerine uyumlanan iki-boyutlu  $\mu = \mu(T, X)$  fonksiyonundan elde edilen değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimlerine ilişkin eş-viskozite eğrileri verilmektedir. Hatırlanacağı üzere karışımdaki hacimsel biyodizel oranı olarak %0, 5, 10, 15, 20 ve 100 değerleri parametre olarak seçilmişti. Eğri uyumları için % 20 ile % 100 arasındaki ölçüm yapılmamış geniş bölgenin hassasiyeti azaltmaması için söz konusu eğriler sadece sık ölçüm yapılan % 0-20 değerlerini kapsayacak şekilde çizilmiştir. Sıcaklıklar için ise yine ölçüm yapılmış olan 10-40°C aralığı dikkate alınmıştır. Deneysel veriler incelendiğinde, saf biyodizel ve dizel yakıtı ile biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranıyla değişimine,

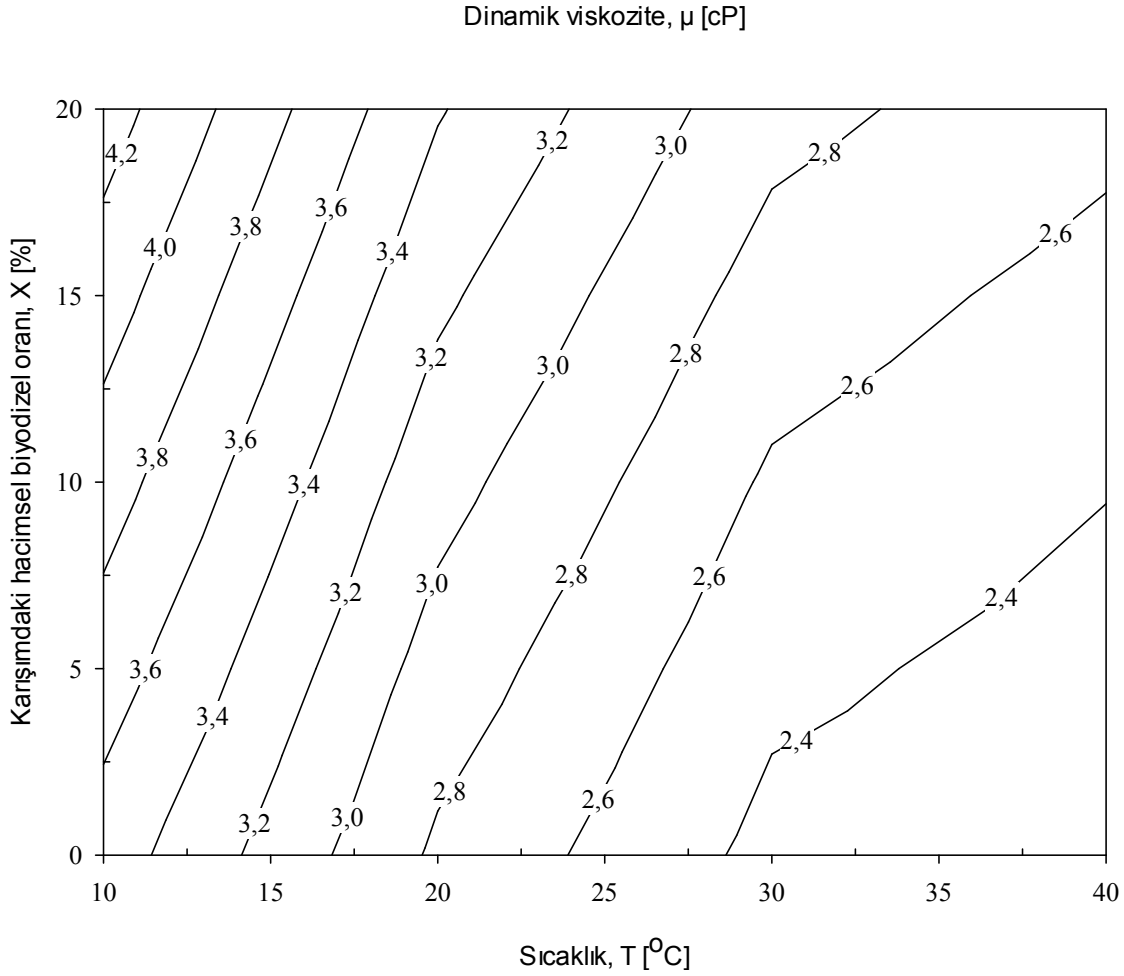
$$\mu = \mu(T, X) = a + bT + cX + dT^2 + eTX + fX^2 + gT^3 + hT^2X + kTX^2 \quad (3.61)$$

şeklinde X [%] karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre 2. dereceden, T [°C] sıcaklığına ise 3. dereceden bağımlı iki-boyutlu fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada a, b, ..., k sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir. Söz konusu eşitlikten elde edilen dinamik viskozite değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimi grafiği incelendiğinde, hesaplanan değerlere göre dinamik viskozitelerin karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, farklı karakterdeki iki ayrı bölge görülebilir. Birinci bölge olarak adlandırılan yüksek sıcaklık ve düşük biyodizel oranı bölgesinde eş-viskozite eğrileri daha seyrek ve yataya yakın iken; ikinci bölge olarak adlandırılan düşük sıcaklık ve yüksek biyodizel oranı bölgesinde eğriler daha sık ve dikeye yakın karakterdedir. Buna göre, birinci bölgede sıcaklıktaki büyük bir değişime karşılık viskozitede küçük bir değişim görülürken yani viskozite değişiminin sıcaklığa karşı hassasiyeti az iken, ikinci bölgede tam tersine sıcaklıktaki küçük bir değişime karşılık viskozitede daha büyük

değişim gözlemlendiğinden viskozitenin sıcaklık değişimine karşı duyarlılığının daha fazla olduğu söylenebilir.



Şekil 3.139. Ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri



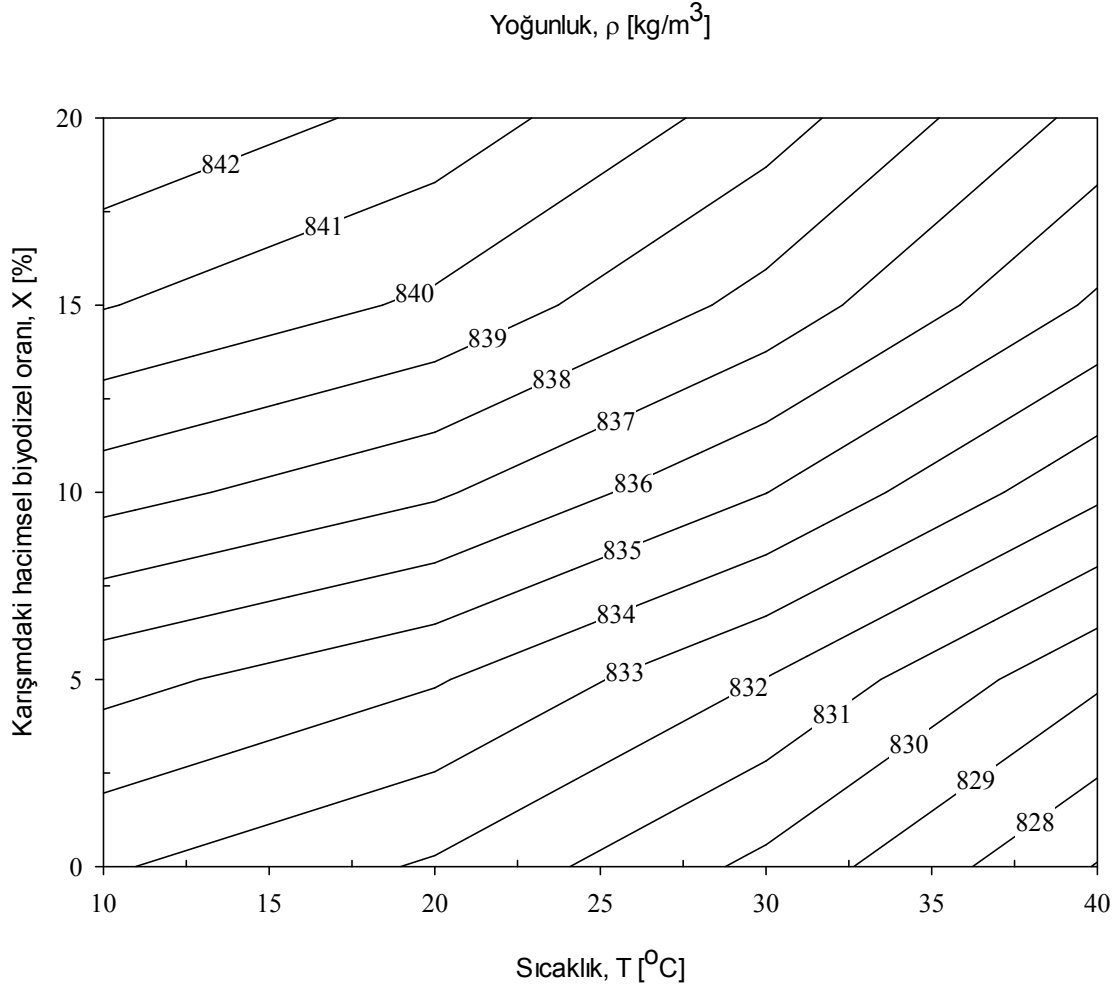
Şekil 3.140. Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri

Şekil 3.141’de, ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluk değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri iki-boyutlu eş-yoğunluk eğrileri şeklinde verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, ölçülen değerlere göre yoğunlukların karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, eş-yoğunluk eğrileri aralarındaki mesafeler yaklaşık olarak sabit olacak şekilde (sabit gradyana sahip), yoğunluğun karışımdaki biyodizel oranına göre değişiminin doğrusal, sıcaklığa göre değişiminin ise parabolik karakterde olduğu belirlenmiştir. Bu durum daha belirgin olarak Şekil 3.142’de görülmektedir.

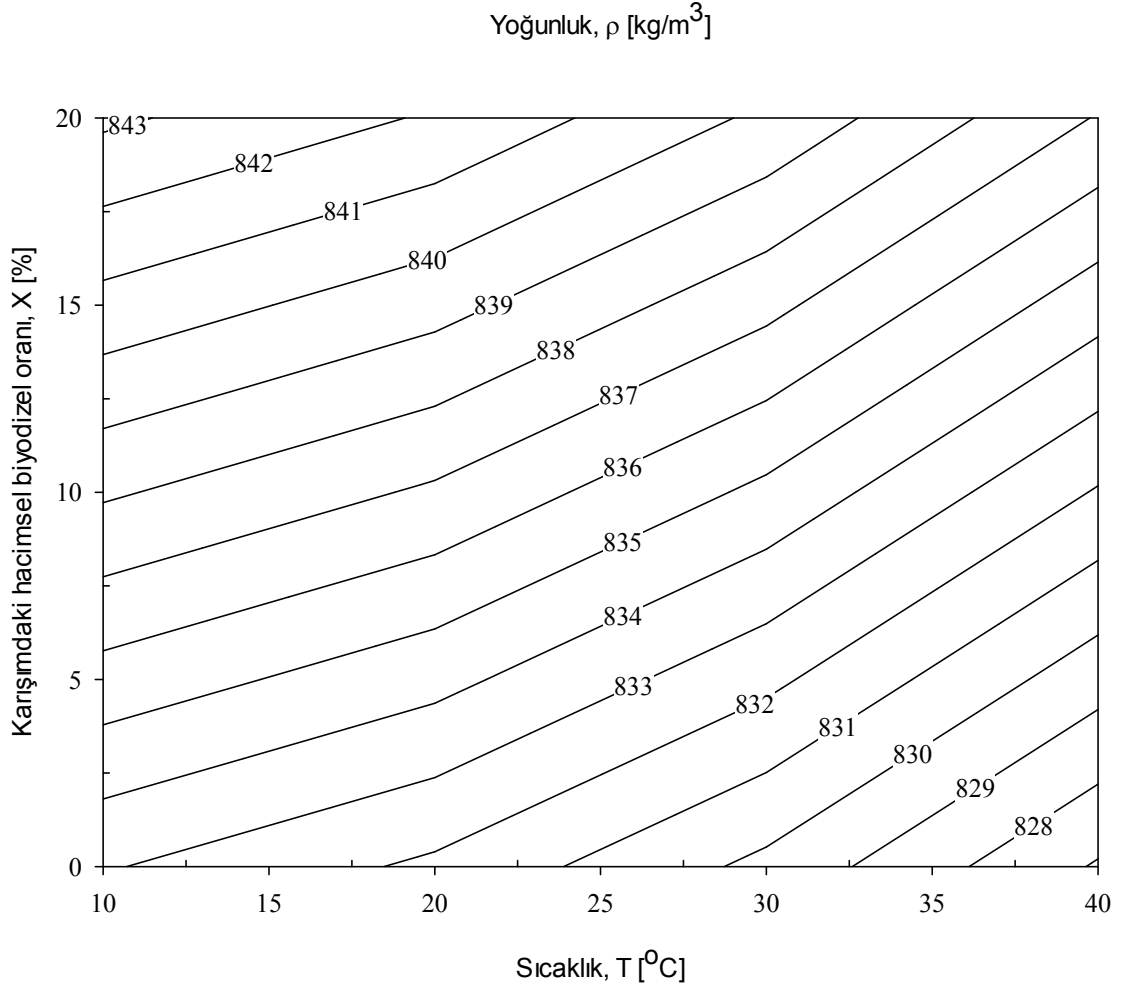
Şekil 3.142’de, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluk değerlerinin ölçüm değerlerine uyumlanan iki-boyutlu  $\rho = \rho(T, X)$  fonksiyonundan elde edilen değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimlerine ilişkin eş-yoğunluk eğrileri verilmektedir. Yukarıda da belirtildiği gibi karışımdaki hacimsel biyodizel oranı olarak %0, 5, 10, 15, 20 ve 100 değerleri parametre olarak seçilmiştir. Eğri uyumlarken % 20 ile % 100 arasındaki ölçüm yapılmamış geniş bölgenin hassasiyeti azaltmaması için söz konusu eğriler sadece sık ölçüm yapılan % 0-20 değerlerini kapsayacak şekilde çizilmiştir. Yoğunluk değerlerinin sıcaklığa göre değişiminin (Şekil 3.134) parabolik, karışımdaki biyodizel oranına göre değişiminin ise doğrusal (Şekil 3.137) olduğu belirtilmiştir. Buna göre, hesaplanan değerlere göre yoğunlukların karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, sabit eş-yoğunluk eğrisi için, karışımın sıcaklığı arttıkça karışımdaki biyodizel oranı parabolik olarak artmaktadır. Ayrıca, sabit bir sıcaklıkta yoğunluğu bir birim değiştirmek için karışımdaki biyodizel oranının yaklaşık sabit bir değerde değiştirilmesi gerekirken, sabit bir karışım oranında yoğunluğu bir birim değiştirmek için düşük sıcaklıklarda daha fazla sıcaklık değişimi, yüksek sıcaklıklarda ise daha az sıcaklık değişimi gerekmektedir. Deney sonuçları incelendiğinde, yoğunlukların sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranıyla değişimine,

$$\rho = \rho(T, X) = a + bT + cX + dT^2 + eTX \quad (3.62)$$

şeklinde X [%] karışımdaki hacimsel biyodizel oranına 1. dereceden ve T [°C] sıcaklığına 2. dereceden bağımlı iki-boyutlu fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada a, b, c, d ve e sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.



Şekil 3.141. Ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.142. Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri

Şekil 3.143'te, ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri iki-boyutlu eş-viskozite eğrileri şeklinde verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, ölçülen değerlere göre kinematik viskozitelerin karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, yoğunluk değerlerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimlerinin doğrusal, sıcaklığa göre değişimlerinin ise doğrusala yakın olması nedeniyle dinamik viskozite değerlerinin sabit yoğunluk değerlerine bölünüyormuş gibi bir etki yaratması sonucu, kinematik viskozitelerin sıcaklık

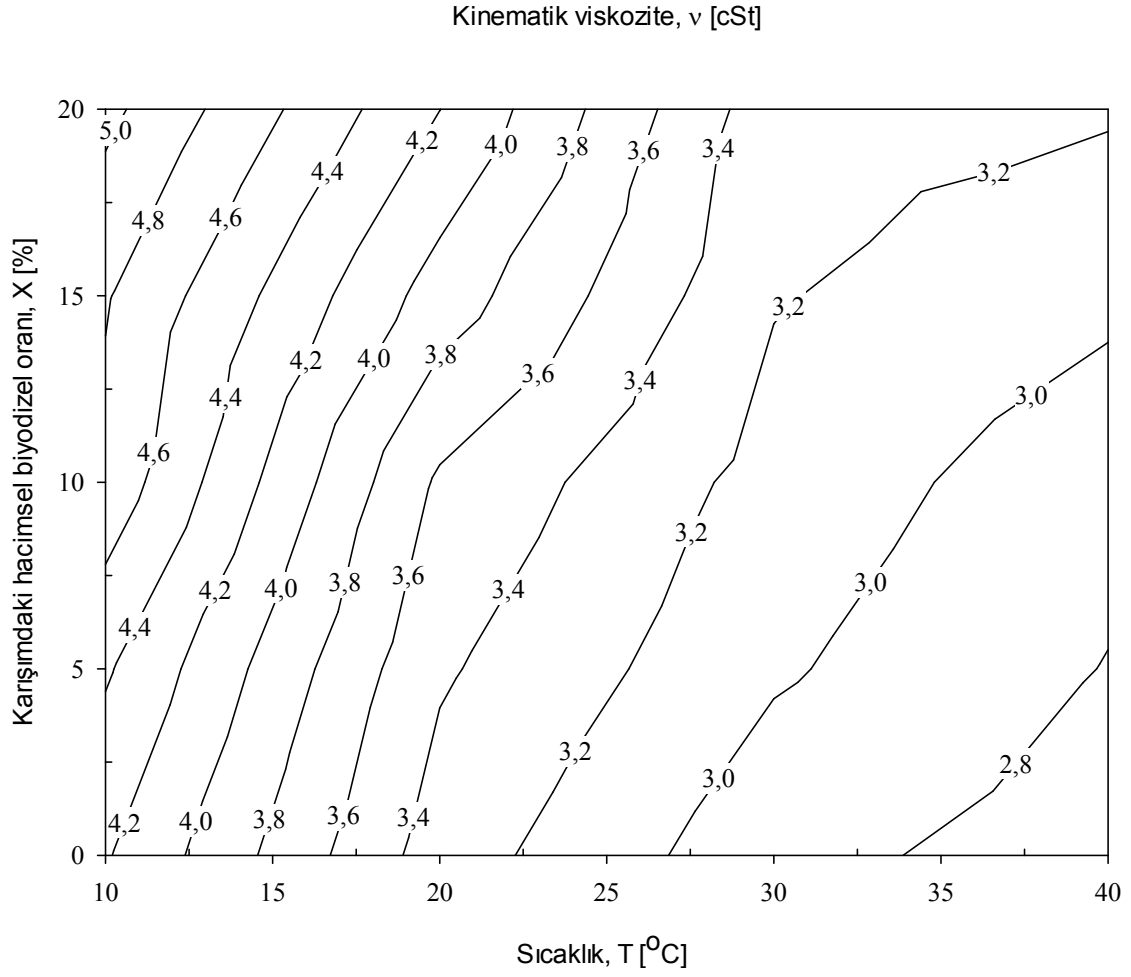
ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri de dinamik viskozitelerin değişimlerine (Şekil 3.139) oldukça benzer karakterde olduğu görülebilir.

Şekil 3.144'te, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin ölçüm değerlerine uyumlanan iki-boyutlu  $v = v(T, X)$  fonksiyonundan elde edilen değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimlerine ilişkin eş-viskozite eğrileri verilmektedir. Hatırlanacağı üzere karışımdaki hacimsel biyodizel oranı olarak %0, 5, 10, 15, 20 ve 100 değerleri parametre olarak seçilmiştir. Eğri uyumlar için %20 ile %100 arasındaki ölçüm yapılmamış geniş bölgenin hassasiyeti azaltmaması için söz konusu eğriler sadece sık ölçüm yapılan % 0-20 değerlerini kapsayacak şekilde çizilmiştir. Deneysel veriler incelendiğinde, saf biyodizel ve dizel yakıtı ile biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranıyla değişimine,

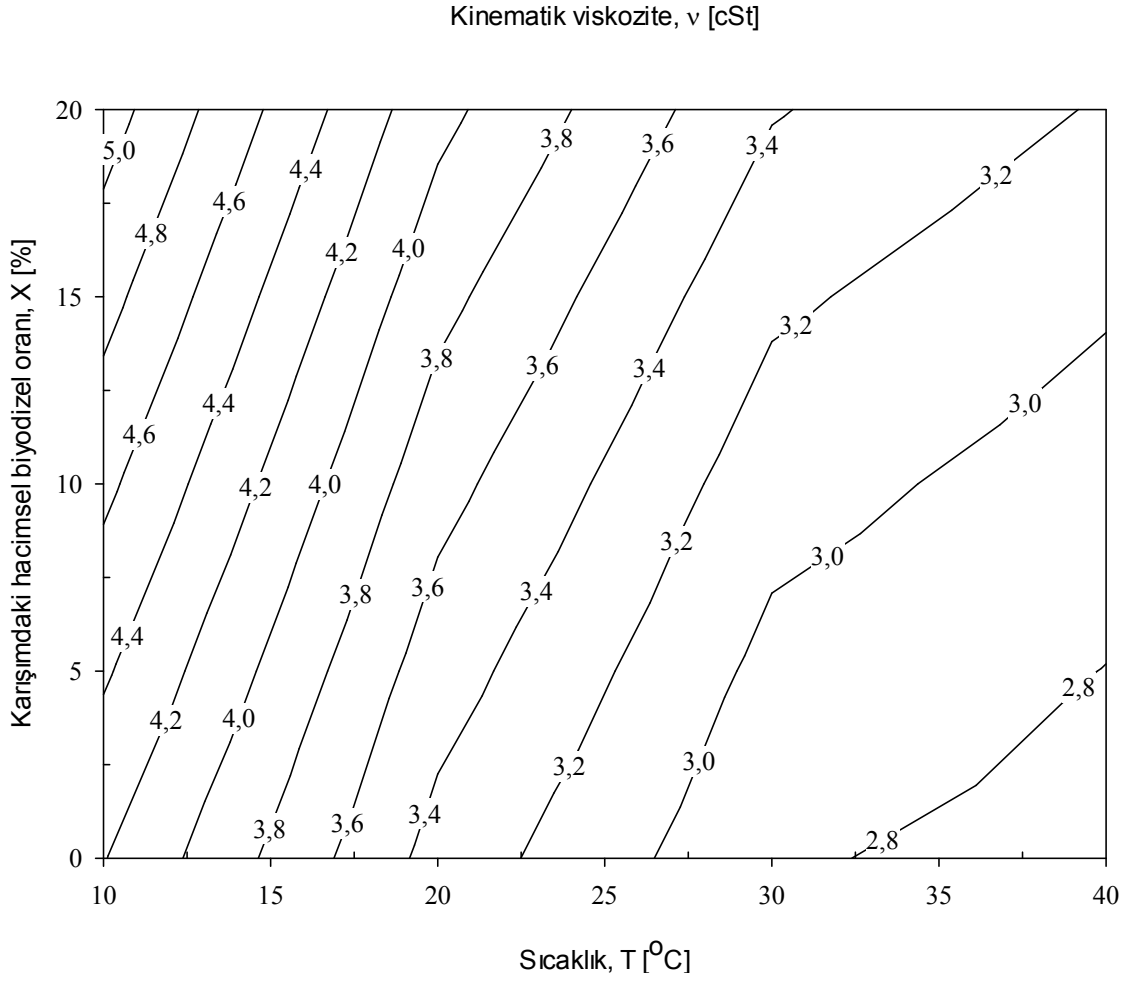
$$v = v(T, X) = a + bT + cX + dT^2 + eTX + fX^2 + gT^3 + hT^2X + kTX^2 \quad (3.63)$$

şeklinde X [%] karışımdaki hacimsel biyodizel oranına 2. dereceden, T [°C] sıcaklığına ise 3. dereceden bağımlı iki-boyutlu fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada a, b, ..., k sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, hesaplanan değerlere göre kinematik viskoziteleri karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, söz konusu şekilde de farklı karakterdeki iki ayrı bölge görülebilir. Birinci bölge olarak adlandırılan yüksek sıcaklık ve düşük biyodizel oranı bölgesinde eş-viskozite eğrileri daha seyrek ve yataya yakın iken; ikinci bölge olarak adlandırılan düşük sıcaklık ve yüksek biyodizel oranı bölgesinde eğriler daha sık ve dikeye yakın karakterdedir. Buna göre, birinci bölgede sıcaklıktaki büyük bir değişime karşılık viskozitede küçük bir değişim görülürken yani viskozite değişiminin sıcaklığa karşı hassasiyeti az iken, ikinci bölgede tam tersine sıcaklıktaki küçük bir değişime karşılık viskozitede daha büyük değişim gözlemlendiğinden viskozitenin sıcaklık değişimine karşı duyarlılığının daha fazla olduğu söylenebilir.





Şekil 3.143. Ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımındaki biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.144. Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri

### 3.5.2.2. Teorik Olarak En Yüksek Metil Ester Verimine Sahip Biyodizel İçin Değişimler

Potasyum hidroksit kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelleri içerisinde teorik olarak en yüksek metil ester verimine sahip biyodizel ile dizel yakıtı hacimsel olarak belirli oranlarda (% 5, 10, 15, 20) karıştırılarak elde edilen yakıt karışımlarının çeşitli sıcaklıklardaki (10, 20, 30, 40°C) dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerleri belirlenmiştir. Söz konusu biyodizelin üretim parametreleri aşağıdaki gibidir:

Yağ: Fındık yağı

Katalizör türü: KOH

Katalizör oranı: %1,25

Reaksiyon sıcaklığı: 60°C

Reaksiyon süresi: 60 dakika

Kullanılan alkol/yağ mol oranı: 6:1

### 3.5.2.2.1. Sıcaklığa Göre Değişimler

Söz konusu biyodizel-dizel yakıtı karışımları için dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin sıcaklığa göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.145, 3.146 ve 3.147’de verilmektedir.

Şekil 3.145’te potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, burada da diğer dinamik viskozite-sıcaklık değişimi şekillerinde olduğu gibi, saf biyodizel, biyodizel-dizel yakıtı karışımları ve saf dizel yakıtının viskozite değerlerinin sıcaklık arttıkça eksponansiyel olarak azaldığı görülmüştür. Düşük sıcaklıklarda saf biyodizel ve saf dizel yakıtının dinamik viskoziteleri arasındaki fark daha fazla iken, artan sıcaklıkla birlikte eğriler birbirlerine eksponansiyel olarak yaklaşmaktadır. Belirtilen mol oranı kullanılarak (6:1) üretilen saf fındık yağı biyodizelinin de dinamik viskozitesinin sıcaklıkla eksponansiyel değişiminin, mısır yağı biyodizelinden farklı olarak doğrusala oldukça yakın bir karakterde olduğu gözlenmektedir. Söz konusu dinamik viskozite değerlerine,

$$\mu = \mu(T) = y_0 + ae^{-bT} \quad (3.64)$$

şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

Şekil 3.146’da potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklığa göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil

incelendiğinde, burada da diğer yoğunluk-sıcaklık değişimi şekillerinde olduğu gibi, yoğunluk değerlerinin beklendiği gibi sıcaklık arttıkça azaldığı, ölçüm yapılan sıcaklık aralığında yoğunluk değerlerinin sıcaklık arttıkça doğrusala yakın olmakla birlikte ikinci dereceden bir değişim gösterdiği belirlenmiştir. Bu nedenle söz konusu yoğunluk değerlerine,

$$\rho = \rho(T) = y_0 + aT + bT^2 \quad (3.65)$$

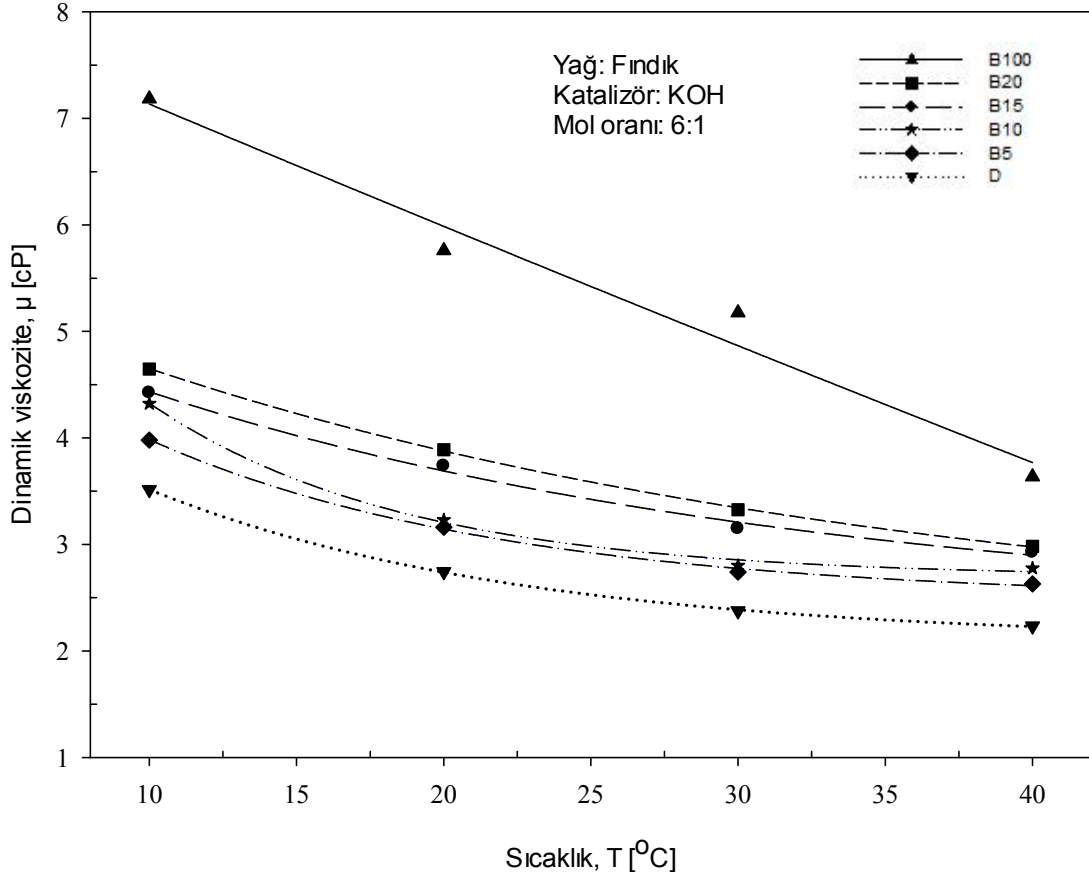
şeklindeki bir-boyutlu parabolik bir fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

Şekil 3.147’de potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, burada da diğer kinematik viskozite-sıcaklık değişimi şekillerinde olduğu gibi, yoğunluk değerlerinin sıcaklık ile değişimlerinin doğrusala yakın karakterde ve yatay eğilimli (Şekil 3.146) olması nedeniyle dinamik viskozite değerlerinin sabit yoğunluk değerlerine bölünüyormuş gibi bir etki yaratması sonucu, kinematik viskozitelerin sıcaklıkla değişimleri de dinamik viskozitelerin sıcaklık ile değişimlerine (Şekil 3.145) oldukça benzer karakterde olduğu görülebilir. Diğer bir ifade ile kinematik viskozitelerin de artan sıcaklıkla birlikte eksponansiyel olarak azaldığı belirlenmiştir. Belirtilen mol oranı kullanılarak (6:1) üretilen saf fındık yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin sıcaklıkla eksponansiyel değişiminin, mısır yağı biyodizelinden farklı olarak doğrusala oldukça yakın bir karakterde olduğu gözlenmektedir. Söz konusu kinematik viskozite değerlerine,

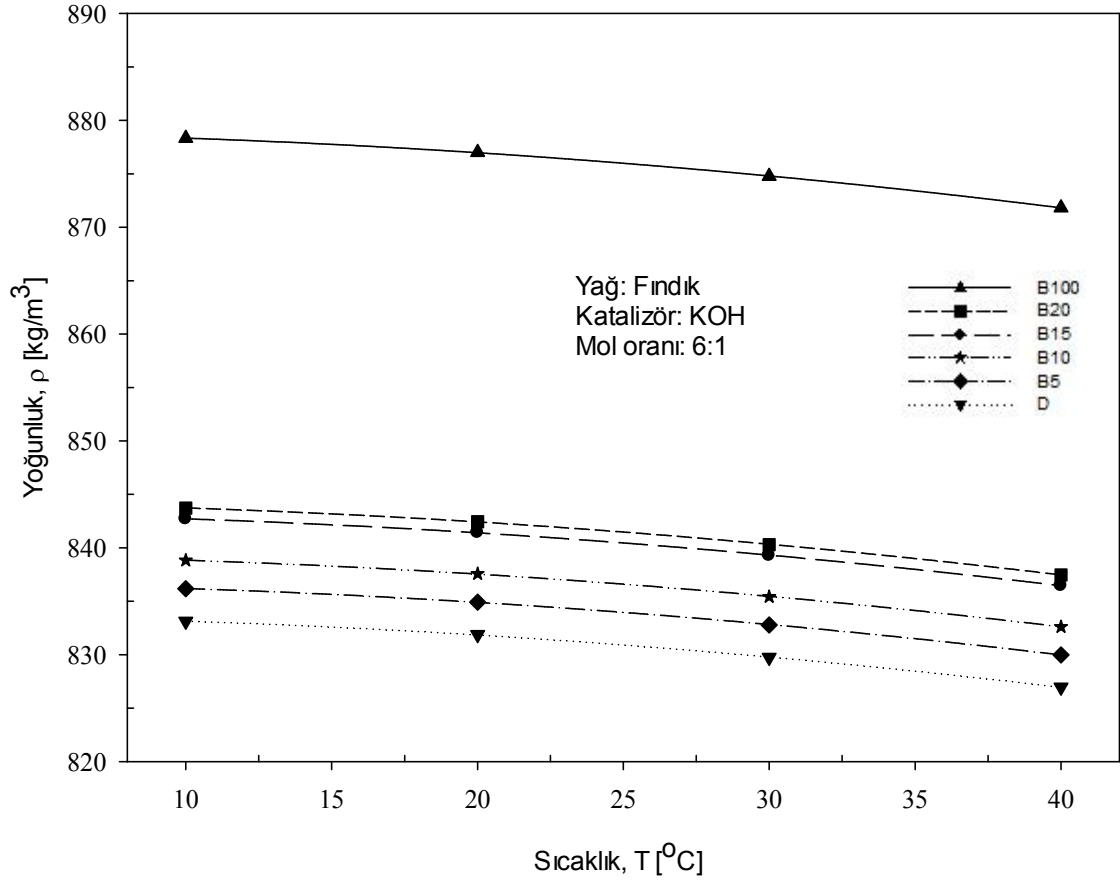
$$v = v(T) = y_0 + ae^{-bT} \quad (3.66)$$

şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki

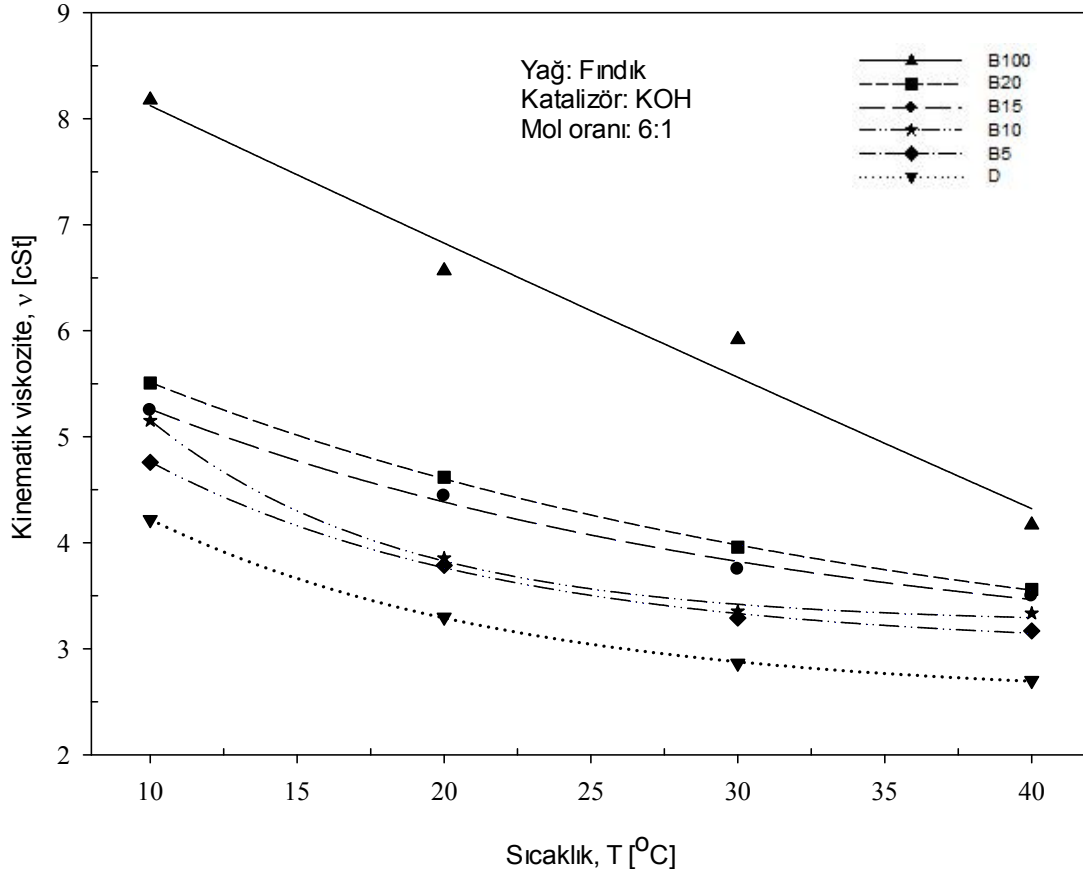
sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ) ve ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.



Şekil 3.145. Potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri



Şekil 3.146. Potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklığa göre değişimleri



Şekil 3.147. Potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli, saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklığa göre değişimleri

### 3.5.2.2.2. Karışımdaki Hacimsel Biyodizel Oranına Göre Değişimler

Söz konusu biyodizel-dizel yakıtı karışımları için dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozite değerlerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri sırasıyla Şekil 3.148, 3.149 ve 3.150’de verilmektedir.

Şekil 3.148’de potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için dinamik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri verilmiştir. Daha önceden bahsedildiği gibi karışımdaki biyodizel oranının sıfır olması saf dizel yakıtına, 100 olması da saf biyodizele karşılık gelmektedir. Söz konusu şekil incelendiğinde, burada da diğer dinamik viskozite-karışımdaki hacimsel biyodizel oranı değişimi şekillerinde olduğu gibi, biyodizelin dinamik viskozitesinin dizel yakıtına göre

yüksek olması nedeniyle karışımdaki hacimsel biyodizel oranı arttıkça biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının viskozite değerlerinin arttığı görülmüştür. Viskozitelerin artan biyodizel oranı ile birlikte eksponansiyel olarak azalarak arttığı belirlenmiştir. Sıcaklık azaldıkça karışımdaki hacimsel biyodizel oranının artışı ile dinamik viskozitelerdeki değişimin doğrusal niteliğe yaklaştığı görülmüştür. Ayrıca, 30 ve 40°C sıcaklıklarda %0, 10 ve 15 hacimsel biyodizel oranlarındaki dinamik viskoziteler birbirlerine yakın değerler almıştır. Söz konusu dinamik viskozite değerlerine,

$$\mu = \mu(X) = y_0 + ae^{-bX} \quad (3.67)$$

şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

Şekil 3.149'da potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için yoğunluklarının karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri verilmiştir. Daha önceden bahsedildiği gibi karışımdaki biyodizel oranının sıfır olması saf dizel yakıtına, 100 olması da saf biyodizele karşılık gelmektedir. Söz konusu şekil incelendiğinde, burada da diğer yoğunluk-karışımdaki hacimsel biyodizel oranı değişimi şekillerinde olduğu gibi, biyodizelin yoğunluğu dizel yakıtınıninkine göre yüksek olduğundan, karışımdaki hacimsel biyodizel oranı arttıkça biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluk değerlerinin beklendiği gibi doğrusal olarak arttığı görülmüştür. Ayrıca, belirli bir karışım oranı için sıcaklık azaldıkça yoğunluk değerleri birbirlerine yaklaşmaktadır. Söz konusu yoğunluk değerlerine,

$$\rho = \rho(X) = y_0 + aX \quad (3.68)$$

şeklindeki bir-boyutlu doğrusal fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$  ve  $a$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri,

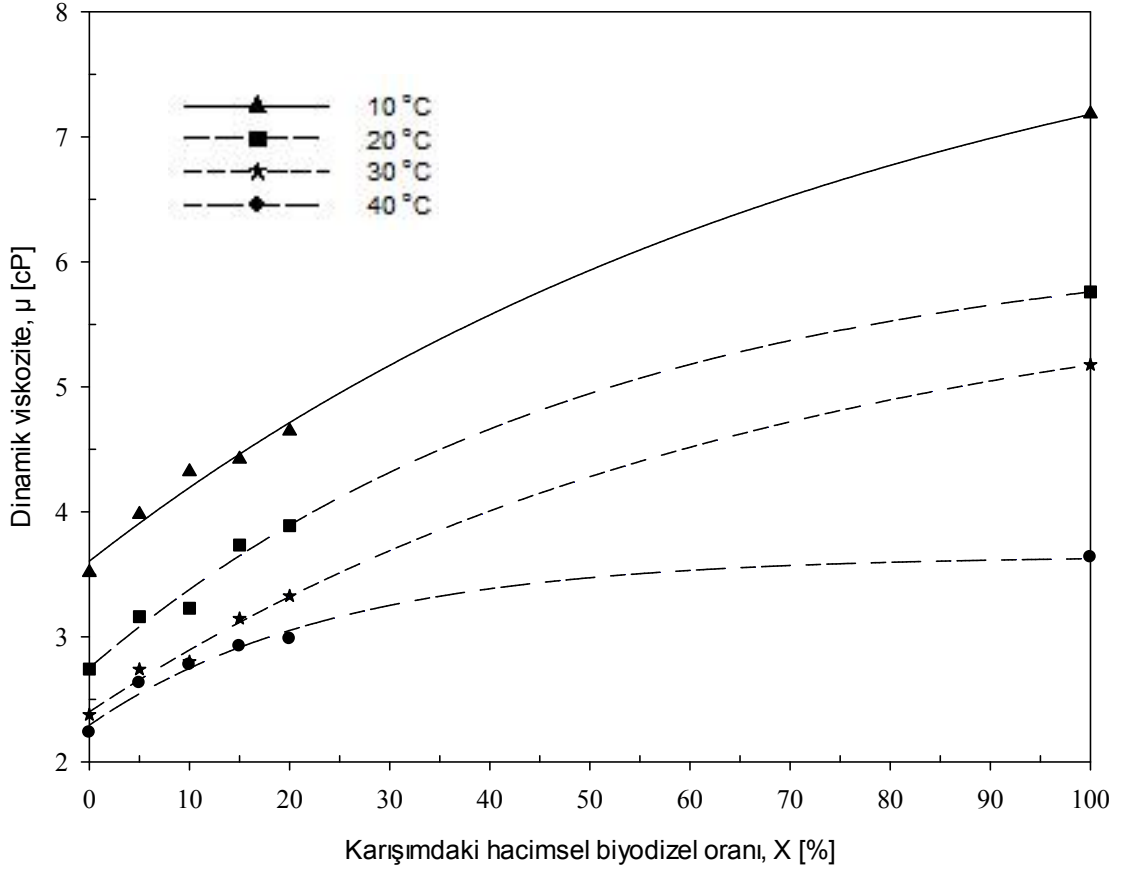


korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.

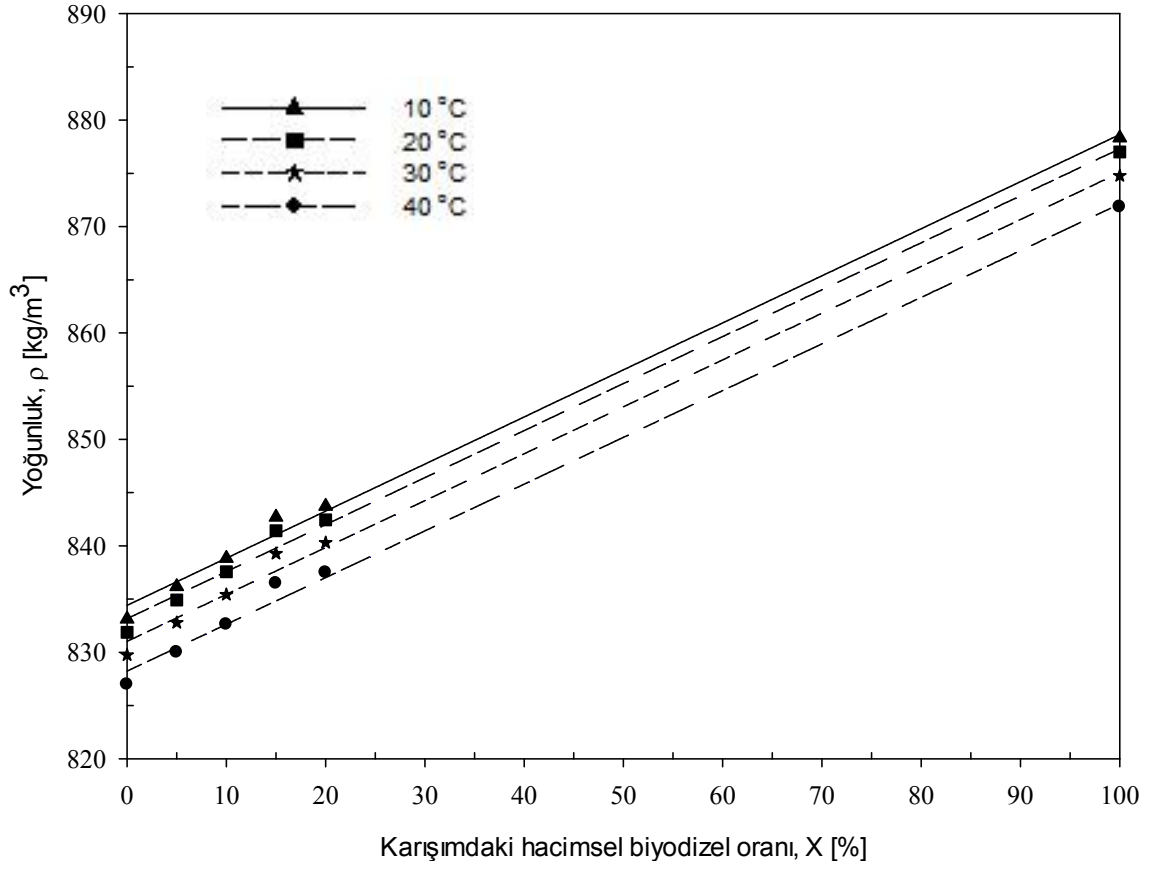
Şekil 3.150'de potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için kinematik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri verilmiştir. Burada da karışımdaki biyodizel oranının sıfır olması saf dizel yakıtına, 100 olması da saf biyodizele karşılık gelmektedir. Söz konusu şekil incelendiğinde, yoğunluk değerlerinin karışım oranı ile değişimlerinin (Şekil 3.137) doğrusal olmasıyla birlikte eğimlerinin çok küçük olması nedeniyle dinamik viskozite değerlerinin sabit yoğunluk değerlerine bölünmüş gibi bir etki yaratması sonucu kinematik viskozitelerin karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ile değişimleri de dinamik viskozitenin karışımdaki hacimsel biyodizel oranı (Şekil 3.136) ile değişimlerine oldukça benzer karakterde elde edilmiştir. Diğer bir ifade ile, burada da diğer kinematik viskozite-karışımdaki hacimsel biyodizel oranı değişimi şekillerinde olduğu gibi, kinematik viskozitelerin de artan biyodizel oranı ile eksponansiyel olarak azalarak arttığı belirlenmiştir. Burada da sıcaklık azaldıkça karışımdaki hacimsel biyodizel oranının artışı ile kinematik viskozitelerdeki değişimin doğrusal niteliğe yaklaştığı görülmüştür. Ayrıca, 30 ve 40°C sıcaklıklarda %0, 10 ve 15 hacimsel biyodizel oranlarındaki kinematik viskoziteler birbirlerine yakın değerler almıştır Söz konusu kinematik viskozite değerlerine,

$$v = v(X) = y_0 + ae^{-bX} \quad (3.69)$$

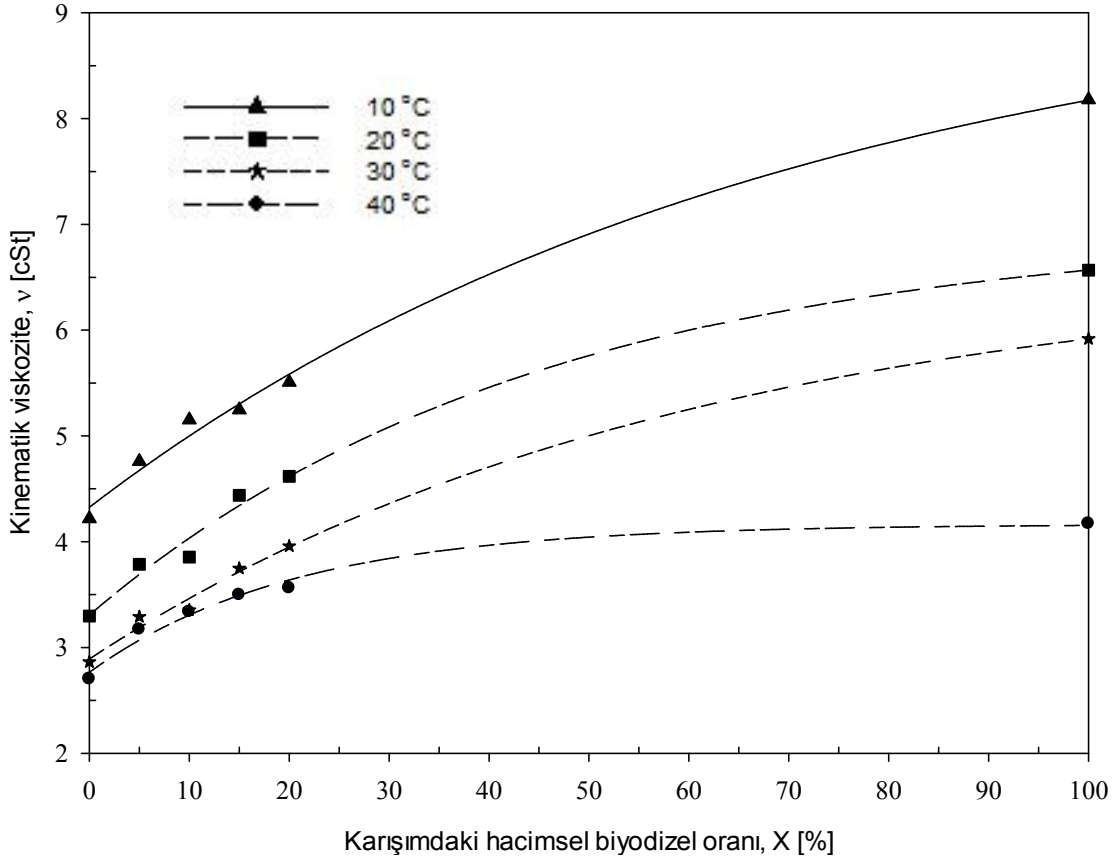
şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada  $y_0$ ,  $a$  ve  $b$  sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.



Şekil 3.148. Potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için dinamik viskozitelerinin karışımındaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.149. Potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için yoğunluklarının karışımındaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.150. Potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklar için kinematik viskozitelerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri

### 3.5.2.2.3. Karışımdaki Hacimsel Biyodizel Oranı ve Sıcaklığa Göre Değişimler

Şekil 3.151’de, ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri iki-boyutlu eş-viskozite eğrileri şeklinde verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, ölçülen değerlere göre dinamik viskozitelerin karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, farklı karakterdeki iki ayrı bölge görülebilir. Birinci bölge olarak adlandırılan yüksek sıcaklık ve düşük biyodizel oranı bölgesinde eş-viskozite eğrileri daha seyrek ve yataya yakın iken; ikinci bölge olarak adlandırılan düşük sıcaklık ve yüksek biyodizel oranı bölgesinde eğriler daha sık ve dikeye yakın karakterdedir. Buna göre, birinci bölgede sıcaklıktaki büyük bir değişime karşılık

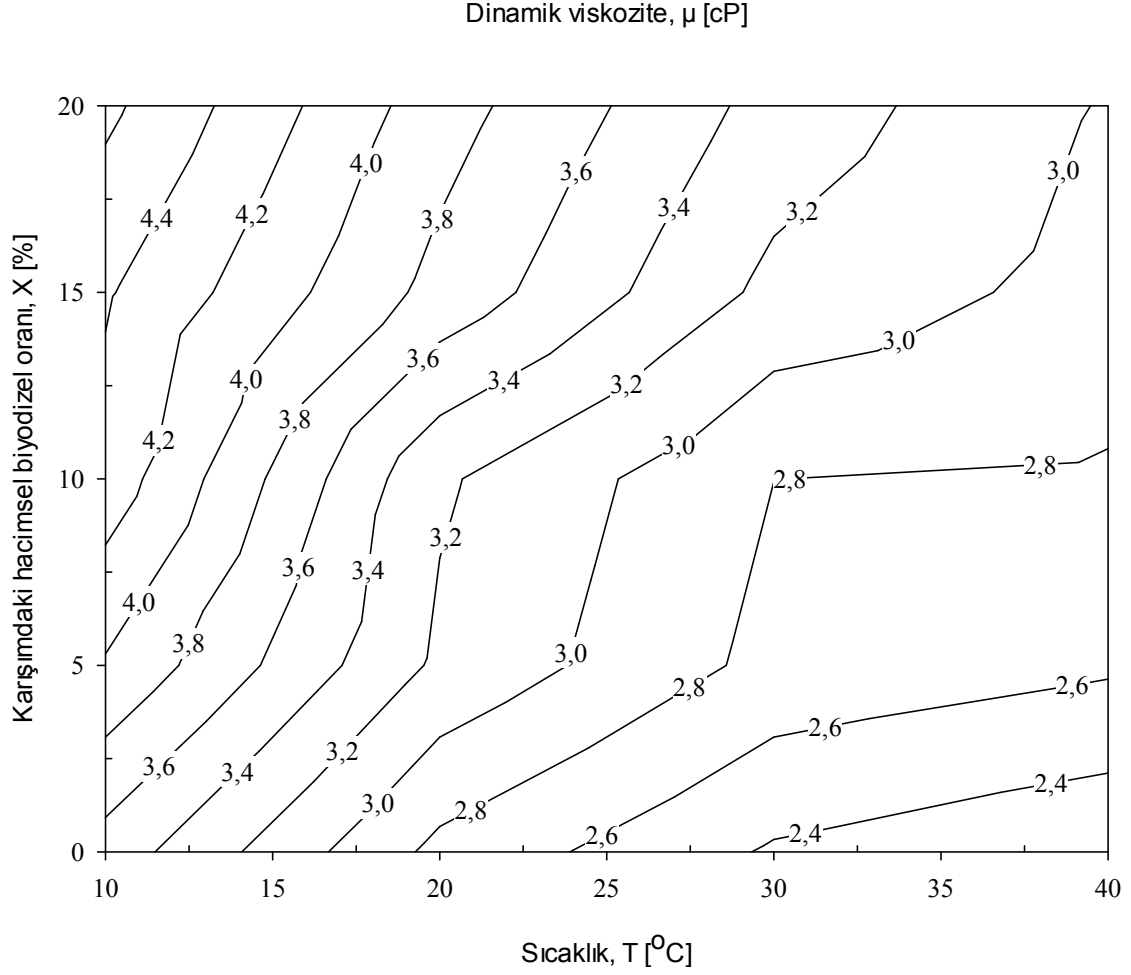
viskozitede küçük bir değişim görülürken, ikinci bölgede tam tersine sıcaklıktaki küçük bir değişime karşılık viskozitede daha büyük değişim gözlemlenmektedir.

Şekil 3.152'de, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin ölçüm değerlerine uyumlanan iki-boyutlu  $\mu = \mu(T, X)$  fonksiyonundan elde edilen değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimlerine ilişkin eş-viskozite eğrileri verilmektedir. Hatırlanacağı üzere karışımdaki hacimsel biyodizel oranı olarak %0, 5, 10, 15, 20 ve 100 değerleri parametre olarak seçilmişti. Eğri uyumlarken % 20 ile % 100 arasındaki ölçüm yapılmamış geniş bölgenin hassasiyeti azaltmaması için söz konusu eğriler sadece sık ölçüm yapılan % 0-20 değerlerini kapsayacak şekilde çizilmiştir. Sıcaklıklar için ise yine ölçüm yapılmış olan 10-40°C aralığı dikkate alınmıştır. Deneysel veriler incelendiğinde, saf biyodizel ve dizel yakıtı ile biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranıyla değişimine,

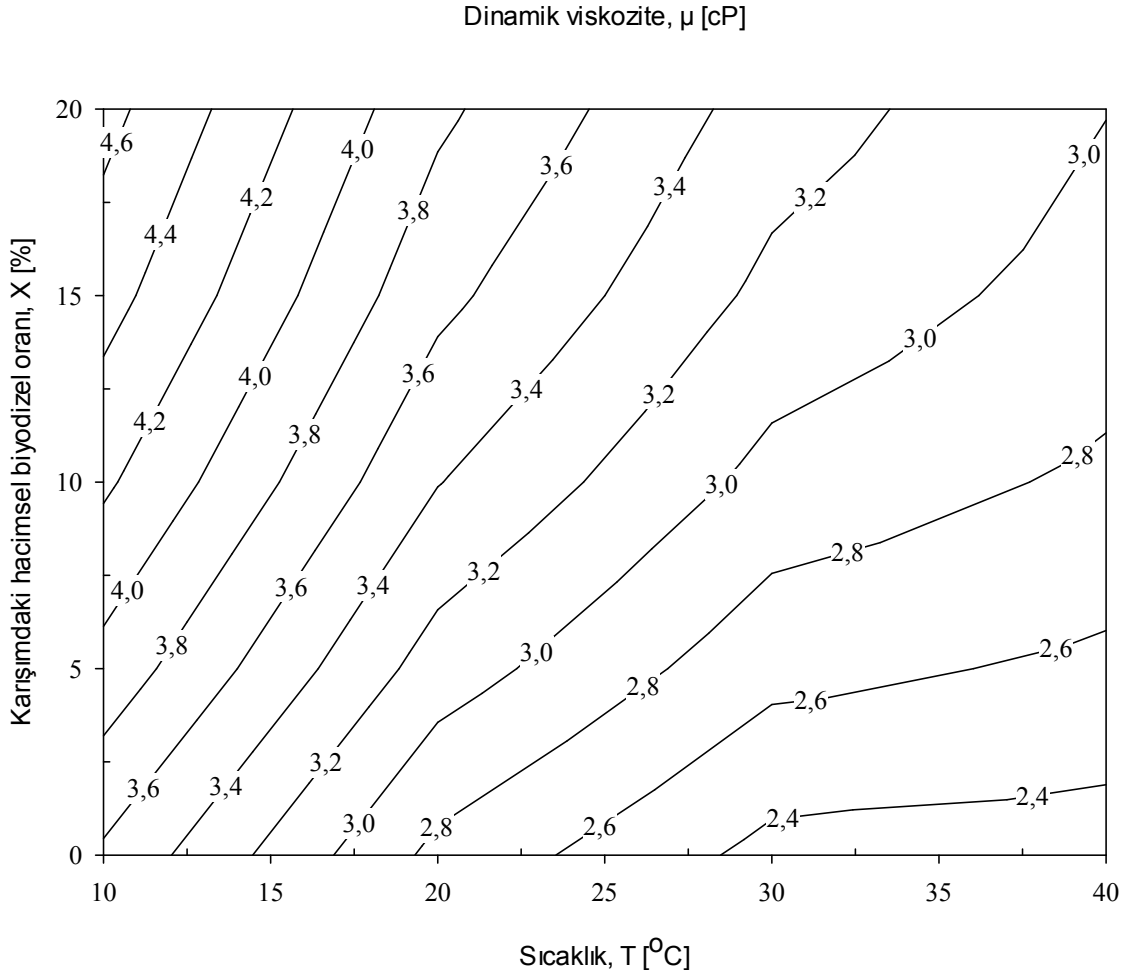
$$\mu = \mu(T, X) = a + bT + cX + dT^2 + eTX + fX^2 + gT^3 + hT^2X + kTX^2 \quad (3.70)$$

şeklinde X [%] karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre 2. dereceden, T [°C] sıcaklığına ise 3. dereceden bağımlı iki-boyutlu fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada a, b, ..., k sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir. Söz konusu eşitlikten elde edilen dinamik viskozite değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimi grafiği incelendiğinde, hesaplanan değerlere göre dinamik viskozitelerin karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, farklı karakterdeki iki ayrı bölge görülebilir. Birinci bölge olarak adlandırılan yüksek sıcaklık ve düşük biyodizel oranı bölgesinde eş-viskozite eğrileri daha seyrek ve yataya yakın iken; ikinci bölge olarak adlandırılan düşük sıcaklık ve yüksek biyodizel oranı bölgesinde eğriler daha sık ve dikeye yakın karakterdedir. Buna göre, birinci bölgede sıcaklıktaki büyük bir değişime karşılık viskozitede küçük bir değişim görülürken yani viskozite değişiminin sıcaklığa karşı hassasiyeti az iken, ikinci bölgede tam tersine sıcaklıktaki küçük bir değişime karşılık viskozitede daha büyük

değişim gözlemlendiğinden viskozitenin sıcaklık değişimine karşı duyarlılığının daha fazla olduğu söylenebilir.



Şekil 3.151. Ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.152. Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri

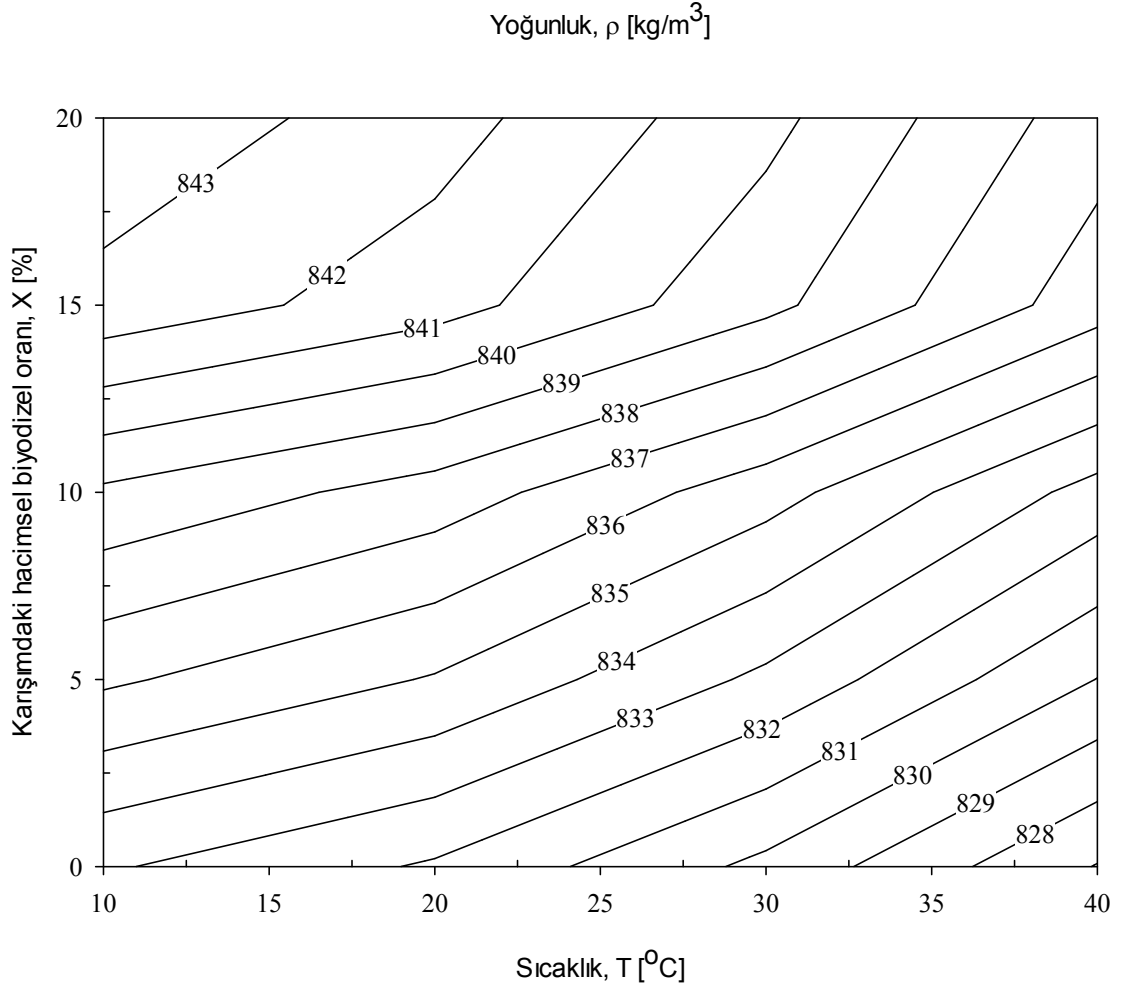
Şekil 3.153'te, ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluk değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri iki-boyutlu eş-yoğunluk eğrileri şeklinde verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, ölçülen değerlere göre yoğunlukların karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, eş-yoğunluk eğrileri aralarındaki mesafeler yaklaşık olarak sabit olacak şekilde (sabit gradyana sahip), yoğunluğun karışımdaki biyodizel oranına göre değişiminin doğrusal, sıcaklığa göre değişiminin ise parabolik karakterde olduğu belirlenmiştir. Bu durum daha belirgin olarak Şekil 3.154'te görülmektedir.

Şekil 3.154'te, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluk değerlerinin ölçüm değerlerine uyumlanan iki-boyutlu  $\rho = \rho(T, X)$  fonksiyonundan elde edilen değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimlerine ilişkin eş-yoğunluk eğrileri verilmektedir. Yukarıda da belirtildiği gibi karışımdaki hacimsel biyodizel oranı olarak %0, 5, 10, 15, 20 ve 100 değerleri parametre olarak seçilmiştir. Eğri uyumlarken % 20 ile % 100 arasındaki ölçüm yapılmamış geniş bölgenin hassasiyeti azaltmaması için söz konusu eğriler sadece sık ölçüm yapılan % 0-20 değerlerini kapsayacak şekilde çizilmiştir. Yoğunluk değerlerinin sıcaklığa göre değişiminin (Şekil 3.146) parabolik, karışımdaki biyodizel oranına göre değişiminin ise doğrusal (Şekil 3.149) olduğu belirtilmiştir. Buna göre, hesaplanan değerlere göre yoğunlukların karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, sabit eş-yoğunluk eğrisi için, karışımın sıcaklığı arttıkça karışımdaki biyodizel oranı parabolik olarak artmaktadır. Ayrıca, sabit bir sıcaklıkta yoğunluğu bir birim değiştirmek için karışımdaki biyodizel oranının yaklaşık sabit bir değerde değiştirilmesi gerekirken, sabit bir karışım oranında yoğunluğu bir birim değiştirmek için düşük sıcaklıklarda daha fazla sıcaklık değişimi, yüksek sıcaklıklarda ise daha az sıcaklık değişimi gerekmektedir. Deney sonuçları incelendiğinde, yoğunlukların sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranıyla değişimine,

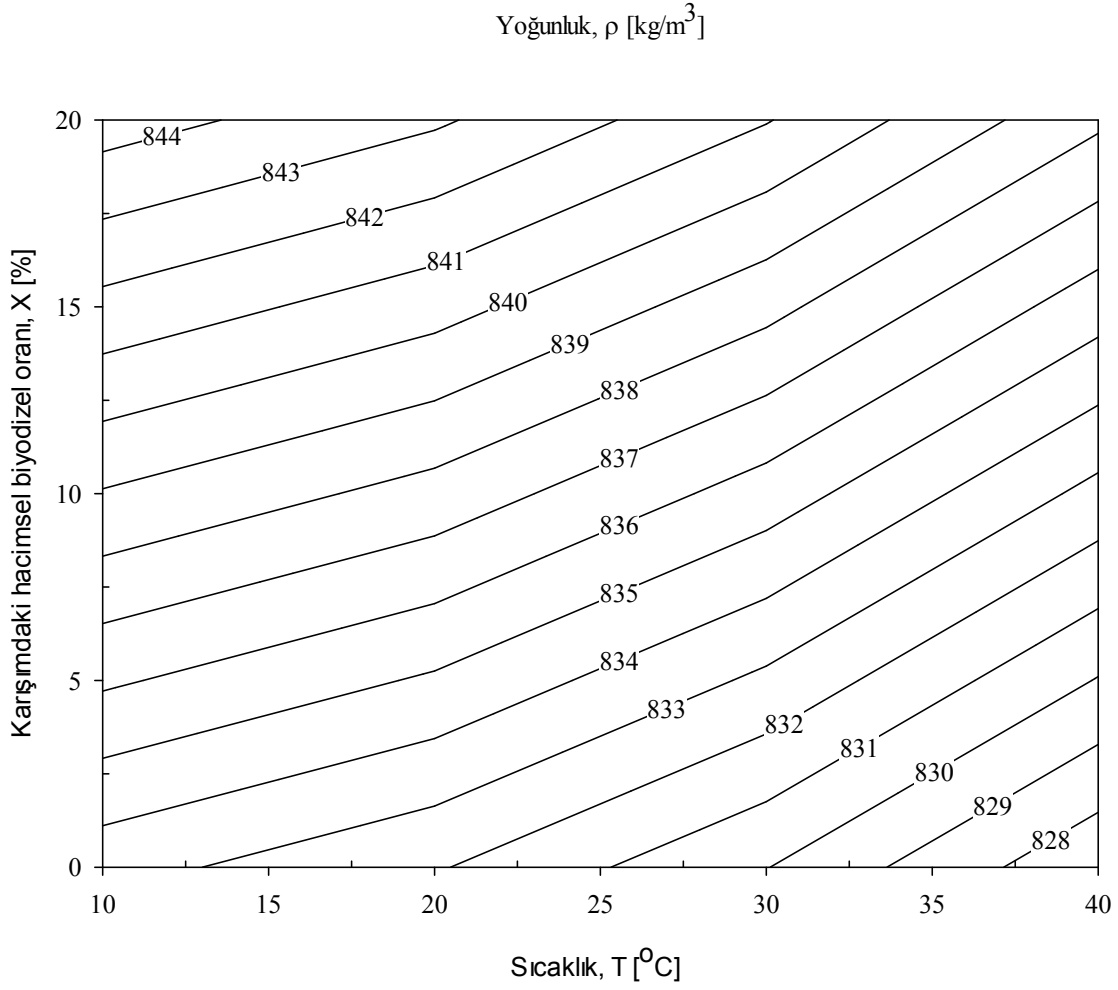
$$\rho = \rho(T, X) = a + bT + cX + dT^2 + eTX \quad (3.71)$$

şeklinde X [%] karışımdaki hacimsel biyodizel oranına 1. dereceden ve T [°C] sıcaklığına 2. dereceden bağımlı iki-boyutlu fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada a, b, c, d ve e sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir.





Şekil 3.153. Ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımındaki biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.154. Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluklarının sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri

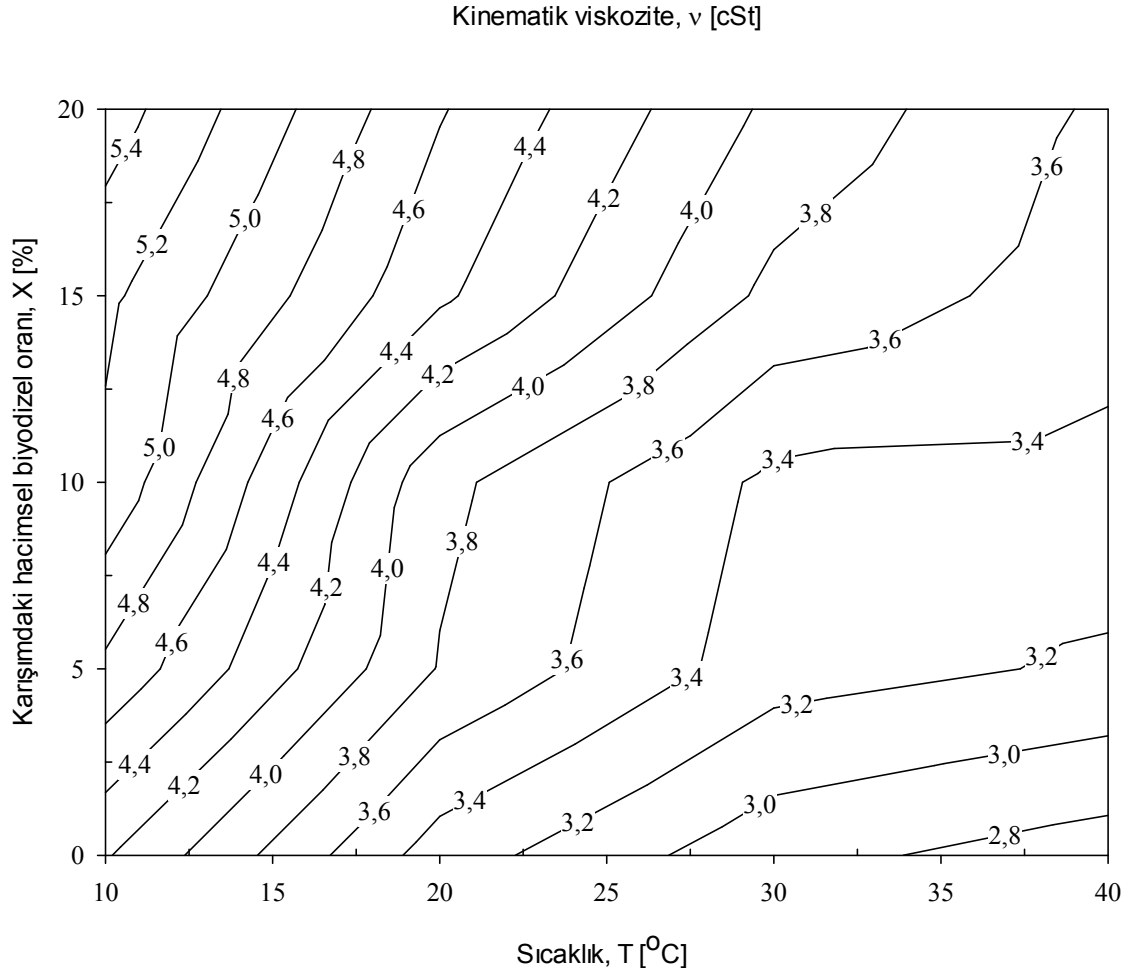
Şekil 3.155'te, ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri iki-boyutlu eş-viskozite eğrileri şeklinde verilmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, ölçülen değerlere göre kinematik viskozitelerin karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, yoğunluk değerlerinin karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimlerinin doğrusal, sıcaklığa göre değişimlerinin ise doğrusala yakın olması nedeniyle dinamik viskozite değerlerinin sabit yoğunluk değerlerine bölünüyormuş gibi bir etki yaratması sonucu, kinematik viskozitelerin sıcaklık

ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimleri de dinamik viskozitelerin değişimlerine (Şekil 3.151) oldukça benzer karakterde olduğu görülebilir.

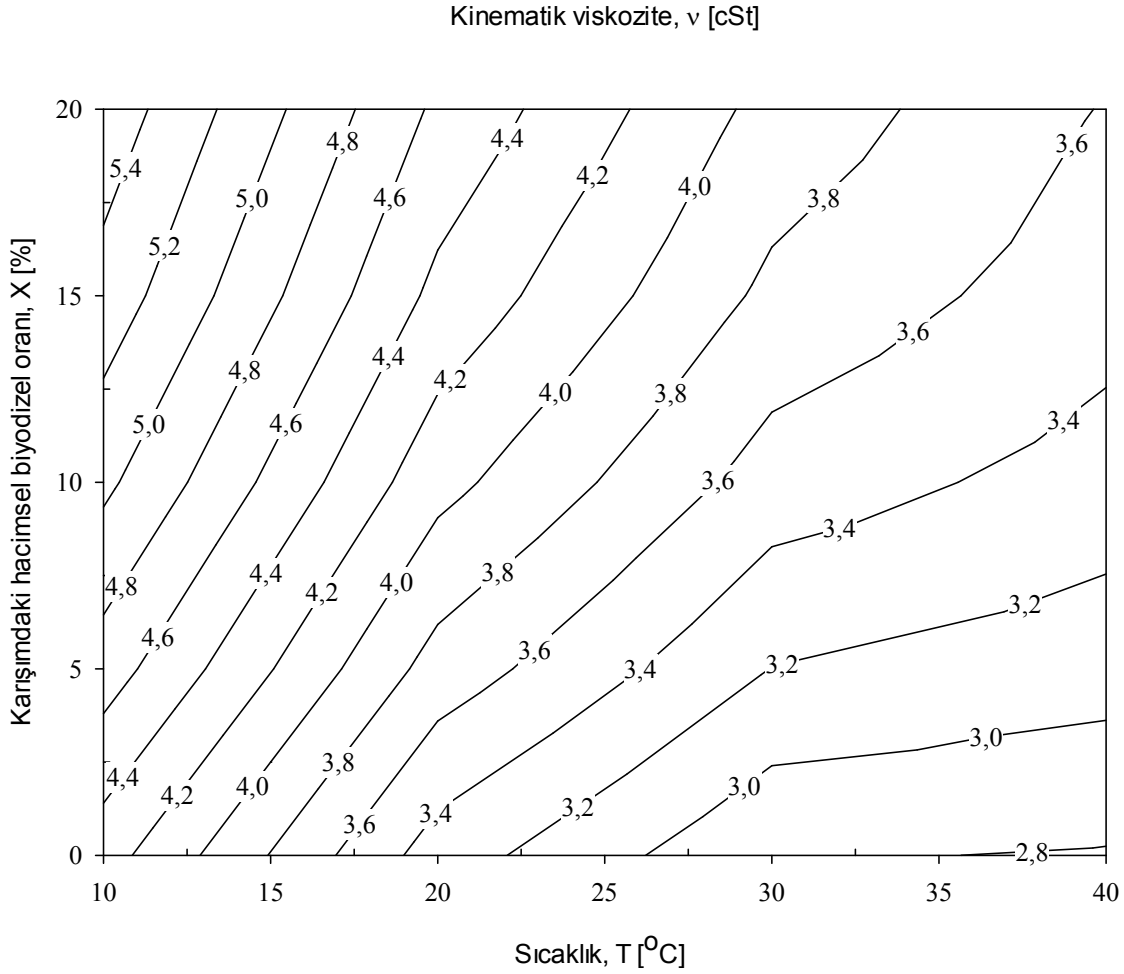
Şekil 3.156'da, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin ölçüm değerlerine uyumlanan iki-boyutlu  $v = v(T, X)$  fonksiyonundan elde edilen değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimlerine ilişkin eş-viskozite eğrileri verilmiştir. Hatırlanacağı üzere karışımdaki hacimsel biyodizel oranı olarak %0, 5, 10, 15, 20 ve 100 değerleri parametre olarak seçilmiştir. Eğri uyumlar için %20 ile %100 arasındaki ölçüm yapılmamış geniş bölgenin hassasiyeti azaltmaması için söz konusu eğriler sadece sık ölçüm yapılan % 0-20 değerlerini kapsayacak şekilde çizilmiştir. Deneysel veriler incelendiğinde, saf biyodizel ve dizel yakıtı ile biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranıyla değişimine,

$$v = v(T, X) = a + bT + cX + dT^2 + eTX + fX^2 + gT^3 + hT^2X + kTX^2 \quad (3.72)$$

şeklinde X [%] karışımdaki hacimsel biyodizel oranına 2. dereceden, T [°C] sıcaklığına ise 3. dereceden bağımlı iki-boyutlu fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Burada a, b, ..., k sabit değerleri ifade etmektedir. En küçük kareler yöntemiyle, saf biyodizel ve dizel ile biyodizel-dizel yakıtı karışımları için yukarıda verilen eşitlikteki sabitlerin değerleri, korelasyon katsayıları ( $r^2$ ), ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki mutlak hata ve mutlak hata oranları belirlenmiştir. Söz konusu şekil incelendiğinde, hesaplanan değerlere göre kinematik viskoziteleri karışımdaki hacimsel biyodizel oranı ve sıcaklığa göre değişimlerini gösteren diğer şekillerde olduğu gibi, söz konusu şekilde de farklı karakterdeki iki ayrı bölge görülebilir. Birinci bölge olarak adlandırılan yüksek sıcaklık ve düşük biyodizel oranı bölgesinde eş-viskozite eğrileri daha seyrek ve yataya yakın iken; ikinci bölge olarak adlandırılan düşük sıcaklık ve yüksek biyodizel oranı bölgesinde eğriler daha sık ve dikeye yakın karakterdedir. Buna göre, birinci bölgede sıcaklıktaki büyük bir değişime karşılık viskozitede küçük bir değişim görülürken yani viskozite değişiminin sıcaklığa karşı hassasiyeti az iken, ikinci bölgede tam tersine sıcaklıktaki küçük bir değişime karşılık viskozitede daha büyük değişim gözlemlendiğinden viskozitenin sıcaklık değişimine karşı duyarlılığının daha fazla olduğu söylenebilir.



Şekil 3.155. Ölçüm değerlerine göre, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri



Şekil 3.156. Uyumlanan iki-boyutlu fonksiyondan elde edilen değerlere göre, potasyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri

### 3.6. Maliyet Analizi

Bu başlık altında en uygun parametreler ışığında (en düşük viskoziteyi veren parametreler) üretilmiş olan mısır yağı ve fındık yağı biyodizelleri için basit bir maliyet analizi yapılmıştır. En uygun parametrelerin mısır yağı için %1,10 oranında potasyum hidroksit, 60°C reaksiyon sıcaklığı, 1 saat reaksiyon süresi ve 9:1 alkol/yağ mol oranı; fındık yağı için ise %1,25 oranında potasyum hidroksit, 60°C reaksiyon sıcaklığı, 1 saat reaksiyon süresi ve 9:1 alkol/yağ mol oranı olduğu belirlenmişti. Bu şartlarda 600 g mısır ve 600 g fındık yağından sırasıyla 585,43 g (kütlesel %97,57 verim), 580,12 g (kütlesel %96,69 verim) biyodizel elde edilmiştir. Mısır yağı ve fındık yağı, marketlerde 5 Litre'lik tenekelerde sırasıyla 20 ve 25 TL'den satılmaktadır. Deneyler esnasında yağ kütle esasına

göre kullanıldığı için maliyet analizinde mısır ve fındık yağının 20°C'deki yoğunlukları göz önüne alınmıştır. Hatırlatmak gerekirse, (2.2) ve (2.3) başlıkları altında mısır ve fındık yağının 20 °C 'deki yoğunlukları sırasıyla 920,73 kg/m<sup>3</sup> , 919,10 kg/m<sup>3</sup> olarak belirlenmişti. Aynı şekilde metil alkol de kütle bazında kullanıldığı için maliyet analizinde metil alkolün 0,7918 g/cm<sup>3</sup> olan 20°C'deki yoğunluğu göz önüne alınmıştır. Tablo 3.9 ve 3.10'da mısır ve fındık yağı biyodizellerinin üretiminde kullanılan malzemelerin miktarları ve fiyatları verilmektedir.

Tablo 3.9. Mısır yağı biyodizeli üretiminde kullanılan malzemelerin miktarı ve fiyatları

Reaktanlar	Birim fiyatı	Kullanılan miktar	Toplam tutar (TL)
Mısır yağı	20 TL/5 Litre	600 gram	$(600/920,73) \cdot 4 = 2,607$ TL
Metil alkol	13,29 TL/1Litre	198 gram	$(198/791,80) \cdot 13,29 = 3,323$ TL
Katalizör (KOH)	29,67 TL/1 kg	6,6 gram	$(6,6 \cdot 10^{-3} \cdot 29,67) = 0,196$ TL
Toplam			6,13 TL/585,43 g biyodizel

Tablo 3.10. Fındık yağı biyodizeli üretiminde kullanılan malzemelerin miktarı ve fiyatları

Reaktanlar	Birim fiyatı	Kullanılan miktar	Toplam tutar (TL)
Fındık yağı	25 TL /5 Litre	600 gram	$(600/919,10) \cdot 5 = 3,264$ TL
Metil alkol	13,29 TL/1 Litre	196 gram	$(196/791,80) \cdot 13,29 = 3,289$ TL
Katalizör (KOH)	29,67 TL /1 kg	6,6 gram	$(6,6 \cdot 10^{-3} \cdot 29,67) = 0,196$ TL
Toplam			6,75 TL/580,12 g biyodizel

Hem mısır yağı hem de fındık yağından biyodizel üretimi aşamasında, yağın ısıtılması, reaksiyonun gerçekleşmesi ve yıkanan biyodizelin ısıtılması için 0,43 kW'lik manyetik karıştırıcı ısıtıcı yaklaşık 1 saat 20 dakika kullanılmıştır. Bu süre zarfında elektrik tüketiminin tutarı Tablo 3.11'de verilmiştir.

Tablo 3.11. Manyetik karıştırıcılı ısıtıcının harcadığı elektrik miktarı ve tutarı

Alet	Güç [kW]	Çalıştığı süre [saat]	Harcanan enerji [kWh]	Elektriğin birim fiyatı [krş/kWh]	Tutar [TL]
Manyetik karıştırıcılı ısıtıcı	0,43	1,20	0,516	21,199*	0,11

\* Elektriğin birim fiyatı mesken tipi abone kabul edilerek Temmuz 2013-Eylül 2013 ayı elektrik tarifesinden tüm bedeller dâhil gece ve gündüz fiyat ortalaması alınarak belirlenmiştir [106]

Manyetik karıştırıcılı ısıtıcının harcadığı elektrik tutarı da eklenirse toplamda mısır yağı biyodizeli üretiminde (6,13 + 0,11 =) 6,24 TL, fındık yağı biyodizeli üretiminde ise (6,75 + 0,11 =) 6,86 TL'nin harcadığı belirlenir. Başka bir ifade ile bütün giderler hesaba katıldığında 1 kg mısır yağı biyodizelinin maliyeti (6,24 TL/585,43 g =) 10,66 TL, fındık yağı biyodizelinin maliyeti ise (6,86 TL/580,12 g =) 11,83 TL'dir. Bu maliyetlerin üzerine personel gideri, işletme gideri, bakım masrafları, yasal vergiler vb. masraflar eklendiğinde maliyet daha fazla artacaktır. Mısır ve fındık yağı biyodizellerinin litre fiyatlarının belirlenmesi için 20°C'deki yoğunlukları belirlenmiştir. %1,10 oranında potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranı kullanılarak üretilen mısır yağı biyodizelinin kütlesi ( $m_{\text{biyodizel}}$ , g) 85,84 g, %1,25 oranında potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranı kullanılarak üretilen fındık yağı biyodizelinin kütlesi ( $m_{\text{biyodizel}}$ , g) ise 85,65 g olarak belirlenmişti. O halde, (2.5.1) başlığı altında verilen (2.3) numaralı denklem kullanılarak mısır yağı biyodizelinin 20°C'deki yoğunluğu,

$$\rho_{\text{mısır yağı biyodizeli}, 20^\circ\text{C}} = \frac{85,84 - 42,74}{49,09} 998,20$$

$$\rho_{\text{mısır yağı biyodizeli}, 20^\circ\text{C}} = 876,40 \text{ kg/m}^3$$

olarak, fındık yağı biyodizelinin 20°C'deki yoğunluğu ise,

$$\rho_{\text{fındık yağı biyodizeli}, 20^\circ\text{C}} = \frac{85,65 - 42,74}{49,09} 998,20$$

$$\rho_{\text{fındık yağı biyodizeli}, 20^\circ\text{C}} = 872,54 \text{ kg/m}^3$$

olarak belirlenir. Buna göre bütün üretim maliyetleri dahil edildiğinde, 1 Litre mısır ve fındık yağı biyodizellerinin fiyatları sırasıyla,

$$F_{\text{mısır yağı biyodizeli}} = 10,66 \frac{\text{TL}}{\text{kg}} \cdot 0,87640 \frac{\text{kg}}{\text{L}} = 9,34 \text{ TL/L}$$

$$F_{\text{findık yağı biyodizeli}} = 11,83 \frac{\text{TL}}{\text{kg}} \cdot 0,87254 \frac{\text{kg}}{\text{L}} = 10,32 \text{TL/L}$$

elde edilir. Tablo 3.12’de üretilen biyodizellerin ve ticari dizel yakıtının litre fiyatları verilmiştir. Görüldüğü gibi üretimi yapılan biyodizeller, dizel yakıtına göre daha pahalıdır. Ancak, üretimde kullanılan yağ ve diğer kimyasalların küçük ölçekli alımlarla gerçekleştirilmesi ve laboratuvar şartlarında üretimlerinin yapılması nedeniyle maliyetler yüksek çıkmıştır. Büyük ölçekli seri üretimde ve atık yağların kullanılması durumunda maliyetlerin azalacağı açıktır. Bunun yanında, dünyada petrol fiyatlarının sürekli artış göstermesi ve petrolün çok da uzak olmayan bir gelecekte tükenecek olması göz önüne alındığında mısır ve findık yağı biyodizellerinin dizel motorlar için dizel yakıtına alternatif olması kaçınılmazdır.

Tablo 3.12. Üretilen biyodizellerin ve ticari dizel yakıtının litre fiyatları

Yakıt	Litre fiyatı [TL/Litre]
Ultra Force Euro Dizel	4,39*
Mısır yağı biyodizeli	9,34
Fındık yağı biyodizeli	10,32

\* Kaynak [107]



#### 4. SONUÇLAR

Bu deneysel çalışmada elde edilen başlıca sonuçlar özet olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Her bir yağ ve katalizör cinsi için farklı farklı olmak üzere, genel olarak katalizör oranı arttıkça üretilen biyodizellerin dinamik viskozitelerinin belirli bir değere kadar azaldığı, belirli bir katalizör oranında en düşük değere ulaştığı ve daha sonra ise arttığı belirlenmiştir.
2. Her iki katalizör kullanımında da, mısır yağından daha düşük katalizör oranlarında daha düşük dinamik viskoziteli biyodizeller elde edilmiştir.
3. Her iki yağ için de, daha yüksek katalizör oranlarında potasyum hidroksit (KOH) kullanıldığında sodyum hidroksit (NaOH) kullanımına göre daha düşük dinamik viskoziteli biyodizellerin üretildiği belirlenmiştir.
4. Her iki yağ için de, dinamik viskozitenin reaksiyon sıcaklığına göre değişiminde katalizör türü etkilidir.
5. Reaksiyon sıcaklığı arttıkça üretilen biyodizelin dinamik viskozitesi azalmış, belirli bir değerde en düşük değerini almış, bu değerden sonra artan reaksiyon sıcaklığı ile birlikte dinamik viskozite de artış göstermiştir.
6. Potasyum hidroksit kullanılarak gerçekleştirilen üretimlerde yağlar farklı olmasına rağmen en düşük dinamik viskozite değerleri 60°C civarındaki reaksiyon sıcaklığında, sodyum hidroksit kullanılarak gerçekleştirilen üretimlerde ise bu kez 50°C civarında en düşük dinamik viskozite değerleri elde edilmiştir.
7. Dinamik viskozitenin reaksiyon süresine göre değişiminin karakteristiğini belirlemede yağın cinsinin katalizör türüne göre daha etkin olduğu belirlenmiştir.
8. Mısır yağından üretilen biyodizellerin dinamik viskozitelerinin reaksiyon süresine göre değişimleri daha az iken, fındık yağından üretilen biyodizellerin dinamik viskoziteleri reaksiyon süresine göre daha belirgin bir değişim göstermiştir.
9. Genel olarak, üretilen biyodizelin dinamik viskozitesi reaksiyon süresi arttıkça azalmış, 60 dakika reaksiyon süresinde en düşük değerini almıştır. Bu değerden sonra artan reaksiyon süresi ile birlikte dinamik viskozite yavaşça artarak, geçen süre ile birlikte sabit kalma eğilimine girdiği görülmüştür. Diğerlerinden farklı olarak

potasyum hidroksit ve fındık yağı kullanılarak üretilen biyodizelin dinamik viskozitesinin sabit kalma eğiliminin gerçekleştiği süre yakalanamamıştır.

10. Dinamik viskozitenin alkol/yağ mol oranına göre değişiminin karakteristiğine esas olarak yağın cinsinin belirgin bir şekilde etki ettiği belirlenmiştir.
11. Her iki yağdan da üretilen biyodizellerin dinamik viskoziteleri artan alkol/yağ mol oranı ile birlikte azalarak 9:1 alkol/yağ mol oranında en düşük değere ulaşıktan sonra, alkol/yağ mol oranı artırılmaya devam edildiğinde mısır yağı biyodizellerinin viskozite değerleri pek fazla artmazken, fındık yağı biyodizellerinin dinamik viskozite değerleri belirgin bir şekilde artmaya devam ettiği belirlenmiştir.
12. İncelenen tüm parametreler dikkate alındığında, yoğunluktaki değişimler yukarıda dinamik viskozite için yapılan değerlendirmeleri farklı kılacak düzeyde olmadığından, dinamik viskozite için yapılan değerlendirmelerin tümü kinematik viskozitelerin değişimi içinde geçerlidir.
13. Ölçülen ve hesaplanan tüm değerler için belirlenen belirsizlikler %0,016 ile %0,054 aralığında değiştiği için sonuçların oldukça yüksek güvenilirliğe sahip olduğu söylenebilir.
14. Veri değerlerine uyumlanan fonksiyonlar için belirlenen tüm korelasyon katsayıları ( $r^2$ ) 0,9846 ile 1,0000 aralığında değiştiğinden, söz konusu fonksiyonların veri değerlerini oldukça yüksek doğrulukta temsil ettiği söylenebilir.
15. Mısır yağı ve sodyum hidroksit kullanılarak gerçekleştirilen transesterifikasyon reaksiyonlarında 15°C'deki en düşük yoğunluk değeri, %0,90 katalizör oranı, 50°C reaksiyon sıcaklığı, 60 dakika reaksiyon süresi ve 9:1 alkol/yağ mol oranı için 877,13 kg/m<sup>3</sup> olarak elde edilmiştir.
16. Mısır yağı ve potasyum hidroksit kullanılarak gerçekleştirilen transesterifikasyon reaksiyonlarında 15°C'deki en düşük yoğunluk değeri, %1,10 katalizör oranı, 60°C reaksiyon sıcaklığı, 60 dakika reaksiyon süresi ve 9:1 alkol/yağ mol oranı için 877,94 kg/m<sup>3</sup> olarak elde edilmiştir.
17. Fındık yağı ve sodyum hidroksit kullanılarak gerçekleştirilen transesterifikasyon reaksiyonlarında 15°C'deki en düşük yoğunluk değeri, %1,00 katalizör oranı, 50°C reaksiyon sıcaklığı, 60 dakika reaksiyon süresi ve 12:1 alkol/yağ mol oranı için 872,65 kg/m<sup>3</sup> olarak elde edilmiştir.
18. Fındık yağı ve potasyum hidroksit kullanılarak gerçekleştirilen transesterifikasyon reaksiyonlarında 15°C'deki en düşük yoğunluk değeri, %1,25 katalizör oranı, 60°C

reaksiyon sıcaklığı, 60 dakika reaksiyon süresi ve 12:1 alkol/yağ mol oranı için 873,67 kg/m<sup>3</sup> olarak elde edilmiştir.

19. Üretilen en düşük yoğunluğa sahip biyodizellerin 15°C'deki yoğunlukları en düşükten en yükseğe doğru, fındık yağı ve sodyum hidroksit kullanımında 872,65 kg/m<sup>3</sup>, fındık yağı ve potasyum hidroksit kullanımında 873,67 kg/m<sup>3</sup>, mısır yağı ve sodyum hidroksit kullanımında 877,13 kg/m<sup>3</sup> ve mısır yağı ve potasyum hidroksit kullanımında 877,94 kg/m<sup>3</sup> şeklinde sıralanabilir.
20. Mısır ve fındık yağları kıyaslandığında, fındık yağından daha düşük yoğunluğa sahip biyodizellerin elde edildiği belirlenmiştir.
21. En düşük yoğunluğa sahip biyodizel, fındık yağı, %1,00 oranında sodyum hidroksit ve 12:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak, 50°C reaksiyon sıcaklığı ve 60 dakika reaksiyon süresinde gerçekleştirilen transesterifikasyon reaksiyonu sonunda 872,65 kg/m<sup>3</sup> olarak elde edilmiştir.
22. Mısır yağı ve sodyum hidroksit kullanılarak gerçekleştirilen transesterifikasyon reaksiyonlarında 40°C'deki en düşük dinamik ve kinematik viskozite değerleri, %0,90 katalizör oranı, 50°C reaksiyon sıcaklığı, 60 dakika reaksiyon süresi ve 9:1 alkol/yağ mol oranı için sırasıyla 3,564 cP, 4,095 cSt olarak elde edilmiştir.
23. Yukarıda belirtilen en düşük viskoziteli mısır yağı biyodizelinin, parlama noktası sıcaklığı, soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığı, üst ısıl değeri, ortalama molekül kütlesi ve kapalı formülü sırasıyla 169,0°C, -5°C, 39930 kJ/kg, 292,87 g/mol, C<sub>18,77</sub>H<sub>35,16</sub>O<sub>2</sub> olarak belirlenmiştir.
24. Mısır yağı ve potasyum hidroksit kullanılarak gerçekleştirilen transesterifikasyon reaksiyonlarında 40°C'deki en düşük dinamik ve kinematik viskozite değerleri, %1,10 katalizör oranı, 60°C reaksiyon sıcaklığı, 60 dakika reaksiyon süresi ve 9:1 alkol/yağ mol oranı için sırasıyla 3,489 cP, 4,005 cSt olarak elde edilmiştir.
25. Yukarıda belirtilen en düşük viskoziteli mısır yağı biyodizelinin, parlama noktası sıcaklığı, soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığı, üst ısıl değeri, ortalama molekül kütlesi ve kapalı formülü sırasıyla, 877,94 kg/m<sup>3</sup>, 171,0°C, -4°C, 39947 kJ/kg, 291,27 g/mol, C<sub>18,66</sub>H<sub>35,13</sub>O<sub>2</sub> olarak belirlenmiştir.
26. Fındık yağı ve sodyum hidroksit kullanılarak gerçekleştirilen transesterifikasyon reaksiyonlarında 40°C'deki en düşük dinamik ve kinematik viskozite değerleri, %1,00 oranında katalizör oranı, 50°C reaksiyon sıcaklığı, 60 dakika reaksiyon süresi ve 9:1 alkol/yağ mol oranında sırasıyla 3,577 cP, 4,128 cSt olarak elde edilmiştir.

27. Yukarıda belirtilen en düşük viskoziteli fındık yağı biyodizelinin, parlama noktası sıcaklığı, soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığı, üst ısıl değeri, ortalama molekül kütlesi ve kapalı formülü sırasıyla,  $-6^{\circ}\text{C}$ ,  $39883 \text{ kJ/kg}$ ,  $293,80 \text{ g/mol}$ ,  $\text{C}_{18,76}\text{H}_{35,56}\text{O}_2$  olarak belirlenmiştir.
28. Fındık yağı ve potasyum hidroksit kullanılarak gerçekleştirilen transesterifikasyon reaksiyonlarında  $40^{\circ}\text{C}$ 'deki en düşük dinamik ve kinematik viskozite değerleri, %1,25 oranında katalizör oranı,  $60^{\circ}\text{C}$  reaksiyon sıcaklığı, 60 dakika reaksiyon süresi, 9:1 alkol/yağ mol oranında sırasıyla  $3,523 \text{ cP}$ ,  $4,062 \text{ cSt}$  olarak elde edilmiştir.
29. Yukarıda belirtilen en düşük viskoziteli fındık yağı biyodizelinin, parlama noktası sıcaklığı, soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığı, üst ısıl değeri, ortalama molekül kütlesi ve kapalı formülü sırasıyla,  $874,07 \text{ kg/m}^3$ ,  $175,0^{\circ}\text{C}$ ,  $-6^{\circ}\text{C}$ ,  $39889 \text{ kJ/kg}$ ,  $294,10 \text{ g/mol}$ ,  $\text{C}_{18,82}\text{H}_{35,62}\text{O}_2$  olarak belirlenmiştir.
30. Üretilen en düşük viskoziteli biyodizellerin  $40^{\circ}\text{C}$ 'deki dinamik viskoziteleri en düşükten en yükseğe doğru, mısır yağı ve potasyum hidroksit kullanımında  $3,489 \text{ cP}$ , fındık yağı ve potasyum hidroksit kullanımında  $3,523 \text{ cP}$ , mısır yağı ve sodyum hidroksit kullanımında  $3,564 \text{ cP}$  ve fındık yağı ve sodyum hidroksit kullanımında  $3,577 \text{ cP}$  şeklinde sıralanabilir.
31. Üretilen en düşük viskoziteli biyodizellerin  $40^{\circ}\text{C}$ 'deki kinematik viskoziteleri en düşükten en yükseğe doğru, mısır yağı ve potasyum hidroksit kullanımında  $4,005 \text{ cSt}$ , fındık yağı ve potasyum hidroksit kullanımında  $4,062 \text{ cSt}$ , mısır yağı ve sodyum hidroksit kullanımında  $4,095 \text{ cSt}$  ve fındık yağı ve sodyum hidroksit kullanımında  $4,128 \text{ cSt}$  şeklinde sıralanabilir.
32. Yukarıda belirtilen şartlarda üretilen en düşük viskoziteli biyodizellerin viskozite değerleri, literatürdeki bazik katalizör kullanılarak üretilen bazı biyodizellerin kinematik viskozite değerlerinden daha düşüktür [42, 46, 53, 55, 57, 59, 60, 68, 71, 72].
33. En düşük dinamik ve kinematik viskoziteye sahip biyodizel, mısır yağı, %1,10 oranında potasyum hidroksit ve 9:1 alkol/yağ mol oranında metil alkol kullanılarak,  $60^{\circ}\text{C}$  reaksiyon sıcaklığı ve 60 dakika reaksiyon süresinde gerçekleştirilen transesterifikasyon reaksiyonu sonunda  $3,489 \text{ cP}$  ve  $4,005 \text{ cSt}$  olarak elde edilmiştir.
34. Üretilen en düşük viskoziteli biyodizellerin  $15^{\circ}\text{C}$ 'deki yoğunlukları en düşükten en yükseğe doğru, fındık yağı ve sodyum hidroksit kullanımında  $873,06 \text{ kg/m}^3$ , fındık yağı ve potasyum hidroksit kullanımında  $874,07 \text{ kg/m}^3$ , mısır yağı ve sodyum

hidroksit kullanımında  $877,13 \text{ kg/m}^3$  ve mısır yağı ve potasyum hidroksit kullanımında  $877,94 \text{ kg/m}^3$  şeklinde sıralanabilir.

35. Üretilen en düşük viskoziteli biyodizellerin soğukta filtre tıkanma sıcaklıkları en düşükten en yükseğe doğru, mısır yağı ve potasyum hidroksit kullanımında  $-4^\circ\text{C}$ , mısır yağı ve sodyum hidroksit kullanımında  $-5^\circ\text{C}$ , fındık yağı ile sodyum ve potasyum hidroksit kullanımında  $-6^\circ\text{C}$  şeklinde sıralanabilir.
36. Üretilen en düşük viskoziteli biyodizellerin üst ısıl değerleri en yüksekten en düşüğe doğru, mısır yağı ve potasyum hidroksit kullanımında  $39947 \text{ kJ/kg}$ , mısır yağı ve sodyum hidroksit kullanımında  $39930 \text{ kJ/kg}$ , fındık yağı ve potasyum hidroksit kullanımında  $39889 \text{ kJ/kg}$  ve fındık yağı ve sodyum hidroksit kullanımında  $39883 \text{ kJ/kg}$  şeklinde sıralanabilir.
37. Optimum şartlarda üretilen biyodizeller dikkate alındığında, mısır yağı ve potasyum hidroksit kullanılarak elde edilen biyodizelin, viskozite, soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığı ve üst ısıl değer açısından en uygun yakıt olduğu sonucuna varılmıştır.
38. Optimum şartlarda üretilen biyodizellerin kinematik viskoziteleri, yoğunlukları, parlama noktası sıcaklıkları ve soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklıkları ilgili biyodizel standartlarına (EN 14214 ve ASTM D 6751) uygundur.
39. Saf mısır yağının  $40^\circ\text{C}$ 'deki dinamik ( $31,579 \text{ cP}$ ) ve kinematik viskozitesine ( $34,502 \text{ cSt}$ ) göre, optimum şartlarda mısır yağı ve potasyum hidroksit kullanımıyla üretilen biyodizelin  $40^\circ\text{C}$ 'deki dinamik ( $3,489 \text{ cP}$ ) ve kinematik viskozitesi ( $4,005 \text{ cSt}$ ) sırasıyla  $\%88,95$ ,  $\%88,39$  oranında, mısır yağı ve sodyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin  $40^\circ\text{C}$ 'deki dinamik ( $3,564 \text{ cP}$ ) ve kinematik viskozitesi ( $4,095 \text{ cSt}$ ) ise sırasıyla  $\%88,71$ ,  $\%88,13$  oranında daha düşük değer almıştır.
40. Saf fındık yağının  $40^\circ\text{C}$ 'deki dinamik ( $32,849 \text{ cP}$ ) ve kinematik viskozitesine ( $35,953 \text{ cSt}$ ) göre, optimum şartlarda fındık yağı ve potasyum hidroksit kullanımıyla üretilen biyodizelin  $40^\circ\text{C}$ 'deki dinamik ( $3,523 \text{ cP}$ ) ve kinematik viskozitesi ( $4,062 \text{ cSt}$ ) sırasıyla  $\%89,28$ ,  $\%88,70$  oranında, fındık yağı ve sodyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin  $40^\circ\text{C}$ 'deki dinamik ( $3,577 \text{ cP}$ ) ve kinematik viskozitesi ( $4,128 \text{ cSt}$ ) ise sırasıyla  $\%89,11$ ,  $\%88,52$  oranında daha düşük değer almıştır.
41. Saf mısır yağının  $15^\circ\text{C}$ 'deki yoğunluğuna ( $922,35 \text{ kg/m}^3$ ) göre, optimum şartlarda mısır yağı ve sodyum hidroksit kullanımıyla üretilen biyodizelin  $15^\circ\text{C}$ 'deki

yoğunluğu ( $877,13 \text{ kg/m}^3$ ) %4,90, mısır yağı ve potasyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin  $15^\circ\text{C}$ 'deki yoğunluğu ( $877,94 \text{ kg/m}^3$ ) ise %4,81 oranında daha düşük değer almıştır.

42. Saf fındık yağının  $15^\circ\text{C}$ 'deki yoğunluğuna ( $920,72 \text{ kg/m}^3$ ) göre, optimum şartlarda fındık yağı ve sodyum hidroksit kullanımıyla üretilen biyodizelin  $15^\circ\text{C}$ 'deki yoğunluğu ( $873,06 \text{ kg/m}^3$ ) %5,18 oranında, fındık yağı ve potasyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizelin  $15^\circ\text{C}$ 'deki yoğunluğu ( $874,07 \text{ kg/m}^3$ ) ise sırasıyla %5,07 oranında daha düşük değer almıştır.
43. Sodyum veya potasyum hidroksit kullanılarak üretilen en düşük viskoziteye (9:1 mol oranında üretilen) ve teorik olarak en yüksek metil ester verimine sahip (6:1 mol oranında üretilen) mısır ve fındık yağı biyodizelleri, yapısında söz konusu biyodizelleri bulunduran biyodizel-dizel yakıtı karışımları ile saf dizel yakıtının, dinamik ve kinematik viskozite değerlerinin sıcaklık arttıkça eksponansiyel olarak azaldığı belirlenmiştir. Söz konusu dinamik ve kinematik viskozite değerlerine sırasıyla,

$$\mu = \mu(T) = y_0 + ae^{-bT} \quad (4.1)$$

$$v = v(T) = y_0 + ae^{-bT} \quad (4.2)$$

şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonların uyumlanması uygun bulunmuştur.

44. Sodyum veya potasyum hidroksit kullanılarak üretilen en düşük viskoziteye ve teorik olarak en yüksek metil ester verimine sahip saf fındık yağı biyodizellerinin dinamik ve kinematik viskozitelerinin sıcaklıkla eksponansiyel değişimlerinin, mısır yağı biyodizellerinden farklı olarak doğrusala oldukça yakın bir karakterde olduğu gözlenmektedir.
45. Üretilen tüm biyodizeller ile saf dizel yakıtının dinamik ve kinematik viskoziteleri arasındaki fark düşük sıcaklıklarda daha fazla iken, artan sıcaklıkla birlikte eğriler birbirlerine eksponansiyel olarak yaklaşmaktadır.
46. Sodyum veya potasyum hidroksit kullanılarak üretilen en düşük viskoziteye (9:1 mol oranında üretilen) ve teorik olarak en yüksek metil ester verimine sahip (6:1 mol oranında üretilen) mısır ve fındık yağı biyodizelleri, yapısında söz konusu biyodizelleri bulunduran biyodizel-dizel yakıtı karışımları ile saf dizel yakıtının,

yoğunluk değerlerinin ölçüm yapılan sıcaklık aralığı için artan sıcaklıkla birlikte ikinci dereceden bir değişim gösterdiği belirlenmiştir. Bu nedenle söz konusu yoğunluk değerlerine,

$$\rho = \rho(T) = y_0 + aT + bT^2 \quad (4.3)$$

şeklindeki bir-boyutlu doğrusal fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur.

47. Sodyum veya potasyum hidroksit kullanılarak üretilen en düşük viskoziteye (9:1 mol oranında üretilen) ve teorik olarak en yüksek metil ester verimine sahip (6:1 mol oranında üretilen) mısır ve fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının dinamik ve kinematik viskozite değerlerinin artan biyodizel oranı ile birlikte eksponansiyel olarak azalarak arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, sıcaklık azaldıkça hacimsel biyodizel oranının artışı ile dinamik ve kinematik viskozitelerdeki değişimin doğrusal niteliğe yaklaştığı görülmüştür. Söz konusu dinamik ve kinematik viskozite değerlerine sırasıyla,

$$\mu = \mu(X) = y_0 + ae^{-bX} \quad (4.4)$$

$$v = v(X) = y_0 + ae^{-bX} \quad (4.5)$$

şeklindeki bir-boyutlu eksponansiyel fonksiyonların uyumlanması uygun bulunmuştur.

48. Sodyum veya potasyum hidroksit kullanılarak üretilen en düşük viskoziteye (9:1 mol oranında üretilen) ve teorik olarak en yüksek metil ester verimine sahip (6:1 mol oranında üretilen) mısır ve fındık yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluk değerlerinin artan biyodizel oranı ile birlikte beklendiği gibi doğrusal olarak arttığı görülmüştür. Bu nedenle söz konusu yoğunluk değerlerine,

$$\rho = \rho(X) = y_0 + aX \quad (4.6)$$

şeklindeki bir-boyutlu doğrusal fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur.

49. Tüm yağ ve katalizör oranları için, 9:1 alkol/yağ mol oranı kullanılarak üretilen biyodizellerin dinamik ve kinematik viskozite değerleri 6:1 mol oranı kullanılarak üretilenlerinkine göre daha düşük olduğundan, beklendiği gibi, yapısında 9:1 mol

oranı kullanılarak üretilen biyodizeller bulunan biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik ve kinematik viskozite değerlerinin 6:1 mol oranı kullanılarak üretilen biyodizeller bulunan karışımlarinkine göre her sıcaklık için daha düşük olduğu görülmüştür.

50. Sodyum veya potasyum hidroksit kullanılarak üretilen en düşük viskoziteye (9:1 mol oranında üretilen) ve teorik olarak en yüksek metil ester verimine sahip (6:1 mol oranında üretilen) mısır ve fındık yağı biyodizellerinin ölçüm değerlerine göre dinamik ve kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri iki-boyutlu eş-viskozite eğrileri şeklinde incelendiğinde, farkı karakterdeki iki ayrı bölge görülmüştür. Birinci bölge olarak adlandırılan yüksek sıcaklık ve düşük biyodizel oranı bölgesinde eş-viskozite eğrilerinin daha seyrek ve yataya yakın iken; ikinci bölge olarak adlandırılan düşük sıcaklık ve yüksek biyodizel oranı bölgesinde eğriler daha sık ve dikeye yakın karakterde olduğu belirlenmiştir. Buna göre, birinci bölgede sıcaklıktaki büyük bir değişime karşılık viskozitede küçük bir değişim görülürken, ikinci bölgede tam tersine sıcaklıktaki küçük bir değişime karşılık viskozitede daha büyük değişim gözlemlenmektedir.
51. Sodyum veya potasyum hidroksit kullanılarak üretilen en düşük viskoziteye (9:1 mol oranında üretilen) ve teorik olarak en yüksek metil ester verimine sahip (6:1 mol oranında üretilen) mısır ve fındık yağı biyodizellerinin dinamik ve kinematik viskozitelerinin sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranıyla değişimlerine sırasıyla,

$$\mu = \mu(T, X) = a + bT + cX + dT^2 + eTX + fX^2 + gT^3 + hT^2X + kTX^2 \quad (4.7)$$

$$\nu = \nu(T, X) = a + bT + cX + dT^2 + eTX + fX^2 + gT^3 + hT^2X + kTX^2 \quad (4.8)$$

şeklinde X [%] karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre 2. dereceden, T [°C] sıcaklığına ise 3. dereceden bağımlı iki-boyutlu fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Söz konusu eşitliklerden elde edilen dinamik ve kinematik viskozite değerlerinin sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranına göre değişimi grafiklerinde, farklı karakterdeki iki ayrı bölge görülmüştür. Birinci bölge olarak adlandırılan yüksek sıcaklık ve düşük biyodizel oranı bölgesinde eş-viskozite eğrileri daha seyrek ve yataya yakın iken, ikinci bölge olarak adlandırılan düşük sıcaklık ve yüksek biyodizel oranı bölgesinde eğriler daha sık ve dikeye yakın karakterdedir.



Buna göre, birinci bölgede sıcaklıktaki büyük bir değişime karşılık viskozitelerde küçük bir değişim görülürken, ikinci bölgede tam tersine sıcaklıktaki küçük bir değişime karşılık viskozitelerde daha büyük değişim gözlemlenmiştir.

52. Sodyum veya potasyum hidroksit kullanılarak üretilen en düşük viskoziteye (9:1 mol oranında üretilen) ve teorik olarak en yüksek metil ester verimine sahip (6:1 mol oranında üretilen) mısır ve fındık yağı biyodizellerinin ölçüm değerlerine göre yoğunluklarının sıcaklık ve karışımdaki biyodizel oranına göre değişimleri iki-boyutlu eş-viskozite eğrileri şeklinde incelendiğinde, eş-yoğunluk eğrileri aralarındaki mesafeler yaklaşık olarak sabit olacak şekilde (sabit gradyana sahip), yoğunluğun karışımdaki biyodizel oranına göre değişiminin doğrusal, sıcaklığa göre değişiminin ise parabolik karakterde olduğu belirlenmiştir.
53. Sodyum veya potasyum hidroksit kullanılarak üretilen en düşük viskoziteye (9:1 mol oranında üretilen) ve teorik olarak en yüksek metil ester verimine sahip (6:1 mol oranında üretilen) mısır ve fındık yağı biyodizellerinin yoğunluklarının sıcaklık ve karışımdaki hacimsel biyodizel oranıyla değişimlerine,

$$\rho = \rho(T, X) = a + bT + cX + dT^2 + eTX \quad (4.9)$$

şeklinde X [%] karışımdaki hacimsel biyodizel oranına 1. dereceden ve T [°C] sıcaklığına 2. dereceden bağımlı iki-boyutlu fonksiyonun uyumlanması uygun bulunmuştur. Sabit eş-yoğunluk eğrisi için, karışımın sıcaklığı arttıkça karışımdaki biyodizel oranının parabolik olarak arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, sabit bir sıcaklıkta yoğunluğu bir birim değiştirmek için karışımdaki biyodizel oranının yaklaşık sabit bir değerde değiştirilmesi gerekirken, sabit bir karışım oranında yoğunluğu bir birim değiştirmek için düşük sıcaklıklarda daha fazla sıcaklık değişimi, yüksek sıcaklıklarda ise daha az sıcaklık değişimi gerekmektedir.

54. Küçük ölçekli üretim yapılması nedeniyle maliyetlerin artması sonucu, üretilen en düşük viskoziteye sahip mısır ve fındık yağı biyodizellerinin ticari dizel yakıtına göre fiyatının daha pahalı olduğu görülmektedir.

## 5. ÖNERİLER

Bu deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında aşağıdaki öneriler yapılabilir:

1. Alkol/yağ mol oranının üretilen biyodizelin dinamik viskozite, yoğunluk ve kinematik viskozitesine etkisi incelenirken, 6:1 ile 9:1 mol oranları arasındaki bölgenin daha iyi irdelenebilmesi için parametrik değer olarak örneğin 7,5:1 mol oranı da kullanılabilir.
2. Biyodizel-dizel yakıtı karışımları için, %50 ve %75 hacimsel biyodizel oranları da kullanılarak elde edilecek karışımların özellikleri de incelenerek uyumlanan fonksiyonların %20-100 bölgesindeki hassasiyetleri artırılabilir.
3. Farklı bitkisel, hayvansal ve atık yağlardan biyodizel üretimi gerçekleştirilerek, motorlara en uygun yakıt ve yakıt karışımlarının belirlenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilebilir.
4. Özellikle biyodizel maliyetini azaltmak için atık yağlardan biyodizel üretimine ağırlık verilebilir. Bu kapsamda, atık yağdan biyodizel üretiminde optimum reaksiyon parametrelerin belirlenmesine yönelik çalışmalar genişletilebilir.
5. Tamamen yenilenebilir enerji kaynaklarından biyodizel üretimi için, alkol olarak biyoetanol kullanılarak biyodizel üretiminin optimum şartları belirlenebilir.
6. Gerçekleştirilen çalışmada, biyodizel ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunlukları, kinematik viskoziteleri, soğukta filtre tıkama noktası sıcaklıkları, parlama noktası sıcaklıkları ve üst ısıl değerleri belirlenmiştir. İleriki çalışmalarda başta setan sayısı olmak üzere diğer fiziksel ve kimyasal özelliklerin de incelenmesiyle, yakıt olarak biyodizelin daha iyi yorumlanmasını sağlanabilir.
7. Performans ve emisyon deneylerinin yanı sıra biyodizel yakıtının motorlarda uzun süreli kullanılması durumunda çeşitli motor elemanları üzerindeki etkilerinin incelenmesine yönelik çalışmalar da gerçekleştirilebilir.

## 6. KAYNAKLAR

1. Ögüt, H. ve Oğuz, H., Biyodizel Üçüncü Milenyum Yakıtı, İkinci Baskı, Nobel Yayın Dağıtım, İstanbul, 2006.
2. Koç, E. ve Şenel, M., C., Dünyada ve Türkiye’de Enerji Durumu – Genel Değerlendirme, Mühendis ve Makine, 54,639 (2013) 32-44.
3. Sezer, İ., Normal Benzine Metanol ve MTBE Katılmasının Buji Ateşlemeli Motorun Performansına ve Eksoz Emisyonlarına Etkisinin Deneysel İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2002.
4. Durgun, O., Yakıtlar ve Yanma Ders Notları, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon-(Basılmamış).
5. Bayraktar, H., Motorlarda Benzin-Etil Alkol-İzopropanol Karışımlarının Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1991.
6. Soysal, C., Dizel Motorlarında Biyodizel-Dizel Yakıtı Karışımlarının Kullanılmasının Motor Performansına Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2008.
7. Elvers, B., Handbook of Fuels, First Edition, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., Weinheim, 2008.
8. Aras, S., Yağ Asidi Metil Esteri (YAME) Kullanımının Dizel Motor Yakıt Sistemi Malzemelerine Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2008.
9. Yasar, F., Altun, S. ve Adin, H., Fuel Properties of Biodiesels Produced from Blends of Canola Oil and Animal Tallow, Energy Education Science and Technology, 27,1 (2011) 199-208.
10. Türker, H., T., Bazı Bitkisel Yağlardan Biyodizel Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2006.
11. Şeker, S., Biyodizel Üretimi ve Katkı Maddelerinin Yakıt Özellikleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007.
12. Altınsoy, A., S., Biyodizel Üretimi, Motorlarda Kullanımı ve Türkiye’deki Kaynakların İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
13. Acarbulut, G., Biodiesel Yakıtı ile Çalıştırılan Belediye Otobüsünün Yakıt Tüketimi Koşullarının Nümerik Yöntemle Etüdü, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
14. Aydoğan, B., Biyodizel Kullanılan Dizel Motorlarda NO<sub>x</sub> Emisyonlarının ve NO<sub>x</sub> Emisyonları Azaltma Yöntemlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 2008.
15. Artukoğlu, B., D., Hayvansal Atık Yağlardan Biyodizel Üretimi ve Özelliklerinin Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006.

16. Fedai, Ö., Transesterifikasyon ile Kanola Yağı Metil Esteri Sentezinin Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006.
17. <http://www.tutorvista.com/content/chemistry/chemistry-iii/hydrocarbon.php>, Quality of diesel – cetane number. 13 Aralık 2013.
18. <http://en.wikipedia.org/wiki/Cetane>, Hexadecane, 13 Aralık 2013.
19. Kaya, C., Bitkisel Yağlardan Biyodizel Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 2006.
20. Uçar, G., Bazı Biyodizel Yakıtlarında Yoğunluk, Viskozite ve Parlama Noktasının Isıl Değere Etkisinin Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2006.
21. Tarauş, S., Ayçiçeği Yağı ve Hayvansal Yağ Karışımlarından Biyodizel Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2008.
22. Baydan, H., E., Biyoetanol, Metil Ester ve Dizel Yakıt Karışımlarının Dizel Motorlarda Kullanımının Motor Performansına Etkisinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2008.
23. <http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir/biyodizel.aspx>, Biyodizel, 15 Aralık 2013.
24. [http://www.albiyobir.org.tr/trde\\_b.htm](http://www.albiyobir.org.tr/trde_b.htm), Türkiye’de Biyodizel, 18 Aralık 2013.
25. T.C. Resmi Gazete, Motorin Türlerine İlişkin Teknik Düzenleme Tebliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Tebliğ. (28067), 27.09.2011, 22.
26. <http://www.ebb-eu.org/stats.php>, European Biodiesel Board, 19 Aralık 2013.
27. Kafadar, A., B., Yağlardan Biyodizel Eldesine Etki Eden Faktörlerin Araştırılması, Doktora Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 2010.
28. Oğuz, H., Demir, F. ve Acaroğlu M., The Investigation of the Possibilities of Using Sunflower Oil in Diesel Engines as Fuel, 1 st World Conference and Exhibition On Biomass For Energy and Industry, 5-9 June 2000, Spain, Proceeding Book Volume 1, 661-663.
29. Oğuz, H., Tarım Kesiminde Yaygın Olarak Kullanılan Dizel Motorlarında Fındık Yağı Biyodizelinin Yakıt Olarak Kullanım İmkanlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2004.
30. Erol, A., Değişik Yağlardan Elde Edilen Biodizellerin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006.
31. Yenioğlu, V., K., Biyodizel Sentezi ve Biyodizel Katkı Maddelerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay, 2009.
32. Danışman, A., Bitkisel Yağlardan Değerli Kimyasallar ve Biyodizel Üretimi, Yüksek Lisans, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2008.
33. İlgen, O., Kanola Yağından Biyodizel Üretimi için Katı Katalizör Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2009.

34. Zhou, W., Production of Sunflower Oil Ethyl Ester for Use as a Biodiesel Fuel, Master Thesis, Applied Chemistry University of Toronto, Applied Science Graduate Department of Chemical Engineering, Toronto, 2000.
35. Gök, C., Biyodizel Olarak Çeşitli Bitkisel Yağların Etil Ester Metoduyla Üretilerek Karakteristiklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar, 2008.
36. Tat, M., E. ve Van Gerpen, J., The Kinematic Viscosity of Biodiesel and Its Blends with Diesel Fuel, JAOCS, 76 (1999) 1511-1513.
37. Tat, M., E. ve Van Gerpen, J., The Specific Gravity of Biodiesel and Its Blends with Diesel Fuel, JAOCS, 77 (2000) 115-119.
38. Encinar, J., M., Gonzalez, J., F., Rodriguez, J., J. ve Tejedor A., Biodiesel Fuels from Vegetable Oils: Transesterification of Cynara Cardunculus L. Oils with Ethanol, Energy & Fuels, 16,2 (2002) 443-450.
39. Kerschbaum, S. ve Rinke, G., Measurement of the Temperature Dependent Viscosity of Biodiesel Fuels, Fuel, 83,3 (2004) 287-291.
40. Vicente, G., Martinez, M. ve Aracil, J., Integrated Biodiesel Production: A Comparison of Different Homogeneous Catalysts Systems, Bioresource Technology, 92,3 (2004) 297-305.
41. Ramadhas, A., S., Jayaraj, S. ve Muraleedharan, C., Biodiesel Production from High FFA Rubber Seed Oil, Fuel, 84,4 (2005) 335-340.
42. Çildir, O. ve Çanakçı, M., Çeşitli Bitkisel Yağlardan Biyodizel Üretiminde Katalizör ve Alkol Miktarının Yakıt Özellikleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 21,2 (2006) 367-372.
43. Math, M., C., Irfan, G., Optimization of Restaurant Waste Oil Methyl Ester Yield, Journal of Scientific & Industrial Research, 66 (2007) 772-776.
44. Wang, Y., Ou, S., Liu, P. ve Zhang, Z., Preparation of Biodiesel from Waste Cooking Oil via Two-Step Catalyzed Process, Energy Conversion and Management, 48,1 (2007) 184-188.
45. Alptekin, E. ve Çanakçı, M., Biyodizel-Dizel Yakıt Karışımlarının Yoğunluk ve Viskozitelerinin Belirlenmesi, 1. Ulusal Yağlı Tohumlu Bitkiler ve Biyodizel Sempozyumu, Mayıs 2007, Samsun, Bildiriler Kitabı, 251-261.
46. Yavuz, H., Aksoy, F., Bayrakçeken, H. ve Baydır, Ş., A., Değişik Bitkisel Yağ Metal Esterlerinin Üretilmesi, Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerinin Karşılaştırılması, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 2 (2008) 23-30.
47. Altun, Ş. ve Öner, C., Hayvansal İç Yağlardan Transesterifikasyon Reaksiyonu ile Biyodizel Üretilmesi, Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi, 1 (2008) 116-120.
48. Chhetri, A., B., Watts, K., C. ve Islam, M., R., Waste Cooking Oil as an Alternative Feedstock for Biodiesel Production, Energies, 1,1 (2008) 3-18.
49. Zhang, J. ve Jiang L., Acid-Catalyzed Esterification of Zanthoxylum Bungeanum Seed Oil with High Free Fatty Acids for Biodiesel Production, Bioresource Technology, 99,18 (2008) 8995-8998.

50. Anastopoulos, G., Zannikou, Y., Stournas, S. ve Kalligeros, S., Transesterification of Vegetable Oils with Ethanol and Characterization of The Key Fuel Properties of Ethyl Esters, Energies, 2,2 (2009) 362-376.
51. Karonis, D., Anastopoulos G., Zannikos, F., Stournas, S. ve Lois E., Determination of Physicochemical Properties of Fatty Acid Ethyl Esters (FAEE) – Diesel Fuel Blends, SAE Technical Paper, Paper No. 1788, (2009).
52. Math, M., C., Kumar, S., P. ve Chetty, S., V., Technologies for Biodiesel Production from Used Cooking Oil-A Review, Energy for Sustainable Development, 14,4 (2010) 339-345.
53. Ibeto, C., N., Ofoefule, A., U. ve Ezugwu, H., C., Analytical Methods for Quality Assessment of Biodiesel from Animal and Vegetable Oils, Trends Applied Sci. Res., 6 (2011) 537-553.
54. Nita, I. ve Geacai, S., Study of Density and Viscosity Variation with Temperature for Fuels Used for Diesel Engine, Ovidius University Annals of Chemistry, 22,1 (2011) 57-61.
55. Sivaramakrishnan, K. ve Ravikumar, P., Determination of Higher Heating Value of Biodiesels, International Journal of Engineering Science and Technology, 3,11 (2011) 791-817.
56. Satyanarayana, M. ve Muraleedharan, C., A Comparative Study of Vegetable Oil Methyl Esters (Biodiesels), Energy, 36,4 (2011) 2129-2137.
57. Özcanlı, M., Keskin, A. ve Aydın, K., Biodiesel Production from Terebinth (*Pistacia Terebinthus*) Oil and Its Usage in Diesel Engine, International Journal of Green Energy, 8,5 (2011) 518-528.
58. El Sabagh, S., M., Keera, S., T. ve Taman, A., R., The Characterization of Biodiesel Fuel from Waste Frying Oil, Energy Sources, 33,5 (2011) 401-409.
59. Aliyu, A., Lomsahaka, E. ve Hamza A., Production of Biodiesel via NaOH Catalyzed Transesterification of Mahogany Seed Oil, Advances in Applied Science Research, 3,1 (2012) 615-618.
60. Aliyu, A., Adoyi, O. ve Hamza, A., Binary Blends of Petrodiesel with Biodiesels Derived from Soybean and Groundnut Oils, Advances in Applied Science Research, 3,1 (2012) 611-614.
61. Moradi, G., R., Karami, B. ve Mohadesi, M., Densities And Kinematic Viscosities in Biodiesel-Diesel Blends at Various Temperatures, Journal of Chemical & Engineering, 58,1 (2013) 99-105.
62. Gurasala, N., K., Selvan, A., M., Balan, A. ve Athreya, S., Optimization of Waste Chicken Fat Pre-Treatment Process for Biodiesel Production, SAE Technical Paper, Paper No. 9131, (2013).
63. Goede, S., D., Roets, P., Velaers, A., Vermeulen, J., Wilken, C., The Properties and Injector Nozzle Fouling Performance of GTL and EN590 Diesel with RME and SME Biodiesel, SAE Technical Paper, Paper No. 1136, (2013).
64. Kelkar, K., Mathialaghan C., S. ve Vora, K., Process Parameter for Biodiesel Production – *Jatropha Curcas*, SAE Technical Paper, Paper No. 2890, (2013).

65. Lopes, S., M., Furey, R. ve Geng, P., Calculation of Heating Value for Diesel Fuels Containing Biodiesel, SAE Int. J. Fuels Lubr., 6,2 (2013) 407-48.
66. Al-Widyan, M., I. ve Al-Shyokh, A., O., Experimental Evaluation of The Transesterification of Waste Palm Oil into Biodiesel, Bioresource Technology, 85,3 (2002) 253-256.
67. Çetinkaya, M. ve Karaosmanoğlu F., Optimization of Base-Catalyzed Transesterification Reaction of Used Cooking Oil, Energy & Fuels, 18,6 (2004) 1888-1895.
68. Dorado, M., P., Ballesteros, E., Lopez, F., J. ve Mittelbach, M., Optimization of Alkali-Catalyzed Transesterification of Brassica Carinata Oil for Biodiesel Production, Energy & Fuels, 18 (2004) 77-83.
69. Singh, A., He, B., Thompson, J. ve Van Gerpen, J., Process Optimization of Biodiesel Production Using Alkaline Catalysts, Applied Engineering in Agriculture, 22,4 (2006) 597-600.
70. Encinar, J., M., Gonzalez, J., F., Reinares, A., R., Ethanolysis of Used Frying Oil. Biodiesel Preparation and Characterization, Fuel Processing Technology, 88,5 (2007) 513-522.
71. Phan, A., N. ve Phan, T., M., Biodiesel Production from Waste Cooking Oils, Fuel, 87,17 (2008) 3490-3496.
72. Kaya, C., Hamamcı, C., Baysal, A., Akba, O., Erdoğan, S., Saydut, A., Methyl Ester of Peanut Seed Oil as A Potential Feedstock for Biodiesel Production, Renewable Energy, 34,5 (2009) 1257-1260.
73. Sarıbıyık, O., Y., Özcanlı, M., Serin, H., Serin, S. ve Aydın, K., Biodiesel Production from Ricinus Communis Oil and Its Blends with Soybean Biodiesel, Journal of Mechanical Engineering, 56,12 (2010) 811-816.
74. Aydın, F., Kafadar, A., B., Erdoğan, S., Saydut, A., Kaya, C. ve Hamamcı, C., The Basic Properties of Transesterified Corn Oil and Biodiesel-Diesel Blends, Energy Sources, 33,8 (2011) 745-755.
75. Uzun, B., B., Kılıç, M., Özbay, N., Pütün, A., E., ve Pütün, E., Biodiesel Production from Waste Frying Oils: Optimization of Reaction Parameters and Determination of Fuel Properties, Energy, 44,1 (2012) 347-351.
76. Naik, M., Meher, L., C., Naik, S., N. ve Das, L., M., Production of Biodiesel from High Free Fatty Acid Karanja (Pongamia pinnata) Oil, Biomass and Bioenergy, 32,4 (2008) 354-357.
77. Alptekin, E. ve Canakcı, M., Optimization of Pretreatment Reaction for Methyl Ester Production from Chicken Fat, Fuel, 89,12 (2010) 4035-4039.
78. Fadhil, A., B., Ahmed, K., M., Dheyab, M., M., Silybum Marianum L. Seed Oil: A Novel Feedstock for Biodiesel Production, Arabian Journal of Chemistry, Basımda (2012).
79. Thiruvengadaravi, K., V., Nandagopal, J., Baskaralingam, P., Bala, V., S., S. ve Sivanesan, S., Acid-Catalyzed Esterification of Karanja (Pongamia Pinnata) Oil with High Free Fatty Acids for Biodiesel Production, Fuel, 98 (2012) 01-04.
80. <http://en.wikipedia.org/wiki/Methanol>, Methanol, 18 Aralık 2013.

81. [http://en.wikipedia.org/wiki/Sodium\\_hydroxide](http://en.wikipedia.org/wiki/Sodium_hydroxide), Sodium Hydroxide, 18 Aralık 2013.
82. [http://en.wikipedia.org/wiki/Potassium\\_hydroxide](http://en.wikipedia.org/wiki/Potassium_hydroxide), Potassium Hydroxide, 18 Aralık 2013.
83. Fukuda, H., Kondo, A. ve Noda, H., Biodiesel Fuel Production by Transesterification of Oils, Journal of Bioscience and Bioengineering, 92,5 (2001) 405-416.
84. Zhang, Y., Dube, M., A., McLean, D., D. ve Kates, M., Biodiesel Production from Waste Cooking Oil: 1.Process Design And Technological Assessment, Bioresource Technology, 89,1 (2003) 01-16.
85. Sharma, Y., C., Singh, B. ve Upadhyay, S., N., Advancements in Development and Characterization of Biodiesel: A review, Fuel, 87,12 (2008) 2355-2373.
86. Enweremadu, C., C. ve Mbarawa, M., M., Technical Aspects of Production and Analysis of Biodiesel from Used Cooking Oil-A Review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13,9 (2009) 2205-2224.
87. Helwani, Z., Othman, M., R., Aziz, N., Fernando, W., J., N. ve Kim, J., Technologies for Production of Biodiesel Focusing on Green Catalytic Techniques: A Review, Fuel Processing Technology, 90,12 (2009) 1502-1514.
88. Demirbas, A., Progress and Recent Trends in Biodiesel Fuels, Energy Conversion and Management, 50,1 (2009) 14-34.
89. Leung, D., Y., C., Wu, X. ve Leung, M., K., H., A Review on Biodiesel Production Using Catalyzed Transesterification, Applied Energy, 87,4 (2010) 1083-1095.
90. Balat, M. ve Balat, H., Progress in Biodiesel Processing, Applied Energy, 87,6 (2010) 1815-1835.
91. Atabani, A., E., Silitonga, A., S., Badruddin, I., A., Mahlia, T., M., I., Masjuki, H., H. ve Mekhilef, S., A Comprehensive Review on Biodiesel as An Alternative Energy Resource and Its Characteristics, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16,4 (2012) 2070-2093.
92. Abbaszaadeh, A., Ghobadian, B., Omidkhan, M., R. ve Najafi, G., Current Biodiesel Production Technologies: A Comparative Review, Energy Conversion and Management, 63 (2012) 138-148.
93. Ali, M., H., Mashud, M., Rubel, R. ve Ahmad, R., H., Biodiesel from Neem Oil As An Alternative Fuel for Diesel Engine, Procedia Engineering, 56 (2013) 625-630.
94. Kiakalaieh, A., T., Amin, N., A., S. ve Mazaheri, H., A Review on Novel Processes of Biodiesel Production from Waste Cooking Oil, Applied Energy, 104 (2013) 683-710.
95. Silitonga, A., S., Masjuki, H., H., Mahlia, T., M., I., Ong, H., C., Chong, W., T. ve Boosroh, M., H., Overview Properties of Biodiesel Diesel Blends from Edible and Non-Edible Feedstock, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 22 (2013) 346-360.
96. [https://www.fpharm.uniba.sk/fileadmin/user\\_upload](https://www.fpharm.uniba.sk/fileadmin/user_upload), Density Determination By Pycnometer, 1 Eylül 2013.
97. <http://kimyabilim.com/sivilarda-ozgul-agirlik-tayini.html>, Sıvılarda Özgül Ağırlık Tayini, 2 Eylül 2013.



98. <http://hbogm.meb.gov.tr/modulerprogramlar/kursprogramlari/gida>, Yoğunluk ve Kıvam Ölçümü, 2 Eylül 2013.
99. Çengel, Y., A. ve Cimbala, J., M., Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları, Editör Engin, T., Birinci Baskı, Güven Kitabevi, İzmir, 2008.
100. HAAKE, Calibration Certificate Booklet , Berlin, 1979.
101. Roberson, J., A. ve Crowe, C., T., Engineering Fluid Mechanics, Second Edition, Houghton Mifflin Company, Boston, 1980.
102. Sezer, İ., Dietil Eter-Motorin Karışımlarının Motor Performansına Etkilerinin Deneysel İncelenmesi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 27,1 (2012) 117-124.
103. Holman, J., P., Experimental Methods for Engineers, 7 th Edition, McGraw-Hill, New York, 2001.
104. Ghanei, R., Moradi, G., R., TaherpourKalantari, R. ve Arjmandzadeh, E., Variation of Physical Properties During Transesterification of Sunflower Oil to Biodiesel As An Approach to Predict Reaction Progress, Fuel Processing Technology, 92 (2011) 1593-1598.
105. Moradi, G., R., Dehghani, S. ve Ghanei, R., Measurements of Physical Properties During Transesterification of Soybean Oil to Biodiesel for Prediction of Reaction Progress, Energy Conversion and Management, 61 (2012) 67-70.
106. <http://enerjienstitusu.com/2011/01/11/2011-yili-yeni-elektrik-tarifesi>, 2014 Yılı Güncel Elektrik Fiyatları Tarifesi, 20 Ağustos 2013.
107. <http://gm.poas.com.tr/pompafiyat/pompafiyatgrid.aspx>, Petrol Ofisi A.Ş. Tavsiye Edilen Mahalli Akaryakıt Perakende Satış Fiyatlar Trabzon Merkez, 20 Ağustos 2013.
108. Pulkrabek, W., W., Engineering Fundamentals of The Internal Combustion Engine, Prentice Hall, New Jersey, 1997.
109. Bayraktar, H., An Experimental Study On The Performance Parameters Of An Experimental CI Engine Fueled With Diesel-Methanol-Dodecanol Blends, Fuel, 87,2 (2008) 158-164.
110. Bayraktar, H. ve Durgun, O., Investigating The Effects of LPG on Spark Ignition Engine Combustion and Performance, Energy Conversion and Management, 46,13-14 (2005) 2317-2333.
111. White, F., M., Akışkanlar Mekaniği, Editör Kadir K. ve Ayder, E., Dördüncü Baskı, Literatür Yayınları, İstanbul, 2004.
112. <http://encyclopedia.airliquide.com/Encyclopedia.asp?GasID=41#MajorApplications>, Gas Encyclopedia, 3 Aralık 2013.
113. Canakci, M., Combustion Characteristics of A Turbocharged DI Compression Ignition Engine Fueled with Petroleum Diesel Fuels and Biodiesel, Bioresource Technology, 98 (2007) 1167-1175.
114. <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich>, Methyl Stearate, 27 Mart 2014.

## 7. EKLER

### EK A. Tablolar

Ek Tablo A-1. İçten yanmalı motorlarda kullanılan bazı alternatif yakıtlar ile benzinin fiziksel ve kimyasal özellikleri  
[7, 99, 108-112]

Yakıt	Molekül formülü	Molekül kütlesi M [kg/kmol]	Üst ısıl değer H <sub>üst</sub> [kJ/kg]	Alt ısıl değer H <sub>alt</sub> [kJ/kg]	Buharlaştırma gizli ısısı h <sub>fg</sub> [kJ/kg]	Stokiyometrik hava-yakıt oranı h <sub>min</sub>	Oktan sayısı		Setan sayısı
							MON <sup>**</sup>	RON <sup>***</sup>	
Etanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	46,07	29710	26950	873	9,0	89	107	-
Metanol	CH <sub>3</sub> OH	32,04	22540	20050	1147	6,5	92	106	-
Metan <sup>*</sup>	CH <sub>4</sub>	16,04	55260	49770	509	17,2	120	120	-
Propan <sup>*</sup>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44,10	50180	46190	426	15,7	97	112	-
Hidrojen <sup>*</sup>	H <sub>2</sub>	2,016	141800	120000	-	34,5	-	90	-
Benzin	C <sub>8</sub> H <sub>15</sub>	111,00	47300	43000	307	14,6	80-91	92-99	-
Dizel	C <sub>12,3</sub> H <sub>22,2</sub>	170,00	44800	42500	270	14,5	-	-	40-55

\*İlgili yakıtların yoğunlukları standart koşullardaki yani 1 bar ve 0 °C'deki değerleridir.

\*\*MON: Motor oktan sayısı

\*\*\*RON: Araştırma oktan sayısı

Ek Tablo A-2. Çalışmada kullanılan mısır ve fındık yağının bazı yakıt özellikleri ve bu özellikleri belirlemede kullanılan fiziksel büyüklükler

Yağ türü	Yağın kütlesi $m_{\text{yağ}}$ [g]	15°C'deki yoğunluk $\rho_{15^\circ\text{C}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	20°C'deki yoğunluk $\rho_{20^\circ\text{C}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	40°C'deki yoğunluk $\rho_{40^\circ\text{C}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Süre t [s]	Kullanılan bilyenin katsayısı* $K$ [mPa · s · $\frac{\text{cm}^3}{\text{g} \cdot \text{s}}$ ]	Kullanılan bilyenin yoğunluğu $\rho_{\text{bilye}}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	40°C'deki dinamik viskozite $\mu_{40^\circ\text{C}}$ [cP]	40°C'deki kinematik viskozite $\nu_{40^\circ\text{C}}$ [cSt]
Mısır	88,02	922,35	920,73	915,29	62,79	8,1	0,07	31,579	34,502
Fındık	87,94	920,72	919,10	913,67	65,30			32,849	35,953

\*Saf mısır ve fındık yağının viskoziteleri daha yüksek olduğundan biyodizel ölçümünde kullanılanlardan farklı bir bilye kullanılmıştır.

Ek Tablo A-3. Suyun farklı sıcaklıklardaki yoğunluk değerleri

Sıcaklık, T [°C]	Yoğunluk, $\rho_{\text{su}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
10	999,70
15	999,96
16	999,94
17	999,90
18	999,85
19	999,78
20	998,20
30	995,65
40	992,30

## ÖZGEÇMİŞ

Mert GÜLÜM, 26.08.1989 tarihinde Rize'nin Pazar İlçesinde dünyaya geldi. İlk ve ortaokulu Artvin Arhavi Mehmet Nazif Günal İlköğretim Okulu'nda bitirdi. Lise öğrenimini ise 2006 yılında Samsun Özel Meralcan Fen Lisesi'nden okul birincisi olarak tamamladı. 2010 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden bölüm ikincisi olarak mezun oldu. Aynı yıl KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Öğrenimine başladı. Şubat 2012'de KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'ne Araştırma Görevlisi olarak atandı. Halen bu göreve devam etmekte olup, iyi derecede İngilizce bilmektedir.

Mert GÜLÜM'ün bu çalışmadan elde edilen sonuçlar kullanılarak yazılan, biri yurt dışı diğeri yurt içi olmak üzere iki bildirisi kabul edilmiş, bir makalesi de uluslar arası dergide hakem değerlendirmesi aşamasındadır. Ayrıca, yeni makale çalışmaları da devam etmektedir. Söz konusu çalışmalar aşağıda verilmiştir:

Bilgin, A. and Gülüm, M., The Effect of Temperature and Biodiesel Fraction on the Viscosity of Biodiesel-Diesel Fuel Blends, The European Conference on Sustainability, Energy & The Environment 2014 (Kabul Edildi).

Gülüm, M. ve Bilgin, A., Çeşitli Üretim Parametrelerinin NaOH Kullanılarak Üretilen Mısır Yağı Biyodizellerinin Bazı Yakıt Özelliklerine Etkisi, 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi 2014 (Kabul Edildi).

Gülüm, M. and Bilgin, A., The Effects of Various Production Parameters on The Some Fuel Properties of Produced Biodiesel From Corn Oil by Using KOH, Energy & Fuels ACS Publications (Değerlendirme Aşamasında).