

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**





KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

ORCID : - - -

Trabzon

ÖNSÖZ

Dizel motorlar için alternatif yakıtlar konusunda biyodizel ile ilgili çalışmalar son yıllarda ön plana çıkmaktadır. Biyodizelin birçok üstün özelliklerine rağmen, en önemli yetersizliği viskozitesinin yüksek olmasıdır. Yüksek viskozite yakıtın atomizasyonunu ve yakıt demeti özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu yüzden biyodizelin yakıt demeti karakteristiği ayrıntılı bir şekilde incelenip iyileştirilmeli, hatta saf dizel yakıtıninkine benzer karakteristik elde edilmeye çalışılmalıdır. Biyodizelin üstün ve yetersiz özellikleri ile ülke olarak petrole olan bağımlılığımız dikkate alındığında, sunulan tezin amacı “Yenilenebilir bir yakıt olan ve yapısında oksijen bulunan biyodizelin en önemli yetersizliklerine çözüm getirerek taşıtlarda daha yaygın olarak kullanılabilmesine olanak sağlamak ve bu sayede petrole olan bağımlılığımızı bir ölçüde azaltmak” olarak belirlenmiştir.

Lisans bitirme çalışması, yüksek lisans ve doktora tezi danışmanlıklarımı üstlenerek, bana her zaman ve her konuda bilgi ve tecrübeleriyle yol gösteren, maddi ve manevi desteğini bir an için bile esirgemeyen Sayın Hocam Prof. Dr. Atilla BİLGİN’e sonsuz saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım. Danışman hocam Prof. Dr. Atilla BİLGİN’in 26.08.2020 tarihinde vefatından sonra danışmanlığımı üstlenen, görüş ve önerilerinden yararlandığım, zorlu süreçte bana destek olan kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Zehra ŞAHİN’e saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım. Görüş ve önerilerinden yararlandığım Prof. Dr. Rolf D. REITZ’e teşekkür ederim. Maddi desteklerinden ötürü TÜBİTAK’a 2211-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Doktora Burs Programı bursiyeri olarak teşekkür ederim. Son olarak, beni bugünlere getiren ve desteklerini hiç esirgemeyen aileme ve eşime ayrıca teşekkür ederim.

Doktora tezimi, 11.06.2020 tarihinde hayatımı kaybeden sevgili anneannem Şadiye KAYA’nın ve 26.08.2020 tarihinde Hakk’ın rahmetine kavuşan hep iyiliklerle andığım Merhum Hocam Prof. Dr. Atilla BİLGİN’nin kıymetli anısına ithaf ediyorum.

Mert GÜLÜM
Trabzon, 2020

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Düşük Viskoziteli Atık Kızartma Yağı Biyodizelinin Üretimi ve Yakıt Demeti Karakteristiklerinin Sayısal Olarak İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Zehra ŞAHİN’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri ve analizleri ilgili laboratuvarlarda 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. 17.12.2020

Mert GÜLÜM

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	IX
SUMMARY.....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
TABLolar DİZİNİ.....	XXVI
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XXVIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. İçten Yanmalı Motor Yakıtları.....	2
1.2.1. İçten Yanmalı Motorlarda Kullanılan Fosil Kökenli Yakıtlar.....	3
1.2.1.1. Dizel Yakıtının Özellikleri.....	3
1.2.1.2. Benzinin Özellikleri.....	4
1.2.2. İçten Yanmalı Motorlarda Kullanılan Alternatif Yakıtlar.....	4
1.3. Biyodizel.....	5
1.3.1. Biyodizelin Özellikleri.....	6
1.3.1.1. Yoğunluk.....	6
1.3.1.2. Viskozite.....	6
1.3.1.3. Düşük Sıcaklıkta Akış Özellikleri.....	7
1.3.1.4. Isıl Değer.....	7
1.3.1.5. Setan Sayısı.....	8
1.3.1.6. Biyobozunabilirlik.....	9
1.3.1.7. Toksik Etki.....	9
1.3.1.8. Karbon Kalıntısı.....	9
1.3.1.9. İyot Sayısı.....	10
1.3.1.10. Bakır Şerit Korozyonu.....	10
1.3.1.11. Parlama Noktası Sıcaklığı.....	10
1.3.1.12. Yağlayıcılık.....	11
1.3.1.13. Distilasyon Sıcaklığı.....	11

1.3.1.14.	Su İçeriği	11
1.3.1.15.	Asit (nötralizasyon) Sayısı	11
1.3.1.16.	Oksidasyon Kararlılığı	12
1.3.2.	Biyodizel Üretiminde Kullanılan Yöntemler	12
1.3.3.	Biyodizelin Üstün ve Yetersiz Özellikleri.....	16
1.3.4.	Türkiye’de ve Dünya’da Biyodizelin Durumu	18
1.4.	Literatür Araştırması	23
1.4.1.	Biyodizel Üretimi, Biyodizelin Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi, Transesterifikasyon Reaksiyonuna Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi.....	24
1.4.2.	Biyodizel-Dizel Yakıtı Karışımlarının Yakıt Özelliklerinin Belirlenmesi	28
1.4.3.	Yakıt Demeti Karakteristiklerinin İncelenmesi	32
1.5.	Tez Çalışmasının Amacı ve Kapsamı	57
1.5.1.	Tez Çalışmasının Amacı	58
1.5.2.	Tez Çalışmasının Kapsamı	58
2.	DENEYSEL ÇALIŞMA	60
2.1.	Deneylerde Kullanılan Cihazlar	60
2.2.	Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	64
2.3.	İncelenen Reaksiyon Parametreleri.....	65
2.4.	Biyodizel Üretimi.....	67
2.5.	Belirlenen Fiziksel ve Kimyasal Özellikler, Ölçüm ve Hesap Yöntemleri.....	71
2.5.1.	Yoğunluk Ölçümü.....	72
2.5.2.	Viskozite Ölçümü	73
2.5.3.	Yüzey Gerilimi Ölçümü	75
2.6.	Belirsizlik Analizi	77
3.	SAYISAL ÇALIŞMA	79
3.1.	Genel Korunum Denklemleri	79
3.1.1.	Kütlenin Korunumu	79
3.1.2.	Doğrusal Momentumun Korunumu	80
3.1.3.	Enerjinin Korunumu	85
3.2.	Türbülans Modelleme Denklemleri	88
3.2.1.	Türbülansın Fiziksel Yapısı ve Özellikleri.....	88
3.2.2.	Türbülanslı Akış İçin Zaman-Ortalama Denklemler	89
3.2.3.	Reynolds Gerilmeleri	92
3.2.4.	Bir Denklemler Modeller	95
3.2.4.1.	Reynolds Gerilme Denklemi	95
3.2.4.2.	Türbülans Kinetik Enerji Denklemi.....	96

3.2.5.	İki Denklemlili Modeller	99
3.2.5.1.	Standart $k - \varepsilon$ Modeli	99
3.2.5.2.	Standart $k - \omega$ Modeli	102
3.3.	Yakıt Demetinin Parçalanması ve Parçalanma Modelleri.....	103
3.3.1.	Yakıt Demetinin Parçalanması	103
3.3.2.	Parçalanma Modelleri	108
3.3.2.1.	Wave Parçalanma Modeli	108
3.3.2.2.	Rayleigh-Taylor Parçalanma Modeli	110
3.4.	Hesaplama Hacmi ve Ağ Yapısı	113
3.5.	Yakıt Demeti Karakteristiğine Etki Eden Faktörler ve İncelenen Parametreler	113
3.6.	Sayısal Çözüm Yöntemleri.....	116
3.6.1.	Upwind Yöntemi.....	117
3.6.2.	Simple Algoritması	119
4.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	123
4.1.	Biyodizel Üretimi.....	123
4.1.1.	Farklı Katalizörler Kullanılarak Üretilen Atık Kızartma Yağı Biyodizelinin Viskozitesinin Reaksiyon Süresi ve Alkol/Yağ Mol Oranına Göre Değişimi	124
4.1.1.1.	CH_3OH ve % 0,75 Oranında CH_3ONa Kullanılması Durumu	124
4.1.1.2.	CH_3OH ve % 1,00 Oranında CH_3ONa Kullanılması Durumu	129
4.1.1.3.	CH_3OH ve % 1,25 Oranında CH_3ONa Kullanılması Durumu	134
4.1.1.4.	CH_3OH ile % 0,75, % 1,00 ve % 1,25 Oranlarında CH_3OK Kullanılması Durumu.....	139
4.1.2.	Farklı Katalizörler Kullanılarak Üretilen Atık Kızartma Yağı Biyodizelinin Viskozitesinin Reaksiyon Sıcaklığı ve Alkol/Yağ Mol Oranına Göre Değişimi	150
4.1.2.1.	CH_3OH ile % 0,75, % 1,00 ve % 1,25 Oranlarında CH_3ONa Kullanılması Durumu.....	150
4.1.2.2.	CH_3OH ile % 0,75, % 1,00 ve % 1,25 Oranlarında CH_3OK Kullanılması Durumu.....	162
4.1.3.	Farklı Katalizörler Kullanılarak Üretilen Atık Kızartma Yağı Biyodizelinin Viskozitesinin Reaksiyon Süresi ve Reaksiyon Sıcaklığına Göre Değişimi.....	173
4.1.3.1.	CH_3OH ile % 0,75, % 1,00 ve % 1,25 Oranlarında CH_3ONa Kullanılması Durumu.....	173
4.1.3.2.	CH_3OH ile % 0,75, % 1,00 ve % 1,25 Oranlarında CH_3OK Kullanılması Durumu.....	184
4.1.4.	Üretilen Biyodizeli İçeren Biyodizel-Dizel Yakıtı Karışımlarının Viskozitelerinin Sıcaklıkla Değişimi	196

4.1.5.	Üretilen Biyodizelin Maliyet Analizi.....	199
4.2.	Üretilen Biyodizelin ve Biyodizel-Dizel Yakıtı Karışımlarının Yakıt Demeti Özelliklerinin İncelenmesi	201
4.2.1.	Akışkanlar Mekaniği Yaklaşımıyla Yakıt Demeti Özelliklerinin Sayısal Olarak İncelenmesi	201
4.2.2.	Püskürtme Basıncı ve Karşı-Hava Yoğunluğunun Etkisi	212
4.2.3.	Enjektör Delik Çapının Etkisi.....	224
4.2.4.	Yakıt Sıcaklığının Etkisi	250
5.	SONUÇLAR.....	290
6.	ÖNERİLER	296
7.	KAYNAKLAR	297
8.	EKLER	313
	ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

DÜŞÜK VİSKOZİTELİ ATIK KIZARTMA YAĞI BİYODİZELİNİN ÜRETİMİ
VE YAKIT DEMETİ KARAKTERİSTİKLERİNİN SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ

Mert GÜLÜM

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Zehra ŞAHİN
2020, 312 Sayfa, 6 Ek Sayfa

Tez çalışmasının ilk aşamasında, CH_3ONa ve CH_3OK katalizör olarak, CH_3OH alkol olarak kullanılarak transesterifikasyon reaksiyonuyla atık kızartma yağından biyodizel üretilmiştir. Bunun için, katalizör oranı, reaksiyon sıcaklığı, reaksiyon süresi ve alkol/yağ mol oranının üretilen biyodizelin viskozitesine olan etkileri tam bir matris şeklinde incelenmiştir. Tez çalışmasının ikinci aşamasında ise, üretilen biyodizelin, dizel yakıtının ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının (B5, B10, B15 ve B20) yakıt demeti özellikleri, (nüfuz derinliği, Sauter ortalama damlacık çapı, yakıt demeti açısı ve hacmi) farklı püskürtme basınçları (100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa), karşı-hava yoğunlukları (15 kg/m^3 ve 30 kg/m^3), enjektör delik çapları (0,08 mm, 0,16 mm, 0,32 mm ve 0,64 mm) ve yakıt sıcaklıkları (295,15 K, 309,15 K, vs.) için Ansys Fluent paket programı kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, 8:1 alkol/yağ mol oranı, % 1 katalizör (CH_3OK) oranı, 55 °C reaksiyon sıcaklığı ve 53 dakika reaksiyon süresinin optimum değerler olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, biyodizel-dizel yakıtı karışımları ısıtıldıklarında ve genel olarak karşı-hava yoğunluğu azaltıldığında, veya püskürtme basıncı ve enjektör çapı artırıldığında yakıt demeti özelliklerinin neredeyse saf dizel yakıtıninkine benzer olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Biyodizel, Metil ester, Yakıt demeti, HAD

Doctoral Thesis

SUMMARY

PRODUCTION OF WASTE COOKING OIL BIODIESEL WITH LOW
VISCOSITY AND NUMERICAL INVESTIGATION OF ITS SPRAY
CHARACTERISTICS

Mert GULUM

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Zehra SAHIN
2020, 312 Pages, 6 Appendix Pages

In the first stage of the thesis, waste cooking oil biodiesel was produced with transesterification using CH_3ONa and CH_3OK as the catalyst, and CH_3OH as the alcohol. For this, the effects of catalyst concentration, reaction temperature, reaction time and alcohol/oil molar ratio on the viscosity of produced biodiesel were investigated as a full matrix. In the second stage of the thesis, the spray characteristics (spray penetration, Sauter mean diameter, spray angle and spray volume) of the produced biodiesel, diesel fuel and biodiesel-diesel fuel blends (B5, B10, B15 and B20) were numerically investigated via Ansys Fluent software under different injection pressure (100 MPa, 200 MPa and 300 MPa), ambient-air density (15 kg/m^3 and 30 kg/m^3), nozzle hole diameter (0,08 mm, 0,16 mm, 0,32 mm and 0,64 mm) and fuel temperature (295,15 K, 309,15 K, etc.). According to the results, the alcohol/oil molar ratio of 8:1, catalyst (CH_3OK) concentration of 1%, reaction temperature of 55°C and reaction duration of 53 minutes were found to be optimal. Moreover, it was found that when the biodiesel-diesel fuel blends are heated, ambient-air density is reduced, or injection pressure and nozzle hole diameter are increased, the spray characteristics of biodiesel-diesel fuel blends are similar to those of diesel fuel.

Key Words: Biodiesel, Methyl ester, Spray, CFD

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	Transesterifikasyon reaksiyonu mekanizması	15
Şekil 1.2.	Bazı yakıt demeti karakteristikleri	33
Şekil 2.1.	Hassas terazi	60
Şekil 2.2.	Manyetik karıştırıcı ısıtıcı.....	61
Şekil 2.3.	Düşen top viskozimetresi ve bilyeler	62
Şekil 2.4.	Kronometre	62
Şekil 2.5.	Su banyosu.....	63
Şekil 2.6.	Piknometre.....	63
Şekil 2.7.	Stalognometre	64
Şekil 2.8.	Atık kızartma yağının ısıtılması.....	68
Şekil 2.9.	Alkolün (CH ₃ OH) tartılması.....	69
Şekil 2.10.	Reaksiyon sonunda meydana gelen karışımın ayırma hunisine alınması ve faz ayrımının gerçekleşmesi.....	70
Şekil 2.11.	Biyodizel fazından gliserinin ayrıştırılması.....	71
Şekil 2.12.	Viskozimetre tüpünün boyutları	74
Şekil 2.13.	Yüzey gerilimi ölçümünde kullanılan damla sayma yöntemi.	76
Şekil 3.1.	Sonsuz küçük bir kontrol hacminde pozitif gerilme tensörü bileşenleri.....	82
Şekil 3.2.	Durgun halindeki akışkanlarda hidrostatik basınç.	83
Şekil 3.3.	Tipik bir türbülanslı akış alanında hız değişimi.....	91
Şekil 3.4.	Jet parçalanma rejimlerini gösteren 2-boyutlu Ohnesorge diyagramı	105
Şekil 3.5.	Karşı-ortam yoğunluğunun etkisini içeren 3-boyutlu Ohnesorge diyagramı	105
Şekil 3.6.	Püskürtme hızıyla parçalanma uzunluğunun değişimi.....	107
Şekil 3.7.	Wave modelinin şematik gösterimi.....	109
Şekil 3.8.	RT modelinin şematik gösterimi.....	110
Şekil 3.9.	KH-RT hibrit modeli	113
Şekil 3.10.	Yakıt demeti karakteristikleri	115
Şekil 3.11.	Yakıt demeti hacmi	116
Şekil 3.12.	2-boyutlu örnek bir hesaplama alanı	118

- Şekil 4.1. CH_3OH ve % 0,75 oranında CH_3ONa kullanılarak 50 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri..... 125
- Şekil 4.2. CH_3OH ve % 0,75 oranında CH_3ONa kullanılarak 55 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri..... 126
- Şekil 4.3. CH_3OH ve % 0,75 oranında CH_3ONa kullanılarak 60 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri..... 127
- Şekil 4.4. CH_3OH ve % 1,00 oranında CH_3ONa kullanılarak 50 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri..... 130
- Şekil 4.5. CH_3OH ve % 1,00 oranında CH_3ONa kullanılarak 55 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri..... 131
- Şekil 4.6. CH_3OH ve % 1,00 oranında CH_3ONa kullanılarak 60 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri..... 132
- Şekil 4.7. CH_3OH ve % 1,25 oranında CH_3ONa kullanılarak 50 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri..... 135
- Şekil 4.8. CH_3OH ve % 1,25 oranında CH_3ONa kullanılarak 55 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri..... 136
- Şekil 4.9. CH_3OH ve % 1,25 oranında CH_3ONa kullanılarak 60 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri..... 137
- Şekil 4.10. CH_3OH ve % 0,75 oranında CH_3OK kullanılarak 50 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri..... 140
- Şekil 4.11. CH_3OH ve % 0,75 oranında CH_3OK kullanılarak 55 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri..... 141

- Şekil 4.12. CH_3OH ve % 0,75 oranında CH_3OK kullanılarak 60 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri 142
- Şekil 4.13. CH_3OH ve % 1,00 oranında CH_3OK kullanılarak 50 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri 143
- Şekil 4.14. CH_3OH ve % 1,00 oranında CH_3OK kullanılarak 55 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri 144
- Şekil 4.15. CH_3OH ve % 1,00 oranında CH_3OK kullanılarak 60 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri 145
- Şekil 4.16. CH_3OH ve % 1,25 oranında CH_3OK kullanılarak 50 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri 146
- Şekil 4.17. CH_3OH ve % 1,25 oranında CH_3OK kullanılarak 55 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri 147
- Şekil 4.18. CH_3OH ve % 1,25 oranında CH_3OK kullanılarak 60 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri 148
- Şekil 4.19. CH_3OH ve % 0,75 oranında CH_3ONa kullanılarak 30 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri . 152
- Şekil 4.20. CH_3OH ve % 0,75 oranında CH_3ONa kullanılarak 60 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri . 153
- Şekil 4.21. CH_3OH ve % 0,75 oranında CH_3ONa kullanılarak 90 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri . 154
- Şekil 4.22. CH_3OH ve % 1,00 oranında CH_3ONa kullanılarak 30 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri . 155

- Şekil 4.23. CH_3OH ve % 1,00 oranında CH_3ONa kullanılarak 60 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri. 156
- Şekil 4.24. CH_3OH ve % 1,00 oranında CH_3ONa kullanılarak 90 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri. 157
- Şekil 4.25. CH_3OH ve % 1,25 oranında CH_3ONa kullanılarak 30 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri. 158
- Şekil 4.26. CH_3OH ve % 1,25 oranında CH_3ONa kullanılarak 60 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri. 159
- Şekil 4.27. CH_3OH ve % 1,25 oranında CH_3ONa kullanılarak 90 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri. 160
- Şekil 4.28. CH_3OH ve % 0,75 oranında CH_3OK kullanılarak 30 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri. 163
- Şekil 4.29. CH_3OH ve % 0,75 oranında CH_3OK kullanılarak 60 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri. 164
- Şekil 4.30. CH_3OH ve % 0,75 oranında CH_3OK kullanılarak 90 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri. 165
- Şekil 4.31. CH_3OH ve % 1,00 oranında CH_3OK kullanılarak 30 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri. 166
- Şekil 4.32. CH_3OH ve % 1,00 oranında CH_3OK kullanılarak 60 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri. 167
- Şekil 4.33. CH_3OH ve % 1,00 oranında CH_3OK kullanılarak 90 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri. 168

- Şekil 4.34. CH_3OH ve % 1,25 oranında CH_3OK kullanılarak 30 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri. 169
- Şekil 4.35. CH_3OH ve % 1,25 oranında CH_3OK kullanılarak 60 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri. 170
- Şekil 4.36. CH_3OH ve % 1,25 oranında CH_3OK kullanılarak 90 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri. 171
- Şekil 4.37. 3:1 mol oranında CH_3OH ve % 0,75 oranında CH_3ONa kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri 175
- Şekil 4.38. 6:1 mol oranında CH_3OH ve % 0,75 oranında CH_3ONa kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri 176
- Şekil 4.39. 9:1 mol oranında CH_3OH ve % 0,75 oranında CH_3ONa kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri 177
- Şekil 4.40. 3:1 mol oranında CH_3OH ve % 1,00 oranında CH_3ONa kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri 178
- Şekil 4.41. 6:1 mol oranında CH_3OH ve % 1,00 oranında CH_3ONa kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri 179
- Şekil 4.42. 9:1 mol oranında CH_3OH ve % 1,00 oranında CH_3ONa kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri 180
- Şekil 4.43. 3:1 mol oranında CH_3OH ve % 1,25 oranında CH_3ONa kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri 181
- Şekil 4.44. 6:1 mol oranında CH_3OH ve % 1,25 oranında CH_3ONa kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri 182

Şekil 4.45.	9:1 mol oranında CH ₃ OH ve % 1,25 oranında CH ₃ ONa kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri	183
Şekil 4.46.	3:1 mol oranında CH ₃ OH ve % 0,75 oranında CH ₃ OK kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri	185
Şekil 4.47.	6:1 mol oranında CH ₃ OH ve % 0,75 oranında CH ₃ OK kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri	186
Şekil 4.48.	9:1 mol oranında CH ₃ OH ve % 0,75 oranında CH ₃ OK kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri	187
Şekil 4.49.	3:1 mol oranında CH ₃ OH ve % 1,00 oranında CH ₃ OK kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri	188
Şekil 4.50.	6:1 mol oranında CH ₃ OH ve % 1,00 oranında CH ₃ OK kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri	189
Şekil 4.51.	9:1 mol oranında CH ₃ OH ve % 1,00 oranında CH ₃ OK kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri	190
Şekil 4.52.	3:1 mol oranında CH ₃ OH ve % 1,25 oranında CH ₃ OK kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri	191
Şekil 4.53.	6:1 mol oranında CH ₃ OH ve % 1,25 oranında CH ₃ OK kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri	192
Şekil 4.54.	9:1 mol oranında CH ₃ OH ve % 1,25 oranında CH ₃ OK kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri	193
Şekil 4.55.	Belirlenen reaksiyon şartlarına göre üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin içeren biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklıkla değişimleri.....	198
Şekil 4.56.	Farklı ağ boyutları kullanılarak elde edilen sayısal nüfuz derinliği değerlerinin deneysel veriler ile karşılaştırılması	203

Şekil 4.57.	Farklı türbülans modelleri ve KH-RT parçalanma modeli kullanılarak elde edilen sayısal nüfuz derinliği değerlerinin deneysel veriler ile karşılaştırılması	204
Şekil 4.58.	Farklı türbülans modelleri ve Wave parçalanma modeli kullanılarak elde edilen sayısal nüfuz derinliği değerlerinin deneysel veriler ile karşılaştırılması	205
Şekil 4.59.	Farklı parçalanma modelleri ve standart $k - \epsilon$ türbülans modeli kullanılarak elde edilen sayısal nüfuz derinliği değerlerinin deneysel veriler ile karşılaştırılması	206
Şekil 4.60.	Farklı karşı-ortam yoğunluklarında ve 100 MPa püskürtme basıncında, saf dizel yakıtı ve atık kızartma yağı biyodizelinin nüfuz derinliğinin zamanla değişimi için elde edilen sayısal sonuçların deneysel veriler ile karşılaştırılması	207
Şekil 4.61.	Farklı karşı-ortam yoğunluklarında ve 200 MPa püskürtme basıncında, saf dizel yakıtı ve atık kızartma yağı biyodizelinin nüfuz derinliğinin zamanla değişimi için elde edilen sayısal sonuçların deneysel veriler ile karşılaştırılması	208
Şekil 4.62.	Farklı karşı-ortam yoğunluklarında ve 300 MPa püskürtme basıncında, saf dizel yakıtı ve atık kızartma yağı biyodizelinin nüfuz derinliğinin zamanla değişimi için elde edilen sayısal sonuçların deneysel veriler ile karşılaştırılması	209
Şekil 4.63.	Farklı karşı-ortam yoğunluklarında, saf dizel yakıtının Sauter ortalama çapının püskürtme basıncıyla değişimi için elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması.....	210
Şekil 4.64.	Farklı karşı-ortam yoğunluklarında, saf atık kızartma yağı biyodizelinin Sauter ortalama çapının püskürtme basıncıyla değişimi için elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması	210
Şekil 4.65.	Farklı karşı-ortam yoğunluklarında, saf dizel yakıtının sprej açısının püskürtme basıncıyla değişimi için elde edilen sayısal sonuçların, deneysel veriler ve ampirik modeller ile karşılaştırılması.....	211
Şekil 4.66.	Farklı karşı-ortam yoğunluklarında, saf atık kızartma yağı biyodizelinin sprej açısının püskürtme basıncıyla değişimi için elde edilen sayısal sonuçların, deneysel veriler ve ampirik modeller ile karşılaştırılması.....	211
Şekil 4.67.	Farklı karşı-ortam yoğunluklarında, saf dizel yakıtı ve atık kızartma yağı biyodizelinin sprej hacimlerinin püskürtme basıncıyla değişimi için elde edilen sayısal sonuçların deneysel veriler ile karşılaştırılması	212
Şekil 4.68.	Farklı karşı-hava yoğunluklarında ve 100 MPa püskürtme basıncında, ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin nüfuz derinliğinin zamanla değişimi için elde edilen sayısal sonuçlar.....	214
Şekil 4.69.	Farklı karşı-hava yoğunluklarında ve 200 MPa püskürtme basıncında, ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin nüfuz derinliğinin zamanla değişimi için elde edilen sayısal sonuçlar.....	215

Şekil 4.70.	Farklı karşı-hava yoğunluklarında ve 300 MPa püskürtme basıncında, ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin nüfuz derinliğinin zamanla değişimi için elde edilen sayısal sonuçlar.....	215
Şekil 4.71.	Farklı karşı-hava yoğunluklarında ve püskürtme basınçlarında, ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliğinin zamanla değişimi için elde edilen sayısal sonuçlar	216
Şekil 4.72.	Farklı karşı-hava yoğunluklarında ve püskürtme basınçlarında, üretilen saf biyodizelin nüfuz derinliğinin zamanla değişimi için elde edilen sayısal sonuçlar	216
Şekil 4.73.	Farklı karşı-hava yoğunluklarında, ticari saf dizel yakıtının Sauter ortalama çapının püskürtme basıncıyla değişimi için elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması.....	218
Şekil 4.74.	Farklı karşı-hava yoğunluklarında, üretilen saf biyodizelin Sauter ortalama çapının püskürtme basıncıyla değişimi için elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması.....	218
Şekil 4.75.	Farklı karşı-hava yoğunluklarında, ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin Sauter ortalama çapının püskürtme basıncıyla değişimi için elde edilen sayısal sonuçlar.....	219
Şekil 4.76.	Farklı karşı-hava yoğunluklarında, ticari saf dizel yakıtının sprej açısının püskürtme basıncıyla değişimi için elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması.....	221
Şekil 4.77.	Farklı karşı-hava yoğunluklarında, üretilen saf biyodizelin sprej açısının püskürtme basıncıyla değişimi için elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması.....	221
Şekil 4.78.	Farklı karşı-hava yoğunluklarında, ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin sprej açılarının püskürtme basıncıyla değişimi için elde edilen sayısal sonuçlar.....	223
Şekil 4.79.	Farklı karşı-hava yoğunluklarında, ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin sprej hacimlerinin püskürtme basıncıyla değişimleri için elde edilen sayısal sonuçlar	224
Şekil 4.80.	Farklı karşı-hava yoğunlukları ve enjektör delik çapları ile 100 MPa püskürtme basıncı için ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar.....	226
Şekil 4.81.	Farklı karşı-hava yoğunlukları ve enjektör delik çapları ile 100 MPa püskürtme basıncı için üretilen saf biyodizelin nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar.....	227
Şekil 4.82.	Farklı karşı-hava yoğunlukları ve enjektör delik çapları ile 200 MPa püskürtme basıncı için ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar.....	227
Şekil 4.83.	Farklı karşı-hava yoğunlukları ve enjektör delik çapları ile 200 MPa püskürtme basıncı için üretilen saf biyodizelin nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar.....	228

Şekil 4.84.	Farklı karşı-hava yoğunlukları ve enjektör delik çapları ile 300 MPa püskürtme basıncı için ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar.....	228
Şekil 4.85.	Farklı karşı-hava yoğunlukları ve enjektör delik çapları ile 300 MPa püskürtme basıncı için üretilen saf biyodizelin nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar.....	229
Şekil 4.86.	Farklı karşı-hava yoğunlukları ve püskürtme basınçları ile 0,08 mm enjektör delik çapı için ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar.....	230
Şekil 4.87.	Farklı karşı-hava yoğunlukları ve püskürtme basınçları ile 0,08 mm enjektör delik çapı için üretilen saf biyodizelin nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar.....	231
Şekil 4.88.	Farklı karşı-hava yoğunlukları ve püskürtme basınçları ile 0,32 mm enjektör delik çapı için ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar.....	231
Şekil 4.89.	Farklı karşı-hava yoğunlukları ve püskürtme basınçları ile 0,32 mm enjektör delik çapı için üretilen saf biyodizelin nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar.....	232
Şekil 4.90.	Farklı karşı-hava yoğunlukları ve püskürtme basınçları ile 0,64 mm enjektör delik çapı için ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar.....	232
Şekil 4.91.	Farklı karşı-hava yoğunlukları ve püskürtme basınçları ile 0,64 mm enjektör delik çapı için üretilen saf biyodizelin nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar.....	233
Şekil 4.92.	Farklı karşı-hava yoğunlukları ve 0,08 mm enjektör delik çapı için ticari saf dizel yakıtının Sauter ortalama çapının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması	234
Şekil 4.93.	Farklı karşı-hava yoğunlukları ve 0,08 mm enjektör delik çapı için üretilen saf biyodizelin Sauter ortalama çapının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması	235
Şekil 4.94.	Farklı karşı-hava yoğunlukları ve 0,32 mm enjektör delik çapı için ticari saf dizel yakıtının Sauter ortalama çapının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması	235
Şekil 4.95.	Farklı karşı-hava yoğunlukları ve 0,32 mm enjektör delik çapı için üretilen saf biyodizelin Sauter ortalama çapının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması	236
Şekil 4.96.	Farklı karşı-hava yoğunlukları ve 0,64 mm enjektör delik çapı için ticari saf dizel yakıtının Sauter ortalama çapının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması	236

Şekil 4.97.	Farklı karşı-hava yoğunlukları ve 0,64 mm enjektör delik çapı için üretilen saf biyodizelin Sauter ortalama çapının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması	237
Şekil 4.98.	Farklı enjektör delik çapları ve 15 kg/m ³ karşı-hava yoğunluğu için ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin Sauter ortalama çaplarının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması	238
Şekil 4.99.	Farklı enjektör delik çapları ve 30 kg/m ³ karşı-hava yoğunluğu için ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin Sauter ortalama çaplarının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması	239
Şekil 4.100.	Farklı karşı-hava yoğunlukları ve 0,08 mm enjektör delik çapı için ticari saf dizel yakıtının sprej açısının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması	241
Şekil 4.101.	Farklı karşı-hava yoğunlukları ve 0,08 mm enjektör delik çapı için üretilen saf biyodizelin sprej açısının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması	241
Şekil 4.102.	Farklı karşı-hava yoğunlukları ve 0,32 mm enjektör delik çapı için ticari saf dizel yakıtının sprej açısının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması	242
Şekil 4.103.	Farklı karşı-hava yoğunlukları ve 0,32 mm enjektör delik çapı için üretilen saf biyodizelin sprej açısının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması	242
Şekil 4.104.	Farklı karşı-hava yoğunlukları ve 0,64 mm enjektör delik çapı için ticari saf dizel yakıtının sprej açısının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması	243
Şekil 4.105.	Farklı karşı-hava yoğunlukları ve 0,64 mm enjektör delik çapı için üretilen saf biyodizelin sprej açısının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması	243
Şekil 4.106.	Farklı enjektör delik çapları ve 15 kg/m ³ karşı-hava yoğunluğu için ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin sprej açılarının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması	245
Şekil 4.107.	Farklı enjektör delik çapları ve 30 kg/m ³ karşı-hava yoğunluğu için dizel yakıtının ve üretilen biyodizelin sprej açılarının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması	245

Şekil 4.108.	Farklı karşı-hava yoğunlukları ve 0,08 mm enjektör delik çapı için ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin sprej hacimlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin sayısal sonuçlar	247
Şekil 4.109.	Farklı karşı-hava yoğunlukları ve 0,32 mm enjektör delik çapı için ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin sprej hacimlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin sayısal sonuçlar	247
Şekil 4.110.	Farklı karşı-hava yoğunlukları ve 0,64 mm enjektör delik çapı için ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin sprej hacimlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin sayısal sonuçlar	248
Şekil 4.111.	Farklı enjektör delik çapları ve 15 kg/m ³ karşı-hava yoğunluğu için ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin sprej hacimlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması	249
Şekil 4.112.	Farklı enjektör delik çapları ve 30 kg/m ³ karşı-hava yoğunluğu için ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin sprej hacimlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması	249
Şekil 4.113.	Farklı yakıt sıcaklıkları ve 100 MPa püskürtme basıncı altında B5 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar	252
Şekil 4.114.	Farklı yakıt sıcaklıkları ve 100 MPa püskürtme basıncı altında B10 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar	253
Şekil 4.115.	Farklı yakıt sıcaklıkları ve 100 MPa püskürtme basıncı altında B15 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar	253
Şekil 4.116.	Farklı yakıt sıcaklıkları ve 100 MPa püskürtme basıncı altında B20 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar	254
Şekil 4.117.	Farklı yakıt sıcaklıkları ve 200 MPa püskürtme basıncı altında B5 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar	254
Şekil 4.118.	Farklı yakıt sıcaklıkları ve 200 MPa püskürtme basıncı altında B10 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar	255
Şekil 4.119.	Farklı yakıt sıcaklıkları ve 200 MPa püskürtme basıncı altında B15 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar	255
Şekil 4.120.	Farklı yakıt sıcaklıkları ve 200 MPa püskürtme basıncı altında B20 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar	256
Şekil 4.121.	Farklı yakıt sıcaklıkları ve 300 MPa püskürtme basıncı altında B5 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar	256

- Şekil 4.122. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 300 MPa püskürtme basıncı altında B10 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar257
- Şekil 4.123. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 300 MPa püskürtme basıncı altında B15 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar257
- Şekil 4.124. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 300 MPa püskürtme basıncı altında B20 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar258
- Şekil 4.125. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 100 MPa püskürtme basıncı altında 3,226 mm²/s kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar....260
- Şekil 4.126. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 100 MPa püskürtme basıncı altında 2,683 mm²/s kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar....260
- Şekil 4.127. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 100 MPa püskürtme basıncı altında 2,388 mm²/s kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar....261
- Şekil 4.128. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 200 MPa püskürtme basıncı altında 3,226 mm²/s kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar....261
- Şekil 4.129. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 200 MPa püskürtme basıncı altında 2,683 mm²/s kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar....262
- Şekil 4.130. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 200 MPa püskürtme basıncı altında 2,388 mm²/s kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar....262
- Şekil 4.131. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 300 MPa püskürtme basıncı altında 3,226 mm²/s kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar....263
- Şekil 4.132. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 300 MPa püskürtme basıncı altında 2,683 mm²/s kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar....263
- Şekil 4.133. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 300 MPa püskürtme basıncı altında 2,388 mm²/s kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar....264
- Şekil 4.134. Farklı püskürtme basınçları altında 309,15 K sıcaklıkta 3,226 mm²/s kinematik viskoziteye sahip B5 yakıt karışımının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar.....265
- Şekil 4.135. Farklı püskürtme basınçları altında 311,15 K sıcaklıkta 3,226 mm²/s kinematik viskoziteye sahip B10 yakıt karışımının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar.....266

Şekil 4.136.	Farklı püskürtme basınçları altında 315,15 K sıcaklıkta 3,226 mm ² /s kinematik viskoziteye sahip B15 yakıt karışımının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar.....	266
Şekil 4.137.	Farklı püskürtme basınçları altında 319,15 K sıcaklıkta 3,226 mm ² /s kinematik viskoziteye sahip B20 yakıt karışımının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar.....	267
Şekil 4.138.	Farklı püskürtme basınçları altında 329,15 K sıcaklıkta 2,683 mm ² /s kinematik viskoziteye sahip B5 yakıt karışımının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar.....	267
Şekil 4.139.	Farklı püskürtme basınçları altında 332,15 K sıcaklıkta 2,683 mm ² /s kinematik viskoziteye sahip B10 yakıt karışımının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar.....	268
Şekil 4.140.	Farklı püskürtme basınçları altında 341,15 K sıcaklıkta 2,683 mm ² /s kinematik viskoziteye sahip B15 yakıt karışımının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar.....	268
Şekil 4.141.	Farklı püskürtme basınçları altında 349,15 K sıcaklıkta 2,683 mm ² /s kinematik viskoziteye sahip B20 yakıt karışımının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar.....	269
Şekil 4.142.	Farklı püskürtme basınçları altında 345,15 K sıcaklıkta 2,388 mm ² /s kinematik viskoziteye sahip B5 yakıt karışımının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar.....	269
Şekil 4.143.	Farklı püskürtme basınçları altında 350,15 K sıcaklıkta 2,388 mm ² /s kinematik viskoziteye sahip B10 yakıt karışımının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar.....	270
Şekil 4.144.	Farklı püskürtme basınçları altında 367,15 K sıcaklıkta 2,388 mm ² /s kinematik viskoziteye sahip B15 yakıt karışımının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar.....	270
Şekil 4.145.	Farklı püskürtme basınçları altında 382,15 K sıcaklıkta 2,388 mm ² /s kinematik viskoziteye sahip B20 yakıt karışımının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar.....	271
Şekil 4.146.	Farklı yakıt sıcaklıklarındaki B5 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının Sauter ortalama çap değerlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması.....	273
Şekil 4.147.	Farklı yakıt sıcaklıklarındaki B10 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının Sauter ortalama çap değerlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması.....	273
Şekil 4.148.	Farklı yakıt sıcaklıklarındaki B15 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının Sauter ortalama çap değerlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması.....	274
Şekil 4.149.	Farklı yakıt sıcaklıklarındaki B20 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının Sauter ortalama çap değerlerinin	

	püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması.....	274
Şekil 4.150.	Farklı yakıt sıcaklıklarında 3,226 mm ² /s kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının Sauter ortalama çaplarının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması	276
Şekil 4.151.	Farklı yakıt sıcaklıklarında 2,683 mm ² /s kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının Sauter ortalama çaplarının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması	276
Şekil 4.152.	Farklı yakıt sıcaklıklarında 2,388 mm ² /s kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının Sauter ortalama çaplarının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması	277
Şekil 4.153.	Farklı yakıt sıcaklıklarındaki B5 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının sprej açısı değerlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması.....	280
Şekil 4.154.	Farklı yakıt sıcaklıklarındaki B10 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının sprej açısı değerlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması.....	280
Şekil 4.155.	Farklı yakıt sıcaklıklarındaki B15 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının sprej açısı değerlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması.....	281
Şekil 4.156.	Farklı yakıt sıcaklıklarındaki B20 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının sprej açısı değerlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması.....	281
Şekil 4.157.	Farklı yakıt sıcaklıklarında 3,226 mm ² /s kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının sprej açılarının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması	282
Şekil 4.158.	Farklı yakıt sıcaklıklarında 2,683 mm ² /s kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının sprej açılarının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması	282
Şekil 4.159.	Farklı yakıt sıcaklıklarında 2,388 mm ² /s kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının sprej açılarının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması	283
Şekil 4.160.	Farklı yakıt sıcaklıklarındaki B5 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının sprej hacmi değerlerinin	

	püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması.....	285
Şekil 4.161.	Farklı yakıt sıcaklıklarındaki B10 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının sprej hacmi değerlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması.....	286
Şekil 4.162.	Farklı yakıt sıcaklıklarındaki B15 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının sprej hacmi değerlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması.....	286
Şekil 4.163.	Farklı yakıt sıcaklıklarındaki B20 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının sprej hacmi değerlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması.....	287
Şekil 4.164.	Farklı yakıt sıcaklıklarında 3,226 mm ² /s kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının sprej hacimlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması	288
Şekil 4.165.	Farklı yakıt sıcaklıklarında 2,683 mm ² /s kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının sprej hacimlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması	289
Şekil 4.166.	Farklı yakıt sıcaklıklarında 2,388 mm ² /s kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının sprej hacimlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması	289

TABLULAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.1.	Transesterifikasyon parametrelerinin üretilen biyodizelin ester verimine etkisinin incelendiği yayınlarda kullanılan malzemeler ve belirlenen parametreler	28
Tablo 2.1.	Biyodizel üretiminde kullanılan alkolün bazı özellikleri	65
Tablo 4.1.	Farklı reaksiyon sıcaklıklarında % 0,75 oranında CH ₃ ONa kullanılarak üretilebilecek biyodizellerin tahmini viskozite değerleri ve ilgili metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresi parametreleri	128
Tablo 4.2.	Farklı reaksiyon sıcaklıklarında % 1,00 oranında CH ₃ ONa kullanılarak üretilebilecek biyodizellerin tahmini viskozite değerleri ve ilgili metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresi parametreleri	133
Tablo 4.3.	Farklı reaksiyon sıcaklıklarında % 1,25 oranında CH ₃ ONa kullanılarak üretilebilecek biyodizellerin tahmini viskozite değerleri ve ilgili metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresi parametreleri	139
Tablo 4.4.	% 0,75, % 1,00 ve % 1,25 oranlarında CH ₃ OK kullanılarak farklı reaksiyon sıcaklıklarında üretilebilecek biyodizellerin tahmini viskozite değerleri ve ilgili metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresi parametreleri	150
Tablo 4.5.	% 0,75, % 1,00 ve % 1,25 oranlarında CH ₃ ONa kullanılarak farklı reaksiyon sürelerinde üretilebilecek biyodizellerin tahmini viskozite değerleri ve ilgili metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığı parametreleri	161
Tablo 4.6.	% 0,75, % 1,00 ve % 1,25 oranlarında CH ₃ OK kullanılarak farklı reaksiyon sürelerinde üretilebilecek biyodizellerin tahmini viskozite değerleri ve ilgili metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığı parametreleri	172
Tablo 4.7.	% 0,75, % 1,00 ve % 1,25 oranlarında CH ₃ ONa kullanılarak farklı metil alkol/yağ mol oranlarında üretilebilecek biyodizellerin tahmini viskozite değerleri ve ilgili reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığı parametreleri	174
Tablo 4.8.	% 0,75, % 1,00 ve % 1,25 oranlarında CH ₃ OK kullanılarak farklı metil alkol/yağ mol oranlarında üretilebilecek biyodizellerin tahmini viskozite değerleri ve ilgili reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığı parametreleri	195
Tablo 4.9.	Optimum biyodizelin yakıt özellikleri ve EN 14214 standart değerleri	196
Tablo 4.10.	Biyodizel-dizel karışımlarının viskozite değerleri	198
Tablo 4.11.	Rasyonel model ile ilgili regresyon ve korelasyon katsayıları	199

Tablo 4.12.	Rasyonel modelden hesaplanan ve ölçülen viskozite değerleri arasındaki gerçek hata oranları	199
Tablo 4.13.	Biyodizel üretiminde kullanılan malzemelerin miktarı ve fiyatları	199
Tablo 4.14.	Manyetik karıştırıcı ısıtıcının harcadığı elektrik miktarı ve tutarı	200
Tablo 4.15.	Üretilen biyodizelin ve ticari dizel yakıtının litre fiyatları	201



SEMBOLLER DİZİNİ

A	: Isı transferinin gerçekleştiği yüzey alanı [m^2], enjektör geometrisine bağlı sabit bir katsayı
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Derneği
a	: Sonlu fark denklemi katsayısı (P, E, W, N, S gibi alt indisler alır), regresyon katsayısı
B_0	: KH model parametresi
B_1	: RT model parametresi
B100	: Üretilen atık kızartma yağı biyodizeli
B5, B10, B15, B20	: Hacimsel olarak % 5, 10, 15 ve 20 oranlarında optimum biyodizeli içeren biyodizel-dizel yakıtı karışımları
BDE15, BDE30	: Hacimsel olarak % 15 ve 30 oranında etanol içeren biyodizel-etanol karışımları
b ve c	: Regresyon katsayıları
C	: Enjektör tipine bağlı olarak sabit bir sayısı
C_d	: Damlacığın direnç katsayısı
C_m	: Momentum katsayısı
C_p	: Sabit basınçtaki özgül ısı [kJ/kgK]
C_v	: Sabit hacimdeki özgül ısı [kJ/kgK]
$C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}, C_{\mu}$: $k - \epsilon$ türbülans modeli sabitleri
CNG	: Sıkıştırılmış doğal gaz
D	: Toplam türbülans enerji yıkımı
DIN	: Alman Standartlar Enstitüsü
DY	: Ticari saf dizel yakıtı
d_e	: Enjektör delik çapı [mm]
EN	: Avrupa Birliği Standardı
E80	: Hacimsel olarak % 80 oranında biyoetanol içeren etanol-benzin karışımı
e	: İç enerji [kJ/kg]
\vec{F}	: Kontrol hacmi üzerine etkiyen kuvvet [N]

GTİP	: Gümrük tarife istatistik pozisyonu
G20, G50, G70	: Hacimsel olarak % 20, % 50 ve % 70 oranlarında benzin içeren dizel-benzin karışımları
G100	: Benzin yakıtı
g	: Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
h	: Entalpi [kJ/kg], hava
ISO	: Uluslararası Standartlar Teşkilatı
\vec{i}, \vec{j} ve \vec{k}	: Birim vektörler
KH	: Kelvin-Helmholtz parçalanma modeli
K	: Viskozimetre bilyesinin sabit katsayısı [$mPa \cdot s \cdot cm^3/g \cdot s$]
k	: Özgül türbülans kinematik enerjisi [$J/kg \equiv m^2/s^2$], incelenen kontrol hacmine komşu kontrol hacimlerinin merkezi
km	: İncelenen kontrol hacmine komşu kontrol hacimlerinin merkezi
L	: Enjektörün boyu [mm]
LNG	: Sıvılaştırılmış doğal gaz
LPG	: Sıvılaştırılmış petrol gazı
m	: Kütle [g]
\dot{m}	: Kütlesel debi [kg/s]
NO _x	: Azotoksit emisyonları
N5, N10 ve N20	: Hacimsel olarak % 5, % 10 ve % 20 oranlarında n-butanol içeren butanol-dizel yakıtı karışımları
\vec{n}	: Dış normal vektör
o	: Ortam
P	: Hidrostatik basınç (termodinamik basınç) [N/m^2], toplam türbülans enerji üretimi, incelenen kontrol hacminin merkezi
P*	: Tahmini (öngörülen) basınç değeri [N/m^2]
P'	: Düzeltilmiş basınç alanı [N/m^2]
P _m	: Mekanik basınç [N/m^2]
Q	: Toplam ısı miktarı [kJ]
\dot{Q}	: Birim zamanda transfer olan (geçen) toplam ısı miktarı [kJ/s]
q''	: Isı akısı [W/m^2]

R	: Korelasyon katsayısı, ölçülen veya hesaplanan hedef fiziksel büyüklük
Re	: Reynolds sayısı
RT	: Rayleigh-Taylor parçalanma modeli
r^2	: Determinasyon katsayısı
S	: Nüfuz derinliği [mm], kısmi diferansiyel denklemin kaynak terimi
S_{ij}	: Kayma şekil değiştirme hızı tensörü [1/s]
S_{xx} , S_{yy} ve S_{zz}	: Doğrusal şekil değiştirme hızı [1/s]
T	: Sıcaklık [°C] veya [K], Taylor sayısı
t	: Viskozimetre bilyesinin viskozimetre tüpü üzerinde işaretli yatay iki çizgi boyunca limit hızla düşme süresi [s], zaman [s]
u, v, w	: Sırasıyla x, y, z koordinatlarındaki hız bileşenleri
\bar{u}	: Zaman-ortalama hız [m/s]
\dot{u}	: Çalkantı hızı [m/s]
u^*	: Tahmini (öngörülen) hız [m/s]
u'	: Düzeltilmiş hız [m/s]
\vec{V}	: Hız alanı [m/s]
V	: Hacim [m ³]
W	: Net iş [kJ]
We	: Weber sayısı
w	: Belirsizlik [%]
\tilde{w}	: Boyutsuz belirsizlik
X	: Karışımdaki hacimsel biyodizel oranı [%]
y	: Yakıt
Z	: Ohnesorge sayısı
α , β , β^*	: $k - \omega$ türbülans modeli sabitleri
ΔP	: Püskürtme basıncı ile karşı-hava basıncı arasındaki farkı [Pa]
ΔT	: Zaman aralığı [s]
ΔV	: Sonlu kontrol hacminin hacmi (İki boyutta alanı)
$\vec{\nabla}$: Diverjans operatörü
∇^2	: Laplace operatörü

δ_{ij}	: Kronecker delta fonksiyonu
ε	: Türbülans kinetik enerjisi yutulma oranı [m^2/s^3]
θ	: Sprey açısı [derece]
μ	: Moleküler dinamik viskozite [$cP \equiv g/m \cdot s$]
μ_t	: Türbülanslı (girdapçık) viskozite [$g/m \cdot s$]
ν	: Kinematik viskozite [$cSt \equiv mm^2/s$]
ρ	: Yoğunluk [$kg/m^3 \equiv g/L$], [g/cm^3]
σ	: Yüzey gerilimi [N/m]
σ_{ij}	: Gerilme tensörünü [N/m^2]
σ_k	: Türbülans kinetik enerjisi (k) için Prandtl-Schmidt katsayısı
σ_ε	: Yutulma için Prandtl-Schmidt katsayısı
σ_ω	: Yutulma miktarı için Prandtl-Schmidt katsayısı
τ_{ij}	: Viskoz gerilme tensörü [N/m^2]
τ_{KH}	: Parçalanma karakteristik zaman aralığına [s]
ω	: Türbülans kinetik enerjisinin yutulma miktarı veya yutulma zaman ölçeğinin tersi [$1/s$]
Λ	: Dalga boyu [mm]
Ω	: Dalganın büyüme oranı (frekansı) [$1/s$]

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Enerji, insan yaşamının temel ihtiyaçlarını karşılamak için gerekli olan en önemli öğelerin başında gelmektedir [1]. Ekonomik ve sosyal kalkınma için temel girdilerden olan enerji, ülkelerin en önemli gelişmişlik göstergeleri arasında yer almaktadır [1, 2].

Dünya enerji ihtiyacının büyük bir kısmı fosil kökenli yakıtlardan (kömür, petrol, vb.) karşılanmaktadır. Son yıllarda artan insan nüfusu, teknolojinin yaygınlaşması, hızlı sanayileşme ve şehirleşme nedenleriyle her geçen yıl enerji talebi hızla artmaktadır. Öyle ki, yapılan bir araştırmada, dünya enerji talebinin 2020 yılında % 65, 2050 yılında ise % 250 daha fazla olacağı tahmin edilmektedir [3]. Enerji talebinin artışıyla fosil kökenli yakıtların daha fazla kullanılması ve motorlu karayolu taşıt sayısının her geçen yıl artması fosil kökenli yakıtların bilinen rezervlerinin hızlıca azalmasına neden olurken, motorlarda ve taşıtlardaki teknolojik gelişmelerle ve alternatif güç kaynaklarının yaygınlaşmasıyla petrol tüketiminin azalması da beklenmektedir. Fakat yine de, nüfusa bağlı tüketim oranları dikkate alındığında, yeni petrol rezervleri bulunamadığı takdirde, petrol kaynaklarının yaklaşık olarak 2050 yılında tükeneceği öngörülmektedir [2, 4].

Enerji ihtiyacının karşılandığı fosil kökenli yakıtların dünya üzerinde belirli coğrafik bölgelerde toplanmış olması zaman zaman petrol krizlerinin yaşanmasına da neden olmuştur [5]. Özellikle 1974 petrol krizi, 1991 Körfez savaşı ve 2003 Irak işgalinde olduğu gibi, petrol ürünlerinin piyasadan çekilmesi fiyatların artmasına neden olmuş, bu durum Türkiye gibi ekonomisi zayıf olan ülkeleri derinden etkilemiştir.

Ayrıca, fosil kökenli yakıtların içten yanmalı motorlarda kullanılması durumunda ortaya çıkan karbonmonoksit, karbondioksit (sera etkisi), kükürtoksitler (asit yağmurları), yarı yanmış veya yanmamış hidrokarbonlar, azotoksitler (fotokimyasal sis), kurşun ve is gibi zararlı emisyonlar çevreyi olumsuz yönde etkilemektedir. Karbonmonoksit kanın oksijen taşıma yeteneğinin azalmasına ve boğulmaya, azotoksitler ciğer ödemine ve gözlerin tahriş olmasına, is ve kurşun parçacıkları astım ile bronşite, hidrokarbonlar ise kansere neden olmaktadır [4, 6].

Fosil kökenli yakıtlar ile ilgili yukarıda bahsedilen sorunlar nedeniyle son yıllarda yeni, yerel kaynaklardan üretilebilen, sürdürülebilir, yenilenebilir ve çevreci alternatif

yakıtlara olan ilgi artmıştır. Alternatif yakıtlar arasında biyokütle, ülkemizin tarım potansiyeli dikkate alındığında en büyük teknik potansiyele sahip olan enerji kaynağı olarak görülmektedir [3]. Biyokütle, yeşil yapraklı bitkilerin güneş enerjisini fotosentez yoluyla doğrudan kimyasal enerjiye dönüştürerek depolanması sonucunda oluşmaktadır. Günümüzde, biyokütle hammadde kaynağı olarak odun, yağlı tohum bitkileri (mısır, fındık, ayçiçeği, vb.), karbonhidrat bitkileri (patates, buğday, vb.), elyaf bitkileri (keten, kenevir, vb.), bitkisel atıklar, hayvansal atıklar, şehirselle ve endüstriyel atıklar örnek gösterilebilir [3]. Biyokütle kaynakları arasında, sıvı olması ve içten yanmalı motorlarda kullanılabilir potansiyeli nedeniyle, bitkisel yağlar ve türevleri (biyodizel) daha çok ilgi çekmektedir. Bitkisel yağların içten yanmalı motorlarda (dizel motorları) kullanımını ilk defa Dr. Rudolf Diesel 1893 yılında denemiş olsa da, yüksek viskozitelerinden dolayı meydana gelen sorunlar nedeniyle, günümüzde tercih edilmemektedirler. Oysa ki, biyodizel, birçok üstün özellikleri nedeniyle (doğada kolay bozunması, setan sayısının ve parlama noktası sıcaklığının yüksek olması, toksit ve sülfür bileşenler içermemesi, vb.), termik verimi en yüksek içten yanmalı motor olan dizel motorlarda kullanılacak en önemli alternatif yakıt olarak dikkat çekmektedir. Özetle belirtmek gerekirse; sunulan tez çalışmasında, Amerika'da Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından [7] çevre ve insan sağlığına diğer yakıtlara göre daha az zarar verdiği belirlenen biyodizelin, üretimi ve yakıt demeti özellikleri incelenmiştir.

1.2. İçten Yanmalı Motor Yakıtları

İçten yanmalı pistonlu motorlar, çalışmalarını için gerekli olan enerjiyi yakıtın yanma odası içerisinde havadaki oksijenle reaksiyonu (yanma) sonucunda elde ederler [6]. Yanma esnasında yakıtın kimyasal enerjisi gazların iç enerjisine, daha sonra bu iç enerji krank milinden faydalı işe (mekanik iş) dönüştürülür [6]. Motorlarda kullanılan yakıtlardan beklenen fiziksel ve kimyasal özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- 1) Yakıt-hava karışımının yanma odası dışında (karbüratörde veya supap gerisinde püskürtme yapılarak) hazırlandığı veya emme stroğu boyunca direkt silindir içine püskürtmenin yapıldığı buji-ateşlemeli motorlarda, yakıtın uçuculuğu (buharlaşılabilmek yeteneği) yüksek olmalı ve çok kısa süre içerisinde hava ile homojen bir karışım oluşturmalıdır. Silindir içinde yakıt-hava karışımının yanmadan hemen önce hazırlandığı sıkıştırma-ateşlemeli motorlarda (dizel

motorlar) ise, basınçlı havanın içine püskürtülen yakıt kolayca parçalanıp çok kısa sürede hava ile etkin bir şekilde karışabilmelidir.

- 2) Yanma reaksiyonu motorların devir sayılarına bağlı olarak 1/100–1/1000 saniye aralığında meydana geldiği için, bu çok kısa süre içerisinde yakıtlar tam olarak yanabilmelidir.
- 3) Birim hacminin veya kütesinin ısı değeri yüksek olmalıdır.
- 4) Yanma ürünleri silindir yüzeylerinde, yanma odası çeperlerinde, piston, segman ve eksoz donanımlarında korozyona neden olmamalıdır.
- 5) Yanma sonunda, yanma odası çeperlerine, supap oturma yüzeylerine, segman yuvalarına ve piston gibi diğer motor elemanlarına yapışan karbon, kömür, zift vb. artıklar ya hiç oluşmamalı ya da çok az miktarlarda oluşmalıdır.
- 6) Bolca bulunabilmeli, çevreyi kirletmemeli, ekonomik olmalı, yangın tehlikesi az olmalı, kolayca depolanabilmeli ve kolayca nakledilebilmelidir [4].

Yukarıda sıralanan özellikleri sağlamak üzere içten yanmalı motorlarda öteden beri değişik katı, sıvı ve gaz yakıtlar kullanılmaktadır. Ancak günümüzde kullanılan en yaygın yakıtlar, ham petrolün damıtılmasından elde edilen fosil kökenli (benzin ve dizel) sıvı yakıtlardır. Bunun yanında, alternatif yakıtlar (biyodizel, hidrojen, biyoyağ, etanol vb.) da kullanılmaktadır.

1.2.1. İçten Yanmalı Motorlarda Kullanılan Fosil Kökenli Yakıtlar

Fosil kökenli yakıtlar esas olarak karbon ve hidrojenden oluşan, fakat bunun yanında az da olsa azot, kükürt vb. bileşenleri de içeren sıvı hidrokarbonlardır [6]. Uzun yıllardır sıkıştırma-ateşlemeli ve buji-ateşlemeli motorlarda sırasıyla fosil kökenli dizel yakıtı ve benzin kullanılmaktadır. Bu yakıtlar genel özelliklerinin yanı sıra çevrim türüne bağlı olarak bazı farklı özelliklere de sahiptir [8]. Aşağıda söz konusu yakıtların en önemli özellikleri verilmiştir:

1.2.1.1. Dizel Yakıtının Özellikleri

Genel olarak sıkıştırma-ateşlemeli motorlarda kullanılan dizel yakıtları hafif ve ağır dizel yakıtları olarak iki ana gruba ayrılabilir. Hafif ve ağır dizel yakıtlarının mol kütleleri ve kimyasal formülleri yaklaşık 170 kg/kmol, $C_{12.3}H_{22.2}$ ve 200 kg/kmol, $C_{14.06}H_{24.8}$ olarak

kabul edilir [6]. Kullanılan dizel yakıtlarının çoğu bu sınırlar içerisinde. Hafif dizel yakıtının viskozitesi düşük, pompalanması kolay, fakat maliyeti yüksektir [6]. Ağır dizel yakıtları ise genellikle yüksek püskürtme basınçları altında ve emme sisteminde ön ısıtmaya tabi tutularak büyük motorlarda (kamyon, jeneratör, vb.) kullanılır [6]. Benzinle kıyaslandığında, dizel yakıtının setan sayısı (kendiliğinden tutuşabilme özelliği) (hafif dizel yakıtı için 40–55, ağır dizel yakıtı için 35–50) ve yoğunluğu (hafif dizel yakıtı için 0,78–0,84 g/cm³, ağır dizel yakıtı için 0,82–0,88 g/cm³) yüksek, ısıl değeri (hafif dizel yakıtı için alt ısıl değer 42500 kJ/kg, ağır dizel yakıtı için alt ısıl değer 41400 kJ/kg) düşüktür [4]. Ayrıca, dizel yakıtının viskozitesi, yakıt demetinin sıcak karşı-hava etkisiyle kolayca ince parçacıklara ayrılabilmesini ve yakıt sisteminin yeterince yağlanabilmesini sağlayacak nitelikte olmalıdır [2]. Son olarak, havadaki su buharıyla reaksiyona girip asit yağmurlarına neden olan kükürdün, günümüz dizel yakıtlarında çok az miktarda bulunması istenmektedir [6].

1.2.1.2. Benzinin Özellikleri

Buji-ateşlemeli motorlarda temel yakıt olarak kullanılan benzin, ham petrolün damıtılması, kraking vb. gibi işlemler sonucunda elde edilir ve yapısında çok çeşitli büyüklük ve yapıda moleküller bulunur [8]. Dizel yakıtıyla kıyaslandığında, benzin kendiliğinden tutuşmaya karşı direnci (vuruntu dayanımı, oktan sayısı) (motor oktan sayısı 80–91) ve ısıl değeri (alt ısıl değeri 43000 kJ/kg) yüksek, yoğunluğu düşük (0,72–0,78 g/cm³) bir yakıttır [4]. Ayrıca benzin, çok kısa süren emme zamanı esnasında, büyük bir kısmı buharlaşabilecek şekilde yüksek uçuculuk özelliğine sahiptir [2]. Benzin tek bileşenli bir hidrokarbon olarak kabul edildiğinde, kapalı formülü ve mol kütlesi yaklaşık olarak sırasıyla C₈H₁₅ ve 111 kg/kmol'dür. Benzin sayısal çalışmalarda bazen bileşen yapısı ve termodinamik özellikleriyle izo-oktan (C₈H₁₈) olarak da kabul edilebilir [6].

1.2.2. İçten Yanmalı Motorlarda Kullanılan Alternatif Yakıtlar

Daha önceden bahsedilen nedenlerden dolayı (petrol kaynaklarının sınırlı olması, eksoz gazlarının çevre kirliliğine ve insan sağlığına olumsuz etkileri, v.b.), günümüzde motorlara uygun değişik alternatif yakıtlar geliştirilmiştir [4]. Motorlarda kullanılabilecek başlıca alternatif yakıtlar aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

A. Gaz Yakıtlar

1. Sıvılaştırılmış Petrol Gazı (LPG)
2. Sıkıştırılmış/Sıvılaştırılmış Doğal Gaz (CNG/LNG)
3. Biyogaz (Büyük çoğunluğu metan ve hidrojenden oluşan gaz karışımı)
4. Hidrojen
5. Dimetil eter

B. Sıvı Yakıtlar

1. Alkoller (metanol, etanol, izopropanol, n-butanol ve n-pentanol)
2. Eterler (dietil eter, etil tert butil eter, metil tert butil eter ve di tert butil eter)
3. Karbonatlar (dimetil karbonat ve dietil karbonat)
4. Yağlar (bitkisel ve hayvansal yağlar)
5. Biyodizel

C. Diğer Yakıtlar

1. Kömür Tozu-Su Karışımı
2. Bor
3. Yeniden Formüle Edilmiş Benzin [2, 4, 6]

Fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak yukarıda verilen yakıtların bazıları buji-ateşlemeli motorlarda, bazıları sıkıştırma-ateşlemeli motorlarda veya her ikisinde de alternatif yakıt olarak kullanılabilir. Bu yakıtlardan etanol, n-butanol, dietil eter, yağlar, biyogaz ve biyodizel yenilenebilir karakterdedir [2, 9, 10]. Yukarı verilen bazı yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri ilgili çalışmalarda verilmiştir [2, 11-13]. Sunulan tez çalışmasının konusu, biyodizel üretimi ve yakıt demeti özelliklerinin incelenmesi olduğundan biyodizel ile ilgili ayrıntılı bilgiler aşağıda verilmiştir.

1.3. Biyodizel

ASTM (American Society for Testing and Material) biyodizeli; bitkisel veya hayvansal yağlar gibi yenilenebilir kaynaklardan, transesterifikasyon reaksiyonuyla üretilen uzun zincirli yağ asitlerinin (C16-C18) mono alkil esterleri (genellikle metil veya etil) olarak tanımlamıştır [14]. “Biyo” kelimesi yenilenebilir, biyolojik kaynaklı ve çevreci olduğunu, “dizel” kelimesi ise dizel motorlarında kullanılabilir olduğunu göstermektedir [5]. Oksijen içeren fonksiyonel gruplu zincir yapısı, kükürt ve aromatik hidrokarbon

içermemesi biyodizeli, dizel yakıtından ayırır [5]. Günlük hayatta biyodizel, yeşil enerji, yeşil dizel, süper dizel veya halk deyimiyile yağ mazotu olarak da anılmaktadır [2, 15].

1.3.1. Biyodizelin Özellikleri

1.3.1.1. Yoğunluk

Bir maddenin birim hacminin kütlesi olarak tanımlanan yoğunluk, püskürtme, yakıt demeti ve yanma karakteristiklerini dolayısıyla motor performansı ve eksoz emisyonlarını doğrudan etkileyen önemli bir yakıt özelliğidir. Dizel motorlarında yanma odasına püskürtülen yakıtın miktarı hacimsel olarak belirlendiğinden, yakıtın yoğunluğundaki değişim yakıt tüketimini de etkilemektedir. Ayrıca, yoğunluk, yakıtın setan sayısı ve ısı değeri gibi diğer önemli yakıt özelliklerini de etkilemektedir. Genel olarak biyodizelin 15 °C’de yoğunluğu 860–900 kg/m³ aralığındadır. Üretim aşamasında biyodizelin yapısından mono-, di- ve tri-gliseritler yeterince uzaklaştırılmazsa ve biyodizeli oluşturan hidrokarbon zincirinin uzunluğu kısalarak dallanma artarsa daha toplu bir molekül yapısı elde edileceğinden, biyodizelin yoğunluğu artar [2]. Diğer bir ifade ile hidrokarbon zincirindeki çift bağ sayısı artarsa biyodizelin yoğunluğu da artar [16].

1.3.1.2. Viskozite

Viskozite en basit tanımıyla akışkanın akmaya karşı gösterdiği iç direnç olarak tanımlanabilir. Yakıtın viskozitesi arttığında daha zor atomize olduğundan (parçalanması güçleştiğinden), damlacıkların çapları artar, istenilen nitelikte yakıt-hava karışımı oluşturulamaz, sprey açısı azalır ve dolayısıyla motor performansı azalırken, eksoz emisyonları artar. Bunun yanında, yüksek viskozite enjektörlerin tıkanmasına, segmanlarda karbon birikmesine, yağlama yağının bozulmasına ve yakıt pompalama işinin artmasına da neden olur [2, 16, 17]. Biyodizel kullanımında artan viskozite, yakıtın sıcaklığı artırılarak veya biyodizel ile alkolü karıştırarak azaltılabilir. Düşük viskoziteli yakıtlar ise yakıt enjeksiyon sisteminde kaçaklara ve yetersiz yağlamaya neden olur [18]. Yüksek ve düşük viskozitenin etkileri dikkate alındığında, ASTM D 6751 ve TS EN 14214 standartlarına göre biyodizellerin kinematik viskoziteleri sırasıyla 40 °C’de 1,9–6,0 mm²/s ve 3,5–5,0 mm²/s aralığında olmalıdır. Yapısındaki hidrokarbon zincirinin çift bağ sayısı azaldıkça ve

uzunluğu arttıķa moleköl bağ kuvveti de arttığı için biyodizelin viskozitesi artar [2]. Ayrıca, oksidasyon ürünlerinin artması ve transesterifikasyon reaksiyonunun tam olarak gerçekleşmediğinin göstergesi olarak monogliserit içeriğinin artması da viskoziteyi arttırmaktadır [19].

1.3.1.3. Düşük Sıcaklıkta Akış Özellikleri

Yakıtların düşük sıcaklıktaki akış özellikleri bulutlanma, akma ve soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklıklarıyla belirlenir. Bulutlanma noktası sıcaklığı, yakıt soğutulduğunda puslanmaya başladığı ve mumsu bir hal aldığı sıcaklıktır [20]. Akma noktası sıcaklığı, yakıtın akıcılığının devam ettiği en düşük sıcaklıktır [20]. Soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığı ise standart şartlarda soğutulan belirli hacimdeki bir yakıtın belirli bir zamanda standart filtre cihazından akamadığı en yüksek sıcaklıktır [21]. Biyodizelin düşük sıcaklıktaki akış özellikleri yüksek viskozitesinden dolayı saf dizel yakıtına göre daha kötüdür. Diğer bir ifade ile, biyodizelin akma ve bulutlanma noktası sıcaklıkları daha yüksektir. Bu durum, soğuk iklimlerde yakıt besleme elemanlarının zarar görmesine ve motoru ilk çalıştırmada aşınmalara neden olur [16]. Biyodizelin akma ve donma noktası, yapısındaki doymamış yağ asitlerinin miktarına (ift bağ sayısına) ve hidrokarbon zincirinin uzunluğuna bağlıdır [19, 22]. Örneğin, doymamış yağ asidi içeriği daha fazla olan kanola ve soya yağı metil esterlerinin bulutlanma noktası sıcaklıkları sırasıyla -5 °C ve 0 °C, akma noktası sıcaklıkları -4 °C ve -10 °C iken, doymuş yağ asidi içeriği daha fazla olan don yağı metil esterinin bulutlanma noktası sıcaklığı 14 °C ve akma noktası sıcaklığı 10 °C'dir [20]. Yani, doymamış yağlardan üretilen biyodizellerin soğukta akış özellikleri daha iyidir. Zincir uzunluğunun kısalması veya zincirin yapısındaki dallanmadaki artış, akış özelliklerinin iyileşmesine katkıda bulunur. Örneğin, izo-propil alkol (C₃H₇OH) kullanılarak üretilen biyodizelin, metil (CH₃OH) veya etil (C₂H₅OH) alkol kullanılarak üretilen biyodizellere göre soğukta akış özellikleri daha iyidir [20].

1.3.1.4. Isıl Değer

Isıl değer, bir kilogram veya bir litre yakıtın stokiyometrik (tam verimle) olarak yanması sonucunda ortaya çıkan eneręi (ısı) miktarıdır. Ağırlık sınırlaması olan taşıtlar için ısıl değer çok önemlidir. ASTM ve EN standartlarında ısıl değer ile ilgili sınır değerler

belirtilmemiştir. Hidrokarbonların zincir uzunluğu ve yapısındaki doymamışlık oranı arttıkça (hidrojen/karbon oranı azaldıkça) ısıl değer azalır [2]. Biyodizelin yapısında kütlece yaklaşık % 10–12 oranlarında oksijen bulunması yanma veriminin iyileşmesine ve fakat ısıl değerinin (35 MJ/kg'dan fazla) saf dizel yakıtıninkine (yaklaşık 42,5–44,8 MJ/kg) göre daha düşük değerler almasına neden olur. Bu yüzden, dizel yakıtıyla kıyaslandığında, biyodizel kullanımında genellikle döndürme momenti ve efektif güç azalırken, özgül yakıt tüketimi artar.

1.3.1.5. Setan Sayısı

Setan sayısı, yakıtın kendi kendine tutuşabilirliğinin bir göstergesidir ve dizel motorlarda motor performansı, eksoz emisyonları ve motor gürültüsünü (vuruntudan kaynaklanır) etkileyen önemli bir yakıt özelliğidir. Setan sayısı yüksek yakıtlar kullanıldığında tutuşma gecikmesi süresi kısalmış ve dizel vuruntusunun meydana gelme olasılığı azalır. Setan sayısı çok yüksek yakıtların kullanılması durumunda ise, olması gerekenden çok daha kısa bir süre içerisinde yanma başlayacağından enjektör deliği üzerinde karbonlaşma ve tıkanma tehlikesi meydana gelebilir. Biyodizelin yapısında oksijen bulunduğu için setan sayısı (48–67), elde edildiği hammaddeye (bitkisel veya hayvansal yağ) göre değişmekle birlikte, genellikle dizel yakıtının setan sayısından (40–55) daha yüksektir. Yakıtların yani 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 [2]. Örneğin, yapısında uzun zincirli doymuş hidrokarbonlar bulunan palm ve hayvansal yağ biyodizellerinin setan sayıları sırasıyla 62 ve 58 iken, yapısında doymamış hidrokarbonlar bulunan soya ve ayçiçeği yağı biyodizellerinin setan sayıları sırasıyla 37 ve 45–52'dir [15]. Son olarak, yakıtların setan sayıları, EN ISO 5165 veya ASTM D 130 standardına bağlı olarak özel motorlar (CFR veya sıkıştırma oranı değiştirilebilen motor) yardımıyla belirlenebilirken, daha kolay ve ucuz bir şekilde ampirik bir eşitlik yardımıyla ASTM D 4737'de verildiği üzere setan indeksi olarak da belirlenebilir [15]:

$$\begin{aligned} \text{Setan İndeksi} = & 45,2 + 0,0892(T_{10} - 215) + 0,131(T_{50} - 260) + 0,0523(T_{90} - \\ & 310) + 0,901B(T_{50} - 260) - 0,420B(T_{90} - 310) + 4,9 \cdot 10^{-4}(T_{10} - 215)^2 - \\ & 4,9 \cdot 10^{-4}(T_{90} - 310)^2 + 107B + 60B^2 \end{aligned} \quad (1.1)$$

Burada:

T_{10} , T_{50} ve T_{90} : Damıtma eğrisinde yakıtın hacimsel olarak % 10, % 50 ve % 90'ının damıtıldığı noktadaki °C cinsinden sıcaklık değerlerini,

$\rho_{15^\circ\text{C}}$: gr/mL cinsinden 15 °C'deki yakıtın yoğunluğunu, temsil etmektedir [15]. Ayrıca,

$$B = (e^{-3,5 \cdot (\rho_{15^\circ\text{C}} - 0,85)}) - 1 \quad (1.2)$$

olarak hesaplanmaktadır [15].

1.3.1.6. Biyobozunabilirlik

Biyodizeli meydana getiren C16–C18 metil esterleri doğada hızla ve kolayca parçalanarak bozunmaktadır. Örneğin, suya bırakıldığında 28 günde dizel yakıtının % 40'ı, biyodizelin ise % 95'i bozunabilmektedir [17]. Bu yüzden, biyodizelin daha çevreci bir yakıt olduğu rahatlıkla söylenebilir.

1.3.1.7. Toksik Etki

İnsanlar üzerinde yapılan elle temas testleri sonucunda biyodizelin ciltte % 4'lük sabun çözeltisinden daha az toksik etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Gerçekleştirilen bir diğer çalışmada [23], tuzun biyodizelden 10 kat daha yüksek öldürücü etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Diğer bir ifade ile, biyodizelin önemli bir toksik etkisi bulunmamaktadır.

1.3.1.8. Karbon Kalıntısı

Karbon kalıntısı, yakıtın enjektör deliklerinde ve yanma odasında tortu (kalıntı) bırakma eğiliminin bir ölçüsüdür. Yakıtın gliserin, serbest yağ asidi, katalizör kalıntısı,

doymamış çoklu yağ asidi ve polimer içeriğinin artması karbon kalıntısını artırır [24]. Deneysel çalışmalar, biyodizelin çok az karbon artığı bıraktığını göstermektedir [15].

1.3.1.9. İyot Sayısı

İyot sayısı, yakıttaki doymamışlığın yani biyodizelin yapısındaki çift bağ sayısının bir ölçüsüdür [20]. Bitkisel veya hayvansal yağların iyot sayıları, yerlerini alan esterlerinkilerle (biyodizel) yaklaşık olarak aynıdır [24]. İyot sayısının çok yüksek olması yakıtın hava ile kolayca okside olmasına, yanma sonrasında aşırı karbon kalıntısına, enjektör deliklerinde tıkanmaya, piston segmanlarında ve segman oluklarında polimerleşmeye neden olmaktadır. TS EN 14214 standardına göre biyodizelin iyot sayısı en fazla 120 olabilir. ASTM D 6751 standardında ise iyot sayısına yer verilmemiştir [2, 19, 20].

1.3.1.10. Bakır Şerit Korozyonu

Biyodizelin bakır alaşımları üzerindeki korozyon etkisini gösterir. Diğer bir ifade ile, bakır şerit korozyon testi biyodizelin aşındırma derecesini değerlendirmek için kullanılır. Aynı zamanda kükürt bileşiklerinin varlığını da gösterir [19]. Biyodizel için TS 2741 EN ISO 2160 test standardına göre ölçülür.

1.3.1.11. Parlama Noktası Sıcaklığı

Parlama noktası, yakıt ısıtıldığında yakıt üzerinde oluşan yakıt buharı ile hava karışımının tutuşabildiği en düşük sıcaklık olarak tanımlanabilir [17]. Saf dizel yakıtın parlama noktası sıcaklığı yaklaşık 55 °C iken, biyodizellerin parlama noktası sıcaklığı ise 120–220 °C civarındadır [2]. Biyodizelin parlama noktası sıcaklığı daha yüksek olduğundan dolayı dizel yakıtına göre taşınması ve depolanması daha güvenlidir. Biyodizelin yapısında, üretiminden kalan metil alkol bulunursa parlama noktası sıcaklığı azalır. Örneğin, biyodizelin yapısındaki metil alkol miktarı % 5 artarsa, biyodizelin parlama noktası yaklaşık 52 °C kadar azalır [19].

1.3.1.12. Yağlayıcılık

Günümüz dizel yakıtları çevresel sorunlardan (asit yağmurları) dolayı çok az miktarda sülfür (kükürt) içerir. Bu durum, dizel yakıtının yağlayıcılık özelliğinin azalmasına, dolayısıyla enjeksiyon pompalarının ve motor ömrünün azalmasına neden olur. Fakat, kükürt içermese de, biyodizelin viskozitesi yüksek olduğundan dolayı yağlayıcılık özelliği dizel yakıtına göre çok daha iyidir [17].

1.3.1.13. Distilasyon Sıcaklığı

Hayvansal veya bitkisel yağlardan üretilen biyodizeller, benzer kimyasal yapıya sahip yağ asidi esterlerinden meydana geldiği için kaynama noktası sıcaklığı aralıkları saf dizel yakıtıninkine göre daha dardır ve bu aralık yaklaşık 325–350 °C'dir [20].

1.3.1.14. Su İçeriği

Su içeriği yakıt için bir saflık göstergesidir. TS EN 14214 standardına göre saf biyodizelin yapısında en fazla 500 mg/kg su bulunabilir. Bunun için, biyodizel üretilip yıkandıktan sonra kurutulmalıdır. Biyodizel kurutulmuş olsa bile, higroskopik özelliğinden dolayı depolanması ve taşınması sırasında bile suyu moleküler yapısına çeker [19]. Bu durum, biyodizelin ısıl değerini azalttığı gibi [2], soğuğa karşı dayanıklılığını da azaltır ve motor yakıt sisteminde korozyona neden olur. Korozyon sonucunda aşınıp kopan parçacıklar yakıtı karıştırarak enjektörlerin ve filtrelerin tıkanmasına neden olabilir [16, 24]. Fakat, su/yakıt emülsiyon oranının uygun olması durumunda yanma sıcaklığı azalır ve özellikle azotoksit (NO_x) emisyonları azaltılabilir [7].

1.3.1.15. Asit (Nötralizasyon) Sayısı

Asit sayısı biyodizelin yapısında bulunan serbest yağ asidinin bir ölçüsüdür. Asit sayısının yüksek olması yakıt hattında ve enjektörde korozyona, filtrenin ve yakıt pompasının tıkanmasına ve jelleşme sıcaklığının azalmasına neden olur. Uzun süreli depolamadan sonra oksitlenmeye başlayan yakıtın asit sayısı artar [19, 24].

1.3.1.16. Oksidasyon Kararlılığı

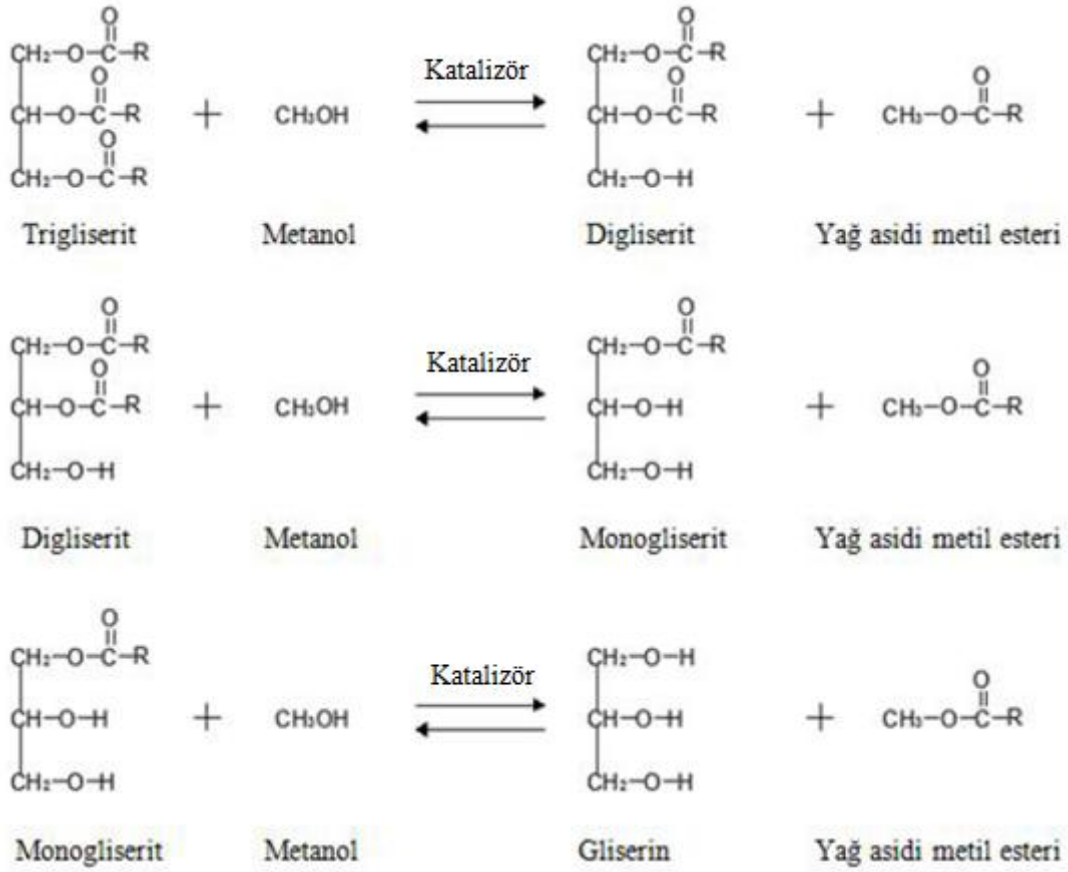
Oksidasyon kararlılığı biyodizelin depolama ömrünü etkileyen önemli bir yakıt özelliğidir. Oksidasyon, biyodizelin yapısındaki çift bağların varlığından kaynaklanmaktadır. Diğer bir ifade ile, çoklu doymamış yağ asitleri bakımından zengin yağlardan (ayçiçeği ve soya yağı gibi) üretilen biyodizeller, doymuş veya tekli doymamış yağ asitlerini içeren yağlardan (hayvansal yağlar) üretilen biyodizellere göre oksitlenmeye karşı daha duyarlıdır (oksidasyon kararlılığı daha düşüktür). Bu durum, çift bağ içeren molekül zincirine bağlı metilen gruplarının serbest radikal saldırılara karşı hassasiyetinden kaynaklanmaktadır [24]. Biyodizelin moleküler yapısı nedeniyle, saf dizel yakıtına göre oksidasyon kararlılığı daha düşüktür. Genellikle, hava, yüksek sıcaklık, ışık veya metal varlığı oksidasyonu kolaylaştırır [19]. Oksitlenen yakıtın viskozitesi artar ve yanma odasında karbon birikimine, yağlama yağının kalınlaşmasına ve azotoksit emisyonlarının artmasına neden olur [19].

1.3.2. Biyodizel Üretiminde Kullanılan Yöntemler

Direkt püskürtmeli veya ön yanma odalı dizel motorlarda önemli yapısal değişiklikler yapılmadan, bitkisel veya hayvansal yağlar acil ve kısa süreler için kullanılabilirler de, viskoziteleri (dizel yakıtının viskozitesinden yaklaşık 20–25 kat fazla [25]) ve molekül kütleleri çok yüksek olduğundan dolayı uzun süreli kullanımlarda, yağlama yağının seyrelmesi, piston segman sıkışması, silindir yüzeylerinin aşınması, filtre tıkanması, yanma odasında ve enjektör ucunda karbon birikintisi ile enjektör koklaşması gibi problemler ile karşılaşmaktadır. Ayrıca, saf yağların yüksek viskoziteden ötürü soğuk havalarda akma ve donma problemleri de vardır [24]. Literatürde, saf yağın viskozitesinin azaltılması için seyreltme, mikroemülsiyon oluşturma, piroliz (ayırıştırma), transesterifikasyon reaksiyonu (yeniden esterleştirme) ve süper kritik alkol gibi yöntemler kullanılmaktadır [2]. Seyreltme yönteminde, bitkisel yağlar belirli oranlarda dizel yakıtıyla karıştırılarak seyreltilmekte yani viskoziteleri azaltılmaktadır. Seyreltme yönteminde genellikle soya, yer fıstığı, kanola ve ayçiçeği yağı kullanılmaktadır [2]. Rakopoulos ve arkadaşları tarafından 2006'da yapılan bir çalışmada [26], pamuk tohumu, soya, ayçiçeği, mısır ve zeytin yağı hacimsel olarak % 10 ve % 20 oranlarında dizel yakıtıyla karıştırılarak seyreltilmiş, ve elde edilen karışımların farklı yüklerde (% 38 ve % 75) ve 2000

devir/dakikada, tek silindirli direkt püskürtmeli bir dizel motorun motor performansı ve eksoz emisyonlarına olan etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, yük arttığında ve karışımdaki yağ oranı azaldığında, özgül yakıt tüketiminin azaldığı ve her iki yük durumunda da karışımların özgül yakıt tüketimlerinin dizel yakıtınınkinden daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Son olarak, söz konusu çalışmada, hammadden bağımsız olarak, yağların dizel yakıtıyla düşük oranlarda karıştırılarak dizel motorlarında güvenli bir şekilde kullanılabileceği vurgulanmıştır [26]. Mikroemülsiyon, boyutları 1–150 nanometre arasında olan, bir veya daha fazla iyonik veya iyonik olmayan ortak çözücü ile birbiriyle karışmayan iki sıvıdan meydana gelen, optik olarak izotropik akışkan mikro yapıların dengedeki kolloidal dağılımı olarak tanımlanır [20]. Diğer bir ifade ile, bu yöntemde, bitkisel yağlar metil alkol, etil alkol ve 1-bütül alkol gibi kısa zincirli alkoller ile karıştırılarak mikroemülsiyon oluşturulur [27]. Bu yöntem yardımıyla yağların viskoziteleri azalır ve çözücülerin yani alkollerin buhar basınçları yüksek olduğu için yağların yakıt demeti karakteristiğinde iyileşmeler gözlemlenir. Fakat, alkollerin setan sayıları ve ısı değerleri düşük olduğundan mikroemülsiyon, motor performansı ve eksoz emisyonlarını olumsuz yönde etkilemektedir [2]. Ayrıca, yine alkol içeriğinden dolayı mikroemülsiyon, düşük sıcaklıkta ayrışma eğilimi gösterir. Piroliz (termal ayrıştırma) yönteminde, yağ molekülleri oksijenli bir ortamda yüksek sıcaklıkta daha küçük moleküllere (alkanlar, alkenler, alkadienler, karboksilik asitler, aromatik bileşikler ve az miktarda gaz bileşik) parçalanmaktadır. Diğer bir anlatımla, bu yöntemin esası, bitkisel ve hayvansal yağların termal bozunmasıyla dizel yakıtının yapısında bulunan olefin ve parafin türü bileşiklerin elde edilmesine dayanır. Viskozite, karbon zincirinin uzunluğuyla orantılı olduğu için piroliz yardımıyla viskozite oldukça azaltılmakta, fakat ilave işlemler fazladan masraf getirmektedir [2, 20, 27]. Bir denge reaksiyonu olan transesterifikasyon reaksiyonunda (ester değişimi, alkoliz) ise, reaksiyon verimini artırmak için uygun bir katalizör eşliğinde, ester molekülü (bitkisel ve hayvansal yağların bileşiminde bulunan trigliseritler) alkolle (1–8 karbon arası primer ve sekonder alifatik alkolle) reaksiyona girer ve yeni bir alkil ester molekülü (biyodizel) meydana gelir. Ester değişimi reaksiyonunda, metil ve etil alkoller başta olmak üzere propil, butil ve amil alkoller de kullanılmaktadır. Diğer alkollerle kıyaslandığında, en küçük moleküler yapıya sahip olan metil alkol, daha polar karakterde olması, daha ucuz olması ve daha kolay reaksiyona girmesi nedeniyle biyodizel üretiminde sıklıkla tercih edilmektedir [20]. Transesterifikasyon reaksiyonu metil alkol kullanılarak gerçekleştirilmişse (yani metanoliz reaksiyonu) meydana gelen ürün yağ

asidi metil esteri, etil alkol kullanılarak gerçekleştirilmişse (yani etanoliz reaksiyonu) meydana gelen ürün yağ asidi etil esteri olarak da adlandırılabilir. Transesterifikasyon reaksiyonunda genellikle bazik (sodyum hidroksit, potasyum hidroksit, sodyum metoksit, potasyum metoksit, sodyum etoksit, potasyum etoksit, vb.), asidik (sülfürik asit, sülfonik asitler, hidroklorik asit, heteropoliasitler, vb.) ve biyokimyasal (enzim) katalizörler kullanılmaktadır [28]. Transesterifikasyon reaksiyonuna ait genel reaksiyon denklemi, R alkil grubunu temsil etmek üzere Şekil 1.1’de verilmiştir. Söz konusu şekilden görüldüğü gibi, transesterifikasyon reaksiyonu kimyasal olarak ardışık üç denge reaksiyonundan meydana gelir. Bu reaksiyonlarda, sırasıyla trigliseritten digliserit, digliseritten monogliserit ve monogliseritten gliserin elde edilir. Her üç reaksiyonda da 1 mol yağ asidi alkil esteri meydana gelir ve transesterifikasyon reaksiyonu sonunda toplam 3 mol yağ asidi alkil esteri (biyodizel) üretilmiş olur. Diğer bir anlatımla, bitkisel veya hayvansal yağların viskozitelerinin yüksek olmasına neden olan gliserin, transesterifikasyon reaksiyonuyla yağların yapısından uzaklaştırılır. Zhou [29] tarafından gerçekleştirilen yüksek lisans tezinde, transesterifikasyon, seyreltme, mikroemülsiyon ve piroliz yöntemleri karşılaştırılmıştır. Transesterifikasyon reaksiyonu sonunda üretilen biyodizelin yakıt özelliklerinin, diğer yöntemlerden elde edilen ürünlerinkine göre, saf dizel yakıtının yakıt özelliklerine daha yakın olduğu belirlenmiştir [29]. Ayrıca, düşük sıcaklık ve basınçlarda bile gerçekleştirilebilen transesterifikasyon reaksiyonuyla ara ürün olmadan direkt biyodizelin üretilbildiği, üretim aşamasında zehirli hiçbir maddeye ihtiyaç duyulmadığı ve bu nedenlerden dolayı biyodizel üretimi için dünya genelinde en çok kullanılan yöntemin transesterifikasyon olduğu belirtilmiştir [29].



Şekil 1.1 Transesterifikasyon reaksiyonu mekanizması [2].

Bazık katalizörlü transesterifikasyon reaksiyonu, biyodizel üretiminde en çok tercih edilen yöntem olsa da, reaksiyon sonunda katalizörün biyodizelden ayrıştırılamaması, sabunlaşma ve esterlerin saflaştırılamaması gibi sorunlardan dolayı, teknolojik gelişmelerle birlikte süper kritik alkol yöntemi de, biyodizel üretiminde son yıllarda popüler hale gelmiştir. Bu yöntemin ana fikrinde, basınç ve sıcaklık arasındaki ilişkinin etkisiyle, çözücünün (metil alkol) dielektrik sabiti, viskozite, yoğunluk ve polarite gibi özelliklerini reaksiyon için uygun hale getirmek vardır [20]. Süper kritik şartlara ulaşması için metanol, 8 MPa'nın üzerindeki basınçlarda yaklaşık 512 K sıcaklığa kadar ısıtılır ve metanolün dielektrik sabitindeki düşme nedeniyle tek faz oluşur. Böylece, bitkisel yağ ile metanol fazlarının ayrılmasından kaynaklanan problemler meydana gelmez (tek faz oluşur). Reaksiyon, katalizör kullanılmadan 240 saniye gibi kısa bir süre içerisinde gerçekleşir. Süper kritik alkol yönteminin en önemli dezavantajı ise üretim maliyetinin yüksek olmasıdır [17, 19, 20]. Son olarak, ilk yatırım maliyeti yüksek olsa da, reaksiyon süresinin azaltılması için günümüzde yüksek frekanslı (ultrasonik) sistemler de geliştirilmiş ve

reaksiyon süresi dakikalar mertebesine indirilmiştir. Bu yöntemde, kavitasyon kabarcıkları oluşturan ultrasonik ses dalgaları, reaksiyona giren maddeleri uygun bir şekilde karıştırır. Bu işlem sırasında bir miktar ısı açığa çıktığı için reaksiyon ortamının ısıtılmasına da gerek yoktur [17].

1.3.3. Biyodizelin Üstün ve Yetersiz Özellikleri

Biyodizelin en önemli üstün özellikleri şu şekilde sıralanabilir:

- 1) Moleküler yapısında kütlece yaklaşık % 10–12 oranlarında oksijen bulunduğu için dizel motorlarda kullanıldığında yanma verimini iyileştirip özellikle karbonmonoksit, yanmamış veya yarı yanmış hidrokarbon ve partikül madde emisyonlarının önemli ölçüde azalmasına neden olur.
- 2) Dizel yakıtıyla moleküler yapısı benzer olduğu için her oranda karıştırılabilirler ve biyodizel-dizel yakıtı karışımları dizel motorların konstrüksiyonunda (yakıt enjeksiyon sistemi, yakıt dağıtım hattı, vb.) önemli değişiklikler yapılmadan kullanılabilir.
- 3) Parlama noktası sıcaklığı (120–220 °C) dizel yakıtıninkine göre daha yüksek olduğu için taşınması ve depolanması daha güvenlidir.
- 4) Setan sayısı (48–67) dizel yakıtıninkine (40–55) göre daha yüksek olduğu için tutuşma gecikmesi süresi kısalmış, motor daha az vurunutulu ve gürültülü çalışır. Böylece, dizel motorların devir sayıları yükseltilecek gücü artırılabilir.
- 5) Yağlayıcılık özelliği dizel yakıtına göre daha iyi olduğundan motorun ömrünü uzatır, piston, segman, yakıt pompası ve enjektörlerdeki aşınmaları azaltır. Örneğin, çok düşük oranlarda sülfür içeren dizel yakıtına % 1–2 oranlarında biyodizelin ilave edilmesi bile yağlayıcılık özelliğini önemli oranda artırır [30].
- 6) Biyodizelin yapısında toksik, aromatik ve kanserojen bileşikler ile kükürt hemen hemen hiç yoktur ve biyodizel biyolojik olarak kolayca parçalanabilir (ayrışabilir).
- 7) Dizel yakıtıyla aynı depolanma koşullarında depolanabilir.
- 8) Biyodizelin yanması sonucu ortaya çıkan karbondioksit fotosentez yolu ile biyodizel üretiminde kullanılan bitkiler tarafından tekrar kullanıldığı için biyodizel, dizel yakıtının aksine, atmosferde karbondioksit birikimine

dolayısıyla sera etkisine neden olmaz. Diğer bir anlatımla, atmosferdeki karbon dioksit dengesi bir bakıma korunmuş olur.

- 9) Atık yağlardan bile kolayca üretilebildiği için, yeryüzündeki atık miktarının azalmasına dolayısıyla çevre kirliliğinin önlenmesine önemli katkı sağlamaktadır.
- 10) Biyodizel üretiminde kullanılan transesterifikasyon reaksiyonu sonunda yan ürün olarak elde edilen gliserin, ticari değere sahiptir ve askeri alanda kullanılabilir. kullanılabilmektedir.
- 11) Biyodizel, petrol kökenli yakıtlar gibi dünyanın sadece belirli bir bölgesindeki kaynaklara bağlı olarak değil de, her bölgenin kendine özgü bitkisel ürünlerinden (tohumlardan) üretilebildiği için, yani yenilenebilir karakterde olduğu için, ekonomik ve ulusal çıkarlara son derece uygundur. Ayrıca, kırsal kesimin sosyo-ekonomik yapısının gelişmesinde, işsizliğin önemli boyutlara ulaştığı günümüzde yeni iş imkanlarının doğmasında ve kente olan göçün önlenmesinde önemli katkıları olabilir.
- 12) Biyodizelin yaygınlaşmasıyla petrol kökenli yakıtlardan kaynaklanan ve uzun yıllardır süregelen uluslararası sorunlar kısmen çözülebilir. Ayrıca, biyodizel üretiminin yaygınlaşması, petrol fiyatlarındaki artışı önleyebilir ve talebin bir kısmını karşılayabilir.
- 13) Biyodizel sahip olduğu fiziksel ve kimyasal özellikleriyle ısıtma sistemlerinde, jeneratörlerde ve deniz taşımacılığında da kullanılabilir.

Birçok üstün yanlarına rağmen, biyodizelin yetersiz yönleri de bulunmaktadır:

- 1) Alt ısı değeri (35–40 MJ/kg) dizel yakıtıninkine (yaklaşık 42,5 MJ/kg) göre daha az olduğu için, dizel motorlarda kullanıldığında genellikle, motor performansı (özellikle döndürme momenti) azalırken, özgül yakıt tüketimi artar.
- 2) Yapısında bulunan oksijenden ötürü biyodizel kullanımında dizel yakıtı kullanımına göre genellikle azotoksit emisyonları (NO_x) artar [31, 32]. Fakat, bazı çalışmalarda biyodizel kullanımında NO_x emisyonlarının azaldığı da belirtilmiştir [33].
- 3) Biyodizelin viskozitesi dizel yakıtının viskozitesinden daha fazladır. Bu durum, yakıtın demet özelliklerini (atomizasyonu ve hava ile karışımını) dolayısıyla motor performansı ve eksoz emisyonlarını olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca, yüksek viskozite nedeniyle biyodizelin bulutlanma ve akma noktası

sıcaklıkları daha yüksektir. Bu yüzden, hacimsel olarak maksimum % 20 oranında biyodizel içeren biyodizel-dizel yakıtı karışımları tercih edilmekte ve garanti kapsamına alınmaktadır [2].

- 4) Saf biyodizel kullanımında, özellikle yakıt sistemindeki hortum, bağlantı elemanları ve contalar biyodizele uygun malzemeler ile değiştirilmesi gerekmektedir [2].
- 5) Ham veya rafineri yağlardan biyodizel üretiminin maliyeti saf dizel yakıtının maliyetinden günümüz koşullarında yaklaşık % 10 ile % 50 aralığında daha fazladır. Bu durum, biyodizelin ticarileşmesindeki en büyük engellerden biridir [34].

1.3.4. Türkiye’de ve Dünya’da Biyodizelin Durumu

Ülkemizde biyoyakıtlar konusu, ilk defa 1931 yılındaki Ziraat Kongresi’nde dile getirilmiştir. 1934 yılında “Bitkisel yağların tarım traktörlerinde kullanımı” adı altında Atatürk Orman Çiftliği’nde biyodizelle ilgili çalışmalar başlatılmıştır [5]. Bu çalışmalarda, Gazi Mustafa Kemal Atatürk enerji ihtiyacının ithal yol ile sağlanmamasını, harp ve benzeri durumlarda yerel kaynaklardan temin edilmesini hedeflemiştir. Ancak, II. Dünya Savaşı’ndan sonra dünya ham petrol üretiminin artıp fiyatların düşmesi, alternatif yakıtlara olan ilginin azalmasına neden olmuştur. 1973 petrol kriziyle birlikte petrol fiyatlarındaki artış ve enerji krizleri neticesinde biyoyakıtlar tekrar gündeme gelse de, çeşitli nedenlerden dolayı dizel yakıtına alternatif olarak biyodizelden yararlanma konusunda yapılan çalışmalar çok sınırlı kalmıştır [35]. Fakat, özellikle 2000 yılından sonra biyodizele, ticari girişimcilerin, medyanın ve devlet kurumlarının artan ilgiyle birlikte, Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü bünyesinde “Biyoenerji proje grubu” oluşturulmuş, “Türkiye’de biyodizel kullanımı” konusunda senaryolar hazırlanmış ve aspir ile kanola yağından pilot ölçekte biyodizel sentezlenmiştir [36]. Büyük ölçekte biyodizel üretimini ise 2001 yılında 300 ton/ay’lık kapasiteyle The Alternative Fuel Technologies Corporation Bursa’da gerçekleştirilmiştir. Aynı yıl, Sanayi ve Ticaret Bakanlığı tarafından “Biyodizel çalışma grubu” oluşturulmuştur. 2003 şubatında İzmit Gebze’de PROKEM adlı firma tarafından soya yağından biyodizel üretilmiş ve üretilen biyodizelin EN 14214 standardını sağladığı belirlenmiştir. Aynı yıllarda, Konya’daki DUYSAK Otomotiv Petrol Ürünleri Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi, bir kısım çiftçiyle birlikte bir pilot bölge oluşturup biyodizel

üretimi için girişimlerde bulunmuş ve üretilen biyodizel tarım makinelerinde kullanılmıştır [5]. Bursa'daki BURÇEV firması 2003'ün sonunda, kullanılmış yağlardan biyodizel üretmiş ve üretim amaçlı ilk ruhsatı almıştır [5]. Günümüz koşullarında, ülkemizin tarım potansiyeli düşünüldüğünde biyodizel kurulum kapasitesi yaklaşık 1,5 milyon ton olsa da [37], yeterli miktarda yerli hammadde bulunamadığından dolayı biyodizel üretim tesislerinin önemli bir kısmı kapanmaktadır. Örneğin, Enerji Piyasası Denetleme Kurulu'nun 2016 verilerine göre, 36 tane biyodizel üretim lisansına sahip firmadan yerli tarım ürünlerini kullanarak aktif biyodizel üretimi yapan 3 tane firma bulunurken [38], 2018 yılının verilerine göre biyodizel üretimi yapan sadece 5 tane firma (TBE Biyodizel Tarımsal Enerji Üretimi Sanayi ve Ticaret A.Ş., AVES Enerji Yağ ve Gıda Sanayi A.Ş., Kolza Biodizel Yakıt ve Petrol Ürünleri Sanayi ve Ticaret A.Ş., Maysa Yağ Sanayi Anonim Şirketi, DB Tarımsal Enerji Sanayi ve Ticaret A.Ş.) bulunmaktadır [39].

Yasal düzenlemelere bakıldığında, biyodizel 20 Aralık 2003 tarihinde 25322 Sayılı T.C. Resmi Gazetesi'nde yayınlanan "Petrol piyasası kanunu" kapsamında tanımlanmıştır. Bu kanunla birlikte petrol ile harmanlanan ürünler kapsamındaki biyodizelin dizel ile karıştırılarak kullanılması yasal hale getirilmiştir [40]. 17 Haziran 2004 tarihinde 25495 Sayılı T.C. Resmi Gazetesi'nde yayınlanan "Petrol piyasası lisans yönetmeliği" kapsamındaki 5. madde gereği, benzin türleri, nafta (hammadde, solvent nafta hariç), gazyağı, jet yakıtı, motorin türleri ve fuel-oil türleriyle birlikte biyodizel, akaryakıt sınıfında tanımlanmıştır [41]. 10 Eylül 2004 tarihinde 25579 Sayılı T.C. Resmi Gazetesi'nde Enerji Piyasası Denetleme Kurulu tarafından yayınlanan "Petrol piyasasında uygulanacak teknik kriterler hakkında yönetmelik" [42] kapsamındaki 8. ve 9. maddelerde sırasıyla "Saf biyodizel ve etil alkolün akaryakıt ile harmanlama işlemini rafinerici ve dağıtıcı lisansı sahipleri yapar." ve "Saf biyodizel ve sanayi tesislerinde yan ürün olarak elde edilenler hariç, akaryakıt üretimi sadece rafinerici lisansı sahipleri tarafından yapılır." şeklinde hükümler bulunmaktadır. 25.07.2005 tarihinde T.C. Resmi Gazetesi'nde yayınlanan 4735 Sayılı Kamu İhale Sözleşmeleri Kanunu'na göre, "Yurt içinde akaryakıt olarak piyasaya; yakıt nafta, 95 oktan kurşunsuz benzin, 98 oktan kurşunsuz benzin, gazyağı, motorin, kırsal motorin, fuel-oil 3, 4, 5 ve 6 ile biyodizel sunulabilir. Bu kararda yer almayan sıvı maddeler, akaryakıt ve ihrakiye olarak piyasaya sunulamaz." düzenlemesi getirilmiştir [43]. 16.03.2006 tarihinde 26110 Sayılı Resmi Gazete'de "Dış ticarete standardizasyon tebliğinde değişiklik yapılması hakkında tebliğ" çerçevesinde, TS EN 14214 standardıyla otobiyodizeli ve TS EN 14213 standardıyla yakıt biyodizeli olarak ayrı

ayrı tanımlamalar yapılmıştır [44]. 08.04.2006 tarihli Resmi Gazete’de yayınlanan 5479 Sayılı “Gelir vergisi kanunu, amme alacaklarının tahsil usulü hakkında kanun, özel tüketim vergisi kanunu ve vergi usul kanununda değişiklik yapılması hakkında kanun” çerçevesinde, 3824.90.99.90.54 G.T.İ.P (gümrük tarife istatistik pozisyonu) numaralı otobiyodizele litrede 0,6498 YTL özel tüketim vergisi getirilmiştir [45]. 08.12.2006 tarihli Resmi Gazete’de yayınlanan “4760 sayılı özel tüketim vergisi kanununa ekli (I) sayılı listede yer alan mallarda uygulanan özel tüketim vergisine ilişkin karar” kapsamında, “6/6/2002 tarihli ve 4760 sayılı özel tüketim vergisi kanununa ekli (I) sayılı listenin (a) cetvelinde yer alan 3824.90.99.90.54 G.T.İ.P numaralı biyodizel isimli malın, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu’nca biyodizel üretimi için verilen işleme lisansı sahibi firmalar tarafından, yalnızca Türkiye’de üretilen tarım ürünlerinden elde edilmesi kaydıyla, 2710.19.41.00.11, 2710.19.41.00.19, 2710.19.45.00.11 ve 2710.19.49.00.11 G.T.İ.P numaralarında yer alan mallar ile harmanlanmak üzere, 4/12/2003 tarihli ve 5015 sayılı Petrol Piyasası Kanunu’nda tanımlanan rafinerici ve dağıtıcı firmalara tesliminde, özel tüketim vergisinin tutarı sıfıra indirilmiştir.” şeklinde karar verilmiştir [46]. 26.12.2006 tarihli 26388 Sayılı Resmi Gazete’de yayınlanan “Özel Tüketim Vergisi Genel Tebliği” kapsamında, “5/6/2006 tarih ve 2006/11202¹ sayılı Bakanlar Kurulu Kararının 1 inci maddesi ile, 4760 sayılı Özel Tüketim Vergisi Kanununa ekli (I) sayılı listenin (A) cetvelinde yer alan 3824.90.99.90.54 G.T.İ.P. numaralı “biodizel” isimli malın, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumunca biodizel üretimi için verilen “İşleme Lisansı” sahibi firmalar tarafından, yalnızca Türkiye’de üretilen tarım ürünlerinden elde edilmesi kaydıyla, 2710.19.41.00.11, 2710.19.41.00.19, 2710.19.45.00.11 ve 2710.19.49.00.11 G.T.İ.P. numaralarında yer alan mallar ile harmanlanmak üzere, 4/12/2003 tarih ve 5015 sayılı Petrol Piyasası Kanununda tanımlanan “Rafinerici” ve “Dağıtıcı” firmalara tesliminde, ÖTV tutarı sıfıra indirilmiştir.” hükmü getirilmiştir [47]. 25 Nisan 2007 tarihli Resmi Gazete’de yayınlanan “Petrol piyasasında uygulanacak teknik kriterler hakkında yönetmelikte değişiklik yapılmasına dair yönetmelik” kapsamında, biyodizel standartlarında bazı önemli değişiklikler yapılmıştır [48]. 21 Ekim 2007 tarihli Resmi Gazete’ye göre, aralarında biyodizelinde bulunduğu bazı akaryakıt ürünlerinin ithalat denetimine ilişkin dış ticarete bazı standartlar getirilmiştir [49]. 2 Kasım 2007 tarihinde yayınlanan Resmi Gazete’ye göre, oto ve yakıt biyodizeline uygulanan özel tüketim vergisi litrede 0,7200 YTL’ye çıkarılmıştır [50]. 15 Temmuz 2009 tarihinden yayınlanan Resmi Gazete’ye göre, oto ve yakıt biyodizelinde özel tüketim vergisi litrede 0,8000 TL’ye

çıkarılmıştır [51]. 21 Kasım 2009 tarihinde Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu tarafından yayınlanan “Otobiodizel’e ilişkin teknik düzenleme” tebliğine göre, “Piyasaya akaryakıt olarak arz edilen veya dolaşımda bulunan otobiodizelin, Türk Standartları Enstitüsü tarafından hazırlanan, ekli Haziran 2009 tarihli TS EN 14214 standardına uygun olması zorunludur.” [52] şeklinde düzenleme getirilmiştir. 31 Aralık 2009 tarihli Resmi Gazete’ye göre, oto ve yakıt biyodizelindeki özel tüketim vergisi 0,9100 TL/litre’ye çıkarılmıştır [53]. 27 Eylül 2011 tarihinde 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” öngörülmüştür [54]. 19 Temmuz 2013 tarihindeki Resmi Gazete’yle birlikte, biyodizel için ulusal marker uygulama faaliyetlerinde ve ulusal marker teslimine ilişkin usul ve esaslarında değişiklik yapılmıştır [55]. 31 Aralık 2013 tarihli Resmi Gazete’den yayınlanan tebliğ çerçevesinde, otobiodizel üretimi ve teslimi, otobiodizel üretim izin belgesinin verilmesi, üreticilerin müracaat şartları, otobiodizel üretimi, otobiodizel teslimi, otobiodizel ile motorinin harmanlanması ve özel tüketim vergisi tutarının iadesi konularında yeni düzenlemeler getirilmiştir [56]. 23 Mayıs 2015 tarihli Resmi Gazete’den yayınlanan “Petrol piyasası lisans yönetmenliğinde değişiklik yapılmasına dair yönetmenlik” kapsamında, “İstasyonsuz kategorisi altında verilmiş bayilik lisansı sahipleri, benzin türleri ile motorin, kırsal motorin, jet yakıtı, gazyağı, yakıt nafta ve biyodizel satışı yapılamaz.” hükmü getirilmiştir [57]. Son olarak, 16 Haziran 2017 tarihli Resmi Gazete’den yayınlanan yönetmenliğe göre, “Dağıtıcı lisansı sahipleri tarafından, bir takvim yılı içerisinde, ithal edilen ve kara tankeri dolun üniteleri hariç rafinericiden temin edilen motorininin toplamına, en az % 0,5 (v/v) oranında yerli tarım ürünlerinden ve/veya bitkisel atık yağlardan üretilmiş biyodizelin harmanlanmış olması zorunludur.” hükmü getirilmiştir [58]. Biyodizelin üstün özellikleri (özellikle yerel kaynaklardan üretilebilme, vb.) ve getireceği faydalar (kırsal kalkınma, göçün önlenmesi, yeni istihdam alanları, vb.) dikkate alındığında, özel tüketim vergisi kapsamına alınsa da, yukarı verilen yasal düzenlemeler biyodizel üretimini ve kullanımını teşvik edici niteliktedir.

Dünya’da ilk defa Rudolf Diesel (1858–1913) 1893 yılında biyoyakıtların alternatif yakıt olarak kullanımı üzerine çalışmalar yapmaya başlamış ve 1900 yılında Paris Dünya Fuarı’nda yer fıstığı yağıyla çalışan motorunu sergilenmiştir. Rudolf Diesel çalışmalarına devam etmiş ve 1911’de “Bitkisel yağların motor yakıtı olarak kullanımı tarımın

gelişmesine katkıları sağlayacaktır.” demiştir [59]. Yine, 1912’de “Bitkisel yağların motorlarda kullanımı günümüzde önemsiz görünebilir, fakat zamanla bitkisel yağlar petrol kadar önemli olacaktır.” demiştir [59]. Bitkisel yağların yüksek viskozitesi nedeniyle doğrudan kullanıldığında karşılaşılan sorunlardan ötürü, biyoyakıtlar popülerliğini o yıllar için kaybetmiştir. Fakat, bitkisel yağların yapısındaki gliserini uzaklaştırarak viskozitesinin azaltılması yönündeki çalışmalar yine de devam etmiştir. 31 Ağustos 1937 tarihinde Brüksel Üniversitesi’nden Dr. Chavanne, bugün “Biyodizel” olarak adlandırılan yakıt için ilk patenti almıştır [60]. Biyodizel üretiminde dünyada lider konumda olan ve biyodizel konusundaki gelişmeleri yakından takip eden Avrupa Birliği ülkelerinin biyodizelle tanışması 1980’lere dayanmaktadır [61]. Bu yıllarda, küçük çapta ve belirli bir standardı olmadan biyodizel üretilmiş olsa da, ilk ticari biyodizel, küçük bir çiftçi kooperatifi tarafından Avusturya’da 500 ton/yıl kapasiteyle kurulan tesiste 1988’de üretilmiştir. İlk büyük sanayi tesisi ise 1991 yılında kurulmuştur [2, 37]. Bu tarihten sonra, Avrupa Birliği Parlamentosu’nda, bilinen petrol rezervlerinin azalması, petrol ürünlerinin fiyatlarındaki dalgalanmalar ve her geçen gün artan çevre kirliliği nedeniyle, 2003’te “Biyoyakıt direktifi”, 2005’te “Biyokütle eylem planı”, 2006’da “Biyoyakıt strateji raporu” ve 2007’de “Biyoyakıt gelişme raporu” hazırlanmıştır [61]. Biyodizel üretimini ve kullanımını destekleyici ve özendirici birçok yasa ile yönetmelik, üye ülkelerde yürürlüğü girmiştir [61]. Örneğin, Almanya, “Yenilenebilir enerji kaynaklarına öncelik tanıma” yasası kapsamında 2007 yılından itibaren biyoyakıtlara kademeli vergi uygulaması başlatmış, ancak biyodizelin çiftçiler tarafından kullanılması durumunda vergi muafiyetini getirerek enerji tarımını desteklemiştir [17]. Ayrıca, biyodizelin, 2007 yılında dizel yakıtına % 5, benzine ise yine 2007’de % 1,2, 2008’de % 2, 2009’da % 2,8 ve 2010’da % 3,6 oranlarında ilave edilmesini zorunlu hale getirmiştir [17]. Fransa, dizel yakıtına % 5 oranında biyodizel ilave edilmesini vergiden muaf tutmuştur. Ayrıca, bilinen otomobil firmalarının yanı sıra uluslararası şirketlerin desteklediği projelerle biyodizel üretimini artırmayı planlamıştır [17]. Biyodizelin öncülüğüne soyunan Avusturya, yıllık 100,000 ton olan üretimini her yıl artırmaktadır. Böylece, Almanya’ya biyodizel ihraç eder duruma gelmiştir [17]. İtalya, 100,000’den fazla nüfuslu yerleşim yerlerindeki toplu taşıma taşıtlarında biyodizel kullanımını başlatmış ve özellikle konut ısınmasında biyodizel kullanımına yönelik projeler geliştirmiştir [17]. Belçika, biyodizelin taşıtlarda saf olarak kullanımına izin vermiştir [17]. Bazı bölgelerde biyodizel kullanımını vergiden muaf tutan İngiltere, kanalizasyonlarda biriken atık yağları diğer maddelerden ayrıştırarak, yılda

yaklaşık 90 milyon litre biyodizel üretmektedir [62]. Yunanistan biyodizelden verginin alınmayacağını ve teşviklere devam edileceğini yasalarla güvence altına almıştır [17]. Söz konusu teşviklerle birlikte Avrupa Birliği ülkelerinde, biyodizel üretim tesisi sayısı gün geçtikçe artmakta olup şu anda yaklaşık 245 adet biyodizel üretim tesisi bulunmaktadır. Toplamda yaklaşık yılda 9 milyon ton biyodizel üretilmektedir [17, 37]. Avrupa Birliği Komisyonu biyodizel üretimini ve kullanımını teşvik edici çalışmalara devam etmekte olup, biyoyakıt kullanımı hedefini 2020 yılı için % 20, 2030 yılı için ise % 30 olarak belirlenmiştir [63, 64]. Diğer ülkeler incelendiğinde, 2025 yılında toplam enerji tüketiminin yaklaşık % 25'ini yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılamayı hedefleyen ve bu yönde çalışmalar yapan ABD'nin biyodizel konusunda kendi ulusal standardını belirlediği görülmüştür [19]. ASTM 6751 standardı ABD'nin ulusal bitkisel yağı olan soya yağı için belirlenmiş bir standarttır [19]. ABD, standartların yaygınlaştırılması, güncel şartlara göre standartların geliştirilmesi ve biyodizel üreticilerinin standartlara uyumu için 10 yıllık bir geçiş süreci başlatmıştır [19]. Ayrıca, ABD'de, hacimsel olarak % 5 oranında soya yağı biyodizelini içeren biyodizel-dizel yakıtı karışımı, istasyonlarda yaygın olarak satılmaktadır. Çiftçiler için de saf biyodizel kullanımı vergiden muaf tutulmuştur [59]. Dünya'nın en büyük palm yağı ihracatçısı konumunda olan ve önemli petrol rezervlerine sahip olan Malezya, ülke çapında palm ağacı dikimine ciddi teşvikler getirmiş ve biyodizel yatırımı için yaklaşık 73 firmaya lisans vermiştir [17]. E80 (hacimsel olarak % 80 oranında biyoetanol içeren etanol-benzin karışımı) kullanımıyla önemli bir başarıya imza atan Brezilya, palm ağacı dikimine teşvik getirerek biyodizel üretiminde de atağa kalkmıştır [17]. Son olarak, dünya genelinde teşvik edilerek kullanılmaya başlanan biyodizel, birçok otomobil firmaları tarafından garanti kapsamına da alınmıştır. Garanti bilgileriyle ilgili ayrıntılara Ölçüm [65] tarafından yapılan yüksek lisans tezinden ulaşılabilir.

1.4. Literatür Araştırması

Doktora tezinin konusuyla ilgili olarak, biyodizel üretimine, biyodizelin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesine, transesterifikasyon reaksiyonuna etki eden parametrelerin incelenmesine, biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yakıt özelliklerinin (özellikle viskozite, yoğunluk ve yüzey gerilimi) belirlenmesine, saf biyodizelin ve biyodizelin diğer yakıtlarla (dizel, alkol, eter vb.) olan karışımlarının yakıt demeti

özelliklerine etki eden parametrelerin incelenmesine yönelik literatürdeki sayısal ve deneysel çalışmalar kronolojik sırayla aşağıda verilmiştir:

1.4.1. Biyodizel Üretimi, Biyodizelin Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi, Transesterifikasyon Reaksiyonuna Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi

Freedman ve arkadaşları [66] 1984'te, pamuk yağı, soya yağı, fındık yağı ve ayçiçeği yağından biyodizel üretimini incelemişler ve alkol oranı, katalizör miktarı, katalizör tipi ile reaksiyon sıcaklığının biyodizel üretimindeki etkilerini araştırmışlardır. Ayçiçeği yağından biyodizel üretiminde, alkol olarak metanol ve katalizör olarak yağın kütlece % 0,5'i oranında sodyum metoksit kullanıldığında, 60 °C'deki reaksiyonun 1 saat sonundaki ester dönüşüm oranının, 3:1 mol oranı için % 82 iken, 6:1 mol oranı için % 98'e yükseldiği belirlenmiştir. Alkol olarak metanolun yanı sıra etanol ve n-bütanol de kullanılmıştır. 3:1 alkol/yağ molar oranı ve % 0,5 oranında sodyum metoksit kullanıldığında, reaksiyon sıcaklığı kullanılan alkolün kaynama noktasının biraz altında seçildiğinde, 1 saatin sonunda ester dönüşüm oranının (verimlerin), n-bütanol, etanol ve metanol için sırasıyla, % 88, % 81 ve % 82 olduğu tespit edilmiştir. Alkol/yağ mol oranı 6:1'e yükseltildiğinde verimlerin % 96–98 aralığında olduğu belirlenmiştir. Reaksiyon sıcaklığının etkisini görebilmek amacıyla gerçekleştirilen deneylerin neticesinde, soya yağı, % 1 oranında sodyum hidroksit ve 6:1 alkol/yağ mol oranı kullanıldığında, 1 saat içinde ester verimlerinin, 60 °C, 45 °C ve 32 °C için sırasıyla % 94, % 87 ve % 64 olduğu belirtilmiştir.

Çanakci ve Gerpen [67] 1999'da, asit katalizör kullanarak, alkol/yağ molar oranının, reaksiyon sıcaklığının, katalizör miktarının, reaksiyon süresinin, su içeriğinin ve serbest yağ asidi miktarının biyodizel üretimindeki etkilerini incelemişlerdir. Reaksiyon süresi 48 saat, alkol/yağ molar oranı 6:1 ve katalizör (sülfürik asit) oranı % 3 seçildiğinde, reaksiyon sıcaklıkları 25 °C, 45 °C ve 60 °C için ester dönüşüm oranlarının sırasıyla % 8,3, % 57,2 ve % 87,8 olduğu belirlenmiştir. Reaksiyon süresi 48 saat, katalizör oranı % 3 ve reaksiyon sıcaklığı 60 °C seçildiğinde, alkol/yağ molar oranının etkisini görebilmek için, 3:1, 9:1, 6:1 ve 30:1 molar oranları kullanılmıştır. 30:1 molar oranında ester dönüşümünün % 98,4'e yükseldiği görülmüştür. Katalizör oranının (% 1, % 3 ve % 5) etkisinin incelendiği deneylerde, reaksiyon süresi 48 saat, alkol/yağ mol oranı 6:1 ve reaksiyon sıcaklığı 60 °C seçildiğinde, ester dönüşüm oranının % 1 ve % 5 için sırasıyla % 72,7 ve % 95 olduğu

belirlenmiştir. Reaksiyon süresinin etkisinin incelendiği deneyler neticesinde, ester veriminin 48 ve 96 saatin sonunda sırasıyla % 87,8 ve % 95,1 olduğu görülmüştür. Asit katalizörler ile yüksek dönüşüm elde etmek için reaksiyon sürelerinin uzun tutulması gerektiği vurgulanmıştır. Alkol tipinin etkisini görebilmek için, metanolün haricinde izo-propanol, 1-bütanol ve etanol kullanılmıştır. Reaksiyon sıcaklıkları alkollerin kaynama noktaları göz önüne alınarak etanol ve izo-propanol için 75 °C, metanol için 60 °C ve 1-bütanol için 110 °C olarak seçilmiştir. En yüksek ester dönüşümü etanol kullanımında % 95,8 olarak belirlenmiştir. İzo-propanol, 1-bütanol ve metanol kullanıldığında ise ester dönüşüm oranlarının % 92,9, % 92,1 ve % 87,8 olduğu tespit edilmiştir.

Encinar ve arkadaşları [68] 2002'de, yabancı enginar yağından etil ester üretimini ve sırasıyla reaksiyon sıcaklığının (25 °C, 50 °C ve 75 °C), katalizör oranının (% 0,25, % 0,50, % 0,75, % 1,0 ve % 1,5), katalizör türünün (sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit) ve etil alkol/yağ mol oranının (3:1, 6:1, 9:1, 12:1 ve 15:1) ester verimine olan etkilerini incelemiştir. Deneylerde reaksiyon süresi 120 dakikada sabit tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre, % 1 oranında sodyum hidroksit ile 12:1 alkol/yağ mol oranında etil alkol kullanılarak 75 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen biyodizelin en yüksek etil ester verimine (% 94,5) sahip olduğu belirlenmiştir.

Chhetri ve arkadaşları tarafından 2008'de yapılan bir çalışmada [69], lokantalardan toplanan atık kızartma yağından üretilen etil ester için katalizör oranının ester verimine olan etkisi incelenmiştir. Deneyler, her bir litre atık yağ için 280 mL saf etil alkol ve farklı kütle oranlarında (yağın kütlece % 0,4, % 0,6, % 0,8, % 1,0 ve % 1,2) sodyum hidroksit kullanılarak 60 °C reaksiyon sıcaklığında ve 25 dakikada gerçekleştirilmiştir. En yüksek etil ester içeriğini veren % 0,8 oranının optimum değer olduğu belirlenmiştir.

N. Phan ve M. Phan tarafından 2008'de yapılan bir çalışmada [70], atık kızartma yağından biyodizel üretilmiş, metil alkol/yağ molar oranı (5:1, 6:1, 7:1, 8:1, 9:1 ve 12:1), katalizör (potasyum) miktarı (% 0,50, % 0,75, % 1,0, % 1,25 ve % 1,5), reaksiyon sıcaklığı (30 °C, 50 °C ve 70 °C) ve reaksiyon süresi (20 dk., 40 dk., 60 dk., 80 dk., 100 dk. ve 120 dk.) gibi parametrelerin ester verimine olan etkileri incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre, en yüksek ester verimi (% 88–90), 7:1 mol oranı, 50 °C reaksiyon sıcaklığı ve % 0,75 katalizör oranı için elde edilmiştir.

Sivaramakrishnan ve Ravikumar tarafından 2011'de yapılan bir çalışmada [71], pamuk, mısır, fındık, keten, hardal, zeytin, palmye, kolza, aspir, susam, soya, ayçiçeği ve ceviz yağlarından biyodizeller üretilmiş, bunların viskozite, yoğunluk, parlama noktası ve

üst ısıl değer gibi önemli yakıt özellikleri ölçülmüş, üst ısıl değeri hesaplamak için viskozite, yoğunluk ve parlama noktası sıcaklığı kullanılarak regresyon analizinden bağıntı geliştirilmiş ve ölçülen üst ısıl değerler ile hesaplanan ısıl değerler arasında hata oranları hesaplanmıştır. Geliştirilen bağıntının % 94,9 doğruluğa sahip olduğu belirtilmiştir. Saf bitkisel yağlardan biyodizel üretimi, metil alkol ve bazik katalizör kullanarak, 65 °C'nin biraz altında ve 3 saatte gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, pamuk, mısır, fındık, keten, hardal, zeytin, palmiye, kolza tohumu, aspir, susam, soya, ayçiçeği, ceviz yağı metil esterleri için sırasıyla 27 °C'de yoğunluk, 871 kg/m³, 873 kg/m³, 875 kg/m³, 885 kg/m³, 866 kg/m³, 860 kg/m³, 867 kg/m³, 857 kg/m³, 866 kg/m³, 880 kg/m³, 865 kg/m³, 863 kg/m³, 864 kg/m³, 40 °C'de kinematik viskozite, 3,75 mm²/s, 3,62 mm²/s, 3,59 mm²/s, 2,83 mm²/s, 4,10 mm²/s, 4,18 mm²/s, 3,94 mm²/s, 4,60 mm²/s, 4,03 mm²/s, 3,04 mm²/s, 4,08 mm²/s, 4,16 mm²/s, 4,11 mm²/s, parlama noktası sıcaklığı, 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, üst ısıl değer, 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.

Aliyu ve arkadaşları tarafından 2012'de yapılan bir çalışmada [72], insanlar tarafından tüketilmeyen mahogany tohumu yağından transesterifikasyon reaksiyonu ile biyodizel üretilmiştir. Transesterifikasyon reaksiyonu, rafine edilmiş 15 cm³ mahogany yağı, 0,1648 g sodyum hidroksit ve 42 cm³ metanol kullanılarak, 30 dakikada ve 60 °C'de gerçekleştirilmiştir. Mahogany yağının ve metil esterinin önemli yakıt özellikleri uluslararası standartlara uygun şekilde ölçülmüştür. Üretilen biyodizelin 15 °C'deki yoğunluğu 863 kg/m³, 40 °C'deki kinematik viskozitesi 4,83 mm²/s, asit değeri 0,49 mg KOH/g, bulutlanma noktası sıcaklığı 0 °C, akma noktası sıcaklığı 6 °C olarak ölçülmüştür. Saf mahogany yağının, rafine mahogany yağının ve mahogany yağı biyodizelinin fiziksel özellikleri karşılaştırıldığında, mahogany yağı metil esterinin dizel yakıtına iyi bir alternatif olabileceği ve ASTM D6751-06 standartlarına uygun olduğu belirtilmiştir.

Uzun ve arkadaşları tarafından 2012'de yapılan bir çalışmada [73], atık kızartma yağından transesterifikasyon reaksiyonuyla metil ester üretilmiş, katalizör türü ve miktarı, reaksiyon süresi, alkol/yağ molar oranı, reaksiyon sıcaklığı ve saflaştırma işlemi gibi önemli parametreler incelenip en yüksek metil ester verimini veren optimum şartlar belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre en yüksek metil ester verimine (% 96), 7,5:1 alkol/yağ mol oranı ve yağın kütlece % 0,50'i kadar sodyum hidroksit kullanılarak, 50 °C

reaksiyon sıcaklığında, 30 dakika reaksiyon süresi sonunda ve saflaştırma işlemi için sıcak saf su kullanıldığında ulaşılmıştır. Ayrıca kullanılan atık yağın ve üretilen biyodizelin önemli fiziksel özellikleri sırasıyla 15 °C’de yoğunluk 963,51 kg/m³, 890 kg/m³ ve 40 °C’de dinamik viskozite 63,5 cP, kinematik viskozite 4,36 mm²/s olarak belirlenmiştir.

Gülüm ve arkadaşları tarafından 2015’te yapılan bir çalışmada [74], sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit kullanılarak transesterifikasyon reaksiyonuyla üretilen mısır yağı biyodizellerinin optimum reaksiyon parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bunun için, sırasıyla katalizör oranı (% 0,25, % 0,50, % 0,75, % 0,90, % 1,00, % 1,10, % 1,25 ve % 1,50), reaksiyon sıcaklığı (40 °C, 50 °C, 60 °C ve 70°C), reaksiyon süresi (30 dakika, 60 dakika, 90 dakika ve 120 dakika) ve metil alkol/yağ mol oranı (3:1, 6:1, 9:1 ve 12:1) gibi transesterifikasyona etki eden en önemli reaksiyon parametrelerinin ayrı ayrı olarak (tam bir matris olarak değil) mısır yağı biyodizellerinin yoğunluk ve kinematik viskozitelerine olan etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, reaksiyon parametreleri, sodyum hidroksit kullanımı için % 0,90 katalizör oranı, 50 °C reaksiyon sıcaklığı, 60 dakika reaksiyon süresi ve 9:1 alkol/yağ mol oranı, potasyum hidroksit kullanımı için % 1,10 katalizör oranı, 60 °C reaksiyon sıcaklığı, 60 dakika reaksiyon süresi ve 9:1 alkol/yağ mol oranı olarak belirlenmiştir. Belirlenen reaksiyon parametreleri altında sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit kullanılarak üretilen biyodizellerin viskozite değerleri 40 °C’de sırasıyla 4,095 mm²/s ve 4,005 mm²/s olarak ölçülmüş ve her ikisinin yakıt özelliklerinin de EN 14214 ve ASTM D 6751 standartlarına uygun olduğu belirtilmiştir.

Yukarıda özetlenen yayınlara benzer şekilde, Tablo 1.1’de, transesterifikasyon reaksiyonuna etki eden parametrelerin, çeşitli yağ, alkol ve katalizör kullanılarak üretilen biyodizellerin ester verimlerine olan etkilerinin incelendiği yayınlardan elde edilen sonuçların özeti verilmiştir.

Tablo 1.1. Transesterifikasyon parametrelerinin üretilen biyodizelin ester verimine etkisinin incelendiği yayınlarda kullanılan malzemeler ve belirlenen parametreler

Referans	Kullanılan Malzemeler			En yüksek ester verimini veren reaksiyon parametreleri				Üretilen biyodizelin viskozitesine olan etkisinin incelenmesi
	Yağ	Alkol	Katalizör	Katalizör oranı, [%]	Sıcaklık [°C]	Süre [dk.]	Alkol/yağ mol oranı	
[75]	Ocimum basilicum	Metil	Lipaz enzim	6,00	47	68	10:1	×
[76]	Jatropha curcas - Ceiba pentandra karışımı	Metil	Potasyum hidroksit	0,50	60	120	% 30 (hacim)	×
[77]	Ayçiçeği	Metil	Kalsiyum oksit	7,00	65	60	6:1	×
[78]	Jatropha	Metil	Mg/Al hidrotalsit	1,30	45	90	4:1	×

1.4.2. Biyodizel-Dizel Yakıtı Karışımlarının Yakıt Özelliklerinin Belirlenmesi

Kerschbaum ve Rinke tarafından 2004'te yapılan bir çalışmada [79], transesterifikasyon reaksiyonuyla bitkisel atık yağdan ve kolza yağından üretilen biyodizellerin dinamik viskozitelerinin sıcaklıkla değişimleri incelenmiştir. 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. 273,15 K'den daha 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. 273,15 K'den daha düşük sıcaklıklarda ise, biyodizellerin dinamik viskoziteleri farklı eğilimler göstermiştir. Sonuç olarak, 273,15 K'den daha düşük sıcaklıklarda dört farklı biyodizel için dört farklı denklem türetilmiştir.

Gülüm ve Bilgin tarafından 2015'te yapılan bir çalışmada [80], metil alkol ve sodyum hidroksit kullanılarak transesterifikasyon reaksiyonuyla (% 0,90 katalizör oranı, 50 °C reaksiyon sıcaklığı, 60 dakika reaksiyon süresi ve 9:1 alkol/yağ mol oranı) rafineri mısır yağından biyodizel üretilmiş, üretilen biyodizel hacimsel olarak % 5, % 10, % 15, % 20, % 50 ve % 75 oranlarında ticari saf dizel yakıtıyla harmanlanıp biyodizel-dizel yakıtı karışımları elde edilmiş, biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunlukları farklı

sıcaklıklarda (10 °C, 15 °C, 20 °C, 30 °C ve 40 °C) ISO 4787 standardına uygun olarak belirlenmiş, yoğunluğun biyodizel oranı ve sıcaklık ile değişimi değerlendirilip bir-boyutlu (kuadratik ve üstel) ve iki-boyutlu regresyon denklemleri önerilmiştir. Önerilen bir-boyutlu denklemler literatürde sıklıkla kullanılan lineer denklem ile kıyaslanmıştır. İki-boyutlu denklemlerin yardımıyla da eş yoğunluk eğrileri elde edilmiştir. Biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının parlama noktası sıcaklıklarının ve üst ısıl değerlerinin biyodizel oranıyla değişimleri için ise sırasıyla ikinci dereceden ve doğrusal denklemler önerilmiştir. Söz konusu çalışmadan edinilen sonuçlara göre, üstel modelin yoğunluğun biyodizel oranıyla değişimini hem niteliksel hem de niceliksel olarak ikinci dereceden ve doğrusal modellere göre daha iyi temsil ettiği, sıcaklığa göre ikinci dereceden ve biyodizel oranına göre ise birinci dereceden terimler içeren iki-boyutlu denklemin yoğunluğun biyodizel oranı ve sıcaklıkla değişimini en küçük maksimum hatayla ve en yüksek korelasyon katsayısıyla temsil ettiği, bu iki-boyutlu denklem yardımıyla hesaplanan eş yoğunluk eğrilerinin yüksek ve düşük olmak üzere farklı gradyanlara sahip oldukları belirlenmiştir.

Hajra ve arkadaşları tarafından 2016'da yapılan bir çalışmada [81], saf stearik asit metil esterinin, oleik asit metil esterinin, sal yağı biyodizelinin, saf dizel yakıtının ve sal yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının yüzey gerilimleri farklı sıcaklıklarda (313 K–353 K) deneysel olarak belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar çeşitli denklemlerden (Macleod [82]-Sugden [83], Sastri-Rao [84], Brock-Bird-Miller-Thodos [85], Escobedo-Mansoori [86] ve Curl-Pitzer [87]) elde edilen sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Deneysel ölçümler incelendiğinde, saf dizel yakıtının yüzey geriliminin saf metil esterlere ve biyodizele göre daha düşük olduğu, sıcaklık arttıkça yüzey geriliminin azaldığı, karışımlar için biyodizel oranı arttıkça yüzey geriliminin arttığı, Macleod-Sugden [82, 83] ve Escobedo-Mansoori [86] denklemlerinin sıcaklık bağımsız parametreler içerdiği, Sastri-Rao [84] ve Brock-Bird-Miller-Thodos [85] denklemlerinin ise yüzey gerilimini tahmin etmek için kritik sıcaklık, basınç ve hacim ile normal kaynama noktası sıcaklığına ihtiyaç duydukları, yüzey gerilimlerinin hesaplanmasında deneysel değerler ile en yakın sonuçların metil esterler için Macleod-Sugden [82, 83] ve Curl-Pitzer [87] denklemleri, saf dizel yakıtı ve karışımlar için ise Sastri-Rao [84] denklemleri kullanıldığında elde edildiği belirlenmiştir.

Gülüm ve Bilgin tarafından 2016'da yapılan bir çalışmada [88], metil alkol, sodyum hidroksit ve kurutulmuş sodyum sülfat kullanılarak rafineri mısır ve fındık yağından transesterifikasyon reaksiyonuyla (mısır yağı için % 0,90 katalizör oranı, 50 °C reaksiyon

sıcaklığı, 60 dakika reaksiyon süresi, 9:1 alkol/yağ mol oranı, fındık yağı için % 1,00 katalizör oranı, 50 °C reaksiyon sıcaklığı, 60 dakika reaksiyon süresi, 9:1 alkol/yağ mol oranı) biyodizeller üretilmiş, üretilen biyodizeller saf dizel yakıtıyla farklı hacimsel oranlarda (% 5, % 10, % 15, % 20, % 50 ve % 75) karıştırılmış ve elde edilen biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunlukları ve viskoziteleri farklı sıcaklıklarda (10 °C, 20 °C, 30 °C ve 40 °C) ölçülmüştür. Yazarlar tarafından ölçülen kinematik viskozite değerleri kullanılarak kinematik viskozitenin biyodizel oranıyla değişim için iki-terimli güç denklemi önerilmiş ve bu denklem literatürde sıklıkla kullanılan ikinci dereceden ve Arrhenius [80] denklemleriyle kıyaslanmıştır. Denklemlerin viskozite değerlerini tahmin etmedeki güvenilirliğini test etmek için Alptekin ve Çanakci [89] tarafından ölçülen atık palm yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının ve mısır yağı biyodizeli-dizel yakıtı karışımlarının 40 °C'deki kinematik viskozite değerleri de kullanılmıştır. Benzer şekilde, yazarlar tarafından ölçülen viskozite değerleri kullanılarak kinematik viskozitenin sıcaklık ile değişimi için ise yine iki-terimli güç denklemi önerilmiş, bu model literatüre daha önceden sunulan Arrhenius [80], Andrade [90] ve tek-terimli güç [91] denklemleriyle kıyaslanmış, denklemlerin doğruluğunun tespiti için Knothe ve Steidley [92] ile Yuan ve arkadaşları [93] tarafından ölçülen dizel yakıtı-soya yağı biyodizellerinin viskozite değerleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, iki-terimli güç denklemlerinin çeşitli biyodizel-dizel yakıtı karışımları için ölçülen kinematik viskozite değerlerinin biyodizel oranı ve sıcaklıkla değişimlerini niteliksel ve niceliksel olarak diğer modellerden daha iyi tahmin ettiği belirlenmiştir.

Gülüm ve Bilgin tarafından 2017'de gerçekleştirilen bir çalışmada [94], metil alkol ve potasyum hidroksit kullanılarak fındık yağından transesterifikasyon reaksiyonuyla (% 1,25 katalizör oranı, 60 °C reaksiyon sıcaklığı, 60 dakika reaksiyon süresi ve 9:1 alkol/yağ mol oranı) biyodizel üretilmiş, üretilen biyodizel hacimsel olarak % 5, % 10, % 15, % 20, % 50 ve % 75 oranlarında saf dizel yakıtıyla karıştırılmış, elde edilen biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluk ve viskoziteleri 10 °C, 20 °C, 30 °C ve 40 °C sıcaklıklarda sırasıyla ISO 4787 and DIN 53015 standartlarına uygun olarak ölçülmüş ve en küçük kareler regresyonu yardımıyla yoğunluk-sıcaklık değişimi için iki-terimli güç, viskozite-biyodizel oranı değişimi için rasyonel, viskozite-sıcaklık değişimi için hiperbolik ve viskozite-yoğunluk değişimi için iki-terimli güç modelleri önerilmiştir. Bu modellerin viskozite ve yoğunluk tahminindeki güvenilirliği, sadece yazarlar tarafından ölçülen deneysel değerlerle değil, Verduzco ve arkadaşları [95], Ivanis ve arkadaşları [96] ile Yuan ve

arkadaşları [93] tarafından ölçülen yoğunluk ve viskozite değerleriyle de test edilmiş ve bu modeller literatürde daha önceden verilen farklı modellerle karşılaştırmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, yoğunluk-sıcaklık ve viskozite-biyodizel oranı değişimlerini sırasıyla üstel ve rasyonel modellerinin, viskozite-sıcaklık ve yoğunluk-viskozite değişimlerini ise iki-terimli güç modelinin niteliksel ve niceliksel olarak daha iyi tahmin ettiği belirlenmiştir.

Lapuerta ve arkadaşları tarafından 2017'de yapılan bir çalışmada [11], dizel yakıtı-alkol (etanol ve n-butanol) ve biyodizel (hacimsel olarak % 80 oranında soya yağı ve % 20 oranında palm yağı içeren karışımdan üretilen metil ester)-alkol (etanol ve n-butanol) karışımlarının viskoziteleri EN ISO 3104 standardına uygun olarak 40 °C'de ölçülmüş, farklı denklemler kullanılarak söz konusu karışımların viskoziteleri tahmin edilmiştir. Hacimsel olarak alkoller dizel yakıtıyla % 2,5, % 5, % 7,5, % 10, % 15, % 20, % 30, % 40, % 50, % 75, biyodizel ile % 2,5, % 5, % 10, % 20, % 40 ve % 75 oranlarında karıştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, diğer denklemlerle kıyaslandığında, Grunberg-Nissan [97] denkleminin dizel yakıtı-butanol, biyodizel-butanol ve biyodizel-etanol karışımlarının viskozitelerini belirlemede daha iyi sonuçlar verdiği, fakat jel oluşumu nedeniyle dizel yakıtı-etanol karışımlarında Grunberg-Nissan denklemi yerine McAllister [98] denkleminin daha uygun olduğu belirlenmiştir.

Kanaveli ve arkadaşları tarafından 2017'de yapılan bir çalışmada [99], üç farklı dizel yakıtı ve yedi farklı biyodizel kullanılarak, 11 farklı hacimsel biyodizel oranı (% 5, % 7, % 10, % 20, % 30, % 40, % 50, % 60, % 70, % 80 ve % 90) için toplamda 231 adet biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının viskoziteleri 40 °C'de ölçülmüş, viskozitelerin tahmini için farklı modeller kullanılmıştır. Söz konusu modeller, niteliksel ve niceliksel olarak viskozitelerin biyodizel oranıyla değişimlerini yeterli düzeyde iyi tahmin edemediği için, yazarlar modellere bazı sabitler ekleyerek yeniden düzenlemiş ve tüm modeller için determinasyon katsayısının (r^2) % 99.6'dan daha büyük olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, Shu [100] ile Barrufet ve Setiadarma [101] modelleri hem niteliksel hem de niceliksel olarak en uygun sonuçları vermiştir.

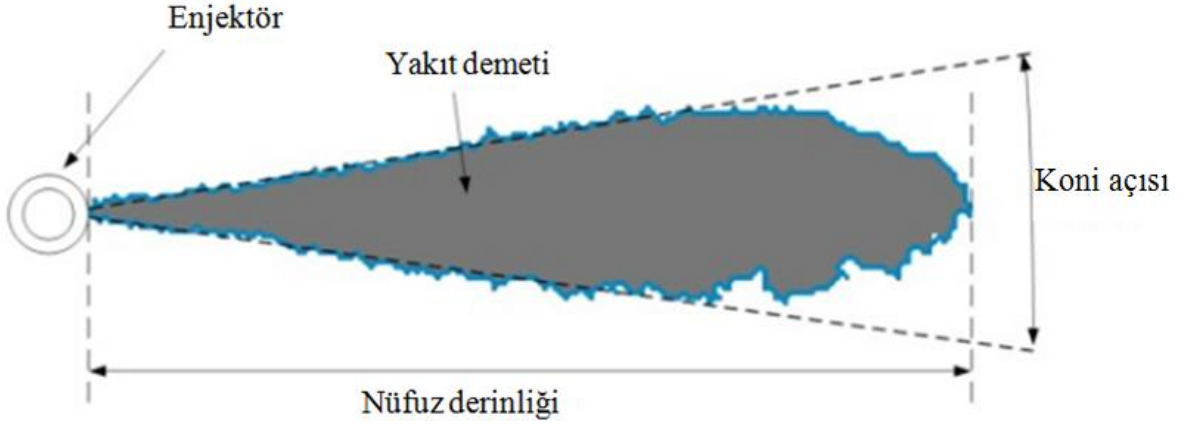
Gülüm ve Bilgin tarafından 2018'de gerçekleştirilen bir çalışmada [102], etil alkol ve sodyum hidroksit kullanılarak atık kızartma yağından transesterifikasyon reaksiyonuyla (% 1,25 katalizör oranı, 70 °C reaksiyon sıcaklığı, 120 dakika reaksiyon süresi ve 12:1 alkol/yağ mol oranı) etil ester (biyodizel) üretilmiş ve hacimsel olarak % 20 oranında saf dizel yakıtıyla karıştırılmış, elde edilen biyodizel-dizel yakıtı karışımına hacimsel olarak % 2, % 4, % 6, % 8, % 10, % 15 ve % 20 oranlarında metanol, etanol, isopropanol, butanol

ve pentanol ilave edilerek biyodizel-dizel-alkol üçlü karışımları elde edilmiştir. Üçlü karışımların viskoziteleri farklı sıcaklıklarda (273,15 K–343,15 K) DIN 53015 standardına uygun olarak ölçülmüştür. Viskozitenin alkol oranıyla ve sıcaklıkla değişimi için tek-boyutlu rasyonel model önerilmiş ve bu model Arrhenius [80], Kendall-Monroe [103], Andrade [90] ve Vogel [104] modelleriyle karşılaştırılmıştır. Modellerin viskozite tahminindeki güvenilirliklerini incelemek için hem yazarlar hem de Barabás ve Todorut [105] tarafından ölçülen viskozite değerleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, rasyonel modelin, diğer modellere göre, yazarlar ile Barabás ve Todorut [105] tarafından farklı biyodizel-dizel-alkol karışımları için ölçülen viskozite değerlerinin sıcaklık ve alkol oranıyla değişimlerini niteliksel ve niceliksel olarak daha iyi temsil ettiği belirlenmiştir.

Gülüm ve arkadaşları tarafından 2018’de yapılan bir çalışmada [106], metil alkol ve potasyum hidroksit kullanılarak atık kızartma yağından transesterifikasyon reaksiyonuyla (% 1,00 katalizör oranı, 6:1 alkol/yağ mol oranı, 60 dakika reaksiyon süresi ve 55 °C reaksiyon sıcaklığı) biyodizel üretilmiş ve bu biyodizel hacimsel olarak % 5, % 10, % 15, % 20, % 25, % 30, % 35, % 40, % 45, % 50, % 55, % 60, % 65, % 70, % 75, % 80, % 85, % 90 ve % 95 oranlarında saf dizel yakıtıyla karıştırılmış, elde edilen karışımların viskoziteleri farklı sıcaklıklarda (273,15 K–373,15 K) ölçülmüş, viskozitenin sıcaklık ve biyodizel oranıyla değişimi için tek-boyutlu rasyonel model önerilmiş ve bu model üç-terimli Vogel model [104], Bingham model [107] ve yapay sinir ağlarıyla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, önerilen rasyonel modelin, diğer modeller ve yapay sinir ağlarına göre, yazarlar ile Geacai ve arkadaşları [108] tarafından farklı biyodizel-dizel yakıtı karışımları için ölçülen viskozite değerlerinin sıcaklık ve biyodizel oranıyla değişimlerini niteliksel ve niceliksel olarak daha iyi temsil ettiği belirlenmiştir.

1.4.3. Yakıt Demeti Karakteristiklerinin İncelenmesi

Motor performansı ve eksoz emisyonlarını doğrudan etkileyen en önemli yakıt demeti karakteristikleri, nüfuz derinliği, sprey koni açısı, ortalama çap dağılımı ve sprey hacmidir. Bunlardan bazıları Şekil 1.2’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Bazı yakıt demeti karakteristikleri

Lefebvre ve arkadaşları tarafından 1988'de yapılan bir çalışmada [109], yüksek viskozitenin yakıt jetinin parçalanmasını sağlayan düzensizlikleri önleyerek atomizasyonu engellediği, ayrıca yüzey geriliminin sıvı yakıt jetinin parçalanmasını önlediği sonucundan yola çıkılarak yüzey gerilimi ve viskozitenin yakıt atomizasyonu için en önemli parametreler olduğu belirlenmiştir.

Grimaldi ve Postrioti tarafından 2000'de yapılan bir çalışmada [110], saf biyodizelin ve saf dizel yakıtının yakıt demeti yapıları incelenmiştir. Biyodizelin yüksek viskozite ve yüzey gerilimi nedeniyle dizel yakıtına göre daha zor atomize olduğu ve nüfuz derinliğinin daha fazla olduğu belirlenmiştir.

Park ve arkadaşları tarafından 2003'te yapılan bir çalışmada [111], saf dizel yakıtının yakıt demeti karakteristiği (sprey gelişimi, nüfuz derinliği, damlacık dağılımı, damlacık parçalanma oranı) 6 farklı hibrit model kullanılarak farklı püskürtme basınçlarında (60 MPa ve 80 MPa) incelenmiştir. Birincil parçalanma için Kelvin-Helmholtz (KH) ve türbülans ağırlıklı modeller, ikincil parçalanma için ise Rayleigh-Taylor (RT), parçacık deformasyon parçalanması (DDB) ve Taylor analoji parçalanması (TAB) modelleri kullanılmıştır. Söz konusu modeller bir araya getirilerek oluşturulan 6 farklı hibrit modelden elde edilen sonuçlar deneysel değerler ile karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmada, yakıt demeti oluşumu ve nüfuz derinliği yüksek hızlı kameralar, Sauter ortalama çap değerleri ise Doppler partikül analizi cihazı ile belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, nüfuz derinliği, yakıt demeti oluşumu ve eksenel ortalama çap değerlerinin dağılımı açısından KH-RT, türbülans-RT ve türbülans-DDB modellerinin daha iyi sonuç verdiği, türbülans-RT ve türbülans-DDB modellerine göre KH-RT ve KH-DDB modellerinin kullanımında yakıt demetinin uç kısmında daha büyük çaplı damlacıkların elde edildiği, 60 MPa

püskürtme basıncında türbülans-RT modeli kullanımında genel ortalama çap değerlerinin türbülans-DDB modeli kullanımına göre daha küçük olduğu fakat bu durumun 80 MPa püskürtme basıncında tam tersi olduğu belirlenmiştir.

Waidmann ve arkadaşları tarafından 2006'da yapılan bir çalışmada [112], saf dizel yakıtının yakıt demeti özellikleri deneysel ve sayısal olarak incelenerek hibrit parçalanma modeli olan KH-RT'nin katsayıları belirlenmiştir. Sayısal incelemede Fluent programı kullanılmıştır. Deneysel kısımda 0,167 mm'lik tek delikli enjektör ile damlacık çap boyutlarını ve hızlarını belirlemede Doppler anemometresi kullanılmıştır. Püskürtme basıncı 160 MPa, püskürtülen yakıtın hacmi 154 mm³, karşı-havanın basıncı ve sıcaklığı sırasıyla 5 MPa ve 710 K olarak belirlenmiştir. Eksenel 40 mm, 45 mm ve 50 mm, radyal 1–7 mm şeklinde ölçüm noktaları belirlenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, deneysel ve sayısal olarak elde edilen yakıt demeti şekillerinin ve nüfuz derinliklerinin birbirlerine çok benzer olduğu, yakıt demetinin sınırlarında damlacık ve buhardan kaynaklanan titreşimlerin var olduğu, aynı eksenel uzaklık için radyal uzaklık arttıkça ortalama damlacık çap boyutunun ve hızının azaldığı belirlenmiştir.

Desantes ve arkadaşları tarafından 2006'da yapılan bir çalışmada [113], dizel yakıtının nüfuz derinliği ve eksenel hız dağılımı için momentumun korunumu ilkesini temel alan yeni teorik bir model geliştirilmiştir. Modelin doğruluğunu göstermek için, buharlaşmanın olmadığı kabulü ile, sprey görüntüleme ve sprey momentum ölçümleri, farklı enjektör delik çapları, püskürtme basınçları, karşı-ortam basınçları ve karşı-ortam yoğunlukları için gerçekleştirilmiştir. Nüfuz derinliği için önerilen modelin deney sonuçlarını % 98,08 hassasiyetle karakterize ettiği belirlenmiştir.

Ahmed ve arkadaşları tarafından 2006'da yapılan bir çalışmada [114], fıstık, kanola ve hindistan cevizi yağı biyodizellerinin ve hacimsel olarak % 5 ve % 20 oranlarında bu biyodizelleri içeren biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının atomizasyon karakteristikleri incelenmiştir. Sonuçlara göre, en düşük ve en yüksek Sauter ortalama çap değerleri saf hindistan cevizi ve fıstık yağı biyodizellerinden elde edilmiştir. Yakıtların atomizasyon karakteristiklerini yoğunluk, viskozite ve yüzey gerilimi gibi yakıt özelliklerinin etkilediği belirtilmiştir. Ayrıca, saf dizel yakıtına göre, biyodizel-dizel karışımlarının ortalama çap değerlerinin daha büyük olduğu belirlenmiştir.

Qi ve arkadaşları tarafından 2006'da yapılan bir çalışmada [115], sıvılaştırılmış petrol gazının (LPG) yakıt demeti özellikleri (nüfuz derinliği, sprey açısı, sprey alanı ve sprey hacmi) deneysel olarak incelenmiş ve görüntü işleme tekniği ile belirlenmiştir.

Deneysel farklı püskürtme basıncında (0,5 MPa, 1 MPa, 2 MPa), 0,1 MPa karşı-ortam basıncında ve 20 °C ortam sıcaklığında, 0,4 mm çapa sahip iki farklı türde (tek delikli ve çift delikli) enjektör kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yakıt püskürtme süresi 5 ms olarak belirlenmiş ve ölçüm hatalarının azaltılması için 15 kez arka arkaya spray resimleri çekilmiş ve değerlerin ortalaması alınmıştır. 1 ms püskürtme süresinde (püskürtmenin ilk aşamalarında) çift delikli enjektörün nüfuz derinliği tek delikli enjektörünkenden daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durumun sıvı halde püskürtülen LPG'nin metalik yüzeylere çarpmasından dolayı buharlaşıp daha hızlı atomize olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Buharlaşmanın devam etmesi nedeniyle püskürtmenin orta ve son safhalarında, çift delikli enjektörden elde edilen yakıt demetinin momentumu çok daha fazla azalmış, bu yüzden tek delikli enjektöre göre daha kısa nüfuz derinliği elde edilmiştir. Spray açılarının değişimi sadece tek delikli enjektör için incelenmiş ve püskürtme basıncı arttıkça spray açısının azaldığı, 0,6 ms civarında en yüksek açı değerinin elde edildiği, fakat bundan sonra değerlerin azaldığı ve yaklaşık sabit kalma eğilimine girdiği belirlenmiştir. Dolayısıyla yeterli püskürtme basıncından sonra basıncın artırılmasının spray açısını arttırmayacağı sonucuna varılmıştır. Spray alanı ve spray hacmi değişimi incelendiğinde, her iki enjektör türü için de püskürtme basıncı arttıkça spray alanının ve hacminin arttığı, iki delikli enjektörden elde edilen spray alanı ve spray hacmi değerlerinin tek delikli enjektörden elde edilenlere göre daha fazla olduğu, püskürtme basıncı arttıkça iki enjektörden elde edilen alan ve hacim değerlerinin oranlarının (çift delikli/tek delikli) arttığı görülmüştür. Böylece, püskürtme basıncı arttıkça çift delikliden elde edilen yakıt demetinin daha hızlı buharlaşacağı, hava ile daha iyi karışacağı ve spray hacmi değeri daha büyük olduğundan hava-yakıt karışımını soğutup yoğunluğunu arttırarak motor performansını arttıracığı şeklinde yorumlanmıştır.

Wu ve arkadaşları tarafından 2006'da yapılan bir çalışmada [116], dimetoksi metanın, dimetil karbonatın, dimetil eterin ve saf dizel yakıtının yakıt demeti özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada 0,37 mm çapında tek delikli enjektör kullanılmış olup, püskürtme basıncı 40 MPa, karşı-ortam basıncı 1 atm ve ortam sıcaklığı 20 °C'de sabit tutulmuştur. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, dimetoksi metan ve dimetil karbonatın yakıt demeti yapılarının şemsiye, dizel yakıtının ise koni şeklinde olduğu, spray açısının dimetoksi metan, dimetil karbonat ve saf dizele doğru arttığı, nüfuz derinliğinin saf dizel, dimetil karbonat ve dimetoksi metana doğru arttığı, söz konusu üç yakıtın da yakıt damlacık yoğunluklarının büyük ölçekte heterojenlik içerdikleri ve yakıt demetlerinin

dallı yapıda olduğu, dizel yakıtının damlacık hızlarının yakıt demetinin merkezinde daha fazla olduğu, aksel yönde dizel yakıtı yakıt demetinin vorteks yapılarının arttığı, dimetoksi metanın atomizasyon özelliği daha iyi olduğundan heterojenlik ve dallı yapının daha zayıf olduğu, sprej koni açısı daha fazla olduğundan dimetoksi metanın vorteks hareketlerinin daha güçlü olduğu ve daha büyük hacimli havayı absorbe ettiği, dimetil karbonatın atomizasyon özellikleri ve vorteks yapı sertliğinin saf dizel ve dimetoksi metanın arasında olduğu belirlenmiştir. Ohnesorge-Reynolds sayısı değişimi grafiği ele alındığında, saf dimetil karbonatın ve hacimsel olarak % 25, % 50 ve % 75 oranlarında saf dimetil karbonat içeren saf dimetil karbonat-dizel karışımlarının atomizasyon özelliklerinin saf dizel yakıtına ve dimetoksi metana göre daha iyi olduğu belirtilmiştir.

Gao ve arkadaşları tarafından 2007'de yapılan bir çalışmada [117], saf etanol (% 99) ve benzin ile etanol-benzin karışımlarının (hacimsel olarak % 25, % 50 ve % 75 oranlarında etanol içeren) deneysel olarak yakıt demeti özellikleri (sprej açısı ve nüfuz derinliği) yüksek hızlı kamera yardımıyla farklı çalışma koşulları altında belirlenmiştir. Deneysel çalışmada, yüksek basınçlı girdaplı enjektör kullanılmıştır. Çalışmada, püskürtme basıncı 5 MPa, püskürtme süresi 1,6 ms ve ortam sıcaklığı 300 K olmak üzere karşı-ortam basıncı 0,1 MPa ve 0,5 MPa olarak değiştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, 0,1 MPa püskürtme basıncında özellikle püskürtme başlangıcından 3,5 ms sonrası için etanol içeriği arttıkça buharlaşmanın artması ile nüfuz derinliğinin azaldığı ve sprej açısının arttığı, diğer taraftan 0,5 MPa püskürtme basıncında karışımlar arasında nüfuz derinliği bakımından önemli bir farkın bulunmadığı, püskürtme başlangıcından 2,5 ms aralığına kadar saf benzinin sprej açısının daha yüksek olduğu ve 2,5 ms ile 5 ms aralığında tüm yakıtların sprej açılarının neredeyse eşit olduğu belirlenmiştir.

Suh ve arkadaşları tarafından 2007'de yapılan bir çalışmada [118], aynı boyutlara sahip piezo ve solenoid enjektörlerin yakıt demeti özellikleri (püskürtme oranı, nüfuz derinliği, sprej açısı, sprej alanı, ortalama çap, ortalama aksel ve radyal hızlar) farklı püskürtme basınçları (60 MPa, 80 MPa ve 100 MPa), karşı-ortam basınçları (0,1 MPa, 1 MPa ve 3 MPa) ve enjektör sinyal süreleri (0,3 ms, 0,4 ms, 0,5 ms, 0,6 ms ve 0,7 ms) altında deneysel olarak incelenmiştir. Püskürtme oranı yani debisi (mg/ms) Bosch metoduna uygun bir ölçüm sistemiyle, nüfuz derinliği, sprej açısı ve sprej alanı yüksek hızlı kameralar kullanılarak, ortalama çap ve damlacık hızları ise Doppler partikül analiz sistemiyle belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre, her iki enjektör türü için de, püskürtme basıncı veya enjektör sinyal süreleri arttıkça yanma odasına gönderilen yakıt miktarının

(mg/püskürtme) arttığı, fakat aynı basınç ve sinyal süresi için piezo enjektör kullanımında daha fazla yakıtın gönderildiği belirlenmiştir. Ayrıca, piezo enjektörün solenoid enjektöre göre en yüksek püskürtme oranına (püskürtme debisi) daha kısa sürede ulaştığı (yani püskürtme gecikmesi daha kısa), fakat her iki enjektör aynı geometrilere sahip olduğu için benzer püskürtme oranları değerlerine sahip olduğu, her iki enjektör kullanımında da elde edilen yakıt demetlerinin benzer yapıya sahip olduğu, her iki enjektör içinde nüfuz derinliğinin püskürtme basıncı ve enjektör sinyal süreleri arttıkça artarken karşı-ortam basıncının artışı ile azaldığı, aynı şartlar için piezo enjektörün nüfuz derinliğinin daha kısa olduğu, aynı karşı-ortam basıncı için piezo enjektörün sprej koni açısının genel olarak ortalama 10° daha fazla olduğu, püskürtme başlangıcında her iki enjektör için de sprej alanlarının (mm^2) benzer olduğu, her iki enjektör için de hem aksel hem de radyal hızların püskürtme başlangıcından sonra geçen süre ile azaldığı, piezo enjektörden elde edilen damlacık çaplarının solenoid enjektörden elde edilene göre daha küçük olduğu belirlenmiştir.

Kim ve arkadaşları tarafından 2008'de yapılan bir çalışmada [119], soya yağından üretilmiş biyodizelin, hacimsel olarak % 20 oranında etanol içeren biyodizel-etanol karışımının ve saf dimetil eterin yakıt demeti özellikleri (yakıt demeti gelişimi, nüfuz derinliği, lokal ve genel ortalama çap dağılımı) deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal çalışma KIVA programı kullanılarak gerçekleştirilmiş iken, deneysel çalışmada tek delikli enjektör ve Doppler analiz metodu kullanılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, yakıt demeti gelişiminin deneysel ve sayısal sonuçlarının birbirlerine çok benzer olduğu, biyodizelin ve etanol katkılı karışımın nüfuz derinliklerinin dimetil eterinkine göre daha fazla olduğu, 20 mm aksel uzaklığa göre, 40 mm aksel uzaklıkta her üç yakıt için de $5 \mu\text{m}$ ve daha büyük çaplardaki damlacıkların sayısının daha fazla olduğu, biyodizelin ve etanol katkılı karışımın ortalama çap değerlerinin 15 ila $30 \mu\text{m}$ aralığında değiştiği, fakat dimetil eterin çap değerlerinin 5 ila $15 \mu\text{m}$ aralığında değiştiği, genel ortalama çap değerlerine bakılarak püskürtmenin başlamasından yaklaşık 0,2 ms sonra parçalanmaların başladığı, 0,5 ms'den önce ise yakıtların tamamen buharlaştığı belirlenmiştir.

He ve arkadaşları tarafından 2008'de yapılan bir çalışmada [120], atık yağdan üretilmiş biyodizel ile saf dizel yakıtının yakıt demeti özellikleri (nüfuz derinliği ve sprej koni açısı) farklı karşı-ortam basınçları (0,5 MPa, 1 MPa, 1,5 MPa ve 1,7 MPa) ve püskürtme sürelerinde (22, 25, 30 ve 35° KMA) incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, biyodizelin yüksek viskozite, yoğunluk ve bulk modülü değerleri nedeniyle aynı

püskürtme sürelerinde daha yüksek püskürtme basınçlarına sahip olduğu, püskürtme süresi arttıkça biyodizelin nüfuz derinliği ve koni açısı değerlerinin arttığı, karşı-ortam basıncı azaldıkça biyodizelin nüfuz derinliği artıp koni açısının azaldığı, nüfuz derinliğinin püskürtme basıncına göre karşı-ortam basıncından daha çok etkilendiği, püskürtmenin ilk başladığı anda yüksek viskozite nedeniyle biyodizelin nüfuz derinliğinin dizel yakıtına göre daha az, püskürtmenin son aşamalarında biyodizelinin ise daha yüksek duruma geldiği, yakıtların sprey koni açılarının benzer değişim eğilimi gösterdiği ve biyodizelin koni açısının daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Bo ve arkadaşları tarafından 2009'da yapılan bir çalışmada [121], farklı püskürtme basınçları (2 MPa, 3 MPa, 4 MPa, 5 MPa ve 6 MPa) ve karşı-ortam basınçları altında (0,05 MPa, 0,2 MPa, 0,5 MPa, 0,7 MPa) gerçekleştirilen deneylerde benzin için yakıt demeti oluşumu, nüfuz derinliği, koni açısı ve sprey uç hızı deneysel olarak belirlenmiştir. Deneyler sırasında püskürtülen yakıtın miktarı stokiyometrik orana yakın olması için yaklaşık olarak 45,35 mg olarak seçilmiştir. Deney sonuçlarına göre, püskürtme basıncı arttıkça nüfuz derinliğinin ve yakıt demetinin uç hızının arttığı, fakat koni açısının azaldığı, geri basınç (karşı-ortam basıncı) arttığında ise nüfuz derinliğinin, koni açısının ve yakıt demetinin uç hızının azaldığı belirlenmiştir. Düşük karşı-ortam basınçlarında (örneğin 0,05 MPa), yakıt demetinin büyük açılı içi boş koni şeklini aldığı, yüksek karşı-ortam basınçlarında ise (örneğin 0,7 MPa) yakıt demetinin daha kompakt bir hal aldığı ve nüfuz derinliğinin azaldığı belirtilmiştir. Yakıt demeti oluşumunun iki aşamadan meydana geldiği, birinci aşamada nüfuz derinliğinin püskürtme başlangıcından sonra geçen zamanla birlikte hızla arttığı, ikinci aşamada ise nüfuz derinliği geçen zamanla birlikte doğrusal olarak arttığı belirlenmiştir.

Park ve arkadaşları tarafından 2009'da yapılan bir çalışmada [122], soya yağından üretilen saf biyodizelin yakıt demeti karakteristiği sayısal ve deneysel olarak farklı yakıt sıcaklıklarında (300 K, 330 K ve 360 K) ve karşı-ortam sıcaklıklarında (300 K, 330 K, 360 K, 400 K ve 450 K) incelenmiştir. Sayısal çalışma KIVA-3V kodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, püskürtme basıncı (60 MPa ve 120 MPa) arttıkça nüfuz derinliğinin arttığı, yakıt sıcaklığındaki değişimin nüfuz derinliğine, yakıt demetinin yapısına ve şekline çok fazla etki etmediği, karşı-ortam sıcaklığı arttıkça ortamın yoğunluğu azalacağı için hem sayısal hem de deneysel olarak nüfuz derinliğinin arttığı, yakıt sıcaklığı ve karşı-ortam sıcaklığı arttıkça hem sayısal hem de deneysel olarak yakıt damlacık dağılımı ve damlacık sayısının buharlaşmadan ötürü azaldığı, en aktif

buharlaşmanın ve buharlaşan en fazla kütlenin yakıt demetinin merkezinde olduğu, yakıt sıcaklığı arttıkça, belirli bir hacimdeki daha küçük damlacıkların, buharlaşmanın etkisi ile azalıp, daha büyük damlacıkların aynı kalması sebebi ile, lokal ortalama çap değerlerinin deneysel ve sayısal olarak arttığı, yakıt demetinin dış kısmındaki (radyal mesafe arttıkça) damlacıkların ortalama çaplarının yakıt sıcaklığı arttıkça arttığı, püskürtmenin ilk başlarında her üç yakıt sıcaklığı için de (300 K, 330 K ve 360 K) damlacık sayısının hızla arttığı daha sonra ise azalmaya başladığı, fakat püskürtmenin ilk başlarında buharlaşma oranının yakıt sıcaklığıyla birlikte arttığı ve en yüksek yakıt sıcaklığında (360 K) toplam buharlaşan yakıt kütlesinin en fazla olduğu belirtilmiştir.

Gao ve arkadaşları tarafından 2009'da yapılan bir çalışmada [123], insanlar tarafından tüketilmeyen yağlardan (jatropha, palm ve kızartma yağı) üretilen biyodizellerin hacimsel olarak % 5, % 10, % 20 ve % 50 oranlarında dizel yakıtıyla harmanlanmasıyla meydana gelen karışımların yakıt demeti karakteristikleri (nüfuz derinliği, sprej koni açısı ve yakıt demeti uç hızı) deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada, 0,18 mm çapında tek delikli enjektör kullanılmış, karşı-ortam basıncı 1,1 MPa olarak sabit tutulurken püskürtme basıncı değiştirilmiştir. Sayısal çalışma sadece jatropha yağı biyodizelinin nüfuz derinliğinin değişimi için Star-CD programı ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, her üç saf biyodizel için de biyodizel oranı arttıkça nüfuz derinliklerinin arttığı, sprej koni açısının püskürtme basıncı arttıkça arttığı, püskürtme basıncı dalgalı yapıda olduğu için yakıt demeti uç hızının da dalgalı yapıda olduğu, en yüksek yakıt demeti hızı 200 m/s olarak belirlendiği daha sonra 20–40 m/s'ye düştüğü ve bu değerlerde yaklaşık olarak sabit kaldığı, sadece jatropha yağı biyodizelinin sayısal olarak elde edilen nüfuz derinliğinin deneysel olarak elde edilen değerlere oldukça iyi uyum gösterdiği, biyodizel oranı arttıkça yakıt demeti hızının da arttığı, en yüksek hız değerlerinin enjektörün ucuna yakın bölgelerde elde edildiği, biyodizel oranı arttıkça kinematik viskozite ve yüzey gerilimi arttığından ortalama çap değerlerinin de arttığı belirlenmiştir.

Park ve arkadaşları tarafından 2010'da yapılan bir çalışmada [124], saf dizel yakıtının, saf biyodizelin ve hacimsel olarak % 20 oranında etanol içeren biyodizel-etanol karışımının püskürtme performanslarıyla birlikte atomizasyon karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Püskürtme performansı (püskürtme oranı, efektif çap ve efektif püskürtme hızı) deneyleri 4 MPa karşı-ortam basıncı ve 1 ms püskürtme süresi için farklı püskürtme basınçlarında (60 MPa, 80 MPa ve 100 MPa), atomizasyon karakteristiği (lokal

ve genel ortalama çap dağılımlı, eksenel hız ve damlacık varma süresi) deneyleri ise 0,1 MPa karşı-ortam basıncı, 80 MPa püskürtme basıncı ve 1 ms püskürtme süresi için gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan sac tipli enjektör 0,3 mm çapa sahip, 0,8 mm uzunlukta ve tek deliklidir. Genel ap değerleri belirli bir zaman aralığı için eksenel yönde 10 mm aralıklar ile enjektör memesinin 10 mm uzağından 100 mm uzağına kadar, radyal yönde ise 2 mm uzaklıkta her bir noktadan yaklaşık 50000 damlacıktan elde edilen değerlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, püskürtme basıncı arttıkça her üç yakıtın da en yüksek püskürtme oranı değerlerinin arttığı ve en yüksek orana ulaşma süresinin kısaldığı, aynı koşullarda biyodizel-etanol karışımının en yüksek püskürtme oranı değerinin azaldığı ve püskürtme gecikmesinin kısaldığı, tüm yakıtlar için efektif çapın püskürtme süresince önce azaldığı sonra yaklaşık sabit kaldığı daha sonra ise tekrar arttığı, kavitasyonun efektif çapın azalmasına neden olduğu, biyodizel-etanol karışımı yakıt için püskürtme basıncı arttığında püskürtme gecikmesi ve efektif çapın azalıp efektif hızın arttığı, tüm yakıtlar için eksenel uzaklık arttıkça lokal ortalama çap değerlerinin azaldığı, aynı eksenel uzaklık için lokal ortalama çap değerlerinin sırasıyla saf biyodizel, biyodizel-etanol karışımı, dizel yakıtı olarak azaldığı, saf biyodizel ile kıyaslandığında biyodizel-etanol karışımının zaman bağımlı genel çap değerlerinin daha küçük olduğu, püskürtme süresi arttıkça biyodizel-etanol karışımının lokal çap değerlerinin azaldığı, en yüksek eksenel ortalama hız değerlerinin sırasıyla dizel, biyodizel ve biyodizel-etanol karışımı için 12,51 m/s (1,9 ms), 34,67 m/s (1,6 ms) ve 24,28 m/s (1,7 ms) olduğu belirlenmiştir.

Kim ve arkadaşları tarafından 2010'da yapılan bir çalışmada [125], soya yağından üretilen biyodizelin ve saf dimetil eterin 293 K ortam sıcaklığı ve 50 MPa püskürtme basıncında farklı karşı-ortam basınçlarındaki (0,1 MPa, 1 MPa ve 2 MPa) yakıt demeti özellikleri deneysel olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmada, nüfuz derinliği ve koni açısı yüksek hızlı kameralar ile çekilen fotoğraflar, farklı radyal ve eksenel konumlardaki lokal ortalama çap değerleri ise Doppler partikül analiz cihazı ile belirlenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, eterin düşük viskozitesi nedeniyle enjektörden daha erken çıktığı, biyodizelin püskürtme süresinin daha kısa olduğu, karşı-ortam basıncı arttıkça yakıtların nüfuz derinliklerinin azaldığı, yakıt demeti fotoğraflarına bakıldığında eterin atomizasyon ve buharlaşma özellikleri daha iyi olduğundan yakıt demetinin en dış bölgelerinin daha bulanık olduğu, biyodizel yakıt demetinin en dış bölgesinin yakıt ve evre hava arasındaki sürtünme nedeniyle oluşan düzensiz girdaplar nedeniyle daha pürüzlü olduğu

belirlenmiştir. Ayrıca, her iki yakıt içinde karşı-ortam basıncı azaldıkça nüfuz derinliğinin arttığı, karşı-ortam basıncı azaldıkça püskürtmenin ilk başlarında nüfuz derinliğinin hızlıca azaldığı, fakat daha sonra bu artış oranının azaldığı tespit edilmiştir.

Wang ve arkadaşları tarafından 2010'da yapılan bir çalışmada [126], palm ve atık kızartma yağından üretilmiş biyodizellerin yakıt demeti karakteristikleri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Püskürtme gecikmesi, nüfuz derinliği, sprej koni açısı, sprej projeksiyon alanı ve sprej hacmi deneysel olarak belirlenmiştir. Sonuçlara göre, biyodizellerin dizel yakıtına göre nüfuz derinliklerinin ve püskürtme gecikmesi sürelerinin daha uzun olduğu, diğer taraftan biyodizellerin sprej koni açısı, projeksiyon alanı ve sprej hacmi değerlerinin dizel yakıtına göre daha küçük olduğu belirlenmiştir. Boyutsuz sprej uzunluğu ile boyutsuz zamanın doğrusal ilişkisi nedeniyle biyodizellerin ve saf dizel yakıtının yakıt demeti davranışlarının birbirlerine benzer olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, biyodizellerin viskozite ve yüzey gerilimi değerleri daha yüksek olduğu için ortalama çap değerlerinin dizel yakıtınkine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Diğer taraftan, sanki dengeli jet teorisi kullanılarak palm yağı biyodizelinin hem aksel yöndeki hem de radyal yöndeki ekivalans oranı dağılımının dizel yakıtına göre daha yüksek iken, atık kızartma yağı biyodizeli ve dizel yakıtının ise birbirlerine benzer olduğu belirlenmiştir.

Ing ve arkadaşları tarafından 2010'da yapılan bir çalışmada [127], palm yağı biyodizelinin ve bu biyodizelin dizel yakıtı ile hacimsel olarak % 5, % 10, % 15 ve % 20 oranlarında harmanlanmasıyla elde edilen karışımların yakıt demeti karakteristikleri (damlacık çapı, Sauter ortalama çapı ve nüfuz derinliği) sayısal olarak Fluent programında incelenmiştir. Çalışmada türbülansın modellenmesinde k-ε modeli kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, biyodizel oranı arttıkça damlacık çapı, nüfuz derinliği ve ortalama çap değerlerinin arttığı, saf biyodizelin damlacık çapı ortalama 1 mm iken saf dizelinkinin 0,0375 mm olduğu, yakıt demetinin dış kısımlarında iç kısımlarına göre daha büyük çaplı parçacıkların bulunduğu ve ortalama çap değerlerinin yakıtın kinematik viskozite, yoğunluk ve yüzey gerilimi gibi yakıt özelliklerine bağlı olduğu belirlenmiştir.

Chaudhry ve arkadaşları tarafından 2010'da yapılan bir çalışmada [128], dizel yakıtının sabit ortam sıcaklığında (290 K) ve buharlaşmanın olmadığı kabulü ile püskürtme basıncı (22 MPa, 25 MPa, 30 MPa ve 40 MPa), karşı-ortam basıncı (1,2 MPa, 2,25 MPa ve 3,3 MPa) ve enjektör delik çapının (0,15 mm, 0,3 mm, 0,4 mm ve 0,5 mm) nüfuz derinliğine olan etkileri sayısal olarak incelenmiş, elde edilen değerler bazı ampirik korelasyonlar ile karşılaştırılmıştır. Araştırmacılar $t^{1/2}$ yapısında birisi hiperbolik iki adet

ampirik korelasyonlar önermişlerdir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, 800 K'e çıkarılan karşı-ortam havası için nüfuz derinliğinin buharlaşmadan ötürü azaldığı, korelasyon denklemlerinden ve sayısal çalışmadan elde edilen nüfuz derinliklerinin arasındaki hata oranlarının başlangıç sıvı jet bölgesinde % 2–3 oranında olduğu, buharlaşmış jet bölgesinde ise % 1 oranında olduğu, hem denklemlerden elde edilen hem de sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçlarda karşı-basınç arttıkça nüfuz derinliğinin azaldığı, püskürtme basıncı ve enjektör delik çapı arttıkça nüfuz derinliğinin de arttığı belirlenmiştir.

Chaudhry ve arkadaşları tarafından 2010'da yapılan bir çalışmada [129], püskürtme basıncının (25 MPa, 30 MPa ve 40 MPa), karşı-ortam basıncının (1,2 MPa, 2,25 MPa ve 3,3 MPa) ve enjektör delik çapının (0,15 mm, 0,3 mm ve 0,4 mm) saf dizel yakıtının nüfuz derinliğine olan etkileri hem sayısal olarak (Fluent) hem de önerilen ampirik bağıntı yardımıyla incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, püskürtme basıncının ve enjektör delik çapının değeri arttıkça nüfuz derinliğinin arttığı, fakat karşı-ortam basıncı arttıkça nüfuz derinliğinin azaldığı belirlenmiştir.

Kim ve arkadaşlar tarafından 2010'da yapılan bir çalışmada [130], soya yağı biyodizelinin ve dimetil eterin yakıt demeti özellikleri 293 K'de farklı püskürtme basınçları (50 MPa ve 70 MPa) ve karşı-ortam basınçları (0,1 MPa, 1 MPa ve 2 MPa) altında deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, püskürtme zamanı arttıkça püskürtülen yakıt miktarının doğrusal olarak arttığı, aynı püskürtme basıncı için biyodizel kullanımında püskürtülen yakıt miktarının yüksek yoğunluğu nedeniyle eter kullanımına göre daha fazla olduğu, her iki yakıt için de püskürtme basıncı arttıkça püskürtme gecikmesinin azaldığı, aynı püskürtme basınçları için biyodizelin püskürtme gecikmesinin yüksek viskozitesi nedeniyle daha uzun olduğu, her iki yakıt için de püskürtme basıncı arttıkça enjektör çıkış hızlarının arttığı, aynı püskürtme basıncı için biyodizelin çıkış hızının daha yüksek olduğu, her iki yakıt için de karşı-ortam basıncı arttığında nüfuz derinliğinin azaldığı, 0,6 ms zaman aralığında daha kısa püskürtme gecikmesi nedeniyle eterin, 1,2 ms zaman aralığında ise biyodizelin yakıt demeti yapısının daha uzun olduğu, karşı-ortam basıncı azaldıkça ve püskürtme basıncı arttıkça her iki yakıtın da hem aksenel hem de radyal maksimum nüfuz derinliğinin arttığı, püskürtmenin ilk zamanlarında eterin en yüksek radyal mesafesinin biyodizele göre daha fazla olduğu fakat eterin yüksek buhar basıncı nedeniyle 0,6 ms'den sonra nüfuz derinliğindeki artışın azaldığı, karşı-ortam basıncı arttıkça eterin buharlaşmaya başlama zamanının geciktiği, her

iki yakıtın da karşı-ortam basıncı ve püskürtme basıncı arttıkça yakıt demeti çapının azaldığı ve biyodizelin Sauter ortalama çap değerlerinin etere göre daha fazla olduğu belirtilmiştir.

Park ve arkadaşları tarafından 2010'da yapılan bir çalışmada [131], dimetil eterin farklı ortam sıcaklıkları (293 K, 350 K ve 400 K) ve yakıt sıcaklıkları (293 K, 330 K ve 370 K) için yakıt demeti özellikleri (nüfuz derinliği, sprej koni açısı, yakıt demeti uç hızı ve Sauter ortalama çapı) deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal çalışmada KIVA-3V paket programı kullanılmıştır. Deneysel çalışmada 0,126 mm çaplı 6 delikli bir adet dizel enjektör ve yüksek hızlı kamera kullanılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, atmosferik koşullarda dimetil eterin nüfuz derinliğinin dizelinkine göre daha az, fakat sprej koni açısının daha fazla olduğu, yüksek karşı-ortam basınçlarında dimetil eterin nüfuz derinliği ve koni açısının dizelinkine çok benzer olduğu, dimetil eterin yakıt sıcaklığının nüfuz derinliğine ve koni açısına etkisinin çok az olduğu, püskürtme süresinin başlarında dimetil eterin sprej koni açısı zamanla ani buharlaşma etkisi nedeniyle arttığı, saf dizel yakıtına göre dimetil eterin radyal yöndeki yer değiştirmesinin aksel yöndekine göre daha fazla olduğu, yüksek karşı-ortam basınçlarında radyal ve aksel yöndeki yer değiştirmelerin daha az olduğu, atmosferik koşullarda yakıt demeti uç hızının aniden arttığı daha sonra hızlıca azaldığı, yüksek karşı-ortam basınçlarda yakıt demeti uç hızının hafifçe azaldığı, atmosferik koşullardaki yakıt demeti uç hızının yüksek karşı-ortam basınçlarındaki uç hızlarına göre daha yüksek olduğu, toplam Sauter ortalama çap değerlerinin yakıt sıcaklığı ve karşı-ortam sıcaklığı arttıkça arttığı, yakıt sıcaklığı ve karşı-ortam sıcaklığı arttıkça yakıt ile hava arasındaki karışımın niteliğinin iyileştiği ve toplam damlacık sayısının arttığı, damlacıkların buharlaşma karakteristiğinde yakıt sıcaklığının ortam sıcaklığına göre daha etkili olduğu belirtilmiştir.

Park ve arkadaşları tarafından 2010'da yapılan bir çalışmada [132], saf dizel yakıtının yakıt demeti özellikleri (nüfuz derinliği, koni açısı ve ortalama çap değerleri) farklı yakıt sıcaklıkları (290 K, 360 K, 443 K ve 500 K) ve karşı-ortam sıcaklıkları (290 K, 400 K ve 600 K) için incelenmiştir. Nüfuz derinliği ve ortalama çap değerleri hem sayısal hem deneysel olarak belirlenirken, sprej koni açısı sadece sayısal olarak belirlenmiştir. Çalışmada püskürtme basıncı 120 MPa, karşı-ortam basınçları 2 MPa ve 4 MPa, püskürtme sinyal süresi 1 ms olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, deneysel ve sayısal olarak elde edilen yakıt demeti şekillerinin birbirlerine çok benzediği, yakıtın sıcaklığı arttıkça nüfuz derinliğinin ve ortalama çap değerlerinin hem sayısal olarak hem de

deneysel olarak azaldığı, fakat koni açısının arttığı, ortam sıcaklığı arttıkça ortalama çap değerlerinin çok fazla değişmediği, fakat nüfuz derinliğinin artıp koni açısının azaldığı, dizel yakıtının kaynama noktasına (580 K–700 K) yakın sıcaklıklarda ortalama çap değerlerinin daha fazla olduğu belirlenmiştir.

Y. Lin ve H. Lin tarafından 2010'da yapılan bir çalışmada [133], kolza yağı ve soya yağı karışımı atık kızartma yağından üretilen biyodizelin yakıt demeti özellikleri (nüfuz derinliği, sprej açısı ve Sauter ortalama çap değeri) incelenmiştir. Atık kızartma yağının başlangıçtaki asit değeri 10 ± 1 mg KOH/g olduğundan, yağ sülfürik asit ile esterleşme reaksiyonuna tabi tutulmuştur. Bu reaksiyon sonunda, atık kızartma yağının asit değeri 2 mg KOH/g'ın altına düşmüştür. Bundan sonra gerçekleştirilen bazik transesterifikasyonu, 1000 mL ön işlemde geçirilmiş yağ (asit değeri 2 mg KOH/g'ın altında olan), 150 mL metil alkol ve 5 g sodyum hidroksit kullanılarak 60 °C reaksiyon sıcaklığında 1 saatte gerçekleştirilmiştir. Ön işlemde sonra biyodizel üretimi neticesinde biyodizel verimi % 90'ı aşmıştır. Üretilen biyodizelin distilasyon eğrisi saf dizel yakıtıyla kıyaslanarak incelendiğinde, biyodizelin distilasyon sıcaklığının 300 °C'nin üzerinde olduğu, saf dizelinkinin ise 200 °C'nin altında olduğu görülmüştür. Üretilen biyodizele hacimsel olarak % 30 oranında su eklendiğinde oluşan karışımın emülsiyon stabilizesinin % 5 hacimsel oranında metanol eklendiğinde arttığı belirtilmiştir. 140 MPa püskürtme basıncı için % 20 oranında su içeren biyodizel-dizel-su karışımının nüfuz derinliğinin saf dizel ve biyodizel-dizel karışımına göre arttığı belirtilmiştir. Atomizasyonun ilk aşamasında, saf dizel ve saf biyodizelin sprej açılarının birbirlerine yakın olduğu ve su içeren biyodizel-dizel yakıtı karışımına göre daha fazla iken, 2 ms'den sonra mikro patlamalar neticesinde su içeren karışımın sprej açısının aniden arttığı görülmüştür. Farklı sıcaklıklarda ve (25 °C ve 380 °C) enjektörden aksel olarak 2 mm, 2,5 mm, 3 mm, 3,5 mm ve 4,0 mm uzaklıklarda, hacimsel olarak % 20 oranında su içeren biyodizel-dizel yakıtı karışımının ortalama çap değerlerinin en yüksek değeri aldığı görülmüştür. Her iki sıcaklık için de aksel uzaklık arttıkça ortalama çap değerlerinin azaldığı, 380 °C'de elde edilen ortalama çap değerlerinin 25 °C'de elde edilene göre daha az olduğu görülmüştür. Çalışmanın sonunda, suyun, yakıtın yakıt demeti özelliklerini iyileştirdiği, optimum karışımın % 74,5 oranında biyodizel, % 5 oranında metanol, % 20 oranında su ve % 0,5 oranında sürfaktan içerdiği vurgulanmıştır.

Fukuda ve diğerleri tarafından 2012'de yapılan bir çalışmada [134], saf dizel yakıtının yüksek basınçlı püskürtme sisteminde nüfuz derinliği, sprej koni açısı ve Sauter

ortama çap değerlerinin değişimleri sayısal olarak Fluent 13.0 programında incelenmiştir. Sayısal çalışmada, demet parçalanması Wave (KH) ve KH-RT hibrit modelleri, parçacık çarpışması O'Rourke algoritması, parçacık buharlaşması için ise hidrodinamik model kullanılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, turboşarjlı durumda doğal emişli duruma göre nüfuz derinliğinin azalıp koni açısının arttığı, fakat ortalama çap değerlerinin yaklaşık aynı kaldığı, KH-RT modelinde kullanılan katsayıların hesabında Wave modeli kullanıldığı için bu iki model kullanılarak elde edilen ortalama çap değerleri ve nüfuz derinlikleri sonuçlarının birbirlerine yakın olduğu, püskürtme basıncı arttıkça buharlaşma artacağı için damlacık çaplarının ve nüfuz derinliğinin azaldığı belirlenmiştir.

Ghasemi ve arkadaşları tarafından 2012'de yapılan sayısal bir çalışmada [135], saf dizel yakıtının, palm yağı biyodizelinin ve kullanılmış atık yağdan üretilmiş biyodizelin yakıt demeti karakteristikleri (nüfuz derinliği, sprej koni açısı, yakıt demeti gelişimi ve Sauter ortalama çapı), farklı püskürtme basınçları, karşı-ortam yoğunlukları, ağ yapıları ve parçalanma modelleri (Wave ve KH-RT) için incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, 1 mm · 1 mm · 0,2 mm ($1,44 \cdot 10^6$) boyutlarının ağ bağımsız sonuç verdiği görülmüştür. Tüm durumlar için püskürtme basıncının artışı ve karşı-ortam basıncının azalmasıyla nüfuz derinliğinin arttığı, biyodizellerin viskoziteleri ve yüzey gerilmeleri yüksek olduğu için saf dizel yakıtına göre daha uzun nüfuz derinliğine ve ortalama çap değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Sprej koni açısının püskürtme basıncından ziyade karşı-ortam basıncına göre değiştiği, biyodizellerin daha küçük sprej açısı değerine sahip olduğu, yüzey gerilimi düşük yakıtlarda koni açısı artarak nüfuz derinliğinin azalıp parçalanmanın daha iyi ve hızlı olduğu belirtilmiştir.

Chen ve arkadaşları tarafından 2013'te yapılan bir çalışmada [136], saf dizel yakıtının, atık kızartma yağından üretilmiş biyodizelin, bu biyodizeli % 20 oranında içeren biyodizel-dizel yakıtı karışımının (B20), jet yakıtının ve kanola yağından üretilmiş normal ve izo-alkan karışımı yenilenebilir dizel yakıtının yakıt demeti özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Damlacık çapları ve partiküllerin boyutlarının dağılımı lazer partikül analiz sistemiyle ve nüfuz derinliği ile sprej koni açısı yüksek hızlı kamera teknolojisi yardımıyla belirlenmiştir. Deneysel çalışmada 140 µm tek delik çaplı enjektör kullanılmıştır. Püskürtme basıncı 30 MPa, 50 MPa, 80 MPa ve 100 MPa olarak değiştirilmiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, tüm yakıtlar için püskürtme basıncı arttıkça ortalama çap değerlerinin sabit radyal ve aksenal bir noktada azaldığı, aynı nokta için sırasıyla saf biyodizel, B20, saf dizel yakıtı, yenilenebilir dizel yakıtı ve jet yakıtı için çap

değerlerinin azaldığı, biyodizelin yüksek viskozitesi yakıt jetinin hızını azalttığı ve yüksek yüzey gerilimi nedeniyle daha zor parçalandığı için ortalama çap değerlerinin diğer yakıtlara göre daha yüksek olduğu, ortalama çap değerlerinin değişiminde yüzey gerilimine göre viskozitenin etkisinin daha fazla olduğu, sabit püskürtme basıncı ve radyal bir nokta için tüm yakıtların ortalama çap değerlerinin aksel doğrultuda arttığı, püskürtme basıncı arttıkça tüm yakıtların damlacık boyutlarının daha dar bir aralıkta değiştiği, 30 MPa püskürtme basıncında saf biyodizel, B20 ve yenilenebilir dizel yakıtının damlacık boyutu dağılımının birbirlerine benzer ve dizel yakıtıninkine göre daha dar olduğu, her yakıt için püskürtme basıncı arttıkça nüfuz derinliğinin arttığı, her püskürtme basıncı için saf dizel yakıtının yüksek yoğunluğu ve bulk modülü nedeniyle nüfuz derinliğinin diğer yakıtlara göre daha yüksek olduğu, fakat karşı-basınç arttıkça derinlik değerlerinin azalıp birbirlerine yaklaştığı, her püskürtme basıncı durumunda B20 yakıtının saf dizel yakıtına göre viskozitesi daha fazla olduğundan artan sürtünme kuvveti nedeniyle nüfuz derinliğinin daha az olduğu, yenilenebilir dizel yakıtı ve jet yakıtının düşük yoğunluğu nedeniyle nüfuz derinliklerinin de daha az olduğu, düşük viskozitenin yüksek jet hızına dolayısıyla yüksek nüfuz derinliğine neden olduğu, tüm yakıtlar için yakıt demetinin koni açısının hava içerisine nüfuz ettikçe azaldığı ve yaklaşık 10°'de sabit kaldığı, püskürtme basıncı arttıkça koni açısının sabit kaldığı değere daha erken ulaştığı, biyodizel oranı arttıkça viskozite değerleri arttığı için koni açısının azaldığı, genel olarak sırasıyla yenilenebilir dizel yakıtı, dizel yakıtı, B20, jet yakıtı ve saf biyodizel için koni açısının azaldığı, yakıtların sprej hacimlerinin değişimi nüfuz derinliklerinin değişimleri ile benzer karakterde olduğu, son olarak püskürtme basıncı arttıkça sprej hacimlerinin de arttığı belirlenmiştir.

G. Kumar ve A. Kumar tarafından 2013'te yapılan bir çalışmada [137], mahua yağından üretilmiş biyodizelin nüfuz derinliği değerleri, farklı püskürtme basınçları (200 MPa, 250 MPa, 300 MPa ve 350 MPa) için önerilen ampirik bağıntılar kullanılarak hesaplanmış ve değerler birbirleriyle kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, nüfuz derinliğinin zamanla arttığı, püskürtme basıncının artışı ile nüfuz derinliğindeki artışın arttığı belirlenmiştir.

Khalid ve arkadaşları tarafından 2013'te yapılan bir çalışmada [138], ön ısıtmanın saf dizel yakıtının ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yakıt demeti özelliklerine (nüfuz derinliği, sprej açısı ve sprej alanı) olan etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Biyodizel saf palm yağından üretilmiş ve kütleli olarak % 5, % 10, % 15, % 20, % 25, % 30, % 35 ve

% 40 oranlarında dizel yakıtı ile karıştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, ısıtmanın olduğu ve olmadığı durumlar için, saf dizel yakıtına göre, biyodizel-dizel yakıtı karışımlarından daha büyük nüfuz derinliği, daha küçük sprej açısı ve sprej alanı değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Yakıtlar 60 °C'ye ısıtıldıklarında ise sprej açılarının, nüfuz derinliklerinin ve projeksiyon alanlarının arttığı belirlenmiştir.

Cipolat ve Valentim tarafından 2013'te yapılan bir çalışmada [139], saf dizel yakıtının ve dimetil eterin farklı püskürtme basınçları (40 MPa ve 60 MPa) ve karşı-ortam basınçlarında (1,2 MPa, 1,6 MPa ve 1,8 MPa) elde edilen deneysel nüfuz derinliği değerleri ile önerilen ampirik modellerden elde edilen değerler kıyaslanmıştır. Püskürtme başlangıcından sonra ilk 0,5 ms içerisinde, her iki modelden de elde edilen sonuçlar saf dizel yakıtının ve dimetil eterin deneysel değerlerinden daha yüksek çıkmıştır. Fakat daha sonra, saf dizel yakıtının deneysel değerlerinin her iki modelden de elde edilen sonuçlardan daha yüksek olduğu, saf dimetil eterin deneysel değerlerinin ise modellerden elde edilen sonuçlara nispeten daha yakın olduğu belirlenmiştir. Saf eter için, düşük ortam basınçlarında ve yüksek püskürtme basınçlarında, modellerden elde edilen sonuçlar ile deneysel değerler arasındaki fark azalmıştır. Saf eterin ortalama çap değerlerinin her püskürtme basıncı ve karşı-ortam basıncında dizel yakıtınınkinden daha fazla olduğu, püskürtme basıncı arttıkça ve karşı-ortam basıncı azaldıkça her iki yakıtın da çap değerlerinin azaldığı belirlenmiştir.

Mohan ve arkadaşları tarafından 2014'te yapılan bir çalışmada [140], buharlaşmanın olmadığı durum için, deneysel olarak, saf dizel yakıtının sabit hacimdeki momentum akısı, nüfuz derinliği, sprej açısı ve sprej hacmi gibi yakıt demeti özellikleri farklı püskürtme basıncında (40 MPa, 60 MPa, 80 MPa ve 100 MPa) ve karşı-hava yoğunluğunda (33 kg/m³ ve 66 kg/m³) incelenmiştir. Sprej simülasyonu için yeni bir hibrit model önerilmiştir. Bu model klasik KH-RT ile kativasyon modelini aynı anda içermektedir. Deneysel olarak elde edilen sonuçlara göre, yakıt demeti momentum akısı arttığı için nüfuz derinliği püskürtme basıncının artışıyla artmış, karşı-hava yoğunluğunun artışıyla yakıt demetinin momentum kaybetmesi nedeniyle nüfuz derinliği azalmıştır. Yakıt demeti uç hızı püskürtme basıncının artışıyla momentum akısı arttığından artmış, fakat karşı-hava yoğunluğunun artışıyla azalmıştır. Sanki dengeli durumunda, karşı-ortam basıncı ve püskürtme basıncı arttıkça sprej açısı artmıştır. Fakat püskürtme basıncının sprej açısı üzerindeki etkisinin daha az olduğu belirlenmiştir. Püskürtme basıncı arttıkça ve karşı-hava yoğunluğu azaldıkça sprej hacmi ise artmıştır. 6 MPa karşı-ortam basıncında ve 50 MPa, 100 MPa ile 150 MPa

püskürtme basınçlarında sayısal olarak kaviteasyon olayı incelendiğinde, basınç farkı arttıkça (püskürtme basıncı ve karşı-hava basıncı arasındaki) kaviteasyon nedeniyle buhar hacim yüzdesinin arttığı belirlenmiştir. Önerilen hibrit model KIVA4 programına tanıtılmış, farklı püskürtme basınçlarında (60 MPa ve 100 MPa) ve karşı-ortam yoğunluklarında (33 kg/m^3 ve 66 kg/m^3) elde edilen sayısal nüfuz derinliği değerlerinin deneysel değerlere tam uyum halinde olduğu görülmüştür. Sabit karşı-ortam basıncı (6 MPa) ve sıcaklığında (1000 K), farklı püskürtme basınçları için, Sauter ortalama çap değerleri ve sıvı yakıt uzunluğunun değişimi de incelenmiştir. Püskürtme basıncının artışıyla yakıtın momentumu arttığından sıvı yakıt uzunluğunun arttığı, fakat püskürtme basıncı çok fazla arttırıldığında bu artışın azaldığı belirtilmiştir. Çap değerlerinin ise artan püskürtme basıncı nedeniyle azaldığı belirlenmiştir. Tek bir enjektör deliği için, püskürtme basıncı (40 MPa, 60 MPa, 80 MPa, 100 MPa ve 120 MPa) arttıkça püskürtme debisinin ve momentum akısının arttığı vurgulanmıştır. Fakat momentum katsayısı (C_m) 40 MPa'dan 125 MPa'a kadar kaviteasyonun meydana gelmesi nedeniyle yaklaşık sabit kaldığı görülmüştür.

Eagle ve arkadaşları tarafından 2014'te yapılan bir çalışmada [141], farklı çaplara (90, 110, 130 ve 150 μm) sahip 4 delikli bir enjektör kullanılarak saf dizel yakıtının geçici (unsteady, transient) bölgedeki yakıt demeti özellikleri 298 K karşı-ortam sıcaklığında farklı karşı-ortam basınçları ($17,5 \text{ kg/m}^3$, $24,2 \text{ kg/m}^3$, $32,7 \text{ kg/m}^3$) ve püskürtme basınçları (100 MPa, 150 MPa and 200 MPa) için deneysel olarak incelenmiştir. 150 μm çapındaki enjektörün 150 MPa püskürtme basıncı için farklı karşı-ortam yoğunluklarında ($17,5 \text{ kg/m}^3$, $24,2 \text{ kg/m}^3$ ve $32,7 \text{ kg/m}^3$) nüfuz derinliği, nüfuz derinliği oranı (hız) ve normalize edilmiş nüfuz derinliği oranının değişimi incelendiğinde, karşı-ortam basıncı arttıkça nüfuz derinliğinin azaldığı, parçalanma süresinden önceki bölgede nüfuz derinliğinin karşı-ortam basıncından çok fazla etkilenmediği, parçalanma süresinden sonraki bölge için karşı-ortam basıncı arttıkça nüfuz derinliğinin azaldığı, en yüksek nüfuz derinliğine ulaşma süresinin (parçalanma süresi) karşı-ortam basıncıyla değişmediği görülmüştür. 150 MPa püskürtme basıncı ve farklı karşı-ortam yoğunluklarında ($17,5 \text{ kg/m}^3$, $24,2 \text{ kg/m}^3$ ve $32,7 \text{ kg/m}^3$) normalize edilmiş nüfuz derinlikleri, 90 ile 150 μm çapındaki enjektörler için kıyaslandığında, sadece $17,5 \text{ kg/m}^3$ karşı-ortam basıncındaki parçalanma süresinin 90 μm 150 μm 'dekine göre az da olsa arttığı, yani aynı karşı-ortam yoğunluklarında ($24,2 \text{ kg/m}^3$ ve $32,7 \text{ kg/m}^3$) ve püskürtme basıncında (150 MPa) parçalanma süresi değerleri 150 μm ve 90 μm 'lik enjektörler için birbirlerine çok yakın olduğu görülmüştür.

Wu ve arkadaşları tarafından 2014'te yapılan bir çalışmada [142], hacimsel olarak % 5 (N5), % 10 (N10) ve % 20 (N20) oranlarında n-butanol içeren butanol-dizel yakıtı karışımlarının yakıt demeti özellikleri (nüfuz derinliği, sprej alanı ve sprej hacmi) farklı püskürtme basınçlarında (70 MPa, 80 MPa, 90 MPa, 110 MPa, 120 MPa ve 130 MPa) ve karşı-ortam basınçlarında (1 MPa, 2 MPa ve 3 MPa) kıyaslanmıştır. % 20 oranında butanol içeren karışım için farklı püskürtme basınçlarında (80 MPa ve 120 MPa) ve karşı-ortam basınçlarında (1 MPa, 2 MPa ve 3 MPa) nüfuz derinliğinin, sprej açısının ve sprej alanının değişimi incelendiğinde, her iki püskürtme basıncında da karşı-ortam basıncı arttıkça nüfuz derinliğinin azaldığı, sprej açısının arttığı, karşı-ortam basıncının nüfuz derinliğine olan etkisinin 80 MPa püskürtme basıncında daha belirgin olduğu, 120 MPa püskürtme basıncında sprej açısının karşı-ortam basıncıyla değişiminin daha belirgin olduğu, püskürtme basıncı arttıkça sprej açısının ve alanının arttığı, sprej alanının karşı-ortam basıncıyla değişiminin 80 MPa püskürtme basıncında daha belirgin olduğu görülmüştür. N20 yakıtı ve 2 MPa karşı-ortam basıncı için farklı püskürtme basınçlarında (70 MPa, 80 MPa, 90 MPa, 110 MPa, 120 MPa ve 130 MPa) nüfuz derinliğinin, sprej açısının ve sprej alanının değişimi incelendiğinde, püskürtme basıncı arttıkça (70–90 MPa) nüfuz derinliğinin ve sprej açısının arttığı, püskürtme basıncı (110–130 MPa) daha da artırıldığında ise buharlaşma nedeniyle nüfuz derinliklerinin ve sprej açılarının değişimlerinin birbirlerine yaklaştığı görülmüştür. 2 MPa karşı-ortam basıncı ve 120 MPa püskürtme basıncı için farklı yakıtların (N5, N10 ve N20) nüfuz derinlikleri, sprej açıları ve sprej alanlarının değişimleri incelendiğinde, karışımdaki alkol oranı arttıkça viskozite azaldığından yakıt demetinin enjektörden çıkış hızı artıp nüfuz derinliğinin arttığı, karışımdaki alkol oranıyla viskozite ve yüzey gerilimi azaldığından yakıtlar daha kolay parçalandığı için sprej açısının ve sprej alanının arttığı görülmüştür.

Guan ve arkadaşları tarafından 2015'te yapılan bir çalışmada [143], soya yağı biyodizelinin, saf dizel yakıtının ve farklı hacimsel oranlarda (% 15 ve % 30) di-n butil eter içeren biyodizel-eter karışımlarının makroskopik (nüfuz derinliği, sprej açısı ve sprej projeksiyon alanı) ve mikroskopik (Sauter ortalama çapı ve istatistiksel damlacık boyutu dağılımı) yakıt demeti özellikleri, farklı püskürtme basınçlarında (60 MPa, 80 MPa ve 100 MPa) ve karşı-ortam basınçlarında (1 MPa ve 2 MPa) deneysel olarak incelenmiştir. Karşı-ortam basıncının azalması ve püskürtme basıncının artmasıyla yakıtların nüfuz derinliklerinin arttığı, saf biyodizelin nüfuz derinliğinin en yüksek değerleri aldığı, fakat biyodizele di-n butil eter ilavesiyle nüfuz derinliğinin azaldığı, eter ilavesiyle yakıtların

viskoziteleri azaldığı için ortalama sprej açı değerlerinin arttığı diğeri bir ifadeyle saf dizel yakıtı ve % 30 oranında eter içeren karışımın en yüksek açı değerlerine sahip olduğu, püskürtme basıncındaki değişimin ortalama sprej açısı değerlerini çok fazla etkilemediği, fakat karşı-ortam basıncındaki artışın sprej açısı değerlerini arttırdığı görülmüştür. Ayrıca, karşı-ortam basıncı arttıkça sprej açısı değerleri arttığından yakıtların sprej alanlarının arttığı, % 30 oranında eter içeren karışımın tüm şartlar altında en yüksek sprej alanına sahip olduğu belirlenmiştir. Son olarak, eter ilavesiyle karışımların viskozite, yoğunluk ve yüzey gerilim değerleri azaldığı için ortalama çap değerlerinin azaldığı belirlenmiştir.

Xie ve arkadaşları tarafından 2015'te yapılan bir çalışmada [144], atık yağdan üretilen biyodizeli hacimsel olarak % 20, % 50 ve % 80 oranlarında içeren biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının makroskopik yakıt demeti özellikleri (nüfuz derinliği, yakıt demeti uç ortalama hızı, sprej koni açısı, ortalama sprej açısı, yakıt demeti gelişimi, sprej alanı ve sprej hacmi) farklı püskürtme basınçlarında (60 MPa, 70 MPa, 80 MPa, 90 MPa ve 100 MPa) ve karşı-ortam basınçlarında (0,1 MPa, 0,3 MPa, 0,5 MPa, 0,7 MPa ve 0,9 MPa) common rail püskürtme donanımı yardımıyla deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel 293 K'de gerçekleştirilmiştir. Kullanılan enjektör tek delikli ve 0,3 mm çapa sahiptir. Püskürtme basıncının artışı ile nüfuz derinliği değerleri artmıştır. Karşı-hava basıncının artışı ile nüfuz derinliği önemli oranlarda azalmış ve karışımlar arasındaki nüfuz derinliği farkı azalmıştır. 80 MPa püskürtme basıncı için 0,1 MPa ve 0,3 MPa karşı-ortam basınçlarında en kısa nüfuz derinliği saf biyodizelden, en uzun nüfuz derinliği ise % 20 biyodizel oranına sahip biyodizel-dizel yakıtı karışımından elde edilmiştir. Diğeri karşı-ortam basınçlarında farklı karışımlar için elde edilen değerler ise birbirlerine çok yakın çıkmıştır. Saf biyodizelin viskozitesi ve yüzey gerilimi yüksek olduğundan yakıt ve enjektör yüzeyi arasındaki sürtünme daha fazla olacağından biyodizelin enjektör çıkış hızı azalmış bu yüzden nüfuz derinliğinin diğeri karışımlara göre azaldığı yorumlanmıştır. Söz konusu yazarlar [144] ayrıca 0,3 MPa karşı hava basıncında 60 MPa, 70 MPa, 80 MPa, 90 MPa ve 100 MPa püskürtme basınçları için deneysel olarak ölçtükleri saf dizel yakıtının nüfuz derinliği değerlerini önerilen ampirik denklemden hesaplanan değerler ile kıyaslamışlardır. Deneysel ve sayısal değerlerin birbirlerine çok iyi uyum gösterdiği belirtilmiştir. Püskürtmenin başlamasından hemen sonra ortalama uç hızı 200 m/s'ye ulaşmış, püskürtme basıncındaki dalgalanmalar nedeniyle hız değerleri de artma ve azalmalar göstermiş, daha sonra hız değerleri hızlıca 20–40 m/s'ye düşmüş ve 1,3 ms'den sonra yaklaşık olarak sabit kalmıştır. Ortalama hız değerlerine bakıldığında, rahatlıkla,

püskürtme basıncının artışı ve karşı-ortam basıncının azalmasıyla hızın arttığı görülmüştür. Ortalama sprej açılarının püskürtme basıncı ve karşı-ortam basıncı arttığında arttığı, fakat karışımdaki biyodizel oranı arttıkça azaldığı belirlenmiştir. Yakıt demeti gelişimi yüksek hızlı kameralar yardımıyla elde edilen fotoğraflardan belirlenmiştir. Karşı-ortam basıncı arttıkça yakıt demetinin aksel uzaklığının kısaldığı fakat genişliğinin arttığı dolayısıyla sprej açısının arttığı görülmüştür. Ayrıca, karşı-ortam basıncının artışıyla yakıt demetinin kararlı hale (stable stage) gelme süresinin geciktiği belirlenmiştir. Sprej alanının nüfuz derinliğinin artışı ile eksponansiyel olarak arttığı belirtilmiştir. Sabit bir karşı-basınç için, püskürtme basıncının artışıyla hem nüfuz derinliği hem de sprej açısı arttığından sprej alanının arttığı, sabit bir püskürtme basıncı için ise karşı-ortam basıncının artışı ile yine sprej açısı arttığından sprej alanının da arttığı belirlenmiştir. Sprej hacminin nüfuz derinliği arttıkça eksponansiyel olarak arttığı görülmüştür. Sabit bir karşı-ortam basıncı için, püskürtme basıncı arttığında nüfuz derinliği ve sprej açısı arttığından sprej hacminin arttığı belirtilmiştir. Aynı yakıtlar için karşı-basınç arttığında (0,1 MPa'dan 0,5 MPa'a artış) sprej hacminin nüfuz derinliğiyle değişimi püskürtme basıncından çok fazla etkilenmediği görülmüştür.

Feng ve arkadaşları tarafından 2016'da yapılan bir çalışmada [145], saf benzinin, saf etil alkolün, saf dizel yakıtının, hacimsel olarak % 20 ve % 40 oranlarında benzin içeren benzin-dizel karışımlarının, hacimsel olarak % 10 ve % 30 oranlarında benzin ve etil alkol içeren benzin-dizel-etil alkol karışımlarının yakıt demeti özellikleri farklı püskürtme basınçları (60 MPa, 90 MPa ve 120 MPa) ve karşı-ortam basınçlarında (2 MPa ve 4 MPa) deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler sırasında yakıt ve çevre ortam sıcaklıkları 293 K'de sabit tutulmuştur. Parçalanma süresinden önce tüm yakıtlardan (saf dizel yakıtı ve dizel-benzin karışımları) benzer nüfuz derinliği değerleri elde edilmiş ve süre ile doğru orantılı olarak nüfuz derinliği değerleri artmıştır. Parçalanma süresinden sonra karışımdaki benzin oranı arttıkça nüfuz derinliğinin azaldığı görülmüştür. Püskürtme basıncındaki değişimin sprej açısını çok fazla etkilemediği, karşı-ortam basıncındaki artışla yakıtların sprej açısı değerlerinin arttığı, karışımdaki benzin oranı arttıkça viskozite azaldığından dolayı sprej açılarının arttığı belirlenmiştir. Son olarak, saf dizel yakıtına benzin ilavesiyle ortalama çap değerlerinin azaldığı, benzin-dizel karışımlarına etanol ilavesi durumunda ortalama çap değerlerinin arttığı, fakat bu durumda bile saf dizel yakıtının ortalama çap değerinden daha az oldukları belirtilmiştir.

Mo ve arkadaşları tarafından 2016'da yapılan bir çalışmada [146], saf soya yağı biyodizelinin ve hacimsel olarak % 80 oranında biyodizel ve % 20 oranında bütanol içeren karışımın yakıt demeti özellikleri (nüfuz derinliği, sprej açısı, sprej alanı, sprej hacmi, damlacık dağılımı ve Sauter ortalama çap değeri) oda sıcaklığında, farklı püskürtme basınçları (60 MPa, 80 MPa ve 100 MPa) ve karşı-ortam basınçlarında (1 MPa ve 2 MPa) incelenmiştir. Saf biyodizelin bütanol içeren karışıma göre nüfuz derinliğinin daha fazla olduğu, her iki yakıt için de püskürtme basıncı arttıkça ve karşı-ortam basıncı azaldıkça nüfuz derinliklerinin arttığı, karşı-ortam basıncı arttığında yakıtların nüfuz derinliği değerlerinin birbirlerine yaklaştığı, sprej açısı değerlerinin parçalanma (kopma) süresine kadar hızlıca azaldığı ve daha sonra sabit kaldığı, karşı-ortam basıncı arttığında her iki yakıtın da sprej açısı değerlerinin arttığı, 1 MPa karşı-ortam basıncında saf biyodizelin sprej alanı değerinin bütanol içeren karışıma göre daha fazla olduğu, 2 MPa karşı-ortam basıncında ise yakıtlardan benzer sprej alanı değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Son olarak, her iki yakıt için de, yakıt demetinin merkezinde yakıt damlacık çapının küçük, fakat yoğunluğunun daha fazla, yakıt demetinin sınırlarına doğru gidildikçe yakıt damlacık çapının büyük fakat yoğunluğunun daha az olduğu belirlenmiştir.

Fu ve arkadaşları tarafından 2017'de yapılan bir çalışmada [147], saf dizel yakıtının (DY), soya yağı biyodizelinin (B100) ve farklı hacimsel oranlarda (% 15 ve % 30) etanol içeren biyodizel-etanol karışımlarının (BDE15 ve BDE30) yakıt demeti özellikleri (nüfuz derinliği, sprej açısı ve sprej uç hızı) deneysel olarak belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar önerilen bazı ampirik modeller ile kıyaslanmıştır. Farklı karşı-ortam basınçları (1,6 MPa ve 2 MPa) ve püskürtme basınçlarında (80 MPa ve 100 MPa) yakıtların nüfuz derinliği değerleri en yüksekten en düşüğe doğru B100, BDE15, BDE30 ve DY olarak sıralanmıştır. Saf biyodizelin viskozitesi ve yüzey gerilimi diğer yakıtlarından daha fazla olduğu için en yüksek nüfuz derinliği değerine sahip olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, düşük karşı-ortam basınçlarında yakıtların nüfuz derinlikleri arasındaki farklılıkların daha belirgin olduğu belirlenmiştir. Aynı karşı-ortam basınçları (1,6 MPa ve 2 MPa) ve püskürtme basınçlarında (80 MPa ve 100 MPa), BDE15 ve BDE30 yakıtlarının en yüksek, saf biyodizelin ise en düşük sprej açısı değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Yakıt demeti pik hızlarının ise en yüksekten en düşüğe doğru B100, DY, BDE15 ve BDE30 şeklinde sıralandığı belirtilmiştir. Biyodizelin yoğunluğu ve yüzey gerilimi değerleri yüksek olduğundan en yüksek yakıt demeti pik hızına sahip olduğu vurgulanmıştır. Tüm yakıtların yakıt demeti pik hızlarının karşı-ortam basıncı azaldığında ve püskürtme basıncı arttığında arttığı

belirtilmiştir. Son olarak, karşı-ortam yoğunluğu arttığında ve püskürtme basıncı azaldığında yakıtların Sauter ortalama çap değerlerinin arttığı, viskozite, yoğunluk ve yüzey gerilimi gibi fiziksel özelliklerin Sauter ortama çap değerini etkilediği fakat viskozitenin daha fazla etkili olduğu, yoğunluk, viskozite ve yüzey gerilimi değerleri en fazla olan saf biyodizelin en yüksek ortalama çap değerlerine sahip olduğu belirtilmiştir. Etanol içeriği arttığında ise yakıtların ortalama çap değerlerinin azaldığı görülmüştür.

Mohan ve arkadaşları tarafından 2017’de yapılan bir çalışmada [148], dimetil eterin ve dietil eterin yakıt demeti özellikleri sayısal olarak KIVA 4 programı kullanılarak incelenmiş, kativasyon özellikleri ise Fluent programında incelenmiştir. Çalışmada, KH-RT ve kativasyon modellerinin birlikte kullanıldığı yeni bir hibrit model önerilmiştir. Saf dizel yakıtı için 50 MPa ve 100 MPa püskürtme basınçlarında, 3 MPa ve 6 MPa karşı-ortam basınçlarında nüfuz derinliğinin değişimi sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Sabit püskürtme basıncında karşı-ortam basıncı arttıkça nüfuz derinliği azalırken, sabit karşı-ortam basıncında püskürtme basıncı arttıkça nüfuz derinliğinin arttığı belirlenmiştir. Yeni hibrit model kullanılarak elde edilen sayısal sonuçların deneysel sonuçlar ile tam uyum içinde olduğu görülmüştür. Ayrıca, 70 MPa püskürtme basıncı için 1 MPa ve 3 MPa karşı-ortam basınçlarında dimetil eterin nüfuz derinliği değişimi sayısal ve deneysel olarak incelendiğinde yine tam uyumun olduğu belirlenmiştir. Söz konusu üç yakıtın püskürtme hızları kıyaslandığında, eterlerin düşük viskoziteleri nedeniyle dizel yakıtından daha yüksek püskürtme hızlarına sahip olduğu görülmüştür. Eterlerin ve saf dizel yakıtının 100 MPa püskürtme basıncı ve 3 MPa karşı-ortam basıncında nüfuz derinliği ve ortalama çap değerleri de deneysel olarak incelenmiştir. Dizel yakıtının yüksek viskozitesi nedeniyle eterlere göre daha yüksek nüfuz derinliğine sahip olduğu görülmüştür. Her üç yakıtın da püskürtme süresiyle ortalama çap değerlerinin azaldığı, fakat eterlerin düşük viskozite ve yüzey gerilimi ile yüksek buhar basıncı nedeniyle damlacık çaplarının daha hızlı bir şekilde azaldığı fark edilmiştir. Diğer taraftan etil eterin yüksek yüzey gerilimi nedeniyle ortalama çap değerlerinin metil eterden daha yüksek olduğu görülmüştür. Son olarak, her üç yakıtın Ohnesorge-Reynolds sayısı grafiği 50 MPa, 100 MPa ve 150 MPa püskürtme basıncı ve 3 MPa karşı-ortam basıncı için incelenmiştir. Eterlerin ve saf dizel yakıtının her üçü de atomizasyon rejiminde olsa da, atomizasyon seviyelerinin farklı olduğu belirtilmiştir. Dizel yakıtıyla kıyaslandığında, aynı püskürtme basıncı için, yüksek Reynolds sayısı ve düşük Ohnesorge sayısına sahip eterlerin dizel yakıtına göre daha iyi atomize olduğu belirtilmiştir.

Jing ve arkadaşları tarafından 2017’de yapılan bir çalışmada [149], hacimsel olarak % 20 (G20), % 50 (G50) ve % 70 (G70) oranlarında benzin (G100) içeren dizel-benzin karışımı yakıtların mikroskobik (damlacık boyutu ve hızı) ve makroskopik (nüfuz derinliği ve sprey açısı) yakıt demeti özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır. 296 K karşı-ortam sıcaklığı için püskürtme basıncı 50 MPa, 75 MPa, 100 MPa, 125 MPa ve 150 MPa, karşı-ortam basıncı ise 0,1 MPa, 1,5 MPa ve 3 MPa olarak değiştirilmiştir. Deneylede, çapları 0,15 mm olan 7 delikli selenoid tek enjektör kullanılmıştır. 50 MPa püskürtme basıncı ve 1,5 MPa karşı-ortam basıncında saf dizel, G50 ve G100’ün yakıt demeti fotoğrafları incelendiğinde, benzinin yoğunluğu ve viskozitesi dizele göre daha düşük olduğundan, karışımdaki benzin oranı arttıkça nüfuz derinliğinin azaldığı görülmüştür. 50 MPa ve 100 MPa püskürtme basınçları ile 1,5 MPa ve 3 MPa karşı-ortam basınçları için saf dizel, G20, G50, G70 ve G100 yakıtlarının nüfuz derinliği grafikleri incelendiğinde, parçalanma süresinden önceki nüfuz derinliği değerlerinin benzer olduğu, karışımdaki benzin oranı arttıkça nüfuz derinliğinin azaldığı ayrıca benzinin buhar basıncı yüksek olduğu için kativasyon özelliğinin yüksek olduğu bu yüzden karışımdaki benzin oranı arttıkça atomizasyonun iyileştiği belirtilmiştir. Aynı püskürtme basıncı için karşı-ortam basıncı arttığında tüm yakıtların nüfuz derinliği değerlerinin birbirlerine yaklaştığı belirlenmiştir. Ayrıca, karşı-ortam basıncı ve püskürtme basıncı arttığında saf dizel yakıtının nüfuz derinliği değişiminin saf benzine göre daha fazla olduğu görülmüştür. Saf dizel, G50 ve G100 için farklı püskürtme basınçlarında (50 MPa ve 100 MPa) ve karşı-ortam basınçlarında (1,5 MPa ve 3 MPa), karşı-ortam basıncının nüfuz derinliğine olan etkisi incelenmiş, parçalanma süresinden önce karşı-ortam basıncının artışıyla nüfuz derinliğinin çok fazla etkilenmediği, parçalanma süresinden sonra karşı-ortam basıncı arttıkça nüfuz derinliğinin azaldığı, G100 daha kolay atomize olduğundan ve parçalanma işleminin büyük bir bölümü parçalanma süresinden önceki bölgede gerçekleştiğinden saf dizel ve G50’ye göre G100’ün nüfuz derinliğinin karşı-ortam basıncının artışıdan çok fazla etkilenmediği görülmüştür. 1,5 MPa karşı-ortam basıncı ve farklı püskürtme basınçlarında (50 MPa, 75 MPa ve 100 MPa) G50 ve G100’ün nüfuz derinliği değişimleri incelendiğinde, püskürtme basıncı arttıkça her iki yakıt için de nüfuz derinliğinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, karşı-ortam basıncından ziyade püskürtme basıncı direkt olarak sıvı hızını ve momentumunu olumlu yönde etkilediğinden, püskürtme basıncının nüfuz derinliğine olan etkisinin karşı-ortam basıncına göre daha fazla olduğu görülmüştür. 1 atm karşı-ortam basıncında enjektörden aksel olarak 40 mm uzaklıkta farklı püskürtme basınçlarında (50 MPa, 75

MPa ve 100 MPa), yakıtların (G0, G20, G40, G70 ve G100) ortalama çap değerleri kıyaslandığında, püskürtme basıncı ve benzin oranı arttıkça ortalama çap değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Bu durumun benzinin yoğunluk ve viskozitesinin daha düşük olmasından ve buhar basıncının yüksek olması nedeniyle kavitasyon özelliğinin yüksek olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. 1 atm karşı-ortam basıncı ve enjektörden aksel olarak 40 mm uzaklık için farklı püskürtme basınçlarında (50 MPa ve 100 MPa) farklı yakıtların (G0, G20, G50, G70 ve G100) ortalama aksel hızları kıyaslandığında, beklenildiği gibi, karışımındaki benzin oranı arttıkça hızın azaldığı, bu azalmanın daha iyi atomizasyon ve parçalanma özelliği olan benzin damlacıklarının kinetik enerjilerinin azalmasından dolayı kaynaklandığı, püskürtme basıncı arttığında yakıtların hız değişimlerinin birbirine yaklaştığı görülmüştür. 1 atm karşı-ortam basıncı ve enjektörden aksel olarak 40 mm uzaklık için farklı yakıtların (G0, G50 ve G100) ortalama çap değerlerinin püskürtme basıncıyla (50 MPa, 75 MPa, 100 MPa ve 125 MPa) değişimleri incelendiğinde, ortalama çap değerlerinin her üç yakıt için de 50 MPa'dan 75 MPa'a kadar hızlıca azaldığı, fakat bu basınç değerden sonra basınç arttıkça çap değerlerinin çok az azaldığı görülmüştür. 1 atm karşı-ortam basıncında ve 75 MPa püskürtme basıncında G50 yakıtının farklı aksel uzaklıklardaki (10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm ve 50 mm) ortalama damlacık çap değerlerinin değişimleri incelendiğinde, püskürtülmenin olduğu ilk anlarda damlacık hızının çok fazla olduğu ve zamanla aniden azaldığı görülmüştür. Son olarak, yakıt demetinin çevresine göre merkezinde damlacık hızı ve türbülansın çok yoğun olduğu, bu yüzden yoğun parçalanma oranına maruz kaldıklarından damlacıkların çaplarının daha küçük olduğu, çevredeki (yine yakıt demeti merkezine yakın) damlacıkların hızları daha düşük olduklarından parçalanmaya daha düşük dolayısıyla çaplarının daha büyük olduğunu belirtilmiştir.

Yi ve arkadaşları tarafından 2017'de yapılan bir çalışmada [150], saf bütül alkolün nüfuz derinliği ve sprej açısı deneysel olarak belirlenmiş ve saf dizel yakıtıyla kıyaslanmıştır. Püskürtme basıncı 70 MPa, 90 MPa ve 110 MPa, karşı nitrojen basıncı 2,0 MPa ve 3,0 MPa olarak değiştirilmiştir. Yakıt sıcaklığı ve karşı-ortam sıcaklığı 290 K olarak sabit tutulmuştur. Saf bütül alkolün daha düşük viskoziteye sahip olmasından dolayı enjektör içi sürtünmelerin azalıp başlangıç jet hızı yüksek olduğundan nüfuz derinliği saf dizel yakıtıninkine göre daha yüksek çıkmıştır. Her üç püskürtme basıncı için de karşı-basınç arttığında yakıtların nüfuz derinliklerinin azaldığı, her üç karşı-basınç için de püskürtme basıncı arttığında yakıtların nüfuz derinliklerinin arttığı, her püskürtme basıncı

ve karşı-ortam yoğunluğu için saf bütanolün nüfuz derinliğinin saf dizele göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, aynı karşı-ortam basıncında, bütanol ve dizel yakıt arasındaki nüfuz derinliği farkı, püskürtme basıncı arttıkça azalmıştır. Bu azalmanın nedeni olarak, püskürtme basıncı artıp karşı-ortam basıncıyla arasındaki fark arttığında yakıtlar için enjektör içi sürtünme etkilerinin azalması gösterilmiştir. Püskürtme süresiyle birlikte, öncelikle yakıtların sprey açılarının belirli bir maksimum değerlere kadar arttığı, daha sonra birincil parçalanmanın etkisiyle açı değerlerinin hızlıca azaldığı ve yaklaşık sabit kaldığı görülmüştür. Her iki yakıtın sprey açı değerleri birbirlerine çok yakın olmakla birlikte, saf bütanolün yüzey geriliminin ve viskozitesinin daha düşük olması nedeniyle açı değerlerinin az da olsa yüksek olduğu, her iki yakıt için de karşı-ortam basıncı arttığında açı değerlerinin arttığı, fakat püskürtme basıncının artışla açı değerlerinin çok fazla değişmediği görülmüştür. Bütanolün viskozitesi ve yüzey gerilimi daha düşük olduğundan kolayca deforme olup parçalandığından parçalanma süresinin dizel yakıtınınkinden daha kısa olduğu belirlenmiştir. Püskürtme basıncının artışıyla hidrodinamik düzensizliklerin artması nedeniyle her iki yakıt için de püskürtme süresinin kısaldığı görülmüştür. Söz konusu araştırmacılar [150] nüfuz derinliğini iki aşamada incelenmişlerdir. Parçalanma süresinden daha kısa sürelerde yakıt yoğunluğunun daha etkili olduğunu ve nüfuz derinliğinin değişim doğrusunun eğiminin daha fazla olduğunu, parçalanma süresinden daha uzun sürelerde ise karşı-hava yoğunluğunun daha etkili olduğu ve nüfuz derinliğinin değişimi doğrusunun eğiminin daha az olduğunu (süreyle karekök mertebesinde değişim) tespit edilmiştir. Son olarak, farklı karşı-ortam basınçlarında (2 MPa ve 3 MPa) ve püskürtme basınçlarında (70 MPa, 90 MPa ve 110 MPa), yakıtların nüfuz derinlikleri için elde edilen deneysel değerler önerilen ampirik model ile kıyaslanmış ve parçalanma süresinden daha uzun sürelerde elde edilen sayısal değerlerin deneysel değerlerden uzaklaşması haricinde söz konusu modelin iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Zhan ve arkadaşları tarafından 2018'de yapılan bir çalışmada [151], saf dizel yakıtının, hacimsel olarak % 20 oranında soya yağı biyodizelini içeren biyodizel-dizel yakıtı karışımının ve hacimsel olarak % 20 oranında di etil eter ve etil alkol içeren biyodizel-dizel-eter ve biyodizel-dizel-alkol karışımlarının yakıt demeti özellikleri (nüfuz derinliği, sprey koni açısı, sprey projeksiyon alanı ve ortalama çap değerleri) farklı püskürtme basınçları (50 MPa, 100 MPa, 150 MPa ve 200 MPa) ve karşı-ortam basınçlarında (2 MPa ve 4 MPa) deneysel olarak belirlenmiştir. Yüksek viskozite ve yüzey gerilimi nedeniyle biyodizel-dizel yakıtı karışımları en yüksek nüfuz derinliği değerlerine

sahiptir. Tüm yakıtlar için, püskürtme basıncı arttıkça yakıt demeti jetinin ilk hızı artacağından nüfuz derinliği artan püskürtme basıncıyla artış göstermiştir. 200 MPa püskürtme basıncı ve 2 MPa karşı-ortam basıncında yakıtların ortalama spreyci açıları karşılaştırıldığında, biyodizel-dizel yakıtı karışımının ve saf dizel yakıtının spreyci açısı değerlerinin birbirlerine yakın olduğu, dizel-biyodizel-etanol karışımının ise en yüksek açı değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Son olarak, püskürtme basıncı arttıkça ve karşı-ortam basıncı azaldıkça yakıtların ortalama çap değerlerinin azaldığı ve eter içeren karışımın daha küçük çap değerlerine sahip olduğu belirtilmiştir.

1.5. Tez Çalışmasının Amacı ve Kapsamı

Dünyanın sadece bazı bölgelerindeki kaynaklara bağlı olmadan atık bitkisel ve hayvansal yağlardan bile kolayca üretilebilen, yenilenebilir, çevreye daha az emisyon (karbonmonoksit, is, hidrokarbon) salan, sera etkisine neden olmayan, aromatik ve kanserojen maddeleri hemen hemen hiç içermeyen biyodizelin, özellikle son yıllarda ülkemizde ve birçok Avrupa ülkesinde, üretimi ve kullanımı teşvik edilmektedir.

Yapılan literatür araştırması çalışmasından yola çıkılarak, biyodizel üretimi konusunda farklı yağ, katalizör ve alkol kullanılarak birçok çalışmanın gerçekleştirildiği belirlenmiştir. Fakat, bu çalışmalarda, transesterifikasyon reaksiyonuna etki eden parametrelerin (katalizör türü ve oranı, reaksiyon sıcaklığı, reaksiyon süresi ve alkol/yağ mol oranı) üretilen biyodizelin viskozitesine olan doğrudan etkileri neredeyse hiç incelenmemiş, çoğunlukla metil ester verimine olan etkileri incelenmiştir. Biyodizel yakıtının viskozitesi, yakıt demeti atomizasyonunu, dolayısıyla motor performansını ve eksoz emisyonlarını etkileyen en önemli parametredir. Biyodizel yakıtının üretimi kadar yakıt demetinin incelenmesi de önemli bir konudur. Yapılan literatür araştırması çalışmasından, yakıt demeti özellikleri konusunda, biyodizeli ve farklı biyodizel-dizel yakıtı karışımlarını esas alan bazı parametrik çalışmaların olduğu görülmüştür. Fakat, yakıt demetinin karakteristiğini (nüfuz derinliği, Sauter ortalama damlacık çapı, spreyci koni açısı ve spreyci hacmi) etkileyen tüm faktörlerin (püskürtme basıncı, karşı-hava yoğunluğu, yakıt sıcaklığı, biyodizel oranı ve enjektör delik çapı) kapsamlı olarak incelendiği bir çalışmaya literatürde pek rastlanmamıştır. Literatürdeki çalışmalar, yöntemsel olarak, genellikle bir veya iki parametrenin sabit tutulup, diğerlerinin değiştirildiği türdendir. Bu durum,

literatürdeki çalışmaların kapsamının kısıtlı kalmasına neden olmuştur. Diğer bir anlatımla, yakıt demeti karakteristiklerine etki eden faktörler ayrıntılı olarak incelenememiştir.

1.5.1. Tez Çalışmasının Amacı

Sunulan bu tez çalışmasında; biyodizel üretimi ve biyodizelin yakıt demeti karakteristiklerinin incelenmesi ile ilgili literatürdeki söz konusu ayrıntılı olarak özetlenen eksiklikleri gidererek ve böylece biyodizelin en önemli yetersizliklerine çözümler getirmeye çalışılarak (yani saf dizel yakıtının yakıt demeti karakteristiğine benzer karakteristik elde edilmeye çalışılarak), biyodizelin kullanım potansiyelinin artırılması amaçlanmıştır.

1.5.2. Tez Çalışmasının Kapsamı

Bu tez çalışması kapsamında, atık kızartma yağından toplamda 162 farklı biyodizel yakıt numunesi üretilmiştir. Saf biyodizelin, biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının ve saf dizel yakıtının yakıt demeti özellikleri hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemiyle (CFD-Ansys Fluent) incelenmiştir. Çalışma kapsamında incelenmiş olan; katalizörler, karışım oranları ile transesterifikasyona ve yakıt demeti karakteristiklerine etki eden parametreler aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

- Kullanılan alkol: Metanol (CH_3OH)
- Kullanılan katalizör: Sodyum metoksit (CH_3ONa) ve potasyum metoksit (CH_3OK)
- Katalizör oranı: % 0,75, % 1,00 ve % 1,25
- Reaksiyon sıcaklığı: 50 °C, 55 °C ve 60 °C
- Reaksiyon süresi: 30, 60 ve 90 dakika
- Alkol/yağ mol oranı: 3:1, 6:1 ve 9:1
- Karışım yakıtları: % 5 (B5), % 10 (B10), % 15 (B15) ve % 20 (B20)
- Yakıt demeti karakteristikleri: Nüfuz derinliği, Sauter ortalama damlacık çapı, sprey açısı ve sprey hacmi
- Püskürtme basınçları: 100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa
- Enjektör delik çapları: 0,08 mm, 0,16 mm, 0,32 mm ve 0,64 mm

- Karşı-hava yoğunlukları: 15 kg/m^3 ve 30 kg/m^3
- Yakıt sıcaklıkları: 295,15 K, 309,15 K, 311,15 K, 315,15 K, 319,15 K, 329,15 K, 332,15 K, 341,15 K, 345,15 K, 349,15 K, 350,15 K, 367,15 K ve 382,15 K.



2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1. Deneylerde Kullanılan Cihazlar

Biyodizel üretiminde ve üretilen biyodizellerin ile biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklardaki yoğunluk, viskozite ve yüzey gerilimlerinin belirlenmesinde, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İçten Yanmalı Motorlar Laboratuvarı'nda hazır bulunan cihazlar kullanılmıştır. Bu cihazlar ve resimleri aşağıda verilmiştir:

a) Hassas terazi

Şekil 2.1'de görülen Avery Berkel CB062-10ABAAGA marka hassas terazi 0,01 g hassasiyete sahiptir ve biyodizel üretiminde kullanılan kimyasalların kütlelerinin ölçümünde kullanılmıştır.



Şekil 2.1. Hassas terazi

b) Manyetik karıştırıcılı ısıtıcı

Şekil 2.2’de görülen Dragon-Med MS7-H550-PRO marka manyetik karıştırıcılı ısıtıcı transesterifikasyon reaksiyonunun gerçekleştirilmesinde yani biyodizel üretiminde kullanılmıştır.



Şekil 2.2. Manyetik karıştırıcılı ısıtıcı

c) Düşen top viskozimetresi

Üretilen saf biyodizellerin ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskoziteleri, B-79-282 Haake Falling Ball marka viskozimetre (Şekil 2.3) ve 0,001 saniye hassasiyetindeki kronometre (Şekil 2.4) kullanılarak ölçülmüştür.



Şekil 2.3. Düşen top viskozimetresi ve bilyeler



Şekil 2.4. Kronometre

d) Su banyosu

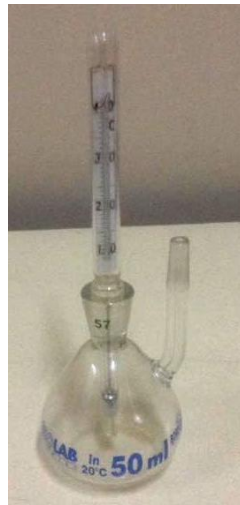
Üretilen saf biyodizellerin ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklardaki yoğunlukları ve dinamik viskoziteleri, Haake F3-80681 marka sabit sıcaklık su banyosu (Şekil 2.5) yardımıyla belirlenmiştir. Söz konusu su banyosu, düşen top viskozimetresi ile birlikte çalıştırılmıştır.



Şekil 2.5. Su banyosu

e) Piknometre

ISOLAB marka termometreli piknometre (Şekil 2.6) yardımıyla saf biyodizellerin ve biyodizel-dizel yakıt karışımlarının yoğunlukları ölçülmüştür.



Şekil 2.6. Piknometre

f) Stalogmometre

Stalogmometre (Şekil 2.7) kullanılarak, belirlenen şartlara göre üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının (B5, B10, B15 ve B20) yüzey gerilimleri ölçülmüştür.



Şekil 2.7. Stalogmometre

2.2. Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

a) Atık kızartma yağı

Biyodizel üretiminde kullanılan atık kızartma yağı ücretsiz olarak temin edilmiştir.

b) Metil alkol

Transesterifikasyon reaksiyonunda yani biyodizel üretiminde alkol olarak % 99,90 saflıktaki metil alkol (CH_3OH) kullanılmıştır. Söz konusu alkolün bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 2.1’de verilmiştir [2].

Tablo 2.1. Biyodizel üretiminde kullanılan alkolün bazı özellikleri

Kimyasal formülü	CH ₃ OH (MeOH)
Molekül kütlesi, [g/mol]	32,04
20 °C'de yoğunluk, [g/cm ³]	0,7918
20 °C'de dinamik viskozite, [mPa. s]	0,59
Parlama noktası sıcaklığı, [°C]	11-12
Kaynama noktası sıcaklığı, [°C]	64,7

c) Sodyum ve potasyum metoksit

Transesterifikasyon reaksiyonunda bazik katalizör olarak sodyum (CH₃ONa) ve potasyum metoksit (CH₃OK) kullanılmıştır [152, 153].

2.3. İncelenen Reaksiyon Parametreleri

Atık kızartma yağı biyodizeli üretimi aşamasında, alkol olarak metanol (CH₃OH), katalizör olarak ise sodyum metoksit (CH₃ONa) ve potasyum metoksit (CH₃OK) kullanılmıştır. Transesterifikasyon reaksiyonunda kullanılan alkolün zincir uzunluğu arttıkça üretilen biyodizelin viskozitesi artmakta, reaksiyon sonunda elde edilen üründen gliserin fazının ayrışması zorlaşmakta ve katalizörün alkol içerisindeki çözünürlüğü azalmaktadır [2]. Bu yüzden sunulan tezde, en kısa zincirli alkol olan metanol kullanılmıştır. Katalizör olarak ise, literatürde genellikle sodyum hidroksit, sodyum metoksit, potasyum hidroksit ve potasyum metoksit kullanılmaktadır. Fakat, literatürdeki çalışmalardan, sodyum metoksit (CH₃ONa) ve potasyum metoksit (CH₃OK) katalizörlerinin, sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH) katalizörlerine göre daha etkili olduğu görülmüştür. Bu yüzden sunulan tezde, katalizör olarak CH₃ONa ve CH₃OK kullanılmıştır. Gerçekleştirilen ön çalışmada, standart titrasyon yöntemi ile kullanılan atık yağın asit değeri limit değerlerin altında olduğu belirlendiği için bazik katalizör kullanımında sorun yaşanmamıştır. “Literatür özeti” kısmında verilen “bazik katalizörlerden biyodizel üretimi” ile ilgili çalışmalar incelendiğinde [66-78, 154-158], genellikle katalizör oranı için % 0,75 ila % 1,25, reaksiyon sıcaklığı için 50 °C ila 60 °C, reaksiyon süresi için 30 dakika ila 90 dakika ve alkol/yağ mol oranı için 3:1 ila 9:1 aralığında üretilen biyodizellerin uluslararası standartlara (EN 14214 ve ASTM D6751) uygun olduğu görülmüştür. Bu yüzden, sunulan tezde,

- Katalizör türü: Sodyum metoksit (CH₃ONa) ve potasyum metoksit (CH₃OK)

- Alkol türü: Metanol (CH₃OH)
- Katalizör oranı: Kullanılan atık yağın kütlesinin % 0,75, % 1,00 ve % 1,25'i
- Reaksiyon sıcaklığı: 50 °C, 55 °C ve 60 °C
- Reaksiyon süresi: 30, 60 ve 90 dakika
- Alkol/yağ mol oranı: 3:1, 6:1 ve 9:1 olarak seçilmiştir.

Gülüm ve arkadaşları tarafından 2015'te yapılan çalışmalardan [74, 158] elde edilen deneyimler neticesinde, düşük katalizör oranları kullanımında transesterifikasyon reaksiyonu yeterince katalizlenemediğinden ve yüksek oranlarda katalizör kullanımında ise sabunlaşma reaksiyonları meydana geldiğinden, üretilen biyodizellerin özelliklerinin ilgili uluslar arası standartları karşılayamadığı belirlenmiştir. Bu yüzden, seçilen % 0,75 – % 1,25 katalizör oranı aralığı uygun bir aralıktır. Kullanılan alkole bağlı olmakla birlikte, düşük reaksiyon sıcaklıklarında sabit bir reaksiyon süresi için transesterifikasyon reaksiyonunun yeterince gerçekleşmemesi (yani trigliseritlerin yeterince esterlere dönüşmemesi) ve yüksek reaksiyon sıcaklıklarında ise reaksiyon ortamında bulunan alkolün buharlaşması, üretilen biyodizellerin yakıt özelliklerinin standartları yakalayamamasına neden olmaktadır. Dolayısıyla, alkolün buharlaşma sıcaklığı (metanol için 64,7 °C) da dikkate alındığında, 50 °C – 60 °C aralığı uygun bir sıcaklık aralığıdır. Reaksiyon sıcaklığını metanolün buharlaşma noktası sıcaklığı olan 64,7 °C'ye yakın değerlere çıkarmak sakıncalıdır. Kısa reaksiyon sürelerinde transesterifikasyon reaksiyonuna yeterli süre verilmediğinden ve reaksiyon süresi aşırı uzatıldığında ise meydana gelen esterlerin tekrar hidrolizlenerek sabunlaşması nedeniyle, üretilen biyodizellerin kimyasal ve fiziksel özellikleri standartları sağlayamamaktadır. Fakat, çok yüksek olmayan sıcaklıklarda ve katalizör oranlarında ise kısa reaksiyon süreleri gerekli biyodizel dönüşümünü sağlayabilmektedir. Bu yüzden, hem çok kısa hem de çok uzun olmayacak şekilde seçilen, 30, 60 ve 90 dakika aralığı uygun bir reaksiyon süresi aralığıdır. Transesterifikasyon reaksiyonunda stokiometrik olarak 1 mol yağ için 3 mol metil alkol kullanılması gerekmektedir. Fakat, literatürdeki çalışmalar ve tarafımızca gerçekleştirilen incelemeler neticesinde, 3:1 mol alkol kullanımında üretilen biyodizellerin standartlara uygun olmadığı tespit edilmiştir. Yüksek mol oranlarında alkol kullanıldığında ise ester fazı ile gliserin fazının ayrışmasının zorlaşması reaksiyonu girenler yönüne kaydırmakta ve bu durum üretilen biyodizelin dönüşüm oranını azaltmaktadır. Bu yüzden, 3:1, 6:1 ve 9:1 alkol/yağ mol oranı aralığı makul bir aralık olarak seçilmiştir [158].

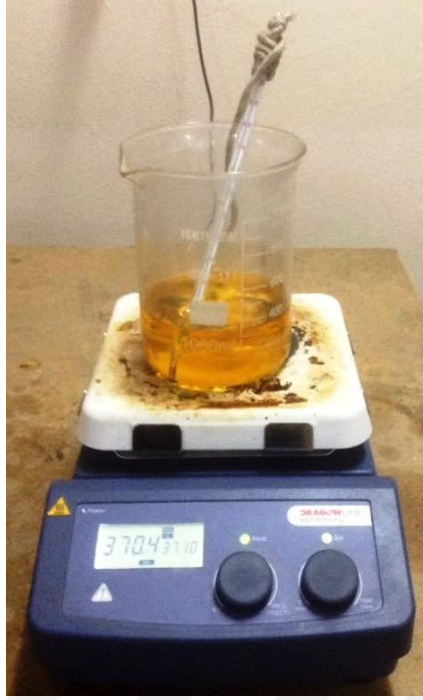
Sonuç olarak, yukarıda belirtilen transesterifikasyon reaksiyonuna etki eden parametrelerin, üretilen biyodizelin viskozitesine olan etkileri tam bir matris şeklinde incelenmiş ve biyodizel üretimi gerçekleştirilmiştir. Bunun için, tek bir alkol-katalizör çifti için (örneğin metanol ve potasyum metoksit kullanımında) $3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81$ adet (3 farklı katalizör oranı, reaksiyon sıcaklığı, reaksiyon süresi ve alkol/yağ mol oranı olduğundan) deney yapılmış dolayısıyla 81 adet biyodizel numunesi üretilmiştir. Her bir alkol-katalizör çifti için 81 adet deney olmak üzere, toplamda $81 \times 2 = 162$ adet (metanol-potasyum metoksit ve metanol-sodyum metoksit) farklı biyodizel üretilmiştir. Son olarak, optimum parametrelere göre üretilen biyodizelin yakıt özellikleri, ulusal ve uluslararası kuruluşlar tarafından akredite edilmiş olan KTÜ Saadettin GÜNER Yakıt Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde ölçtürülmüştür.

2.4. Biyodizel Üretimi

Biyodizel üretiminde kullanılan atık kızartma yağının serbest yağ asidi içeriği ve su içeriği (600 mg/kg) değerleri, DIN 51605 standardındaki ilgili limit değerlerinden [159] daha küçük olduğundan dolayı, transesterifikasyon reaksiyonunda bazik katalizörler (sodyum metoksit ve potasyum metoksit) kullanılmıştır. Biyodizel üretiminin aşamaları aşağıda açıklanmıştır:

a) Atık yağın tartılması ve ısıtılması

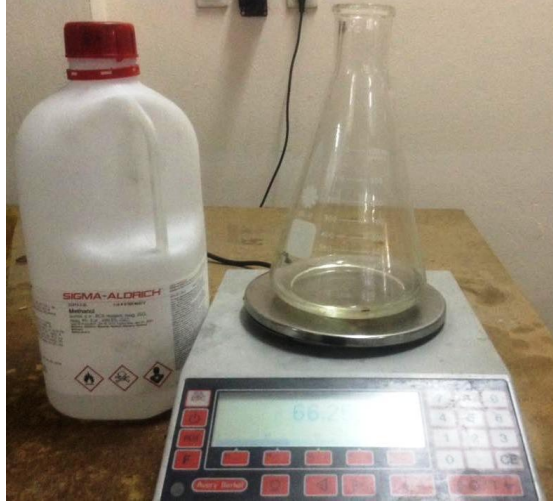
Atık kızartma yağı, filtreden geçirilip süzöldükten sonra hassas terazi yardımıyla tartılmıştır. Manyetik karıştırıcılı ısıtıcıyla ısıtılmış (Şekil 2.8) ve reaksiyon kabına alınmıştır.



Şekil 2.8. Atık kızartma yağının ısıtılması

b) Katalizör-alkol çözeltisinin hazırlanması

Yukarıda belirtilen katalizör oranına bağlı olarak sodyum metoksit veya potasyum metoksit ile, yine yukarıda belirtilen alkol/yağ mol oranına bağlı olarak metil alkol tartılmıştır (Şekil 2.9). Tartılan alkol ve katalizör bir erlenin içerisinde manyetik karıştırıcı ısıtıcı yardımıyla sadece karıştırılıp katalizör-alkol karışımı meydana getirilmiştir. Hazırlanan bu karışım, reaksiyon kabında bulunan ısıtılmış atık kızartma yağına yavaşça eklenmiştir.



Şekil 2.9. Alkolün (CH_3OH) tartılması

c) Bazik katalizörlü transesterifikasyon reaksiyonu ve ayırma işlemi

Manyetik karıştırıcı ısıtıcı yardımıyla hem ısıtılıp hem de karıştırılan yağ ve katalizör-alkol çözeltisinin, reaksiyon sıcaklığına gelmesi beklenmiştir. Karışım (yağ ve katalizör-alkol çözeltisi) reaksiyon sıcaklığına geldiğinde süre başlatılmıştır. Reaksiyon süresi boyunca sabit bir reaksiyon sıcaklığında, söz konusu yağ ve katalizör-alkol çözeltisi geri soğutucu altında karıştırılmıştır. Reaksiyon sıcaklığının reaksiyon süresi boyunca sabit kalması için termometre yardımıyla yağ ve katalizör-alkol çözeltisinin sıcaklığı sürekli kontrol edilmiştir. Reaksiyon esnasında az da olsa alkol kaybının meydana gelmemesi için transesterifikasyon geri soğutucu altında gerçekleştirilmiştir. Reaksiyon sonunda meydana gelen ürün ayırma hunisine alınarak yaklaşık bir gün beklenip net bir faz ayrımının meydana gelmesi beklenmiştir. Bir günün sonunda Şekil 2.10'da görüldüğü gibi, ayırma hunisinde, metil esteri içeren üst faz ile gliserin, katalizör, reaksiyona girmemiş atık yağ ve alkolü içeren alt faz meydana gelmiştir. Alt faz ayırma hunisinin musluğu yardımıyla üst fazdan kolaylıkla uzaklaştırılmıştır (Şekil 2.11).



Şekil 2.10. Reaksiyon sonunda meydana gelen karışımın ayırma hunisine alınması ve faz ayrımının gerçekleşmesi

d) Ester fazının yıkanması, kurutulması ve süzülmesi

Ayrırma hunisindeki ester fazı, safsızlıklarından arındırmak için saf su yardımıyla yıkanmıştır. Atık yıkama suyu berraklaşana kadar yıkama işlemine devam edilmiştir. Diğer işlemlerin ardından biyodizel kullanıma hazır hale getirilmiştir.



Şekil 2.11. Biyodizel fazından gliserinin ayrıştırılması

2.5. Belirlenen Fiziksel ve Kimyasal Özellikler, Ölçüm ve Hesap Yöntemleri

Daha önceden de bahsedildiği gibi, üretilen biyodizellerin ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının dinamik viskozite, yoğunluk ve yüzey gerilimi değerleri, KTÜ Makina Mühendisliği Bölümü İçten Yanmalı Motorlar laboratuvarında hazır bulunan cihazlar yardımıyla belirlenmiştir. Optimum biyodizelin diğer önemli yakıt özellikleri ise KTÜ bünyesinden bulunan Prof. Dr. Saadettin Güner Yakıt Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde ölçtürülmüştür. Bu ölçümler aşağıdaki standartlara uygun olarak gerçekleştirilmiştir:

- Üst ısı değeri (yanma ısı): DIN 51900-2
- Parlama noktası sıcaklığı: TS EN ISO 3679
- Soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığı: TS EN 116
- Akma noktası sıcaklığı: TS 1233 ISO 3016
- Toplam kirlilik: TS EN 12662
- Karbon kalıntısı: TS EN ISO 10370

- Oksidasyon kararlılığı: TS EN 14112
- Mono, di ve trigliserit içeriği: TS EN 14105
- Asit sayısı: TS EN 14104
- Çoklu doymamış metil ester içeriği: TS EN 15779
- Bakır şerit korozyonu: TS 2741/EN ISO 2160
- Metanol içeriği: TS EN 14110
- Su içeriği: TS 6147/EN ISO 12937
- Sülfatlanmış kül içeriği: TS ISO 3987
- Kükürt içeriği: TS EN ISO 20846
- İyot sayısı: TS EN 14111

Optimum biyodizelin setan indeksi ise (1.1) numaralı denklem kullanılarak ASTM D 4737 standardına uygun olarak belirlenmiştir.

2.5.1. Yoğunluk Ölçümü

Üretilen biyodizellerin ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunlukları hassas terazi (Şekil 2.1) ve piknometre (Şekil 2.6) kullanılarak ISO 4787 standardına uygun olarak ölçülmüştür. Piknometre kullanılarak yoğunluk ölçümü, prensip olarak yoğunluğu bilinen bir akışkanın (genellikle saf su) hacminin yani piknometrenin hacminin belirlenmesi ilkesine dayanır [160]. Yoğunluk ölçümünde öncelikle piknometrenin kendi kütlesi ($m_{\text{piknometre}}$) yani darası hassas terazide ölçülür. Daha sonra, aşağıda verilen (2.1) ve (2.2) numaralı denklemler kullanılarak yoğunluk hesaplanır:

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

$$\rho_{\text{sıvı}} = m_{\text{sıvı}} / V_{\text{piknometre}} = \frac{m_{\text{toplaml}} - m_{\text{piknometre}}}{m_{\text{su}}} \cdot \rho_{\text{su}} \quad (2.2)$$

Burada, $V_{\text{piknometre}}$ piknometre hacmini, m_{su} saf su ile dolu piknometrenin kütlesini, m_{toplaml} yoğunluğu belirlenen sıvı ile dolu piknometrenin kütlesini, $\rho_{\text{sıvı}}$ ilgili sıvının yoğunluğunu ve ρ_{su} saf suyun yoğunluğunu temsil etmektedir.

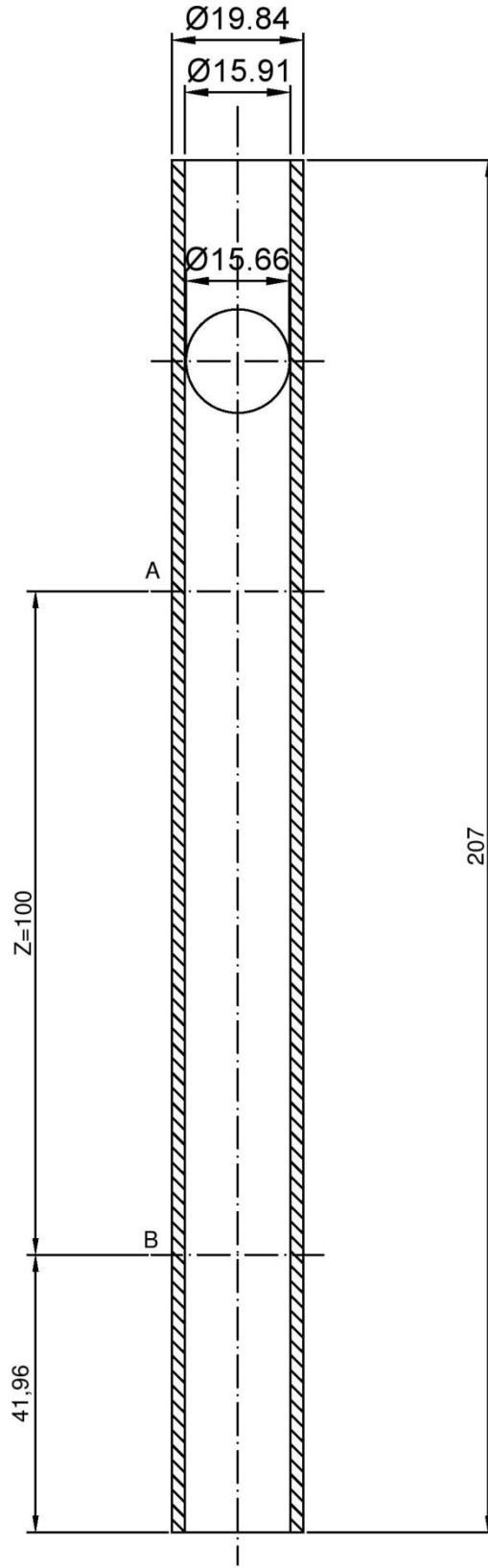
2.5.2. Viskozite Ölçümü

Sıcaklığın ve maddenin yapısının bir fonksiyonu olan viskozite, bir akışkanın yüzey gerilimi altında deforme olmaya karşı gösterdiği direncin bir ölçüsüdür. Viskozite, akışkanın akmaya karşı gösterdiği iç direnç olarak da tanımlanabilir. Tez kapsamında, üretilen biyodizellerin ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklardaki dinamik viskoziteleri, Stokes yasasına ve DIN 53015 standardına uygun olarak Haake Düşen Top Viskozimetresi (Falling Ball Viscometer) (Şekil 2.3) ve Haake su banyosu (Şekil 2.5) kullanılarak ölçülmüştür. Söz konusu viskozimetre tüpünün boyutları Şekil 2.12'de verilmiştir. Dinamik viskozite ölçümünde,

$$\mu_{SIV1} = K \cdot (\rho_{bilye} - \rho_{SIV1}) \cdot t \quad (2.3)$$

bağıntısı kullanılmıştır. Burada, μ_{SIV1} , K , ρ_{bilye} , ρ_{SIV1} ve t sırasıyla sıvının dinamik viskozitesini ($\text{g/m} \cdot \text{s} \equiv \text{mPa} \cdot \text{s} \equiv \text{cP}$), viskozimetre bilyesinin katsayısını ($\text{mPa} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^3/\text{g} \cdot \text{s}$), viskozimetre bilyesinin yoğunluğunu (g/cm^3), sıvının yani saf biyodizelin veya biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluğunu (g/cm^3) ve viskozimetre tüpü üzerinde bulunan iki yatay çizgi arasındaki düşey mesafe boyunca bilyenin sabit limit hızla düşme süresini temsil etmektedir. Tez çalışmasında, saf biyodizelin viskozite değerlerine uygun olarak bir bor silika cam (boron silica glass) bilye kullanılmıştır. (2.3) denkleminde verilen t süresi, kronometre yardımıyla peş peşe gerçekleştirilen ölçümlerin sonunda elde edilen değerlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Söz konusu viskozimetrenin kalibrasyonu için, tarafımızca üretilen bir biyodizel numunesinin dinamik viskozite ve yoğunluk değerleri hassas bir şekilde Prof. Dr. Saadettin GÜNER Yakıt Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde ölçtürülmüş ve bu değerleri verecek şekilde (2.3) numaralı bağıntı kullanılarak K katsayısı $0,057 \text{ mPa} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^3/\text{g} \cdot \text{s}$ olarak belirlenmiştir. Saf biyodizellerin ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozite değerleri ($\text{mm}^2/\text{s} \equiv \text{cSt}$) ise, (2.4) bağıntısına göre,

$$\nu_{SIV1} = \mu_{SIV1}/\rho_{SIV1} \quad (2.4)$$



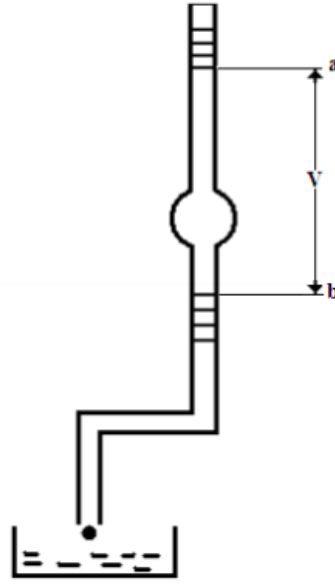
Şekil 2.12. Viskozimetre tütünün boyutları

aynı sıcaklıkta belirlenen sıvının dinamik viskozitesinin yoğunluğuna bölünmesiyle hesaplanmıştır.

2.5.3. Yüzey Gerilimi Ölçümü

Sıvı içindeki bir molekül, komşu sıvı molekülleri tarafından ortalama olarak aynı kuvvetle çekilir. Bu yüzden hiçbir kuvvetin etkisi altında değilmiş gibi hareket eder. Yüzeydeki sıvı molekülleri ise sadece sıvı tarafındaki moleküller tarafından içeriye doğru çekilirler. Bu çekim, sıvı yüzeyinin daralmasına sebep olur. Dolayısıyla sabit sıcaklık ve basınçta, sıvı yüzeyini 1 m² veya 1 cm² büyötmek (veya daraltmak) için verilmesi (veya alınması) gereken enerjiye yüzey gerilimi (σ , N/m veya N·m/m²) denir. Diğer bir anlatımla, yüzey gerilimi sıvı yüzeyinde alınan birim uzunluğu gergin tutan kuvvettir. Öyleyse, yüzey gerilimi için atom veya moleküller arasındaki çekim kuvvetinin yüzeydeki dengesizliğinin bir sonucudur denebilir [161]. Yalnızca, sıvı-sıvı veya sıvı-gaz ara yüzeylerinde yüzey geriliminden bahsedebiliriz. Dolayısıyla yüzey gerilimini belirtirken bitişik bulunan sıvı ya da gazı da belirtmek önemlidir. Ayrıca, yüzey gerilimi, oluşan sıvı damlalarının boyutunu da tayin eder. Daha fazla kütle katılımıyla büyümesini sürdüren bir damla, yüzey gerilimi artık damlayı bir arada tutamaz hale geldiğinde dağılır [162].

Yüzey gerilimini belirlemede çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden en önemlisi, belli bir hacmindeki sıvının damla sayısını saymaktır [161]. Yönteme göre, kılcal bir borudan düşen damlanın kütlelerinin yerçekimi ivmesiyle çarpımı (ağırlık kuvveti), tam düşme anında, borunun çevresindeki sıvının yüzey gerilim kuvvetine eşit olur [161]. Bunun için Şekil 2.7 ve Şekil 2.13'te görüldüğu gibi stalogrametre kullanılabilir.



Şekil 2.13. Yüzey gerilimi ölçümünde kullanılan damla sayma yöntemi [161].

V hacmindeki sıvının akması sırasında oluşan r yarıçapındaki bu damlaların, kütle ve ağırlığı sırasıyla aşağıdaki bağıntılarla belirlenebilir:

$$m_{SIV1} = \frac{V}{n} \rho_{SIV1} \quad (2.5)$$

$$m_{SIV1} \cdot g = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \sigma_{SIV1} \quad (2.6)$$

Burada, n damla sayısını, m_{SIV1} sıvının kütlesini (kg), ρ_{SIV1} sıvının yoğunluğunu (kg/m^3), g yerçekimi ivmesini ($9,81 \text{ m/s}^2$), $2 \cdot \pi \cdot r$ stalognometrenin alt ucunun çevresini ve σ_{SIV1} sıvının yüzey gerilimini (N/m) belirtmektedir [161]. Bu çalışmada olduğu gibi, stalognometre ile daha çok, yüzey gerilimi bilinen bir sıvı (genellikle su) yardımıyla başka bir sıvının yüzey gerilimi belirlenir. Aynı stalognometre (Şekil 2.7) kullanılmak üzere, (2.5) ve (2.6) eşitlikleri iki ayrı sıvı için ayrı ayrı yazılıp taraf tarafa oranlanırsa sırasıyla;

$$\frac{m_{SIV1}}{m_{SU}} = \left(\frac{n_{SU}}{n_{SIV1}} \right) \cdot \left(\frac{\rho_{SIV1}}{\rho_{SU}} \right) \quad (2.7)$$

$$\frac{m_{SIV1}}{m_{SU}} = \frac{\sigma_{SIV1}}{\sigma_{SU}} \quad (2.8)$$

elde edilir. (2.7) ve (2.8) bağıntılarının birleştirilmesiyle,

$$\frac{\sigma_{siv1}}{\sigma_{su}} = \left(\frac{n_{su}}{n_{siv1}} \right) \cdot \left(\frac{\rho_{siv1}}{\rho_{su}} \right) \quad (2.9)$$

elde edilir. Sunulan tezde, saf dizel yakıtının, saf biyodizelin ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yüzey gerilimleri yukarıdaki bağıntılar kullanılarak belirlenmiştir. Referans alınan saf suyun yüzey gerilimi (σ_{su}) değerleri için referans [163] kullanılmıştır.

2.6. Belirsizlik Analizi

Deneysel çalışmalarda, ölçüm cihazlarının hassasiyeti nedeniyle, ölçülen fiziksel büyüklük bir miktar belirsizlik yani hata içerir. Bu belirsizlik, söz konusu büyüklük kullanılarak hesaplanan diğer fiziksel büyüklüklerde de hataya neden olur, yani belirsizlik yayılarak devam eder. Dolayısıyla, hesaplanmak istenilen hedef fiziksel büyüklük, bu büyüklüğün hesabında kullanılan diğer fiziksel büyüklüklerin belirsizlik değerlerine bağlı olarak bir miktar belirsizlik içerir. Eğer, hedef büyüklükteki değişim, hesaplanan belirsizlik sınırları içerisinde kalıyorsa söz konusu değişim bir anlam ifade etmez. Bu nedenle, bu tezde olduğu gibi, özellikle deneysel çalışmalarda, ölçülen ve hesaplanan büyüklüklerin anlamlılığını ve güvenilirliğini incelemek amacıyla Kline ve McClintock tarafından önerilen yöntem ile belirsizlik analizinin yapılması gerekmektedir [164]. Bu yöntemle göre, ölçülen veya hesaplanan hedef fiziksel büyüklük R ve büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişkenler $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ise,

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (2.10)$$

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

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \cdot w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \cdot w_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_3} \cdot w_3 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \cdot w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.11)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bu tezde, hedef fiziksel büyüklük olarak yoğunluk, dinamik viskozite, kinematik viskozite ve yüzey gerilimi değerlerinin belirsizlikleri (2.11) bağıntısı yardımıyla hesaplanmıştır [2].

Tüm tez çalışması boyunca ölçülen yoğunluk, dinamik viskozite, kinematik viskozite ve yüzey gerilimi değerleri için belirsizlikler hesaplanmış ve Ek Tablo 1-3'te verilmiştir. Söz konusu tablolar incelendiğinde, belirsizliklerin $\pm\% 0,02005$ (Ek Tablo 3'te verilen B20'nin 90 °C'de dinamik viskozite ölçümü için) ile $\pm\% 1,2007$ (Ek Tablo 3'te verilen B15'in 367,15 K'de yüzey gerilimi ölçümü için) değerleri arasında değiştiği görülmektedir. Belirsizlik değerlerinin düşük düzeyde olması ölçüm değerlerinin güvenilirliğe sahip olduğunu göstermektedir.



3. SAYISAL ÇALIŞMA

Tezin bu kısmında, üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin, satın alınan saf dizel yakıtının ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının (B5, B10, B15 ve B20) sprey özelliklerinin (nüfuz derinliği, Sauter ortalama damlacık çapı, sprey koni açısı ve sprey hacmi) incelenmesinde kullanılan Fluent paket programı (ağ yapısı), türbülans modelleri, parçalanma modelleri ve genel akışkanlar mekaniği korunum denklemleriyle (süreklilik, momentumun korunumu ve enerjinin korunumu) ilgili ayrıntılı bilgiler verilmiştir.

3.1. Genel Korunum Denklemleri

3.1.1. Kütlelerin Korunumu

Kontrol hacminden geçen akışkanın (parçacığın) üç boyutlu hız alanı $\vec{V} = (u, v, w) = u(x, y, z, t)\vec{i} + v(x, y, z, t)\vec{j} + w(x, y, z, t)\vec{k}$ olmak üzere, Reynolds transport teoremi, sistem ve kontrol hacmi yaklaşımları için uygulandığında (kontrol hacminin zamanla şekil değiştirmedeği kabulü ile), kontrol hacmi için kütlelerin korunumuna ait genel ifade:

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\text{sistem}} = \iiint \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \iint \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA = 0 \quad (3.1)$$

olarak elde edilir [162, 165, 166]. Burada, m ve ρ akışkanın kütlelerini (kg) ve yoğunluğunu (kg/m^3) temsil etmektedir. Üniform hız ile giriş ve çıkışlar için,

$$\iiint \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = \sum_{\text{giren}} \dot{m} - \sum_{\text{çıkan}} \dot{m} \quad (3.2)$$

olarak yazılabilir. Burada, \dot{m} akışkanın kütleli debisini (kg/s) temsil etmektedir. (3.2) numaralı denklem kelimelerle şu şekilde ifade edilebilir: Kontrol hacmi içerisindeki kütlelerin birim zamandaki net değişim hızı, kontrol hacmine giren ve kontrol hacminden çıkan kütleli debilerin farkına eşittir [162, 165, 166]. Diverjans teoremi kullanılarak veya sonsuz küçük kontrol hacminde her bir yüzey için Taylor serisi açılımıyla kütleli debinin

değişimleri (kontrol hacminden geçen akışkanın hızlarından yararlanılarak) yazıldığında, kartezyen koordinatlarda 3-boyutlu bir kontrol hacmi için genel süreklilik denklemi (kütlenin korunumu):

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \vec{\nabla} \cdot \vec{V} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.3)$$

olarak elde edilir [162, 165, 166]. Bu denklem, sıkıştırılamaz akış (bu çalışmada olduğu gibi yoğunluğun değişmemesi, yani $D\rho/Dt \cong 0$) için,

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.4)$$

haline dönüşür. Burada, $\vec{\nabla}$ diverjans operatörü (nabla) olmak üzere, kartezyen koordinatlarda,

$$\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k} \quad (3.5)$$

olarak ifade edilir [162, 165, 166].

3.1.2. Doğrusal Momentumun Korunumu

Reynolds transport teoreminin uygulanmasıyla, bir kontrol hacmi için doğrusal momentum denkleminin genel ifadesi:

$$\frac{d}{dt} (m\vec{V})_{\text{sistem}} = \sum \vec{F} = \iiint \frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} dV + \iint (\rho\vec{V}) \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (3.6)$$

veya

$$\frac{d}{dt} (m\vec{V})_{\text{sistem}} = \iiint (\rho\vec{g}) dV + \iint \sigma_{ij} \cdot \vec{n} dA \quad (3.7)$$

olarak elde edilir [162, 165, 166]. Burada, $\sum \vec{F}$ kontrol hacmine etkiyen toplam kuvveti (N), σ_{ij} gerilme tensörünü (N/m²) ve \vec{g} yerçekimi ivmesini (m/s²) temsil etmektedir. Üniform hız ile giriş ve çıkışlar için (3.7) numaralı denklem,

$$\sum \vec{F} = \sum \vec{F}_{\text{kütle}} + \sum \vec{F}_{\text{yüzey}} = \iiint \frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} dV + \sum_{\text{çıkan}} \dot{m}\vec{V} - \sum_{\text{giren}} \dot{m}\vec{V} \quad (3.8)$$

olarak elde edilir. Son iki terimdeki \vec{V} giriş veya çıkışlardaki kontrol hacminden geçen akışkanın ortalama hızını (m/s) temsil etmektedir. (3.8) numaralı denklem kelimelerle şu şekilde ifade edilebilir: Kontrol hacmi üzerine etkiyen toplam kuvvet (kütle kuvvetleri (kontrol hacmi üzerindeki kuvvet, yani yerçekimi kuvveti) ile yüzey kuvvetleri (akışkan elemanına etki eden kuvvetler, yani basınç ve viskoz kuvvetler)) kontrol hacmi içerisinde birim zamandaki momentum değişimi artı kontrol hacminden dışarı çıkan momentumun akısı eksi kontrol hacmine giren momentumun momentum akısına eşittir [162, 165, 166]. Diverjans teoremi yardımıyla $\iint (\rho\vec{V}) \vec{V} \cdot \vec{n} dA$ ve $\iint \sigma_{ij} \cdot \vec{n} dA$ yüzey integralleri yerine sırasıyla $\iiint \vec{V} \cdot (\rho\vec{V}\vec{V}) dV$ ve $\iiint \vec{V} \cdot \sigma_{ij} dV$ yazılırsa veya sonsuz küçük kontrol hacminde her bir yüzey için Taylor serisi açılımıyla momentum akısının ($\sum_{\text{çıkan}} \dot{m}\vec{V} - \sum_{\text{giren}} \dot{m}\vec{V}$) değişimleri yazılırsa, hem sıkıştırılabilir hem de sıkıştırılmaz akışlar için Cauchy denklemi:

$$\frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} + \vec{V} \cdot (\rho\vec{V}\vec{V}) = \rho\vec{g} + \vec{V} \cdot \sigma_{ij} \quad (3.9)$$

olarak elde edilir [162, 165, 166]. Aynı denklem,

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{V} \cdot (\rho\vec{V}) \right] + \rho(\vec{V} \cdot \vec{V})\vec{V} = \rho\vec{g} + \vec{V} \cdot \sigma_{ij} \quad (3.10)$$

olarak da yazılabilir. Burada, \vec{g} (m/s²) yerçekimi ivmesi vektörü,

$$\vec{g} = g_x \vec{i} + g_y \vec{j} + g_z \vec{k} \quad (3.11)$$

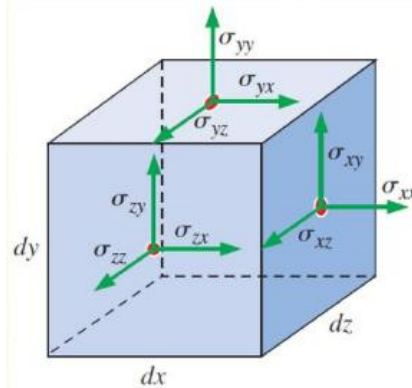
olarak yazılabilir. (3.10) numaralı denklemin köşeli parantez içerisindeki ifadesi süreklilik ve sıkıştırılmaz denklemleri gereği sıfır olduğu için, sıkıştırılmaz akışta Cauchy denkleminin bir diğer formu,

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right] = \rho \frac{d\vec{V}}{dt} = \rho \vec{g} + \nabla \cdot \sigma_{ij} \quad (3.12)$$

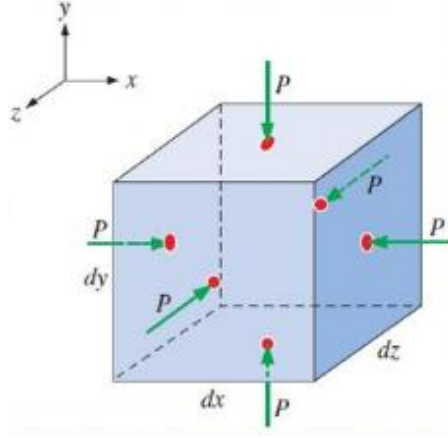
olarak elde edilir [162, 165, 166]. Vektörel Cauchy denklemi üç hız bileşeni (u, v ve w), yoğunluk (ρ) ve altı adet gerilme (σ_{xx} , σ_{xy} , σ_{xz} , σ_{yy} , σ_{yz} ve σ_{zz}) olmak üzere toplam 10 bilinmeyi içerir. Bu nedenle çözülemezler. Bu denklemlerin çözülebilir hale gelmesi için Şekil 3.1’de görüldüğü gibi “bünye denklemleri” olarak adlandırılan ve gerilme bileşenleri ile hız alanı ve basınç alanı arasındaki ilişkiyi ortaya koyan denklemler kullanılır. Hareketli bir akışkan için bünye denklemleri:

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -P & 0 & 0 \\ 0 & -P & 0 \\ 0 & 0 & -P \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

şeklinde ifade edilebilir [162, 165, 166]. Burada, P, Şekil 3.2’de görüldüğü gibi, hidrostatik basıncı (termodinamik basınç) (N/m^2) yani durgun haldeki akışkanlarda akışkan elemanı üzerindeki tek gerilmeyi temsil eder ve ideal gaz denklemiyle (gaz akışkanlar için) hesaplanabilir. Ayrıca, (3.13) numaralı denklemdeki τ_{ij} viskoz gerilme tensörüdür, yani viskoz gerilmeleri (N/m^2) temsil eder.



Şekil 3.1. Sonsuz küçük bir kontrol hacminde pozitif gerilme tensörü bileşenleri [162].



Şekil 3.2. Durgun halindeki akışkanlarda hidrostatik basınç [162].

Eğer akışkan sıkıştırılamaz ise basınç terimi (P) için hiçbir hal denklemi yoktur ve artık P 'yi termodinamik basınç olarak tanımlayamayız. Bunun yerine, (3.13) numaralı denklemdeki P mekanik basınç (P_m , N/m^2) olarak aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$P_m = \frac{-1}{3} (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) \quad (3.14)$$

Sıkıştırılamaz akışları çözümlerken, basınç değişkeni P daima mekanik basınç P_m olarak düşünülür [162, 165, 166]. Sıkıştırılamaz (ρ sabit) ve izotermal (akışta yerel sıcaklık değişimleri küçük veya hiç olmadığı yani dinamik viskozitenin sabit olduğu varsayımı) akışlarda Newton tipi akışkanlar için viskoz gerilme tensörü,

$$\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} \quad (3.15)$$

olarak yazılabilir. Burada, μ akışkanın dinamik viskozitesini (kg/ms), S_{ij} ise kayma şekil değişim hızı tensörünü ($1/s$) ifade eder. Söz konusu tensör,

$$S_{ij} = \begin{pmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & \frac{\partial w}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

olarak ifade edilir [162, 165, 166]. Burada, S_{xx} , S_{yy} ve S_{zz} doğrusal şekil değiştirme hızlarıdır (1/s). Dolayısıyla, bünye denklemleri,

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} -P & 0 & 0 \\ 0 & -P & 0 \\ 0 & 0 & -P \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} & \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} & \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) & \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

olarak elde edilir [162, 165, 166]. (3.17) numaralı bünye denklemi, (3.12) numaralı Cauchy denkleminde yerine yazılırsa, sıkıştırılmaz akış için,

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = -\vec{\nabla}P + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (3.18)$$

şeklindeki Navier-Stokes denklemi elde edilir [162, 165, 166]. Bu denklem, doğrusal olmayan (non-linear) ve ikinci mertebeden bir kısmi diferansiyel denklemdir. Burada, ∇^2 Laplace operatörü olmak üzere kartezyen koordinatlarda,

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \vec{i} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \vec{j} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \vec{k} \quad (3.19)$$

şeklinde ifade edilir. Daha açık bir şekilde, sıkıştırılmaz akış için Navier-Stokes denkleminin,

x-bileşeni:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3.20)$$

y-bileşeni:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3.21)$$

z-bileşeni:

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3.22)$$

olarak verilebilir. Dolayısıyla, Navier-Stokes denklemleri, dört bilinmeyen (üç hız bileşeni ve basınç) ve dört denklemle (üç momentum denklemi ve bir süreklilik denklemi) sayısal yöntemler yardımıyla çözülmektedir.

3.1.3. Enerjinin Korunumu

Sıkıştırılamaz bir akışkan için enerji dengesi; iç enerji, ısı iletimi, ısı taşınımı ve sürtünme nedeniyle üretilen ısıdan belirlenir [167, 168]. Sıkıştırılabilir akışkanlarda ise hacim değişimi ortaya çıktığından dolayı, genişleme (ya da sıkıştırma) işi dolayısıyla ek bir terim daha ortaya çıkar. Her iki durumda da ısı iletimi ile olan ısı geçişi söz konusudur. Ancak, ısı iletimi ısı transferinin katkısı orta düzey sıcaklıklarda çok az olduğundan çoğunlukla ihmal edilir. Elemanter bir $dV = dx dy dz$ hacmindeki ve $dm = \rho dV$ kütledeki sonsuz küçük hacim elemanı için Termodinamiğin birinci yasasından enerji dengesi,

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dE_T}{dt} + \frac{dW}{dt} \quad (3.23)$$

şeklinde yazılır. (3.23) numaralı denkleme göre, elemanter bir hacme dt zaman diliminde giren dQ (kJ) ısı miktarı, dE_T (kJ) miktarda enerji artışına neden olur ve dW (kJ) işini yapar. Isı geçişinin sadece iletimle olması durumunda Fourier yasasına göre,

$$\frac{1}{A} \frac{dQ}{dt} = q'' = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (3.24)$$

yazılır [167, 168]. Burada, n yüzeye dik normal doğrultuyu, A (m²) ısı transferinin gerçekleştiği yüzey alanını (ısı geçişi doğrultusuna dik yüzey alanı), q'' ısı akısını (W/m²), k ısı iletim katsayısını (W/mK) ve T sıcaklığı (K) belirtmektedir. Diğer taraftan, birim zamanda toplam enerjideki dE_T değişim (kJ/s), potansiyel enerjideki değişim göz ardı edilirse, sadece iç enerjideki (e, kJ/kg) ve kinetik enerjideki (kJ/kg) değişimlerin toplamı şeklinde,

$$\frac{dE_T}{dt} = \rho dV \left[\frac{de}{dt} + \frac{1}{2} \frac{d}{dt} (u^2 + v^2 + w^2) \right] \quad (3.25)$$

olarak yazılır [167, 168]. Burada, eleman üzerinde yapılan iş ise, sınırlardaki gerilmeler (Şekil 3.1) nedeniyle ortaya çıktığından, toplam net iş değişimi birim zamanda (kJ/s),

$$\frac{dW}{dt} = -dV \left[\frac{\partial}{\partial x} (u\sigma_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u\tau_{yx} + v\sigma_{yy} + w\tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (u\tau_{zx} + v\tau_{zy} + w\sigma_{zz}) \right] \quad (3.26)$$

olarak elde edilir. Burada yer alan gerilmelerin yerine Stokes hipotezi ile olan eşitler yazıldığında, (3.25) numaralı denklemdeki hız terimlerinin yerine Navier-Stokes denklemlerinden elde edilen eşitlikler yazıldığında ve (3.25) ile (3.26) numaralı denklemler birleştirildiğinde,

$$\rho \frac{de}{dt} + \rho \text{div} \vec{V} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \mu \phi \quad (3.27)$$

elde edilir [167, 168]. Burada, ϕ (1/s²) yutulma fonksiyonu olup, viskozitesi çok yüksek akışkanların kullanılması durumunda hesaba katılmalıdır. Diğer bir anlatımla, sürtünme

kayıplarını temsil eden \emptyset fonksiyonu, gerçekte yalnızca ses hızına yakın akışlarda veya yağların yüksek hızlı hareketinde önem kazanır. \emptyset fonksiyonu,

$$\emptyset = 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \quad (3.28)$$

olarak tanımlanır [167, 168]. (3.27) numaralı denklem genel bir denklem olup, ideal gaz durumu için gerekli dönüşümler ($dh = de + d(P/\rho)$ ve $dh = C_p dT$) yapıldığında,

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = \frac{dP}{dt} + \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right\} + \mu \emptyset \quad (3.29)$$

sonucu elde edilir [167, 168]. Burada, h entalpiyi (kJ/kg) ve C_p sabit basınçta özgül ısıyı (kJ/kgK) temsil etmektedir. Isı iletim katsayısının (k) sabit olduğu durumda ise,

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = \frac{dP}{dt} + k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \mu \emptyset \quad (3.30)$$

elde edilir [167, 168]. Sıkıştırılamaz akış durumunda ise, $C_p = C_v = C$ ve $\text{div} \vec{V} = 0$ olduğundan dolayı, (3.29) numaralı denklem,

$$\rho C \frac{dT}{dt} = \rho C \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial T}{\partial t} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \mu \emptyset \quad (3.31)$$

olarak elde edilir [167, 168, 169]. Burada, C_v sabit hacimdeki özgül ısıyı (kJ/kgK) temsil etmektedir. Sadece iletim problemi için $\rho C dT/dt = \mu \emptyset = 0$ olduğu bilinmektedir. (3.31) numaralı denklemin sol tarafındaki terim taşınımı, sağ tarafındaki ilk terim iletimi ve sağ tarafındaki son terim sürtünme kayıplarını temsil etmektedir. Daimi durum için $\partial T / \partial t = 0$ alınmalıdır.

3.2. Türbülans Modelleme Denklemleri

Doğada ve mühendislik uygulamalarında karşılaşılan akışların çoğu türbülanslıdır. Atmosferik sınır tabaka akışı, okyanus akıntıları, uçakların etrafındaki akış, petrol ve doğalgaz hatlarındaki akış, nehir ve kanal akışları, araba, gemi, denizaltı ve hava taşıtları arkasındaki akışlar, pistonlu motorların silindirleri içerisindeki gaz akışları türbülanslı akışlara verilebilecek örneklerdir. Bunlara ek olarak, sunulan tezin konusu olarak, sıvı yakıt enjektörden çok yüksek hızlarda (yüksek Re sayısı) püskürtüldüğü için yakıt demeti ile hava arasındaki akış türbülanslı akışa bir örnektir. Bu yüzden, aşağıda, türbülansın fiziksel yapısı ve Fluent paket programında kullanılmış olan türbülans modelleri ile ilgili ayrıntılı bilgiler verilmiştir.

3.2.1. Türbülansın Fiziksel Yapısı ve Özellikleri

Türbülans ile ilgili pek çok gözlem yapabilmemize karşın, türbülansı çok iyi tanımlama yapma zorluğu vardır. Türbülansı tanımlayabilmek için türbülanslı akışın özelliklerini sıralayan kısa bir liste yapılmalıdır [170-175]:

a) Düzensizlik: Bütün türbülanslı akışlar düzensiz ve rastgeledir. Bu nedenle türbülans problemine deterministik (kesin çözüm) yaklaşımı yapmak imkansızdır. Bunun yerine istatistiksel yöntemlere başvurulur [170].

b) Yayılım: Bu özellik, türbülanslı akışlarda, momentum, ısı ve kütle geçişlerinin daha hızlı olmasına ve daha hızlı bir şekilde karışımların oluşmasına neden olur [170].

c) Yüksek Reynolds sayıları: Türbülanslı akışlar, her zaman yüksek Re sayılarında meydana gelir. Re sayısı arttığında türbülans ve akışın kararsızlığı artar. Kararsızlıklar, hareket denklemlerindeki viskoz terimlerin ve doğrusal olmayan atalet terimlerinin iç etkileşimine bağlıdır. Bu iç etkileşim çok karmaşıktır. Zira, doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemler ile ilgili matematiksel bilgiler, genel çözümü üretebilecek kadar gelişmemiştir. Tesadüfîlik ve lineer olmayan terimler türbülans denklemlerini zorlu bir hale getirir. Matematiksel yöntemlerin eksikliği, bütün teorik yaklaşımları deneme-yanılma ilişkisine götürür [170].

d) Üç boyutlu girdap çalkantıları: Türbülans, dönmeli ve üç boyutlu olup, yüksek düzeyde çalkantı hareketi yapan girdaplar ile karakterize edilir [170].

e) Yutulma: Türbülanslı akışlar her zaman yutucudurlar. Viskoz kayma gerilmeleri, türbülans kinetik enerjisinin iç enerjiye dönüşümünü sağlayan şekil değiştirme işini yaparlar. Türbülans, sürekli olarak bu viskoz kayıpları telafi edecek şekilde bir enerjiye ihtiyaç duyar. Bu enerji temin edilemediği zaman türbülans hızlı bir şekilde zayıflar. Diğer bir ifade ile, türbülans kendisi için gereken enerjiyi tamamen çevresinden sağlar. Türbülans, gereksinim duyduğu enerjiyi türbülanslı hız çalkantıları için kullanır ve kaynak olarak da ortalama akış içerisinde ortaya çıkan “kayma”dan yararlanır [170].

f) Sürekli ortam: Türbülans, akışkanlar mekaniği denklemleri ile ifade edilen bir sürekli ortam olayıdır [170].

g) Türbülanslı akış bir akış özelliğidir. Türbülans, akışkanın değil akışın bir özelliğidir. Hareket denklemlerinin doğrusal olmayışı nedeniyle, her bir tekil akış örneği kendi başlangıç ve sınır koşullarına bağlı olarak belirli özelliklere sahiptir. Navier-Stokes denklemlerinin genel bir çözümü bilinmemektedir. Dolayısıyla türbülanslı akış problemlerinin de genel çözümü yoktur [170].

Türbülans teorisi, genel akışkanlar dinamiğindeki gerilme-şekil değiştirme hızı arasındaki ilişkiyi veren Stokes hipotezine benzer bir ilişkiyle sınırlıdır. Buna göre; laminer akışlardaki moleküler viskozitenin (μ , kg/ms) yerini alan bir büyüklük tanımlanarak, türbülans hız çalkantılarının moleküler hareketle momentum geçişini ifade etme yoluna gidilmiştir. Bu yaklaşım ile, moleküler viskozite yerine “girdapçık ya da türbülans viskozitesi (μ_t)” kullanılmaktadır. Moleküler viskozite akışkanın bir özelliği olmasına karşın, türbülansla göz önüne alınan girdapçık viskozitesi akışın bir özelliğidir [170].

3.2.2. Türbülanslı Akış İçin Zaman-Ortalama Denklemler

Türbülanslı akışın yapısında var olan düzensizlik ve tesadüfîlik, akış alanının her noktasında ölçülen hız ve basınç gibi büyüklüklerin doğrultu ve şiddet yönünden yüksek frekanslı değişimler göstermesinden kaynaklanmaktadır [170, 171]. Akış alanındaki herhangi bir noktada yapılan hız ölçümleri, o noktadaki anlık hızın şiddetinin belirli bir ortalama değer etrafında zamanla değişmekte olduğunu gösterir [170, 171]. Bu durum, akışın, ana hareket doğrultusuna dik yönde ikinci bir hız alanının var olduğunu gösterir. Ayrıca, türbülanslı akış ile ilgili olarak yapılan gözlemler, girdaplı yapının ana akışın hız alanını etkilediğini ve hızda çalkantılı bir yapının ortaya çıkmasına neden olduğunu göstermektedir [170, 171]. Dolayısıyla, Şekil 3.3’te görüldüğü gibi, istatistiksel yaklaşım

ile, ortalama olarak, daimi (sürekli) türbülanslı bir akış alanındaki herhangi bir noktada $u(t)$ anlık hızını (m/s), bunun zaman-ortalaması olan \bar{u} (m/s) ve çalkantı hızı olan $\acute{u}(t)$ (m/s) gibi iki bileşene ayırarak,

$$u(t) = \bar{u} + \acute{u}(t) \quad (3.32)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifadedeki \bar{u} , $\Delta T = T_2 - T_1$ zaman aralığı (s) için,

$$\bar{u} = \frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} u(t) dt \quad (3.33)$$

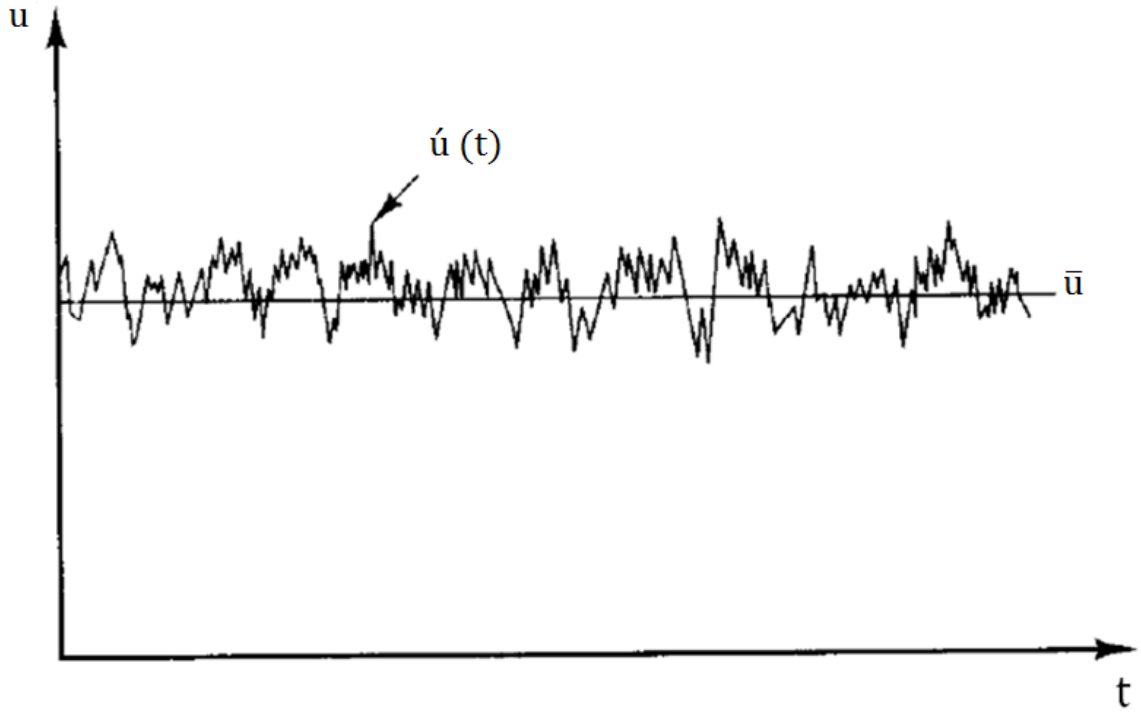
olarak yazılır ve ortalama akışı karakterize eder [170-174]. Çalkantı hız bileşeniyle ilgili bilgiler, çalkantıların kare-ortalamasının-kök değeri (root-mean-square, rms) biçiminde gösterilmektedir ve “türbülansın mutlak şiddeti” ya da kısaca “türbülans şiddeti” olarak adlandırılmaktadır [175]:

$$\sqrt{\overline{(\acute{u})^2}} = \left[\frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} (u(t) - \bar{u})^2 dt \right]^{1/2} \quad (3.34)$$

Çalkantıların zaman ortalaması,

$$\bar{\acute{u}} = \frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} \acute{u}(t) dt = \frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} u(t) \cdot dt - \frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} \bar{u} \cdot dt = \bar{u} - \bar{u} = 0 \quad (3.35)$$

olarak elde edilir.



Şekil 3.3. Tipik bir türbülanslı akış alanında hız değişimi [174]

Benzer şekilde, diğer çalkantılı büyüklükler için de zaman ortalamalar sıfırdır [174]:

$$\bar{v} = \bar{w} = \bar{p} = \bar{\rho} = 0 \quad (3.36)$$

$$\bar{u} \cdot \bar{u} = 0 \quad (3.37)$$

$$\overline{u \cdot u} \neq 0 \quad (3.38)$$

$$\overline{u \cdot v} \neq 0 \quad (3.39)$$

Reynolds gerilme denklemini elde etmeden önce, f ve g iki bağımlı değişkeni (birbirinden farklı), s'de x, y, z, t gibi bağımsız bir değişkeni göstermek üzere, zaman ortalama ile ilgili,

$$\bar{\bar{f}} = \bar{f} \quad (3.40)$$

$$\overline{\bar{f} + \bar{g}} = \bar{f} + \bar{g} \quad (3.41)$$

$$\overline{\bar{f} \cdot \bar{g}} = \bar{f} \cdot \bar{g} \quad (3.42)$$

$$\overline{\bar{f} \cdot \bar{g}} = \bar{f} \cdot \bar{g} + \overline{\hat{f} \cdot \hat{g}} \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial \bar{f}}{\partial s} = \frac{\partial \hat{f}}{\partial s} \quad (3.44)$$

$$\overline{\int \bar{f} \cdot ds} = \int \bar{f} \cdot ds \quad (3.45)$$

şeklindeki bağıntılar yazılabilir [170, 174].

3.2.3. Reynolds Gerilmeleri

Bilindiği gibi, (3.20–3.22) numaralı Navier-Stokes denklemleri anlık hız için yazılmıştır. Buradaki anlık hız değerlerinin yerine, ortalama ve çalkantılı büyüklükleri cinsinden olan eşitliklerin yazılıp elde edilen denklemlerin zaman ortalamasının alınması işlemine “Reynolds zaman ortalama” işlemi denilmektedir [170]. Bu şekilde elde edilen denklemlere “Reynolds denklemleri” adı verilir. (3.3) numaralı süreklilik denklemi indis notasyonları (tansörler) yardımıyla,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.46)$$

şeklinde yazılır. Süreklilik denkleminde $\rho = \bar{\rho} + \hat{\rho}$ ve $u_i = \bar{u}_i + \hat{u}_i$ yazılırsa ve elde edilen ifadenin zaman ortalaması alınır,

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.47)$$

sonucu elde edilir. Sıkıştırılamaz akış için ise,

$$\frac{\partial(\bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.48)$$

ve

$$\frac{\partial(\acute{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.49)$$

eşitlikleri elde edilir [174]. (3.20–3.22) numaralı sıkıştırılamaz akış için momentumun korunumu, Navier-Stokes denklemleri indis rotasyonlar ile,

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + u_j \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_j} = \rho g_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} \quad (3.50)$$

şeklinde yazılır [170]. Burada, τ_{ji} gerilme tansörü (N/m^2) olup, (3.15) numaralı denklem kullanılarak, sıkıştırılamaz akış için,

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = \rho g_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial(2\mu S_{ji})}{\partial x_j} \quad (3.51)$$

olarak elde edilir [170, 174]. Buradaki anlık büyüklükler yerine $u_i = \bar{u}_i + \acute{u}_i$, $u_j = \bar{u}_j + \acute{u}_j$, $P = \bar{P} + \acute{P}$, $S_{ji} = \bar{S}_{ji} + \acute{S}_{ji}$ şeklindeki eşitlikler yazılırsa ve zaman ortalaması alınırsa, sıkıştırılamaz akış için,

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho g_i - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [2\mu \bar{S}_{ji} - \rho \overline{\acute{u}_i \acute{u}_j}] \quad (3.52)$$

elde edilir [170, 171, 174]. Bu bağıntı Reynolds denklemleri olarak adlandırılır. Burada yer alan son terim $-\rho \overline{\acute{u}_i \acute{u}_j}$ Reynolds gerilme tansörüdür (N/m^2). (3.52) numaralı bağıntı, x doğrultusundaki bileşeni sıkıştırılamaz akış için $i=1$ ve $j=1,2,3$ yazılarak,

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right] = \rho g_x - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} - \rho \left[\frac{\partial \overline{\acute{u}^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{(\acute{u} \acute{v})}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{(\acute{u} \acute{w})}}{\partial z} \right] \quad (3.53)$$

şekline dönüşür. Reynolds gerilmeleri, türbülanslı çalkantı hareketleri nedeniyle ortaya çıkarlar ve türbülanslı hız bileşenlerinin çarpımlarının zaman ortalaması ($\overline{u_i u_j}$) şeklinde tanımlanırlar. Reynolds gerilmelerinin laminer akıştaki sürtünme terimlerine eklenen terimler olarak ortaya çıkmaları dolayısıyla, akış üzerindeki etkileri de aynı olur. Bu özellikten yararlanılarak, laminer akış ile türbülanslı akış arasında kurulan benzeşim ile Reynolds gerilmelerinin bir girdap viskozitesinden dolayı ortaya çıktığı varsayımı yapılır. Türbülans modellemesinin mantığı da budur. Pek çok durumda, akış içerisinde laminer gerilme bileşenleri, Reynolds gerilmelerinin yanında göz ardı edilebilecek düzeyde kalır. Göz ardı edilmeleri ile yapılan yaklaşımların hata payı da oldukça düşük düzeydedir [170]. Diğer bir anlatımla, istatistiksel ortalamalı büyüklükler cinsinden yazılan (3.53) numaralı denklemde, çalkantı bileşenlerinin korelasyonlarını içeren bazı ek bilinmeyen terimler bulunmaktadır. Bu nedenle, (3.53) numaralı denklem, bilinmeyen sayısının denklem sayısına eşit olduğu “kapalı” bir yapıda değildir. Momentumun vb. büyüklüklerin türbülanslı hareketten dolayı sahip oldukları bu korelasyonların, akışın yapısını belirlemede önemli etkileri vardır. Bunların hesaplanması, türbülanslı akışın hesaplanmasındaki ana problemlerden biridir. Denklemlerin non-lineer bir yapıda olmaları nedeniyle çalkantı bileşenlerinin daha yüksek mertebeden korelasyonlarını içeren ek bilinmeyen büyüklükler ortaya çıkar ve benzer işlemlerin yapılmasına devam edildiğinde sonsuz sayıda denklemden oluşan bir diferansiyel denklem takımına ulaşılır. İşte, türbülans modellemesinin amacı; bilinmeyen türbülans korelasyonlarını, ortalama akış değişkenleri ve istatistiksel türbülans parametreleri gibi bilinen ya da hesaplanabilir büyüklükler cinsinden ifade ederek “kapama” problemini çözmek; yani bilinmeyen sayısı ile denklem sayısının eşit olduğu “kapalı” bir diferansiyel denklem takımını oluşturmaktır [175]. Literatürdeki türbülans modellerini, “cebirsel modeller (sıfır denklemliler modeller)”, “bir denklemliler modeller” ve “iki denklemliler modeller” olarak üç ana başlık altında toplayabiliriz. Bundan sonraki bölümde, literatürde sıklıkla kullanılan, “bir denklemliler modeller” ve “iki denklemliler modeller” ile ilgili ayrıntılı bilgiler verilmiştir.

3.2.4. Bir Denklemliler

3.2.4.1. Reynolds Gerilme Denklemi

Reynolds denklemlerinde yer alan Reynolds gerilmeleri ($\tau_{ij} = -\rho \overline{u_i u_j}$) ile ilgili olarak bir denklem elde etmek üzere, sıkıştırılamaz akış için (3.50) numaralı indis notasyonlu Navier-Stokes denklemleri $\overline{u_i}$ ve $\overline{u_j}$ ile çarpılırsa,

$$\overline{u_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k} = \overline{u_j} \frac{-1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \overline{u_j} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\mu \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k} \right) \quad (3.54)$$

ve

$$\overline{u_i} \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial t} + \overline{u_i u_k} \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_k} = \overline{u_i} \frac{-1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_j} + \overline{u_i} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\mu \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_k} \right) \quad (3.55)$$

elde edilir [170, 173, 174]. Bu denklemlerin zaman ortalaması alınır ve taraf tarafa toplanırsa,

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\overline{u_i u_i})}{\partial t} + \overline{u_k} \frac{\partial (\overline{u_i u_i})}{\partial x_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k} + \frac{\partial (\overline{u_i u_j u_k})}{\partial x_k} + \overline{u_i u_k} \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_k} = \\ & \frac{1}{\rho} \overline{\dot{P}} \left[\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right] - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_k} \left[(\overline{\dot{P} u_j}) \delta_{jk} + (\overline{\dot{P} u_i}) \delta_{ik} \right] + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_k} \mu \left(\frac{\partial (\overline{u_i u_j})}{\partial x_k} \right) \\ & - 2 \frac{1}{\rho} \mu \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_k} \end{aligned} \quad (3.56)$$

elde edilir [173]. Burada,

$\partial (\overline{u_i u_i}) / \partial t$: zaman bağımlı terim,

$\overline{u_k} [\partial (\overline{u_i u_i}) / \partial x_k] + \overline{u_j u_k} [\partial \overline{u_i} / \partial x_k] + \partial (\overline{u_i u_j u_k}) / \partial x_k + \overline{u_i u_k} [\partial \overline{u_j} / \partial x_k]$: taşınım

terimi,

$\frac{1}{\rho} \overline{\dot{P}} [\partial \overline{u_i} / \partial x_j + \partial \overline{u_j} / \partial x_i] - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_k} [(\overline{\dot{P} u_j}) \delta_{jk} + (\overline{\dot{P} u_i}) \delta_{ik}]$: basınç terimi,

$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_k} \mu (\partial \overline{u_i u_j} / \partial x_k) - 2 \frac{1}{\rho} \mu \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_k}$: viskoz terimi,

δ_{jk} (veya δ_{ik}): Kronecker delta fonksiyonu

dur [173]. δ_{jk} fonksiyonu $j = k$ için 1 iken, $j \neq k$ için 0 değerini alır. (3.56) numaralı denklem $-\rho$ ile çarpılır ve $\tau_{ij} = -\rho \overline{u_i' u_j'}$ tanımı uygulanırsa,

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial t} + \bar{u}_k \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} = -\tau_{jk} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} - \tau_{ik} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} + \epsilon_{ij} - \Pi_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(v \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} + C_{ijk} \right) \quad (3.57)$$

$$\epsilon_{ij} = 2\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} \quad (3.58)$$

$$\Pi_{ij} = \bar{p} \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right] \quad (3.59)$$

$$C_{ijk} = \left[(\overline{\rho u_i' u_j' u_k'}) + (\bar{p} u_i') \delta_{jk} + (\bar{p} u_j') \delta_{ik} \right] \quad (3.60)$$

şeklindeki Reynolds gerilme denklemi elde edilir [170, 173, 174].

3.2.4.2. Türbülans Kinetik Enerji Denklemi

Birim kütle için tanımlanan ve türbülans çalkantılarının meydana getirdiği özgül türbülans kinematik enerjisi ($J/kg \equiv m^2/s^2$),

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i'} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (3.61)$$

olarak tanımlanır [170, 174]. Özgül türbülans kinematik enerjisi denklemini elde etmek için, sıkıştırılamaz akış koşullarında elde edilmiş olan Reynolds gerilme denkleminin (3.57–3.60) yola çıkılır. Bu denklemi, τ_{xx} , τ_{yy} ve τ_{zz} 'leri gösterecek bir denklem şekline getirmek için $j = i$ ve $k = j$ yazılarak yeniden düzenlenirse,

$$\begin{aligned}
-\frac{\partial \overline{u_1^2}}{\partial t} - \bar{u}_j \frac{\partial \overline{u_1^2}}{\partial x_j} &= 2\overline{u_1 u_j} \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_j} + \frac{\partial (\overline{u_1 u_1 u_1})}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho} \bar{p} \left[\frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_1} \right] \\
+ \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\overline{p u_1}) \delta_{ij} + (\overline{p u_j}) \delta_{ij} \right] &- \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial \overline{u_1 u_1}}{\partial x_j} \right] + 2\nu \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_j}
\end{aligned} \quad (3.62)$$

elde edilir [170, 173]. Burada, ν akışkanın kinematik viskozitesini (m^2/s) ifade etmektedir. Bu ifadeyi k 'yi ifade eden bir denklem şekline dönüştürmek üzere, her iki taraf $(-1/2)$ ile çarpılırsa ve k 'nin tanımı (3.61) kullanılırsa,

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = -\overline{u_1 u_j} \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_j} - \varepsilon - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{1}{2} (\overline{u_1 u_1 u_1}) + \frac{1}{\rho} (\overline{p u_j}) \right] + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3.63)$$

$$\varepsilon = \nu \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_j} \quad (3.64)$$

elde edilir [170, 173]. Diğer bir ifade ile,

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial k}{\partial x_j} - \frac{1}{2} \rho (\overline{u_1 u_1 u_1}) - (\overline{p u_j}) \right] \quad (3.65)$$

olarak türbülans kinetik enerjisi transport denklemini elde edilir [170, 173]. Görüldüğü gibi bu denklem, çalkantılı hız bileşenlerinin yüksek dereceden korelasyonlarını içermekte olup, bu korelasyonların belirlenmesi olanaksızdır. Bu nedenle, bu türden terimlerin modellenmesi gerekir. (3.65) numaralı denklemde,

$\rho(\partial k/\partial t)$: türbülans kinetik enerjisinin zamanla değişimini,

$\rho \bar{u}_j [\partial k/\partial x_j]$: türbülans kinetik enerjisinin taşınımını,

$\tau_{ij} [\partial \bar{u}_i/\partial x_j]$: türbülans kinetik enerjisinin üretimi ve girdapçığın birim hacminin ortalama akıştan kayma gerilmeleri nedeniyle elde ettiği (kazandığı) türbülans kinetik enerjisini (ortalama akışın kinetik enerjisi açısından ise bu terim bir kuyu olarak görülür),

$\rho \varepsilon$: yutulmayı yani en küçük girdapçıkların sahip olduğu kinetik enerjinin moleküler düzeyde ısı enerjisiye geçişini,

$\mu [\partial k/\partial x_j]$: ortalama akıştan moleküler hareket ile türbülans enerjisinin yayılımı (difüzyon) geçişini,

$-\frac{1}{2}\rho(\overline{u_i u_i u_j}) - (\overline{P u_j})$: üçlü korelasyon türbülanslı çalkantılar yolu ile olan türbülanslı yayınımlı ve basınç çalkantıları nedeniyle olan yayınımlı temsil etmektedir [170, 173]. (3.65) numaralı denklemin modellenmesinde yapılan ilk varsayım Boussinesq girdap viskozitesi yaklaşımıdır. Buna göre,

$$\tau_{ij} = \mu_t \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3.66)$$

şeklinde tanımlanır. Buradaki μ_t türbülans (girdap) viskozitesidir (kg/ms). Ayrıca, türbülans yayınımlı ve basınç yayınımlı terimleri Prandtl'in genel yayınımlı formunda aşağıdaki gibi modellenir:

$$\left[\frac{1}{2} \rho (\overline{u_i u_i u_j}) - (\overline{P u_j}) \right] = \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \quad (3.67)$$

Burada, σ_k k için Prandtl-Schmidt sayısı olarak bilinen bir katsayıdır. Modelenmiş olan terimlerin türbülans kinetik enerjisi denkleminde (3.65) yerine yazılması ile,

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \frac{\partial (\bar{u}_j k)}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3.68)$$

olarak modellenmiş türbülans kinetik enerjisi denklemi elde edilir [170, 173, 174]. Burada, yutulma (ε) (m^2/s^3) ve girdap (türbülans) viskozitesi,

$$\varepsilon = C_\varepsilon \frac{k^{3/2}}{l} \quad (3.69)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho k^{1/2} l \quad (3.70)$$

olarak göz önüne alınmalıdır. Burada, C_ε , C_μ ve σ_k katsayıları sırasıyla 0,07÷0,09, 0,09 ve 1 olarak alınabilir [170, 173]. Bir denklemlilik modelinin en zayıf tarafı, karışım uzunluğunun (türbülanslı akışın girdapçıkların boyutu, l) problemin türüne bağlı olarak

farklı yapılarda olmasıdır. Bu nedenle sunulan tezde, karışım uzunluğu için yeni bir diferansiyel denklemin tanımlandığı iki denklemliler modeller kullanılmıştır.

3.2.5. İki Denklemliler Modeller

İki denklemliler modellerde, türbülans uzunluk ölçeği (l) veya eş değeri bir parametre ($\varepsilon = C_\varepsilon k^{3/2}/l$) için bağımsız bir transport denklemi kullanılır. Bu sayede daha geniş bir uygulama alanı elde edilir. Türbülans kinetik enerjisinin üretilmesi ve yutulması (ε) arasında belirli bir denge (orantı) olmadığı zaman dengesiz bir yapı ortaya çıkar. Dengesiz yapıya sahip akışlarda iki denklemliler modeller hatalı sonuç verir. İkinci denklem olarak özellikle ε (m^2/s^3) veya ω ($1/s$) değişkenleri için olan denklemliler kullanılır. Yutulma olarak bilinen ε , türbülans kinetik enerjisinin birim zamanda ortaya çıkan bozulması (azalması) olarak göz önüne alınır. ω ise türbülans kinetik enerjisinin yutulma miktarı veya yutulma zaman ölçeğinin tersi olarak tanımlanır ve,

$$\omega = C_\omega k^{1/2}/l \quad (3.71)$$

bağıntısı ile ifade edilir [170-175].

3.2.5.1. Standart $k - \varepsilon$ Modeli

Yutulma (ε) için bir transport denklemi elde etmek üzere, ortalama ve çalkantılı hız bileşenleri için yazılan Navier-Stokes denklemlinden zaman ortalaması alınmış Navier-Stokes denklemi (ortalama ve çalkantılı hız bileşenlerini içeren) çıkarılırsa,

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \overline{u_j \frac{\partial (u_i + \bar{u}_i)}{\partial x_j}} - \overline{u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}} = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right] \quad (3.72)$$

elde edilir. Bu denklemin x_k 'ye göre türevi alınır, $\partial \bar{u}_i / \partial x_k$ ile çarpılır, zaman ortalaması alınır ve her iki taraf 2μ ile çarpılırsa, modellenmemiş $k - \varepsilon$ denklemi,

$$\begin{aligned}
\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \rho\bar{u}_j \frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j} &= -2\nu \overline{\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_k} \frac{\partial^2 \bar{P}}{\partial x_k \partial x_i}} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j} \right) - \bar{u}_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \overline{\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_k} \frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_k}} \right] \\
-2\nu\mu \left[\overline{\frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_k}} \right] \left[\overline{\frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_k}} \right] &- 2\mu \overline{\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_k} \frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_k} \frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j}} - 2\mu \overline{\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_k} \frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} \frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_k}} \\
-2\mu\bar{u}_j \overline{\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_k} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_k \partial x_j}} &- 2\mu \overline{\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_k} \frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_k} \frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j}}
\end{aligned} \tag{3.73}$$

olarak elde edilir [171]. Türbülansın izotropik olduğu ve akışım sıkıştırılamaz olduğu varsayımıyla,

$$\begin{aligned}
\rho \frac{\partial\varepsilon}{\partial t} + \rho\bar{u}_j \frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j} &= -2\mu \left[\overline{\bar{u}_{i,k} \bar{u}_{j,k}} + \overline{\bar{u}_{k,i} \bar{u}_{k,j}} \right] \frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} - 2\mu \overline{\bar{u}_k \bar{u}_{i,j}} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_k \partial x_j} - 2\mu \overline{\bar{u}_{i,k} \bar{u}_{i,m} \bar{u}_{k,m}} \\
-2\nu\mu \overline{\bar{u}_{i,k} \bar{u}_{i,m} \bar{u}_{k,m}} &+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j} - \overline{\mu \bar{u}_j \bar{u}_{i,m} \bar{u}_{i,m}} - 2\nu \overline{\bar{P}_m \bar{u}_{j,m}} \right)
\end{aligned} \tag{3.74}$$

elde edilir [171]. Burada,

$-2\mu \left[\overline{\bar{u}_{i,k} \bar{u}_{j,k}} + \overline{\bar{u}_{k,i} \bar{u}_{k,j}} \right] \frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} - 2\mu \overline{\bar{u}_k \bar{u}_{i,j}} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_k \partial x_j}$: ortalama hareketten kaynaklanan ve girdapların kendi içlerindeki gerilmelerden kaynaklanan ε üretimini,

$-2\mu \overline{\bar{u}_{i,k} \bar{u}_{i,m} \bar{u}_{k,m}} - 2\nu \overline{\bar{u}_{i,k} \bar{u}_{i,m} \bar{u}_{k,m}}$: ε 'un viskoz bozunumunu (yutulması),

$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j} - \overline{\mu \bar{u}_j \bar{u}_{i,m} \bar{u}_{i,m}} - 2\nu \overline{\bar{P}_m \bar{u}_{j,m}} \right)$: hızdan, basınçtan ve moleküler

viskoziteden kaynaklanan toplam difüzyonu

temsil eder [171, 172]. (3.74) numaralı $k - \varepsilon$ denkleminde öncelikle üretim terimi modellenir. Bunun için, yerel denge koşuluyla, ε 'un türbülans kinetik enerjisi üretimine eşit olduğu kabul edilir ve aşağıdaki bağıntılar yazılır,

$$P_\varepsilon = -2\mu \left[\overline{\bar{u}_{i,k} \bar{u}_{j,k}} + \overline{\bar{u}_{k,i} \bar{u}_{k,j}} \right] \frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} - 2\mu \overline{\bar{u}_k \bar{u}_{i,j}} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_k \partial x_j} \tag{3.75}$$

$$P_k = \tau_{ij} \frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} = \varepsilon\rho \tag{3.76}$$

$$P_\varepsilon \propto \frac{P_k}{t_{kr.}} = \left[\tau_{ij} \frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} \right] (t_{kr.})^{-1} \tag{3.77}$$

$$t_{kr.} = \frac{k}{\varepsilon} \quad (3.78)$$

Burada, $t_{kr.}$ (s) karakteristik zaman skalasını temsil etmektedir. Böylece, yerel izotropiklik ve denge koşulu varsayımıyla,

$$P_\varepsilon = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k \quad (3.79)$$

yazılabilir [171, 172]. Aynı mantık ile, ε 'un viskoz bozunumu (yutulması), boyut analizi yardımıyla,

$$D_\varepsilon = -2\overline{\mu \dot{u}_{1,k} \dot{u}_{1,m} \dot{u}_{k,m}} - 2\nu \overline{\mu \dot{u}_{1,km} \dot{u}_{1,km}} \quad (3.80)$$

$$D_\varepsilon \propto \frac{\varepsilon \rho}{t_{kr.}} \quad (3.81)$$

$$D_\varepsilon = C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \rho \quad (3.82)$$

şeklinde modellenir [171, 172]. Son olarak, toplam difüzyon terimi, Prandtl'in genel yayılım formunda aşağıdaki gibi modellenir,

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} - \overline{\mu \dot{u}_{j,1,m} \dot{u}_{1,m}} - 2\nu \overline{P_m \dot{u}_{j,m}} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (3.83)$$

Modellenen terimler (3.74) numaralı denklemde birleştirilirse, $k - \varepsilon$ türbülans modeli,

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3.84)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \rho \quad (3.85)$$

$$\mu_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (3.86)$$

olarak elde edilir [171, 172]. Burada, genellikle $C_{\varepsilon 1} = 1,44$, $C_{\varepsilon 2} = 1,92$, $C_\mu = 0,09$, $\sigma_k = 1$ ve $\sigma_\varepsilon = 1,3$ değerlerindeki katsayılarıdır.

3.2.5.2. Standart k – ω Modeli

Yukarıda bahsedildiği gibi, ω (1/s) türbülans kinetik enerjisinin yutulma miktarı veya yutulma zaman ölçeğinin tersi olarak tanımlanır ve,

$$\omega \propto \varepsilon/k \quad (3.87)$$

ile orantılıdır. k – ε türbülans modeline benzer şekilde, k – ω türbülans modeli,

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + P_\omega - D_\omega \quad (3.88)$$

olarak tanımlanır. Buradaki, $\rho \bar{u}_j [\partial \omega / \partial x_j]$ terimi konveksiyonu, $\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right]$ terimi difüzyonu, P_ω terimi üretimi ve D_ω terimi yutulmayı temsil etmektedir [171, 172]. Boyut analizi yardımıyla,

$$P_\omega = \alpha \frac{\omega}{k} P_k \quad (3.89)$$

$$D_\omega = \beta \rho \omega^2 \quad (3.90)$$

yazılabilir. Böylece, k – ω türbülans modeli,

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3.91)$$

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 \quad (3.92)$$

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \quad (3.93)$$

olarak elde edilir. Burada, genellikle $\alpha = 5/9$, $\beta = 3/40$, $\beta^* = 9/100$, $\sigma_\omega = 1/2$ ve $\sigma_k = 1/2$ değerlerindeki katsayılarıdır [170-172].

3.3. Yakıt Demetinin Parçalanması ve Parçalanma Modelleri

3.3.1. Yakıt Demetinin Parçalanması

Dizel motorlarda, yakıt-hava karışımı, emme zamanı boyunca yanma odasına emilen havanın içerisine, sıkıştırma zamanının sonlarına doğru yakıt püskürtülerek oluşturulmaktadır. Yakıtın püskürtülmesindeki amaç, küçük damlacılara ayrılması sonucu hava ile temas eden yüzeyi önemli oranda artırılıp buharlaşmanın ve yanmanın daha kısa süre içerisinde ve daha kontrollü olarak gerçekleşmesini sağlamaktır [8]. Diğer bir anlatımla, yakıtın parçalanması ne kadar ince ve dağılımı ne kadar homojen olursa, yakıtın yanması o kadar kolay yani yanma verimi o kadar yüksek olur [8]. Yanma odasına yüksek basınç ile püskürtülen yakıtın parçalanarak damlacıklara ayrılması karmaşık olayların sonucunda meydana gelmektedir. Parçalanmadaki en büyük etken, atalet kuvvetleri ile viskoz kuvvetler arasındaki oranı ifade eden Reynolds sayısıdır (Re):

$$Re = (\rho_y \cdot d_e \cdot U_{bağlı}) / \mu_y \quad (3.94)$$

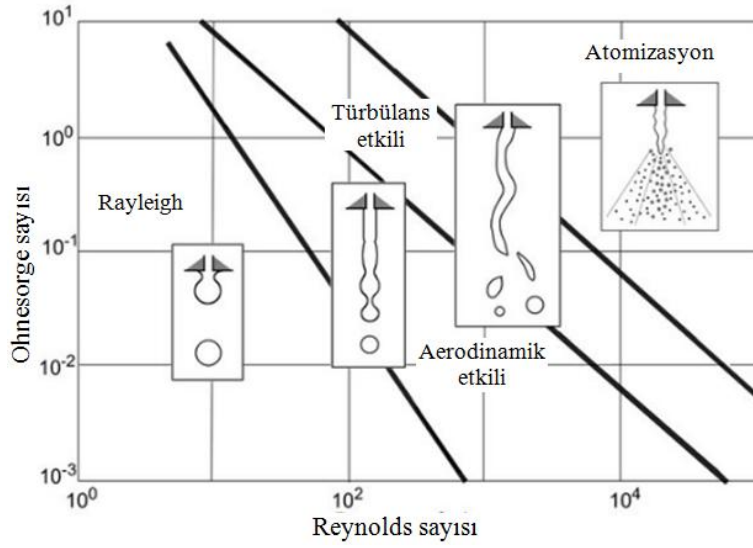
Burada, ρ_y , d_e , $U_{bağlı}$ ve μ_y sırasıyla yakıtın yoğunluğunu (kg/m^3), enjektör delik çapını (m), karşı-ortam (hava) hızı ile sıvının enjektörden çıkış hızı arasındaki farkı (diğer bir ifade ile yakıtın enjektörden çıkış hızı) (m/s) ve yakıtın dinamik viskozitesini (kg/ms) temsil etmektedir. Ayrıca, oluşan damlacıkların tekrar daha küçük damlacıklara ayrılmaları, atalet kuvvetleri ile yüzey gerilme kuvvetleri arasındaki oranı tanımlayan Weber sayısına (We),

$$We_y = (\rho_y \cdot d_e \cdot U_{bağlı}^2) / \sigma_y \quad (3.95)$$

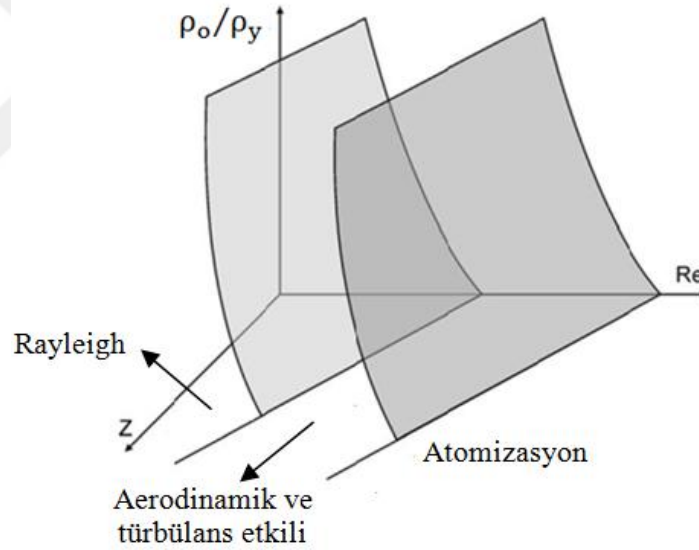
bağlıdır [8, 176]. Burada, σ_y yakıtın yüzey gerilimini (N/m) ifade etmektedir. Aerodinamik kuvvetler (sıvının hızından kaynaklanan), yüzey gerilme kuvvetlerini yendiğinde parçalanma başlar [177]. Sıvı jetinin parçalanmasındaki farklı mekanizmaları incelemek amacıyla, diğer bir ifade ile jet parçalanma sürecini bir değerle tanımlayabilmek için Ohnesorge sayısı (Z),

$$Z = \sqrt{We_y} / Re = \mu_y / \sqrt{\sigma_y \cdot \rho_y \cdot d_e} \quad (3.96)$$

olarak tanımlanmıştır [169]. Şekil 3.4'te görüldüğü gibi, Ohnesorge sayısının Reynolds sayısına göre değişimine göre, sıvı jetinin parçalanması 4 farklı rejim (Rayleigh, aerodinamik etkili, türbülans etkili ve atomizasyon) ile ifade edilebilir. (3.96) bağıntısından görüldüğü gibi, Ohnesorge sayısı tamamen yakıtların fiziksel özelliklerine bağlıdır. Fakat, 1990 yılında Hiroyasu ve Arai tarafından yapılan bir çalışmada [169], sıvı jetinin parçalanmasında, sıvının fiziksel özellikleri kadar, karşı-ortamın yoğunluğunun da etkili olduğu belirlenmiştir. Diğer bir anlatımla, karşı-ortam (hava) yoğunluğu arttığında parçalanmanın da arttığı belirtilmiştir [169]. Bu nedenle, Şekil 3.5'te görüldüğü gibi, iki-boyutlu Ohnesorge grafiğine (Şekil 3.4), karşı-ortam yoğunluğu/sıvı yoğunluğu oranı da eklenerek 3-boyutlu bir grafik önermiştir [169, 178]. Literatürde farklı yakıtların veya yakıt karışımlarının yakıt demeti karakteristikleri ile ilgili çalışmalarda, Ohnesorge grafiği sıklıkla kullanılmaktadır. Böylece, yakıt demeti karakteristiklerine (nüfuz derinliği, ortalama damlacık çapı, sprej açısı, sprej hacmi, vb.) etki eden faktörler, dolayısıyla motor performansı ve eksoz emisyonlarındaki değişimler daha iyi yorumlanmıştır. Diğer bir anlatımla, Ohnesorge grafiği yardımıyla, yakıtların ve yakıt karışımlarının atomizasyon karakteristikleri belirlenebilir. Böylece, yakıtlar veya yakıt karışımları motorlarda kullanılmadan önce, genel bir fikre sahip olabiliriz.



Şekil 3.4. Jet parçalanma rejimlerini gösteren 2-boyutlu Ohnesorge diyagramı [169].



Şekil 3.5. Karşı-ortam yoğunluğunun etkisini içeren 3-boyutlu Ohnesorge diyagramı [169].

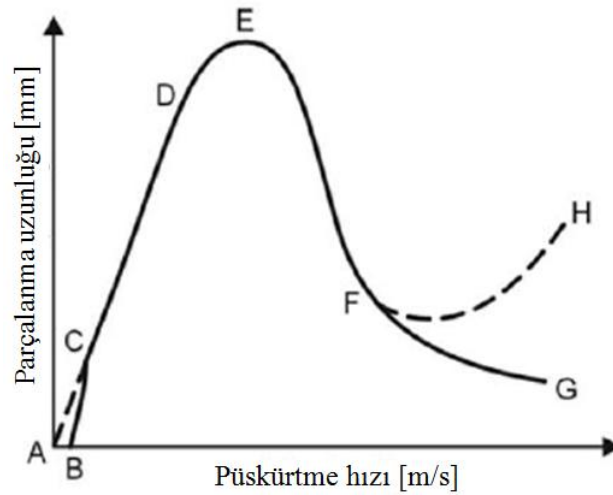
Şekil 3.6'da püskürtme hızına bağlı olarak parçalanma uzunluğunun (enjektör deliği ile sıvı yakıt demetinin ilk parçalandığı nokta arasındaki yatay mesafe) değişimi verilmiştir. Püskürtme hızı çok düşük olduğunda jet akışı meydana gelmezken sadece damlama şeklinde bir akış oluşur (Şekil 3.6 ABC bölgesi). Rayleigh parçalanma rejiminde (Şekil 3.4), püskürtme hızının artırılmasıyla meydana gelen parçalanmamış jet uzunluğu, hızın artmasıyla birlikte artar (Şekil 3.6 CD çizgisi). Sıvı atalet ve yüzey gerilim kuvvetleri

nedeniyle tüm jet hacminde meydana gelen simetrik titreşimler parçalanmaya neden olur. Parçalanmış damlacık çapları enjektör deliğinin çapından daha büyüktür [169]. Püskürtme hızı artırılmaya devam edildiğinde, parçalanma uzunluğu kısalmaya başlar yani yakıt demeti daha kısa sürede parçalanır (Şekil 3.6 DE çizgisi), fakat damlacık çapı enjektör delik çapından hala daha büyüktür. Parçalanma devam ettikçe ortalama damlacık boyutu azalır ve enjektör çapının boyutlarına yakın damlacık çap boyutları elde edilir. Aerodinamik etkili rejimde (Şekil 3.4), Rayleigh rejiminde etkili olan kuvvetlerin (atalet ve yüzey gerilimi) şiddeti aerodinamik kuvvetlerin etkisiyle artar. Karşı-ortamın etkisini ifade eden gaz fazındaki Weber sayısı, aerodinamik etkili rejimin karakteristik parametresidir [169]:

$$We_o = (\rho_o \cdot d \cdot U_{bağlı}^2) / \sigma_{y,o} \quad (3.97)$$

Burada, ρ_o karşı-ortamın (hava) yoğunluğunu (kg/m^3), d parçalanmadan önceki damlacıkların çapını (m), $\sigma_{y,o}$ yakıt ve karşı-ortam (hava) arasındaki yüzey gerilimini (N/m), $U_{bağlı}$ damlacık ve karşı-ortam arasındaki bağlı hızı (m/s) ifade etmektedir [169, 178]. Bu rejimde, püskürtme hızının artışıyla parçalanma uzunluğu hızla azalır (Şekil 3.6 EF çizgisi). Püskürtme hızının artırılmaya devam edilmesi durumunda, türbülans etkili rejimde (Şekil 3.4), enjektör içerisindeki akış türbülanslı hale gelir. Sıvı jetinin hızı ile karşı-ortamın hızı arasındaki farkın meydana getirdiği aerodinamik kuvvetler ve türbülans nedeniyle, kısa boylu yüzey dalgalarının dengesiz büyümesiyle yakıt parçalanır. Parçalanma sonucu oluşan damlacıkların çapları enjektörün çapından daha küçüktür ve parçalanma uzunluğu artan Reynolds sayısı (yani püskürtme hızıyla) azalır (Şekil 3.6 FG (FH) çizgisi) [169, 178]. Bu andan sonra, sıvı jeti bütün bir parça olarak parçalanmaya devam etmez. Diğer bir anlatımla, sıvı demeti yüzeyinden, küçük damlacıklar ayrılmaya başlar ve tamamen parçalanana kadar sıvı demeti yavaşça aşınır [179]. Tam bu anda, iki tane parçalanma uzunluğu dikkate alınmalıdır. Bunlardan birincisi, yüzey parçalanmasının başlangıcını (bozulmamış jet uzunluğu), diğeri ise sıvı jetinin tamamen parçalanmasını (parçalanma sonu) ifade eder (kor uzunluğu). Bozulmamış jet uzunluğu püskürtme hızının artışıyla azalırken (Şekil 3.6 FG çizgisi), kor uzunluğu artabilir (Şekil 3.6 FH çizgisi). Yüksek Reynolds sayılarında her iki parçalanma uzunluğunun da ölçümü çok zor olduğundan, bu rejim için, farklı bilim insanları tarafından elde edilen deneysel sonuçlar arasında farklılıklar olabilir [169]. Püskürtme hızı daha fazla artırılıp bozulmamış jet

uzunluğu sıfıra yaklaşırsa (Şekil 3.6. G (H) noktası), atomizasyon rejimine (Şekil 3.4) ulaşılır ve konik yapıda bir sprej elde edilir. Bu rejimde sıvı jet, enjektörden çıkar çıkmaz parçalanmaya başlar, diğer bir ifade ile sprej konisinin tepesi enjektörün içinde konumlanır [179]. Fakat, parçalanmamış büyük sıvı parçalar içeren yoğun sprej bölgesi (kor bölgesi) akış yönünde hala bulunabilir. Parçalanma sonucu oluşan damlacıkların boyutları enjektör deliğinin boyutundan bir hayli küçüktür. Bu yüzden, ortak-hatlı püskürtme (common-rail) sisteminin kullanıldığı yüksek püskürtme basınçlı (dolayısıyla yüksek püskürtme hızlı) günümüz dizel motorlarındaki sprej yapısı atomizasyon rejimine en iyi örnektir. Parçalanma süreci enjektörün içerisindeki karmaşık akış şartlarına bağlı olduğu için atomizasyon rejiminde sıvı jetinin parçalanmasıyla ilgili teorik tanımlamalar ve ifadeler diğer rejimlere göre çok daha karmaşıktır. Ayrıca, deneysel çalışmalar çok yüksek hızlarda, küçük boyutlarda ve yoğun sprej bölgelerinde gerçekleştirildiği için atomizasyon rejiminin modellenmesi çok daha zordur [169]. Atomizasyon rejimi kapsamında Şekil 3.4 incelendiğinde, püskürtme hızıyla birlikte bağlı hızın artışıyla sıvı (yakıt)-gaz (karşı-ortam) ara yüzeyindeki düzensizliklerin ve sıvı yüzeyine etkiyen aerodinamik kuvvetlerin arttığı, yüksek Reynolds sayılarında viskozitenin söz konusu düzensizlikleri sönmüleyemediği ve yüksek Weber sayılarında yüzey geriliminin aerodinamik kuvvetleri dengeleyemediği, dolayısıyla damlacık çaplarının boyutlarının çok küçük olduğu yorumlanabilir.



Şekil 3.6. Püskürtme hızıyla parçalanma uzunluğunun değişimi [169].

3.3.2. Parçalanma Modelleri

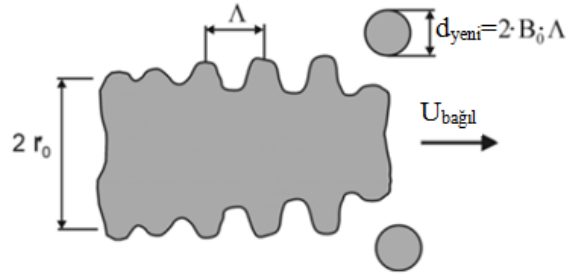
Literatürde yakıt demetinin parçalanmasıyla ilgili birçok model bulunmasına rağmen, Kelvin-Helmholtz (KH) ve Rayleigh-Taylor (RT) modelleri, özellikle günümüz dizel motorları için yüksek basınçta (dolayısıyla yüksek We ve Re sayılarında) yakıt demetinin parçalanmasında sıklıkla kullanılmaktadır. Buna uygun olarak, sunulan tezde, KH-RT hibrit modeli kullanılmış ve Wave (KH) modeliyle kıyaslanmıştır. Aşağıda, söz konusu modeller ile ilgili ayrıntılı bilgiler verilmiştir.

3.3.2.1. Wave Parçalanma Modeli

Wave diğer bir ifade ile Kelvin-Helmholtz (KH) modeli, silindirik sıvı jeti yüzeyinde büyüyen Kelvin-Helmholtz düzensizliklerinin birinci dereceden liner analizi temeline dayanır. Diğer bir ifade ile, enjektör içerisindeki türbülanslı akış nedeniyle silindirik sıvı jetinin yüzeyinde bulunan sinüzoidal dalgaların (tedirginlikler, kararsızlık), sıvı ve gaz (karşı-ortam) fazı arasındaki aerodinamik kuvvetlerin etkisiyle büyüyüp (genliği artıp) yüzeyden parça koparması ve böylece yakıt demetinin parçalanması temeline dayanır. Diğer bir ifade ile, Şekil 3.7'de görüldüğü gibi, r_0 yarıçapına (m) sahip olan ve karşı-ortam ile arasında $U_{bağlı}$ büyüklüğünde hız farkı (m/s) bulunan parçalanmamış sıvı jetinin yüzeyinde, aerodinamik kuvvetlerin etkisiyle büyüyen dalgaların içerisinde birim zamanda en yüksek genlik büyüme oranına sahip olanı dolayısıyla en kararsız olanı, yüzeyden parça koparmakta ve

$$r_{yeni} = B_0 \cdot \Lambda_{KH} \quad (3.98)$$

yarıçapında yeni bir damlacık grubu oluşmaktadır. Yani, yeni damlacıklar en kararsız olan yüzey dalgalarından oluştuğu için, doğal olarak, yarıçapları da ilgili dalgaların dalga boyuyla (Λ_{KH} , m) orantılıdır. B_0 deneysel model parametresi olarak belirlenmiştir [178].



Şekil 3.7. Wave modelinin şematik gösterimi [169].

En hızlı büyüyen ve dolayısıyla parçalanmaya neden olan dalganın dalga boyu (Λ_{KH}) ve büyüme oranı (Ω_{KH} , 1/s) aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\frac{\Lambda_{KH}}{r_0} = 9,02 \frac{(1 + 0,45Z^{0,5})(1 + 0,4T^{0,7})}{(1 + 0,865We_0^{1,67})^{0,6}} \quad (3.99)$$

$$\Omega_{KH} \left[\frac{\rho_y r_0^3}{\sigma} \right]^{0,5} = \frac{0,34 + 0,38We_0^{1,5}}{(1 + Z)(1 + 1,4T^{0,6})} \quad (3.100)$$

burada, T Taylor sayısını ifade etmek üzere,

$$T = Z\sqrt{We_0} \quad (3.101)$$

olarak belirlenir [169, 178]. Yüzeyden kopan parçacıklar aerodinamik kuvvetlerin etkisiyle sürekli kütle kaybına uğradıkları için, yarıçaplarının (r) zamanla değişimi, parçalanma karakteristik zaman aralığına (τ_{KH} , s) bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{r - r_{yeni}}{\tau_{KH}} \quad (3.102)$$

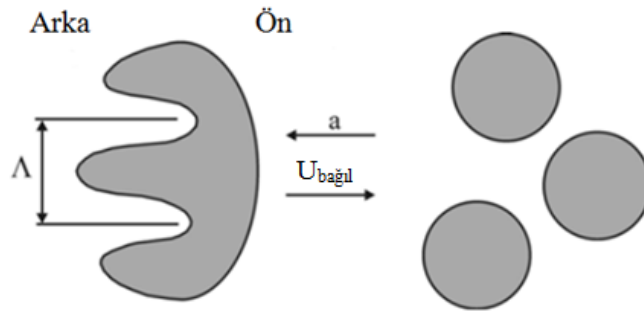
burada,

$$\tau_{KH} = 3,788B_1 \frac{r}{\Lambda_{KH} \Omega_{KH}} \quad (3.103)$$

şeklinde hesaplanır [169, 178]. B_1 enjektör içi akışı temsil eden (türbülans) deneysel bir sabit olmak üzere 1,73 ile 60 aralığında değişmektedir [169, 178]. Wave modeli yaklaşımıyla, daha az sayıda nispeten daha büyük çaplı damlacıklar ve daha fazla sayıda nispeten daha küçük çaplı damlacıklar elde edildiğinden, tek başına Wave modelinin kullanılması, dizel motorlardaki sprej karakteristiğini tam yansıtmamaktadır [169]. Bu yüzden, literatürde, bir dizi yaklaşık eşit çaplara sahip damlacık dağılımının elde edildiği Rayleigh-Taylor (RT) modeli önerilmiştir.

3.3.2.2. Rayleigh-Taylor Parçalanma Modeli

Rayleigh-Taylor parçalanma modeli temel olarak, farklı yoğunluklara sahip iki akışkanın ara yüzeyindeki düzensizliklerin, akışkanların arasındaki hız farkı ($U_{bağlı}$) nedeniyle artıp parçalanmaya neden olmasıyla açıklanabilir. Sıvı içerisine bir gazın nüfuz etmesi durumunda ara yüzey kararlı iken (yani parçalanma olmazken), gaz ortamın (karşı-ortam) içerisine sıvının (damlacık) nüfuz etmesi durumunda (içten yanmalı motorlarda olduğu gibi) ise ara yüzeyde tedirginlikler (kararsızlıklar) artar ve parçalanmaya neden olan yüzey dalgaları meydana gelir [169]. Şekil 3.8’de görüldüğü gibi, Kelvin-Helmholtz (KH) modeli yardımıyla karakterize edilen birincil parçalanma aşamasına maruz kalmış damlacıkların arka yüzeyi, aerodinamik kuvvetlerin etkisiyle hızla yavaşlayan ön yüzey kadar yavaşlayamaz. Bu durum, damlacığın arka yüzeyinde düzensiz dalgaların oluşmasına neden olur [178].



Şekil 3.8. RT modelinin şematik gösterimi [169].

Diğer bir anlatımla, enjektörü çok yüksek hızlarda terk eden sıvı jeti, karşı-ortamın neden olduğu (sıvı jeti ile karşı-ortamın hız farkından dolayı) aerodinamik direnç kuvvetinin

etkisiyle (sürtünme etkisiyle) hızla yavaşlar ve parçalanır. Söz konusu aerodinamik direnç kuvveti,

$$F_{\text{aerodinamik}} = \pi r^2 \cdot C_d \cdot \frac{\rho_o \cdot U_{\text{bağıl}}^2}{2} \quad (3.104)$$

bağıntısıyla hesaplanabilir. Direnç kuvveti damlacığın kütesine ($m_{\text{damlacık}} = 4/3 \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_y$) bölünürse, sıvı-gaz ara yüzeyindeki ivme (m/s^2),

$$a = \frac{3}{8} \cdot C_d \cdot \frac{\rho_o \cdot U_{\text{bağıl}}^2}{\rho_y \cdot r} \quad (3.105)$$

olarak hesaplanabilir. Bu modelde, parçalanmaya neden olan, yani en kararsız ve en hızlı büyüyen dalganın dalga boyu (Λ_{RT} , m) ve büyüme oranı (frekansı) (Ω_{RT} , 1/s) sırasıyla,

$$\Lambda_{RT} = C_3 \cdot 2\pi \cdot \sqrt{\frac{3\sigma}{a \cdot (\rho_y - \rho_o)}} \quad (3.106)$$

$$\Omega_{RT} = \sqrt{\frac{2}{3\sqrt{3} \cdot \sigma} \cdot \frac{[a(\rho_y - \rho_o)]^{3/2}}{\rho_y + \rho_o}} \quad (3.107)$$

şeklinde hesaplanmaktadır [169, 178]. Birçok uygulamada, karşı-ortamın (hava) yoğunluğu sıvının yoğunluğuna göre ihmal edilmektedir. Ayrıca, parçalanma zamanı (s),

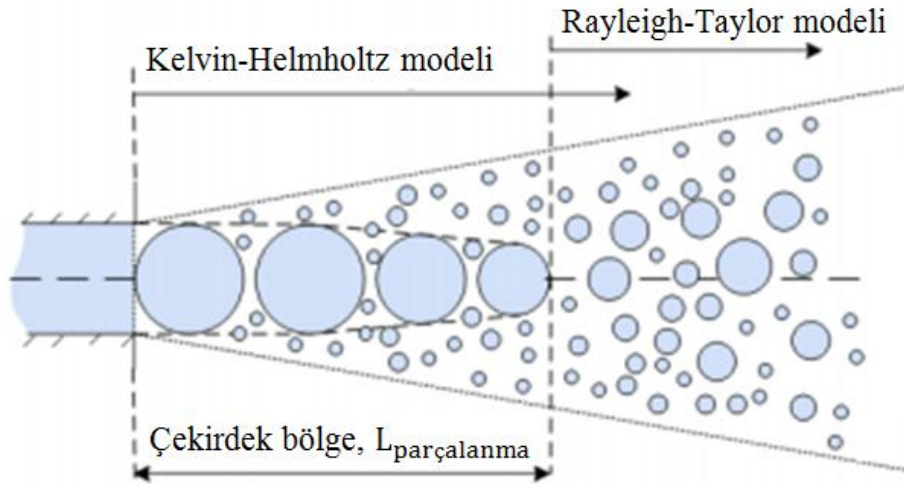
$$t_{\text{parçalanma}} = 1/\Omega_{RT} \quad (3.108)$$

yardımıyla hesaplanmaktadır. Bilindiği gibi, $t = t_{\text{parçalanma}}$ olduğunda damlacıklar, çapları en kararsız dalganın dalga boyuyla orantılı olacak şekilde ($d_{\text{yeni}} = \Lambda_{RT}$) parçalanır ve $\Lambda_{RT} < d_{\text{yeni}}$ olduğu sürece parçalanma devam eder. Rayleigh-Taylor parçalanma modelindeki C_3 katsayısı, Kelvin-Helmholtz (KH) modelindeki B_1 katsayısı gibi, enjektör içerisinde meydana gelen ve ikincil parçalanmayı etkileyen, türbülans ve kavitasyonu temsil eden bir parametredir. Bu katsayı, 1,0 ile 5,33 aralığında değişmektedir [169].

Hwang ve arkadaşları tarafından 1996'da yapılan bir çalışmada [180], tek bir parçalanma modelinin (KH veya RT) motorlarda püskürtme sonunda meydana gelen kompleks sprey yapısını tam olarak karakterize edemediği, bu yüzden literatürde birincil ile ikincil parçalanmayı ayrı ayrı karakterize eden ve en az iki farklı parçalanma modellerini içeren hibrit modellerin kullanıldığı, çok yüksek basınçlarda püskürtmenin yapıldığı dizel motorlarda spreyin modellenmesinde ise Kelvin-Helmholtz (KH) ile Rayleigh-Taylor modellerinin (KH-RT) beraber kullanıldığı belirtilmiştir. Chan ve arkadaşları tarafından 1997'de yapılan bir çalışmada [181], atomizasyon rejiminde, sıvı bakımından yoğun parçalanmamış bir çekirdek bölgenin varlığı deneysel olarak tespit edilmiş ve bu bölgenin uzunluğunun diğer bir ifade ile parçalanma uzunluğunun ($L_{\text{parçalanma}}$),

$$L_{\text{parçalanma}} = C \cdot d_{\text{enjektör}} \cdot \sqrt{\rho_y / \rho_o} \quad (3.109)$$

bağıntısıyla hesaplanabileceği belirtilmiştir. Burada, C enjektör tipine bağlı olarak 3,3 ile 15,8 aralığında değişen bir katsayıdır. Fakat, birçok çalışmada, $C = B_1/2$ olarak alınmaktadır [177]. Sunulan teze benzer birçok sayısal çalışmada, Şekil 3.9'da görüldüğü gibi, KH-RT hibrit modeli kullanılmıştır. KH-RT hibrit modeli Wave parçalanma modeli ile kıyaslanmıştır. Parçalanma uzunluğundan ($L_{\text{parçalanma}}$) önce KH modeli (ana damla yüzeyinden ufak damlacıklar kopmakta) etkin iken, parçalanma uzunluğundan sonra RT ve KH modellerinin dalga boyları kıyaslanıp hangi modelin etkin olacağı belirlenmektedir. Damlacıklar yavaşladıkça aerodinamik kuvvetlerin azaldığı not edilmelidir [179]. Sunulan bu tez çalışmasında olduğu gibi, konuyla ilgili tüm sayısal çalışmalarda, her enjektör için hibrit modelin katsayıları deneysel bir çalışma ile kalibre edilmelidir. Literatürde, parçalanma uzunluğu ile ilgili farklı bilim insanları tarafından önerilen farklı bağıntılar bulunmaktadır.



Şekil 3.9. KH-RT hibrit modeli

3.4. Hesaplama Hacmi ve Ağ Yapısı

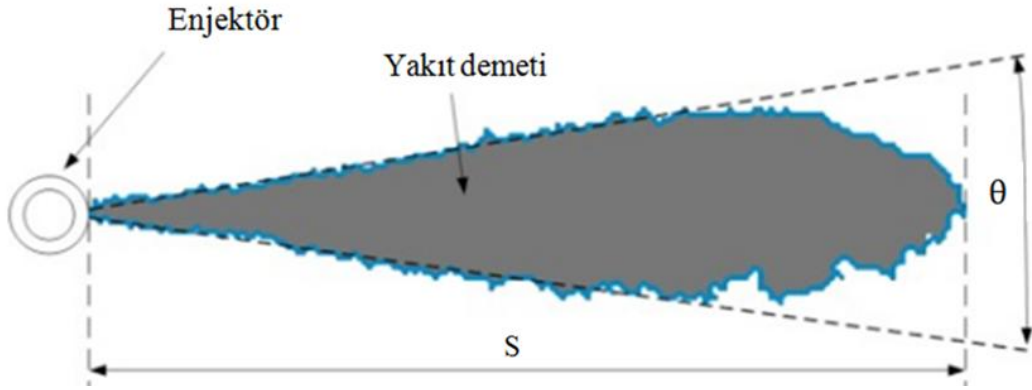
Üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin, satın alınan ticari dizel yakıtının ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının (B5, B10, B15 ve B20) sprey özelliklerinin Fluent paket programında incelenebilmesi için hesaplama hacmi (püskürtme odası) tasarlanmıştır. Sınır şartları seçilmiştir. İncelenen problem zaman bağımlıdır. Söz konusu püskürtme odası için, ileride açıklanacağı üzere, farklı boyutlarda hexahedron ağ (mesh) kullanılmıştır. Kullanılan sayısal çalışmada, damlacıkların çarpışmaları da göz önüne alınmıştır.

3.5. Yakıt Demeti Karakteristiğine Etki Eden Faktörler ve İncelenen Parametreler

Dizel motorlarında çevrimin ekonomikliği, püskürtülen yakıtın parçalanmasının iyilik derecesine ve dolayısıyla karışım teşkiline bağlıdır [176]. Yakıtın püskürtülmesiyle çeşitli çaptaki damlacıklardan (5–40 μm) bir yakıt demet oluşur [176]. Demetteki damlacıklar, büyüklüklerine ve sayılarına göre dağılım gösterirler. Püskürtme başlangıcında, küçük çaplı damlacıkların enerjileri düşüktür ve hızlarını çok çabuk kaybederler. Dolayısıyla yanma odası içerisinde daha az yol alırlar. Bunu takip eden damlacıklar ise, daha büyük çaplı ve hızları daha fazla olduğundan dolayı daha düşük dirençle karşılaşırlar ve daha çok yol alırlar. Yakıt dağılımı enjektör deliğinden uzaklaştıkça ucu küt bir koni biçiminde genişlemektedir [176]. Dizel motorlar için tipik bir yakıt demetinin uzunluğu (nüfuz derinliği, S) ve koni açısı (θ) Şekil 3.10'da gösterilmiştir

[182]. Demetin nüfuz derinliği karışımın oluşması açısından önem taşımaktadır. Büyük dizel motorlarda damlacıkların, püskürtmenin yapıldığı yerden uzak noktalara kadar ulaşması amaçlanmaktadır. Nispeten daha küçük motorlarda ise demetin yanma odası cidarına çarpıp orada sıvı filmi oluşturması istenmez. Bu nedenlerle demetin nüfuz derinliği ve koni açısı önemli yakıt demeti karakteristikleridir [8]. Bütün demetin uzunluğu 250 mm, hatta daha uzun olabilmesine rağmen, tek bir damlacık yanma odası içerisinde yaklaşık 25 mm yol gider. Ancak nüfuz derinliği hesabında bütün demet göz önüne alınır [176]. Ayrıca, yakıt demetinin karakteristiğini belirlemede, püskürtülen yakıt çok sayıda ve değişik çapta damlacıklara parçalandığından, demetin iyilik derecesi için (parçalanma açısından), damlacıkların ortalama çapını veren Sauter ortalama damlacık çapı ifadesi tercih edilir. Son olarak, yine farklı bir sprej karakteristiği olarak, yakıt ile havanın karışımının iyiliğini (niteliğini) belirlemede sprej hacmi terimi kullanılır. Nüfuz derinliği (demet boyu), ortalama damlacık çapı, sprej açısı ve sprej hacmi motor performansı ve eksoz emisyonlarını doğrudan etkilemektedir.

Sunulan tez çalışmasında, farklı yakıtların (üretilen saf biyodizel, satın alınan saf dizel yakıtı ve biyodizel-dizel yakıtı karışımları), yukarıda belirtilen yakıt demeti karakteristikleri (nüfuz derinliği, Sauter ortalama damlacık çapı, sprej koni açısı ve sprej hacmi), farklı püskürtme basınçları (100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa), karşı-ortam (hava) yoğunlukları (15 kg/m^3 ve 30 kg/m^3), enjektör delik çapları (0,08 mm, 0,16 mm, 0,32 mm ve 0,64 mm) ve yakıt sıcaklıkları (295,15 K, 309,15 K, 311,15 K, 315,15 K, 319,15 K, 329,15 K, 332,15 K, 341,15 K, 349,15 K, 345, 15 K, 350,15 K, 367,15 K, ve 382,15 K) altında incelenmiştir. Söz konusu yakıtların yakıt demeti özellikleri belirlenmeden önce, Fluent paket programı deneysel bir çalışma [126] yardımıyla doğrulanmıştır. Bunun için, Fluent paket programında, yukarıda ayrıntılı olarak açıklanan parçalanma modelleri (KH-RT ve Wave) ve türbülans modelleri (standart $k - \epsilon$ ve standart $k - \omega$) kullanılmıştır. Ayrıca, yine Fluent paket programında ağ bağımsız çözüm için farklı ağ boyutları (0,5 mm, 0,75 mm, 1 mm, 1,25 mm ve 1,5 mm) incelenmiştir.



Şekil 3.10. Yakıt demeti karakteristikleri [182].

Elde edilen sayısal sprey açısı değerleri literatürde daha önceden Heywood [169] (3.110) ve Sitkei [183] (3.111) tarafından önerilmiş bağıntılardan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır:

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{1}{A} 4\pi \left(\frac{\rho_o}{\rho_y}\right)^{0,5} \frac{\sqrt{3}}{6} \quad (3.110)$$

$$\theta = 0,03 \left(\frac{L}{d_e}\right)^{-0,3} \left(\frac{\rho_y}{\rho_o}\right)^{-0,1} Re^{0,7} \quad (3.111)$$

Burada, A enjektör geometrisine bağlı olup korelasyon yardımıyla belirlenmiş sabit bir katsayıyı [169] ve L enjektör boyunu temsil etmektedir [184]. Sayısal olarak elde edilen ortalama çap değerleri (d_{32}), Ejim ve arkadaşları [185] (3.112) ile Hiroyasu ve Arai [169] (3.113) tarafından önerilmiş bağıntılardan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır:

$$d_{32} = 6156 \cdot v_y^{0,385} \cdot \sigma_y^{0,737} \cdot \rho_y^{0,737} \cdot \rho_o^{0,06} \cdot \Delta P^{-0,54} \quad (3.112)$$

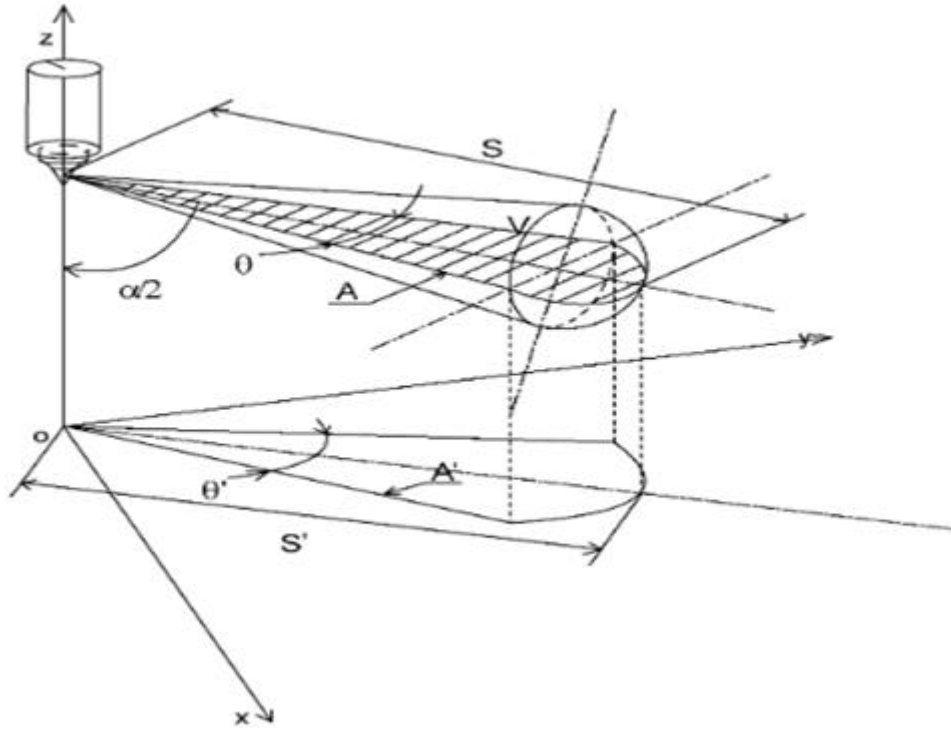
$$d_{32} = d_e \cdot 0,38 \cdot Re^{0,25} \cdot We_y^{-0,32} \cdot \left(\frac{\mu_y}{\mu_o}\right)^{0,37} \cdot \left(\frac{\rho_y}{\rho_o}\right)^{-0,47} \quad (3.113)$$

Burada, v_y ve σ_y yakıtın kinematik viskozitesini (m^2/s) ve yüzey gerilimini (N/m), μ_o karşı-ortamın (havanın) dinamik viskozitesini (kg/ms) ve ΔP püskürtme basıncı ile karşı-ortam (hava) basıncı arasındaki farkı (Pa) temsil etmektedir.

Spreyin hacminin hesaplanmasında (V_{sprey} , mm^3), Şekil 3.11'de görüldüğü gibi, yakıt demeti şekil olarak bir tam koni ve yarım küreden oluştuğu kabul edilir ve aşağıdaki bağıntı kullanılır [186, 187]:

$$V_{\text{sprey}} = \frac{1}{3} \pi \cdot S^3 \cdot \tan^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \cdot \frac{(1 + 2 \tan(\theta/2))}{(1 + \tan(\theta/2))^3} \quad (3.114)$$

Burada, S nüfuz derinliğini (mm) ve θ sprej koni açısını (derece) temsil etmektedir.



Şekil 3.11. Yakıt demeti hacmi [186, 187].

3.6. Sayısal Çözüm Yöntemleri

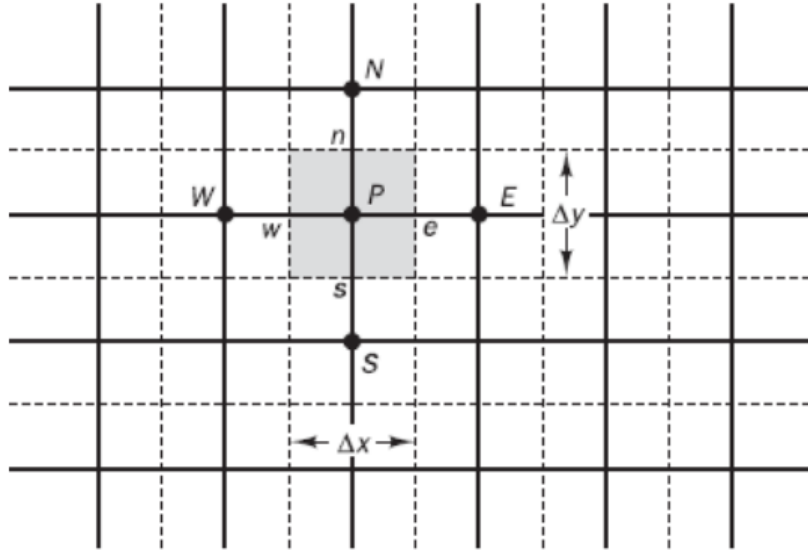
Sonlu fark, sonlu hacim ve sonlu elemanlar, akışkanlar dinamiği ve ısı transferi problemlerinde yaygın olarak kullanılan denklem ayrıklaştırma yöntemleridir [188, 189]. Bu yöntemlerden sonlu fark ve sonlu hacim, günümüzdeki en popüler denklem ayrıklaştırma yöntemleridir ve bu tezin sayısal çalışmasında, Fluent paket programı tarafından kullanılmıştır. Sonlu elemanlar, zamanla popüleritesi artan bir yöntemdir. Sonlu

elemanlar yönteminde, çözüm bölgesi küçük elemanlara ayrılarak ve her bir eleman üzerinde uygun interpolasyon fonksiyonları kullanılarak cebirsel denklemler elde edilir ve bunların çözümü ile sonuca ulaşılır. Sonlu hacim ise integral formdaki korunum denklemlerinin fiziksel bir bölge içerisinde doğrudan ayrıklaştırılması esasına dayanan bir tür sonlu fark yöntemidir [188, 189]. Sonlu fark yaklaşımı, diferansiyel denklemlerin sayısal çözümlerinin elde edilmesi için kullanılan en eski yöntemdir. İlk olarak 1768 yılında Euler tarafından kullanılmıştır. Yöntemin temelinde, herhangi bir türevi iki farkın oranı şeklinde ifade etmek vardır [188, 189]. Sınır elemanları yönteminde, diferansiyel denklemler çözüm alanının sınırlarında integral denklemlerine dönüştürülerek sonuca ulaşılır [188, 189]. Hem sonlu fark hem de sonlu hacim denklemlerinin kullanılması sonucunda, kısmi diferansiyel denklemlerin yapısına göre doğrusal veya doğrusal olmayan cebirsel denklem sistemleri elde edilir. Doğrusal olmayan denklem sistemleri ardışık (iteratif) bir teknik kullanılarak çözümlenmelidir [189].

Korunum denklemlerinde yer alan integral terimlerinin ayrıklaştırılması işlemi için, değişkenlerin kontrol hacmi merkezinde tanımlanan değerlerinin dışında, kontrol hacmi içerisindeki belirli noktalarda değişken değerlerinin bilinmesine de gerek vardır. Bu amaçla, ara noktalar olarak tanımlanan bu noktalarda, değişkenlerin değerleri için interpolasyon yapılır. Yaygın olarak kullanılan interpolasyon yöntemleri “Upwind”, “Doğrusal” “Hybrid” ve “Quick” olarak sıralanabilir. Sunulan tezde, denklemler “Upwind” yöntemi ve basınç-hız bağıntısı “SIMPLE” algoritmasıyla çözdürülmüştür. Aşağıda, kullanılan yöntemlerin ayrıntılı açıklaması verilmiştir.

3.6.1. Upwind Yöntemi

Bu yöntem ile, Şekil 3.12’de görülen e noktasındaki ϕ_e değişken değerinin belirlenmesi, burada birinci türev için yazılan ileri veya geri fark yaklaşımlarının kullanılması ile eşdeğerdir. Bu yöntem için, Taylor serisi yardımıyla ikinci türev de kullanılabilir.



Şekil 3.12. 2-boyutlu örnek bir hesaplama alanı

Buna göre,

$$\phi_e = \begin{cases} \phi_P; (\vec{V} \cdot \vec{n}) > 0 \\ \phi_E; (\vec{V} \cdot \vec{n}) < 0 \end{cases} \quad (3.115)$$

şeklinde bir yaklaşım göz önüne alınır. Bu yaklaşım, P noktasının $(x_e - x_p)$ kadar uzağındaki e noktasında ϕ değişkeninin Taylor serisine açılması ile yapılır:

$$\phi_e = \phi_P + (x_e - x_p) \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{x=x_p} + \frac{(x_e - x_p)^2}{2} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right)_{x=x_p} \quad (3.116)$$

Bu ifadenin sağ tarafındaki birinci terimden sonraki terimlerin göz ardı edilmesi ile birinci dereceden hassas olan,

$$\phi_e = \phi_P + O(\Delta x) \quad (3.117)$$

sonucu elde edilir. Benzer şekilde E noktasının $(x_E - x_e)$ kadar uzağındaki e noktasında ϕ değişkeninin Taylor serisine açılması ile,

$$\phi_e = \phi_E + O(\Delta x) \quad (3.118)$$

sonucu elde edilir.

3.6.2. Simple Algoritması

Lineer olmayan Navier-Stokes denklemleri, hesaplama alanındaki hız ve basınç değerlerini çözmek için kullanılır. Ancak, genellikle, hız ve basınç alanları denklemleri önceden bilinmemektedir. Üstelik, basıncı belirlemeyi sağlayan bir denklem de mevcut değildir. Bu güçlüğü aşmak için Patankar tarafından geliştirilen ve “tahmin etme ve düzeltme” esasına dayanan SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) ve türevleri (SIMPLER, SIMPLEC ve PISO) yöntemleri, süreklilik denklemini basınç alanı için kullanmaktadırlar [175]. Diğer bir ifade ile, hız ve basınç değerlerini belirlemek adına, sıkıştırılamaz akış için, ayrıklaştırılmış süreklilik ve momentum denklemlerinin birleşiminden türetilmekte olan basınç düzeltme denkleminin çözümü esasına dayanan SIMPLE algoritması kullanılır [190]. Buna göre, x ve y yönündeki momentum denklemlerini yarı ayrıklaştırılmış halde yazarsak,

$$a_p^u \cdot u_p = \sum a_{km}^u \cdot u_{km} - \frac{\partial P}{\partial x} \cdot \Delta V + S_u \quad (3.119)$$

$$a_p^v \cdot v_p = \sum a_{km}^v \cdot v_{km} - \frac{\partial P}{\partial y} \cdot \Delta V + S_v \quad (3.120)$$

elde edilir [190]. Burada, a sonlu fark denklemi katsayısını, ΔV sonlu kontrol hacminin hacmini (iki boyutta alanını), S kısmi diferansiyel denklemin kaynak terimini, u_{km} ve v_{km} kaydırılmış (staggered) değişken düzenlemesi için komşu kontrol hacimlerinin yüzeylerindeki x ve y yönündeki hız bileşenlerini, P ve km alt indisleri ise sırasıyla incelenen kontrol hacminin merkezini ve incelenen kontrol hacmine komşu kontrol hacimlerinin merkezlerini temsil etmektedir. Yukarıda bahsedildiği gibi, (3.119) ve (3.120) denklemlerinin çözülebilmesi için basınç alanının bilinmesi gerektiğinden, “ * ” üst indisli büyüklükler tahmini (öngörülen) değerleri, “ ’ ” üst indisli büyüklükler de düzeltme değerlerini göstermek üzere, SIMPLE algoritmasına göre gerçek değerler [175],

$$P = P^* + P' \quad (3.121)$$

$$u = u^* + u' \quad (3.122)$$

$$v = v^* + v' \quad (3.123)$$

şeklinde yazılabilir. Böylece, öngörülen bir P^* basınç alanı için (3.119) ve (3.120) denklemleri,

$$a_P^u \cdot u^*_P = \sum a_{km}^u \cdot u^*_{km} - \frac{\partial P^*}{\partial x} \cdot \Delta V + S_u \quad (3.124)$$

$$a_P^v \cdot v^*_P = \sum a_{km}^v \cdot v^*_{km} - \frac{\partial P^*}{\partial y} \cdot \Delta V + S_v \quad (3.125)$$

şekline dönüşür. (3.124) ve (3.125) numaralı denklemler taraf tarafa sırasıyla (3.119) ve (3.120) numaralı denklemlerden çıkarılırsa [190],

$$a_P^u \cdot u'_P = \sum a_{km}^u \cdot u'_{km} - \frac{\partial P'}{\partial x} \cdot \Delta V \quad (3.126)$$

$$a_P^v \cdot v'_P = \sum a_{km}^v \cdot v'_{km} - \frac{\partial P'}{\partial y} \cdot \Delta V \quad (3.127)$$

elde edilir. (3.126) ve (3.127) numaralı denklemlerinin sağ taraflarındaki ilk terimler yok varsayıldığında,

$$u_P = u^*_P - D^u \cdot \frac{\partial P'}{\partial x} \quad (3.128)$$

$$v_P = v^*_P - D^v \cdot \frac{\partial P'}{\partial y} \quad (3.129)$$

elde edilir [190]. Burada,

$$D^u = \frac{\Delta V}{a_P^u} \quad (3.130)$$

$$D^v = \frac{\Delta V}{a_p^v} \quad (3.131)$$

şeklindedir. Her ne kadar (3.128) ve (3.129) numaralı denklemler incelenen kontrol hacminin merkezindeki hız değerleri (u_p ve v_p) için geliştirilmiş olsa da, söz konusu denklemler hesaplama ağı içerisindeki herhangi bir nokta (kontrol hacminin yüzeyleri, vb.) için de kullanılabilir [190]. Diğer bir ifade ile gerçek hız değerleri,

$$u = u^* - D^u \cdot \frac{\partial P'}{\partial x} \quad (3.132)$$

$$v = v^* - D^v \cdot \frac{\partial P'}{\partial y} \quad (3.133)$$

olarak elde edilir. (3.132) ve (3.133) numaralı denklemlerin sırasıyla x ve y 'ye göre türevleri alınır,

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(D^u \cdot \frac{\partial P'}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D^v \cdot \frac{\partial P'}{\partial y} \right) + \frac{\partial u^*}{\partial x} + \frac{\partial v^*}{\partial y} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3.134)$$

elde edilir [190]. Süreklilik denklemi nedeniyle, (3.134) numaralı denklemin sağ tarafı sıfıra eşit olacağından,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D^u \cdot \frac{\partial P'}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D^v \cdot \frac{\partial P'}{\partial y} \right) = \frac{\partial u^*}{\partial x} + \frac{\partial v^*}{\partial y} \quad (3.135)$$

elde edilir. (3.135) numaralı basınç düzeltme denkleminin sağ tarafındaki kaynak terimi kütleli dengesizliklerden ortaya çıkar ve iterasyon işleminin durdurulmasındaki kriter olarak kullanılır [175, 190]. Diğer bir ifade ile, bu kaynak terimi sıfır olana kadar sırasıyla (3.124), (3.125), (3.135), (3.121), (3.132) ve (3.133) numaralı denklemler kullanılarak basınç ve hızlar düzeltilir, ve sıfır olduğunda ($P' = 0$) $P^* = P$, $u^* = u$ ve $v^* = v$ olacağından bundan sonra basınç ve hızlar için bir düzeltme yapılmasına gerek kalmaz. Çözüm böylece yakınsar [175, 190]. Kısaca, sıkıştırılamaz akış için kullanılan SIMPLE algoritmasının çalışma mantığı aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. P^* basınç alanı tahmin edilir. (Örneğin, $P^* = 0$)

2. (3.124) ve (3.125) numaralı denklemler kullanılarak u^* ve v^* belirlenir.
3. (3.135) numaralı denklem kullanılarak P' basınç düzeltme terimi belirlenir.
4. (3.121), (3.132) ve (3.133) numaralı denklemleri kullanılarak sırasıyla gerçek P , u ve v hesaplanır.
5. Hesaplanan büyüklükler ile sıcaklık ve türbülans bileşenleri gibi diğer bilinmeyenler hesaplanır.
6. Bulunan gerçek P , u ve v değerleri tahmini (öngörülen) değerler (P^* , u^* ve v^*) olarak atanır ve 2. adımdan devam edilir. Sonuç yakınsayan kadar tüm adımlar tekrarlanır [190].



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Sunulan tez çalışması 2 ana kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda, transesterifikasyon reaksiyonuna etki eden parametrelerin (katalizör oranı, reaksiyon sıcaklığı, reaksiyon süresi ve alkol/yağ mol oranı) üretilen biyodizellerin direkt olarak viskozitelerine olan etkileri tam bir matris şeklinde incelenerek, farklı katalizörler kullanımında atık kızartma yağından üretilebilecek biyodizelin (metil ester) reaksiyon parametreleri belirlenmiştir. Belirlenen optimum reaksiyon parametrelerine göre üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin bazı önemli yakıt özellikleri (üst ısıl değer, parlama noktası sıcaklığı, soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığı, akma noktası sıcaklığı, toplam kirlilik, karbon kalıntısı, oksidasyon kararlılığı, mono, di ve trigliserit içeriği, asit sayısı, çoklu doymamış metil ester içeriği, bakır şerit korozyonu, metanol içeriği, su içeriği, sülfatlanmış kül içeriği, kükürt içeriği ve iyot sayısı) KTÜ Saadettin GÜNER Yakıt Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde ölçtürülmüş ve EN 14214 standart değerleriyle kıyaslanmıştır. İkinci kısımda, ticari saf dizel yakıtının, tez çalışması kapsamında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin ve bu biyodizeli hacimsel olarak % 5, % 10, % 15 ve % 20 oranlarında içeren biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının (B5, B10, B15 ve B20) yakıt demeti özelliklerine (nüfuz derinliği, Sauter damlacık ortalama çapı, sprej koni açısı ve sprej hacmi), enjektör delik çapının ve yakıt sıcaklığının etkileri farklı püskürtme basıncı ve karşı-ortam (hava) yoğunluğu altında, sayısal olarak Ansys Fluent paket programı yardımıyla incelenmiştir. Ayrıca, biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının (B5, B10, B15 ve B20) yakıt demeti karakteristiklerinin, saf dizel yakıtının yakıt demeti karakteristiklerine benzer olduğu şartlar belirlenmiştir.

4.1. Biyodizel Üretimi

Bölüm 3'te ayrıntılı bir şekilde anlatıldığı üzere, CH_3OH ve farklı katalizörler (CH_3ONa ve CH_3OK) kullanılarak, atık kızartma yağından biyodizel üretimi aşamasında,

- katalizör miktarı olarak kullanılan atık yağın kütlelerinin % 0,75, % 1,00 ve % 1,25 değerleri,
- reaksiyon sıcaklığı olarak 50 °C, 55 °C ve 60 °C sıcaklıkları,

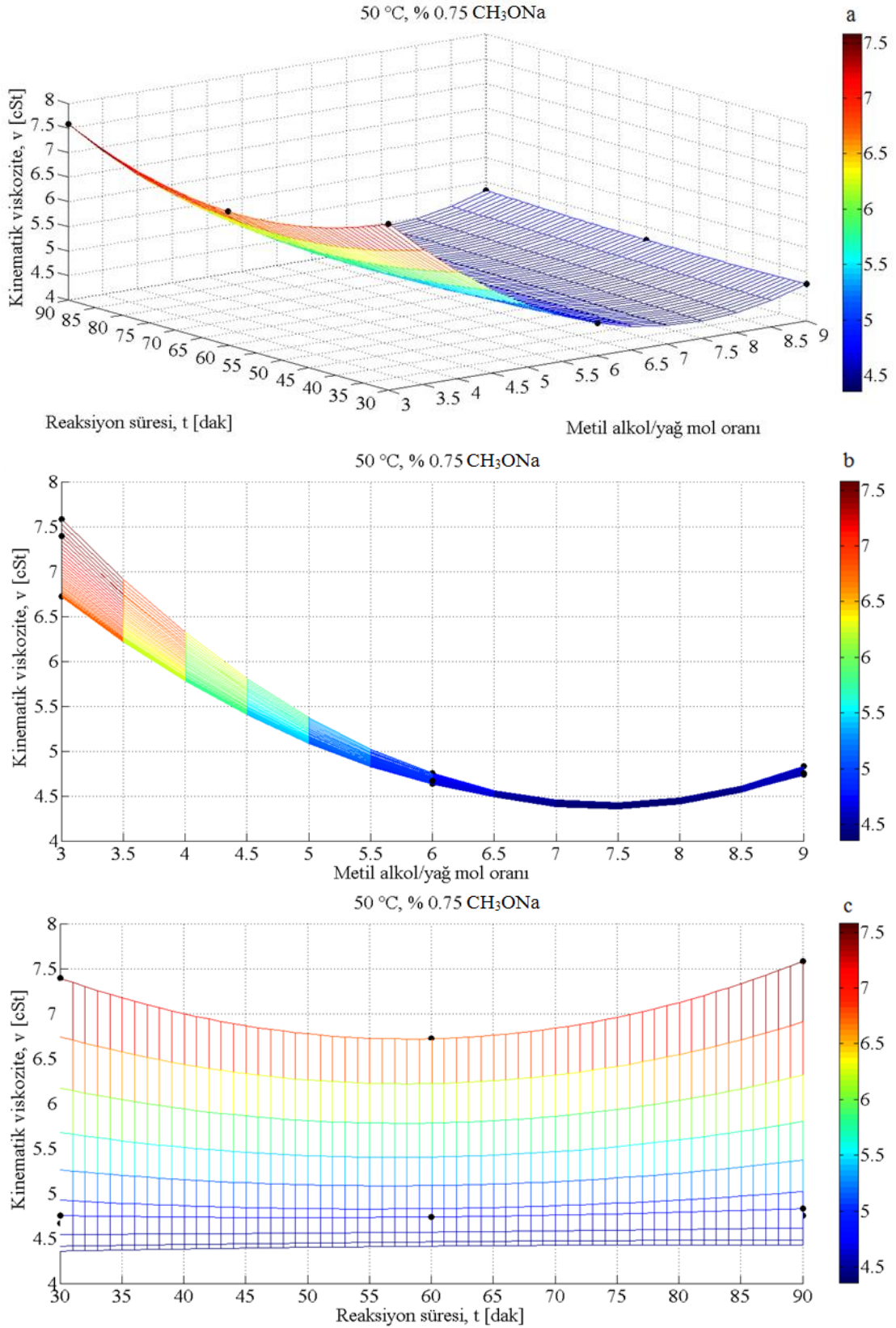
- reaksiyon süresi olarak 30, 60 ve 90 dakika süreleri ve
- alkol/yağ mol oranı olarak 3:1, 6:1 ve 9:1 oranları incelenmiştir.

Transesterifikasyon reaksiyonuna etki eden parametrelerin tümünün, üretilen biyodizelin viskozitesine olan etkilerinin tam bir matris şeklinde incelenmesi için her bir alkol-katalizör çifti için 81 adet farklı deney olmak üzere, $81 \times 2 = 162$ adet (metanol-potasyum metoksit ve metanol-sodyum metoksit) farklı biyodizel üretilmiş, yoğunlukları (ISO 4787) ve viskoziteleri (DIN 53015) ölçülmüştür. Farklı katalizörler kullanılarak üretilen biyodizellerin kinematik viskozitelerinin (1) reaksiyon süresi ve alkol/yağ mol oranına göre, (2) reaksiyon sıcaklığı ve alkol/yağ mol oranına göre ve son olarak (3) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri, aşağıda 3 başlık altında verilmiştir.

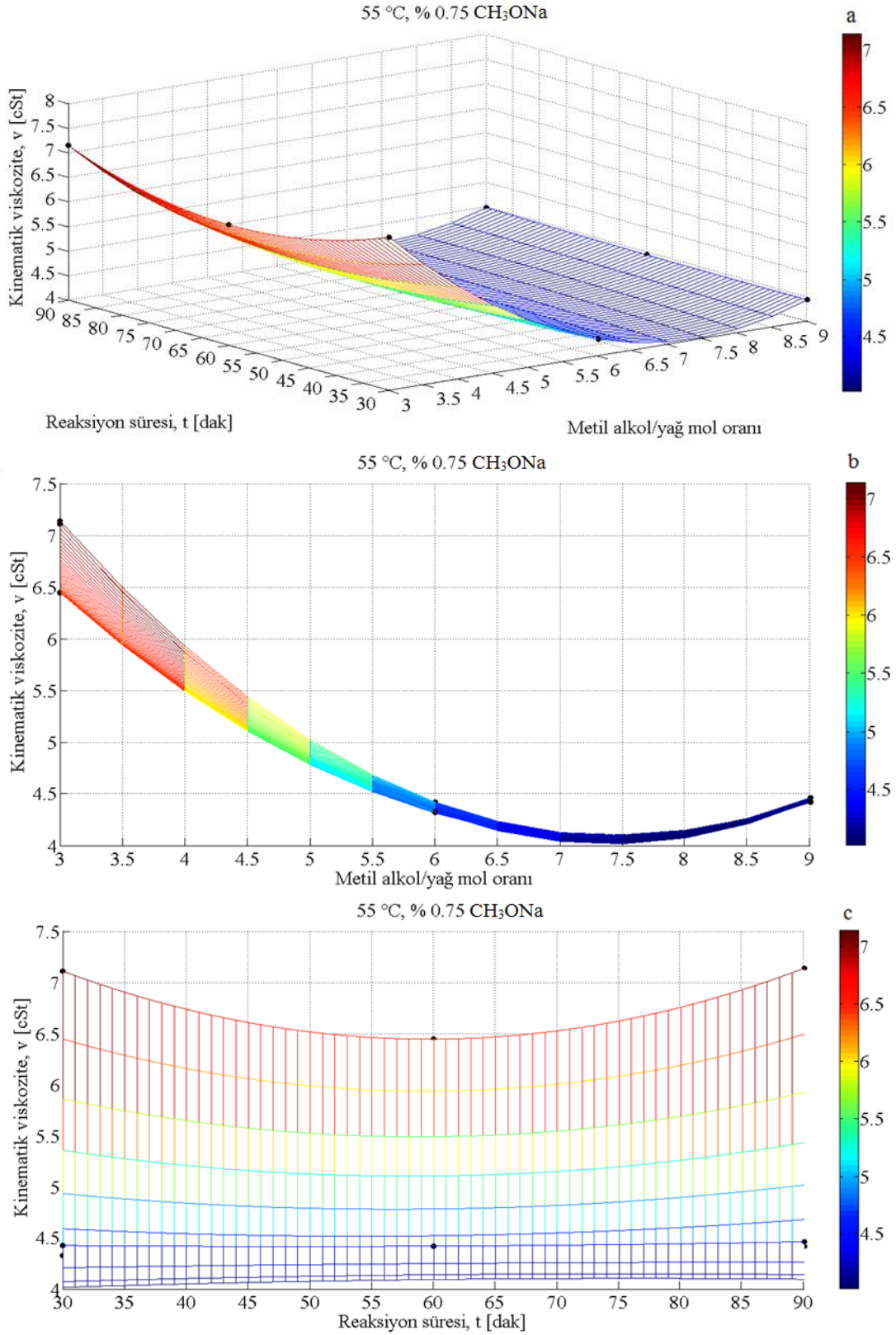
4.1.1. Farklı Katalizörler Kullanılarak Üretilen Atık Kızartma Yağı Biyodizelinin Viskozitesinin Reaksiyon Süresi ve Alkol/Yağ Mol Oranına Göre Değişimi

4.1.1.1. CH₃OH ve % 0,75 Oranında CH₃ONa Kullanılması Durumu

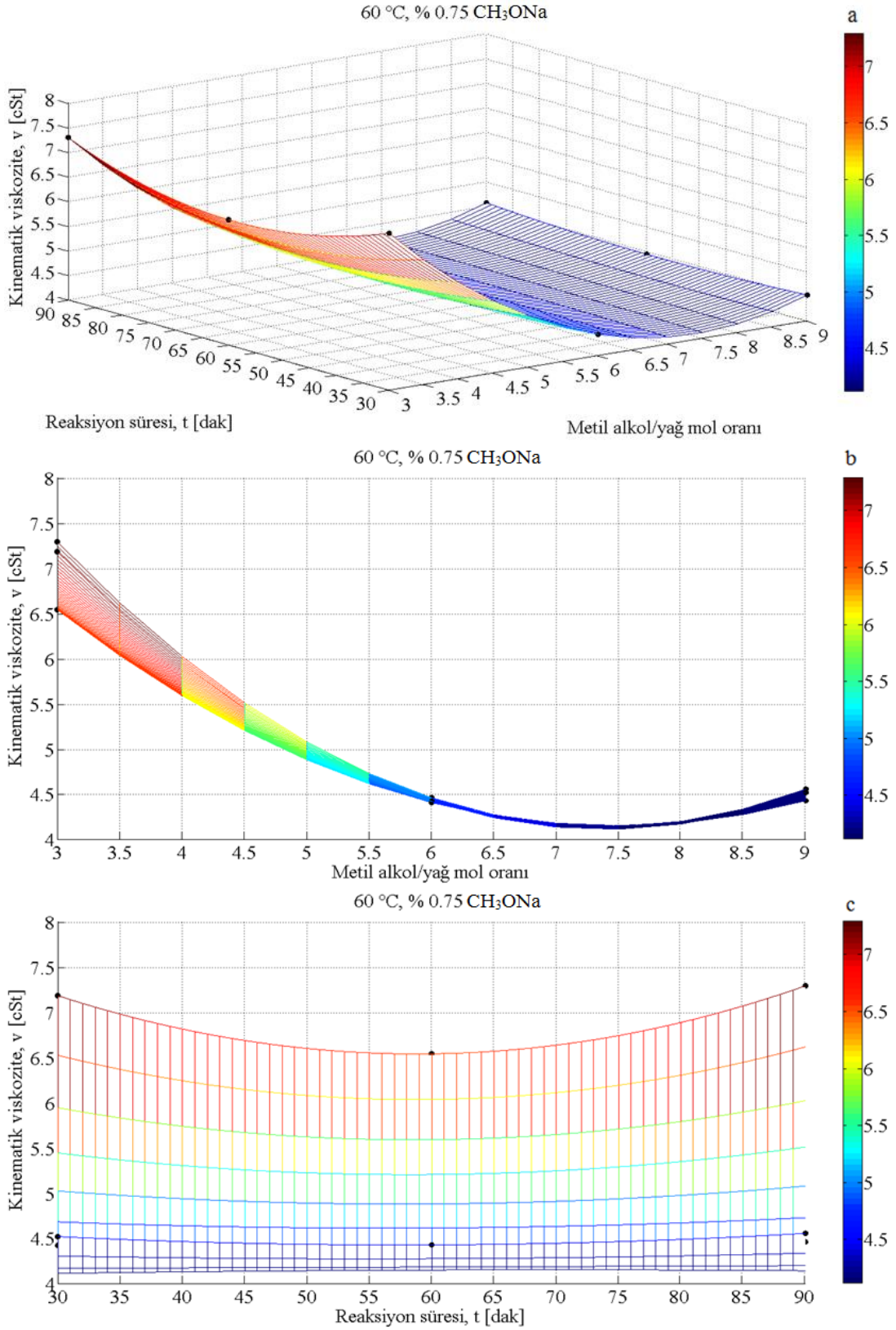
Şekil 4.1–4.3 a–c’de, CH₃OH ve % 0,75 oranında CH₃ONa kullanılarak farklı reaksiyon sıcaklıklarında (50, 55 ve 60 °C) üretilen atık kızartma yağı biyodizellerinin kinematik viskozitelerinin metil alkol/yağ mol oranına (3:1, 6:1 ve 9:1) ve reaksiyon süresine (30, 60 ve 90 dak.) göre değişimleri 3- ve 2-boyutlu olarak verilmiştir.



Şekil 4.1. CH₃OH ve % 0,75 oranında CH₃ONa kullanılarak 50 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri



Şekil 4.2. CH₃OH ve % 0,75 oranında CH₃ONa kullanılarak 55 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri



Şekil 4.3. CH₃OH ve % 0,75 oranında CH₃ONa kullanılarak 60 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri

Şekil 4.1–4.3 incelendiğinde, farklı reaksiyon sıcaklıkları için kinematik viskozitenin reaksiyon süresi ve metil alkol/yağ mol oranına göre değişimlerinin benzer karakterde olduğu görülebilir. Düşük alkol/yağ mol oranlarında (örneğin 3:1), viskoziteler en yüksek değerleri almış (Şekil 4.1 a, b – Şekil 4.3 a, b) ve reaksiyon süresine göre değişimleri yaklaşık parabolik bir karakter sergilemiştir (Şekil 4.1 a, c – Şekil 4.3 a, c). Mol oranı arttıkça bir denge reaksiyonu olan transesterifikasyon reaksiyonu, ürünler yönüne kaydığından, viskoziteler giderek azalarak 7,5:1 mol oranında düşük değerlerine ulaşmış (Şekil 4.1–4.3 b), aynı zamanda reaksiyon süresine göre viskozitenin değişimi yaklaşık sabit bir karaktere dönüşmüştür (Şekil 4.1–4.3 c). Mol oranı daha da artırıldığında, gliserinin biyodizel fazındaki çözünürlüğünün artması nedeniyle (reaksiyonun girenler yönüne kayması), viskozite değerleri tekrar artış eğilimine girmiş (Şekil 4.1–4.3 b) fakat reaksiyon süresine göre yaklaşık sabit değişim karakteristikleri devam etmiştir (Şekil 4.1–4.3 c).

Sunulan tez çalışmasında, reaksiyon parametrelerinin ara değerleri, örneğin alkol/yağ mol oranı için 3,5:1, 4,5:1, 7,5:1, vb. reaksiyon süresi için 35, 40, 75 dakika vb. ve reaksiyon sıcaklığı için 51, 52, 58 °C vb., kullanılarak üretilebilecek, yani gerçekte üretilmemiş olan biyodizellerin viskozite değerleri, Matlab programındaki interpolasyon komutu yardımıyla tahmin edilmiştir. Böylece, parametrik değerlerin değişimi daha ayrıntılı olarak incelenmiştir. Matlab programı, viskozite tahminini gerçek ölçüm değerlerini, örneğin alkol/yağ mol oranı için 3:1, 6:1 ve 9:1 ve reaksiyon süresi için 30, 60 ve 90 dakika, referans olarak yapmaktadır. Buna göre, farklı reaksiyon sıcaklıklarında (50, 55 ve 60 °C), reaksiyon sürelerinde (30, 60 ve 90 dak.) ve alkol/yağ mol oranlarında (3:1, 6:1 ve 9:1), % 0,75 oranında CH₃ONa kullanılarak üretilebilecek biyodizellerin ilgili reaksiyon parametreleri Matlab programındaki interpolasyon yöntemi yardımıyla tahmin edilmiş ve Tablo 4.1’de verilmiştir.

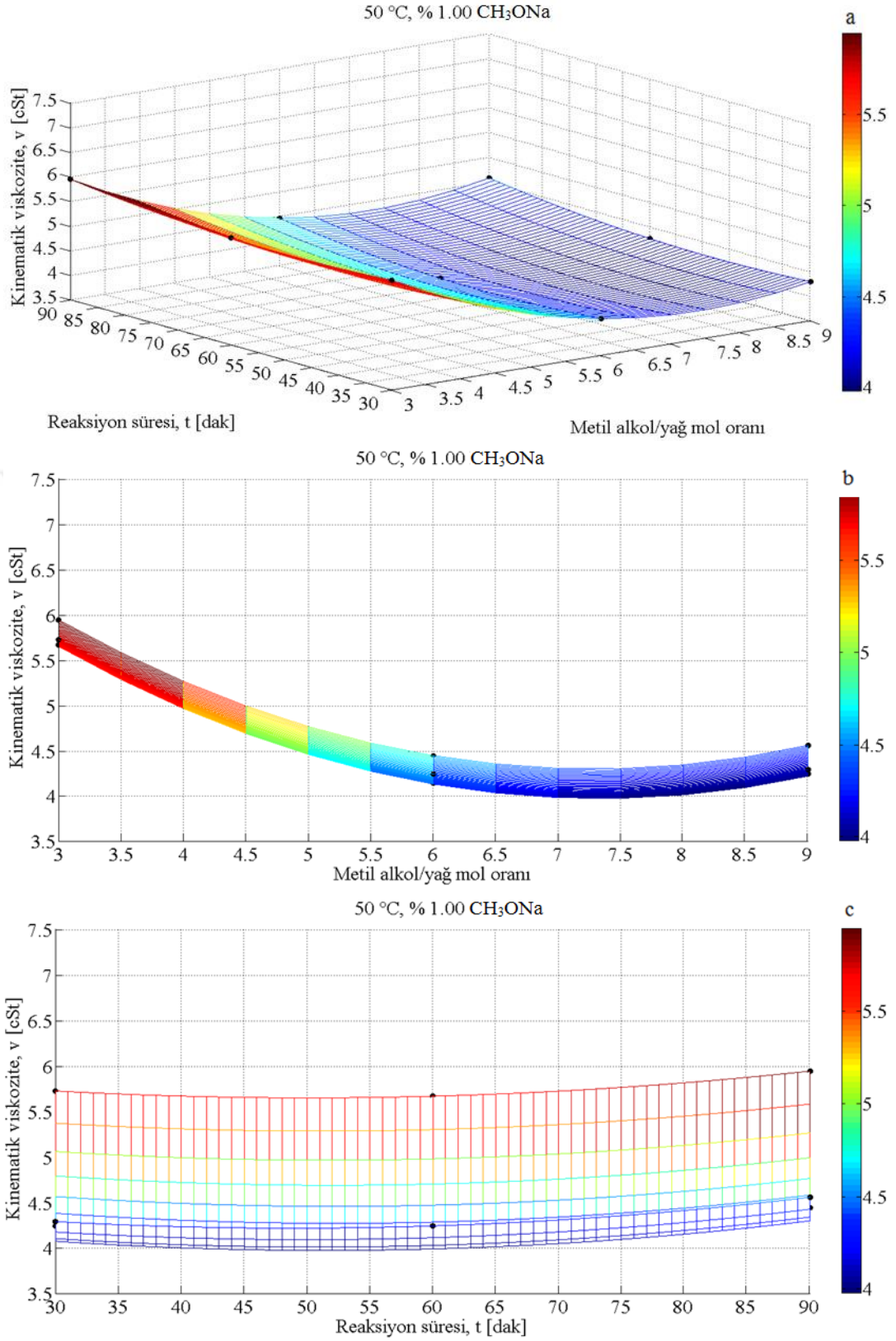
Tablo 4.1. Farklı reaksiyon sıcaklıklarında % 0,75 oranında CH₃ONa kullanılarak üretilebilecek biyodizellerin tahmini viskozite değerleri ve ilgili metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresi parametreleri

Katalizör (CH ₃ ONa) oranı	Reaksiyon sıcaklığı		
	50 °C	55 °C	60 °C
% 0,75	7,5:1 mol oranı ve 30 dak. reaksiyon süresinde 4,3584 cSt	7,5:1 mol oranı ve 30 dak. reaksiyon süresinde 4,0225 cSt	7,5:1 mol oranı ve 30 dak. reaksiyon süresinde 4,1186 cSt

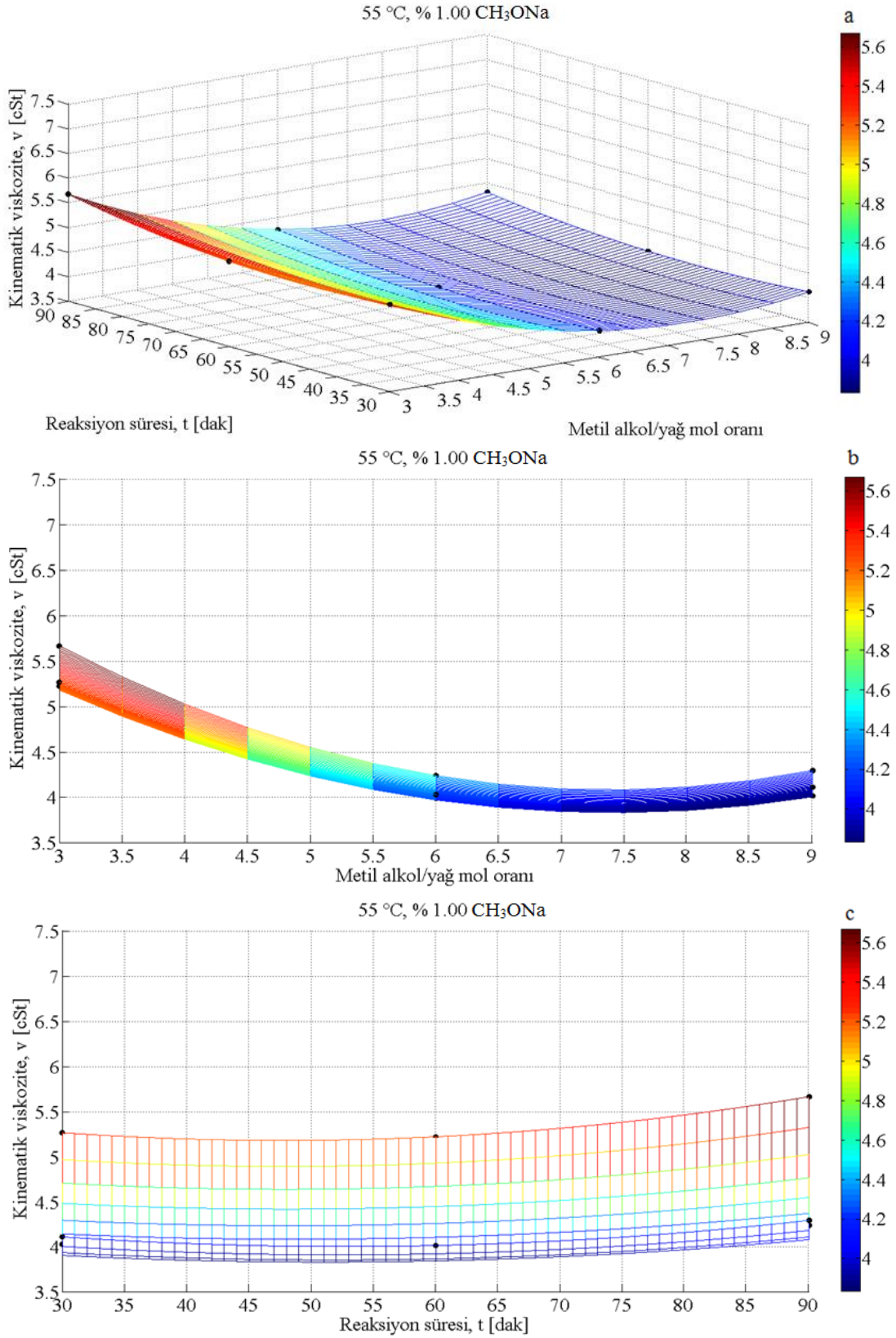
Tablo 4.1 incelendiğinde, herhangi bir reaksiyon sıcaklığı için, 7,5:1 metil alkol/yağ mol oranı kullanımında ve 30 dakika reaksiyon süresi sonunda düşük viskoziteli biyodizelin elde edilebileceği görülmüştür. Diğer bir anlatımla, reaksiyon sıcaklığının değişimi, düşük viskozitenin elde edileceği mol oranı ve reaksiyon süresini etkilememiştir. Burada vurgulanması gereken diğer bir önemli husus, deneysel olarak % 0,75 katalizör oranı, 55 °C reaksiyon sıcaklığı, 6:1 mol oranı ve 60 dakika reaksiyon süresi için, düşük viskoziteli biyodizel üretilmiş olsa da, Tablo 4.1, yine 55 °C reaksiyon sıcaklığında, mol oranı 7,5:1'e artırıldığında ve reaksiyon süresi 30 dakikaya indirildiğinde daha da düşük viskoziteli (4,0225 cSt) biyodizelin üretilebileceğini göstermektedir.

4.1.1.2. CH₃OH ve % 1,00 Oranında CH₃ONa Kullanılması Durumu

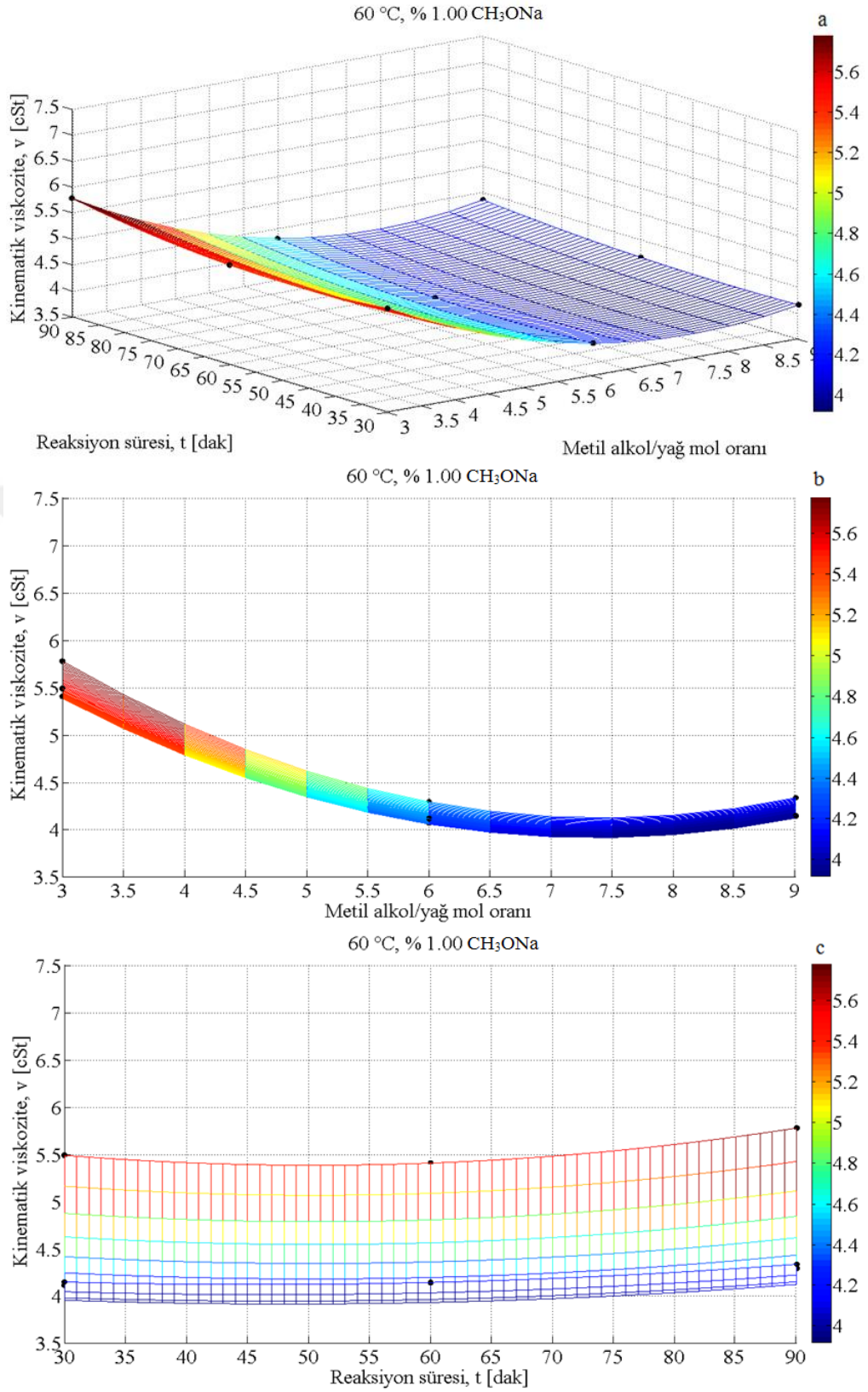
Şekil 4.4–4.6 a–c'de, CH₃OH ve % 1,00 oranında CH₃ONa kullanılarak farklı reaksiyon sıcaklıklarında (50, 55 ve 60 °C) üretilen atık kızartma yağı biyodizellerinin kinematik viskozitelerinin metil alkol/yağ mol oranına (3:1, 6:1 ve 9:1) ve reaksiyon süresine (30, 60 ve 90 dak.) göre değişimleri 3- ve 2-boyutlu olarak verilmiştir.



Şekil 4.4. CH₃OH ve % 1,00 oranında CH₃ONa kullanılarak 50 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri



Şekil 4.5. CH₃OH ve % 1,00 oranında CH₃ONa kullanılarak 55 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri



Şekil 4.6. CH₃OH ve % 1,00 oranında CH₃ONa kullanılarak 60 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri

Şekil 4.4–4.6 incelendiğinde, reaksiyon sıcaklığındaki değişimin (50, 55 ve 60 °C), kinematik viskozitenin reaksiyon süresi ve metil alkol/yağ mol oranına göre değişim karakteristiğine çok fazla etkisinin olmadığı görülmüştür. 3:1 gibi düşük mol oranlarında yeterince biyodizel dönüşümü sağlanamadığından yüksek viskoziteli biyodizeller üretilmiş (Şekil 4.4 a, b – Şekil 4.6 a, b), mol oranı arttıkça reaksiyon verimi iyileştiğinden viskoziteler azalarak 7,5:1 mol oranında düşük değerleri almıştır. Kullanılan alkol miktarı daha fazla artırıldığında ise viskoziteler tekrar artmaya başlamıştır (Şekil 4.4–4.6 b). Tüm alkol/yağ mol oranları için viskozitenin reaksiyon süresine göre değişimi, % 0,75 oranında CH₃ONa kullanımına göre (Şekil 4.1–4.3 c) lineerleşme eğilimi göstermektedir (Şekil 4.4–4.6 c). Diğer bir ifade ile alkol/yağ mol oranının değişimi, viskozitenin reaksiyon süresine göre değişim karakteristiğini çok fazla etkilememektedir. Fakat söz konusu lineere yakın karakteristik, artan reaksiyon süresiyle viskozitenin az miktarda artışı şeklindedir. Ayrıca, her üç reaksiyon sıcaklığında da, viskozitenin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi, düşük mol oranlarında (örneğin 3:1) nispeten geniş, yüksek mol oranlarında ise daha dar bir aralıkta gerçekleşmiştir. Fakat % 0,75 oranında katalizör kullanımında elde edilen viskozitenin metil alkol/yağ mol oranıyla değişimine göre (Şekil 4.1–4.3 c), % 1,00 katalizör kullanımında düşük mol oranlarındaki geniş aralıktaki değişim daha dar, yüksek mol oranlarındaki dar aralıktaki değişim ise daha geniş bir aralık karakteri göstermiştir (Şekil 4.4–4.6 c).

CH₃OH ve % 1,00 oranında CH₃ONa kullanılarak farklı reaksiyon sıcaklıklarında (50, 55 ve 60 °C), reaksiyon sürelerinde (30, 60 ve 90 dak.) ve metil alkol/yağ mol oranlarında (3:1, 6:1 ve 9:1) deneysel olarak üretilen atık kızartma yağı biyodizellerinin kinematik viskozite değerlerini kullanarak, 50, 55 ve 60 °C’de üretilebilecek biyodizellerin viskozite değerleri ve ilgili alkol/yağ mol oranı ile reaksiyon süresi değerleri interpolasyon yöntemi yardımıyla tahmin edilmiştir. Söz konusu değerler Tablo 4.2’de verilmiştir.

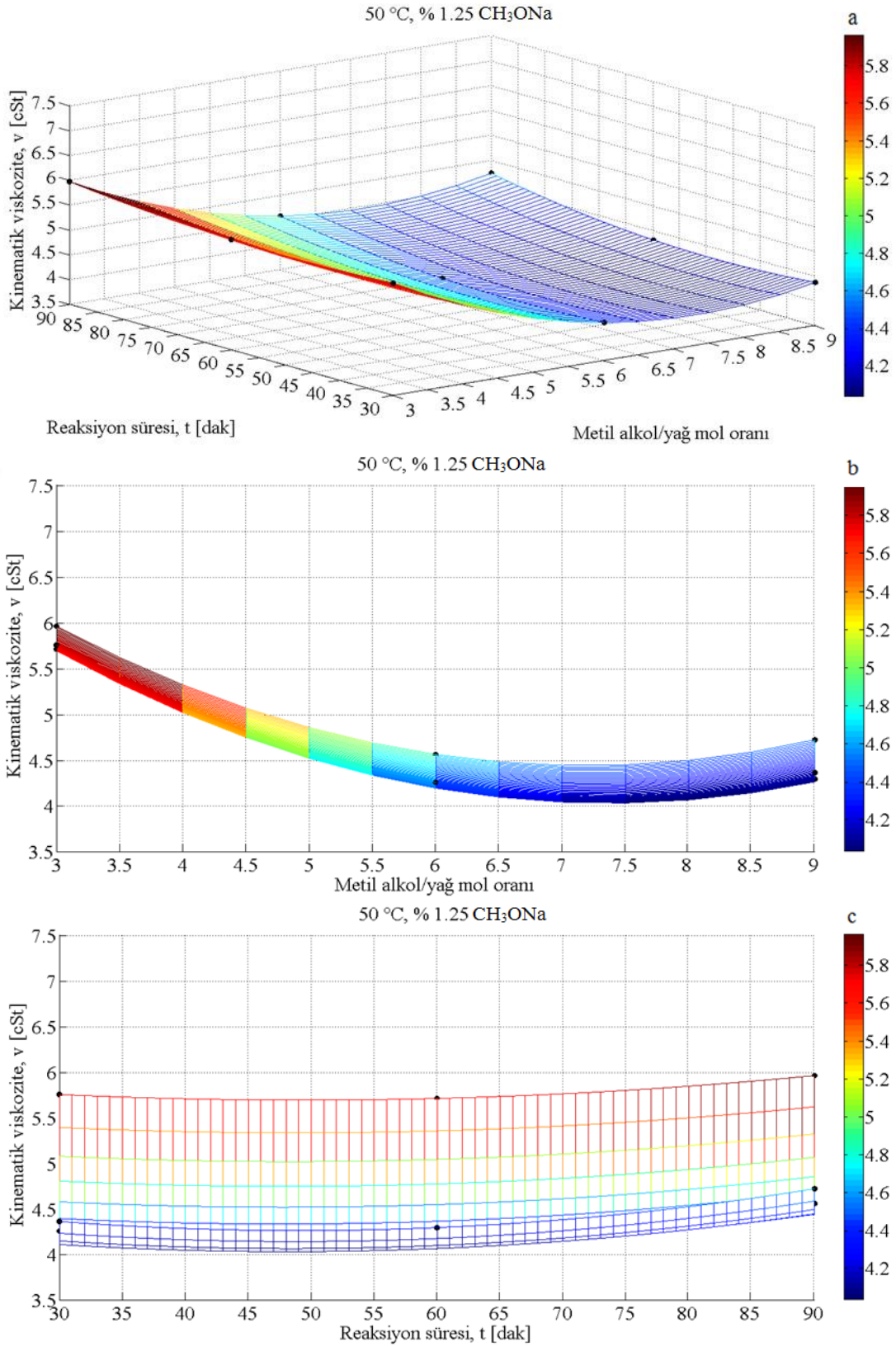
Tablo 4.2. Farklı reaksiyon sıcaklıklarında % 1,00 oranında CH₃ONa kullanılarak üretilebilecek biyodizellerin tahmini viskozite değerleri ve ilgili metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresi parametreleri

Katalizör (CH ₃ ONa) oranı	Reaksiyon sıcaklığı		
	50 °C	55 °C	60 °C
% 1,00	7,5:1 mol oranı ve 71 dak. reaksiyon süresinde 3,9784 cSt	7,5:1 mol oranı ve 51 dak. reaksiyon süresinde 3,8347 cSt	7,5:1 mol oranı ve 68 dak. reaksiyon süresinde 3,9183 cSt

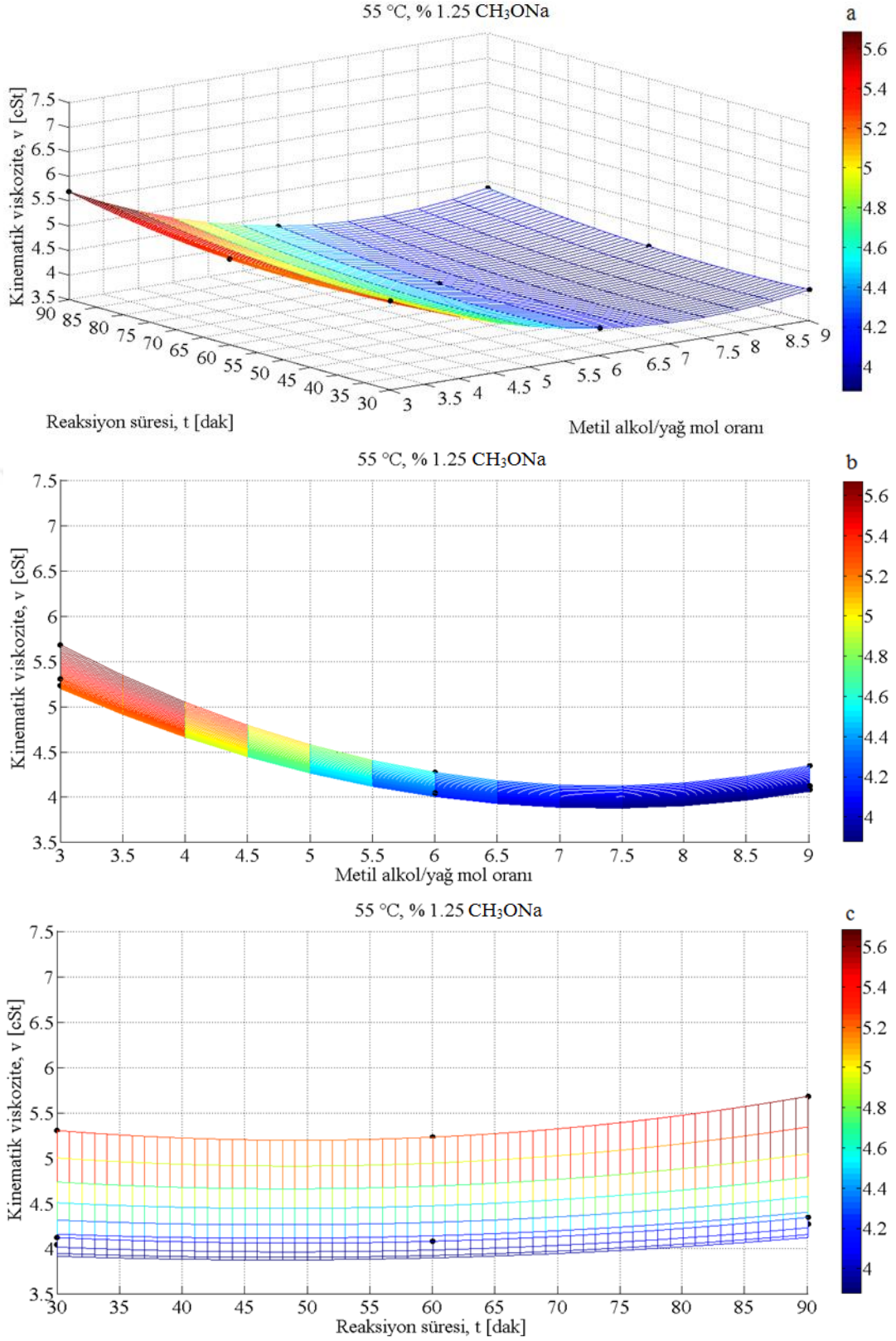
Tablo 4.2 incelendiğinde, 7,5:1 metil alkol/yağ mol oranı kullanılması şartıyla, her üç reaksiyon sıcaklığı için farklı reaksiyon sürelerinde düşük viskoziteli biyodizellerin üretilebileceği görülmüştür. Diğer bir anlatımla, reaksiyon sıcaklığının değişimi, düşük viskozitenin elde edilebileceği mol oranını etkilememiştir. Deneysel olarak, 55 °C reaksiyon sıcaklığı, 6:1 mol oranı ve 60 dakika reaksiyon süresinde düşük viskoziteli biyodizel üretilmiş olsa da, Tablo 4.2, yine 55 °C reaksiyon sıcaklığında mol oranı 7,5:1'e artırıldığında ve reaksiyon süresi 51 dakikaya indirildiğinde daha da düşük viskoziteli (3,8347 cSt) biyodizelin üretilebileceğini göstermektedir.

4.1.1.3. CH₃OH ve % 1,25 Oranında CH₃ONa Kullanılması Durumu

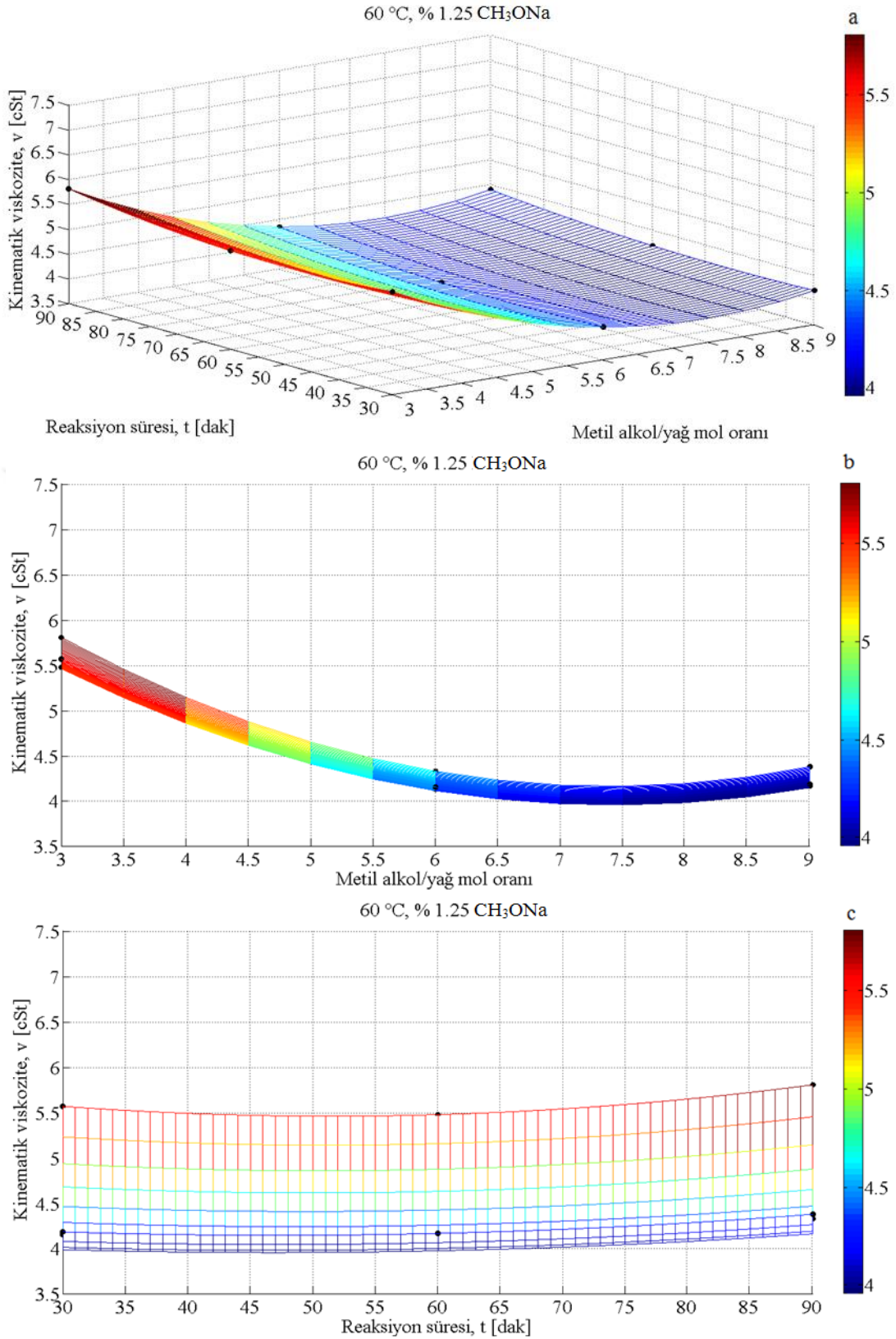
Şekil 4.7–4.9 a–c'de, CH₃OH ve % 1,25 oranında CH₃ONa kullanılarak farklı reaksiyon sıcaklıklarında (50, 55 ve 60 °C) üretilen atık kızartma yağı biyodizellerinin kinematik viskozitelerinin metil alkol/yağ mol oranına (3:1, 6:1 ve 9:1) ve reaksiyon süresine (30, 60 ve 90 dak.) göre değişimleri 3- ve 2-boyutlu olarak verilmiştir.



Şekil 4.7. CH₃OH ve % 1,25 oranında CH₃ONa kullanılarak 50 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri



Şekil 4.8. CH₃OH ve % 1,25 oranında CH₃ONa kullanılarak 55 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri



Şekil 4.9. CH₃OH ve % 1,25 oranında CH₃ONa kullanılarak 60 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri

Şekil 4.7–4.9 incelendiğinde, kinematik viskozitenin reaksiyon süresi ve metil alkol/yağ mol oranına göre değişim karakteristiği üzerine, reaksiyon sıcaklığındaki (50, 55 ve 60°C) değişimin yine çok fazla etkili olmadığı görülmüştür. Reaksiyon veriminin düşük olduğu 3:1 gibi düşük mol oranlarında üretilen biyodizellerin viskoziteleri, en yüksek değerleri almışken (Şekil 4.7–4.9 a, b), mol oranının yine 7,5:1'e artırılmasıyla transesterifikasyon reaksiyonu verimi iyileşmiş ve minimum viskoziteli biyodizeller üretilmiştir. Mol oranının daha fazla artırılması, reaksiyonu girenler yönüne kaydırarak yine viskozitelerin artmasına neden olmuştur (Şekil 4.7–4.9 b). % 1,25 oranında katalizör kullanımında, düşük mol oranlarında viskozitenin metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi daha geniş bir aralıkta, yüksek mol oranlarında ise nispeten daha dar bir aralıkta gerçekleşmiştir (Şekil 4.7–4.9 b). Fakat % 0,75 katalizör oranı kullanımına göre, (Şekil 4.1–4.3 c), % 1,00 katalizör oranı (Şekil 4.4–4.6 c) kullanımına benzer şekilde, geniş aralıktaki bu değişim nispeten daha dar, dar aralıktaki değişim ise nispeten daha geniş bir karakter göstermiştir (Şekil 4.7–4.9 b). % 1,00 oranında CH_3ONa kullanımına benzer olarak (Şekil 4.4–4.6 c), tüm alkol/yağ mol oranlarında viskozitenin reaksiyon süresine göre değişimi, lineere yakın aralık karakterini sürdürmüştür (Şekil 4.7–4.9 c). Yani, reaksiyon süresiyle viskozitenin değişiminde, alkol/yağ mol oranının etkisi pek yoktur (Şekil 4.7–4.9 c). Artan reaksiyon süresiyle birlikte viskozitedeki az miktardaki artış eğilimi de, % 1,00 oranında CH_3ONa kullanımına benzer karakterdedir (Şekil 4.7–4.9 c). Ayrıca, 30 dakika gibi kısa reaksiyon sürelerinde transesterifikasyona yeterli zaman verilmediğinden yeterli biyodizel dönüşümü sağlanamadığı ve üretilen biyodizellerin viskozite değerlerinin yüksek çıktığı, reaksiyon süresi belirli bir değere kadar artırıldığında transesterifikasyonun verimi iyileştiğinden viskozitelerin azalıp minimum değerler aldığı, fakat reaksiyon süresi aşırı uzatıldığında (örneğin 90 dakika) ise hidroliz ve sabunlaşma reaksiyonları nedeniyle viskozitelerin tekrar arttığı belirlenmiştir.

CH_3OH ve % 1,25 oranında CH_3ONa kullanılarak farklı reaksiyon sıcaklıklarında (50, 55 ve 60 °C), reaksiyon sürelerinde (30, 60 ve 90 dak.) ve metil alkol/yağ mol oranlarında (3:1, 6:1 ve 9:1) deneysel olarak üretilen atık kızartma yağı biyodizellerinin kinematik viskozite değerlerini kullanarak, 50, 55 ve 60 °C'de üretilebilecek biyodizellerin viskozite değerleri ve ilgili alkol/yağ mol oranı ile reaksiyon süresi değerleri Matlab programındaki interpolasyon yöntemi yardımıyla tahmin edilmiştir. Söz konusu değerler Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3. Farklı reaksiyon sıcaklıklarında % 1,25 oranında CH_3ONa kullanılarak üretilebilecek biyodizellerin tahmini viskozite değerleri ve ilgili metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresi parametreleri

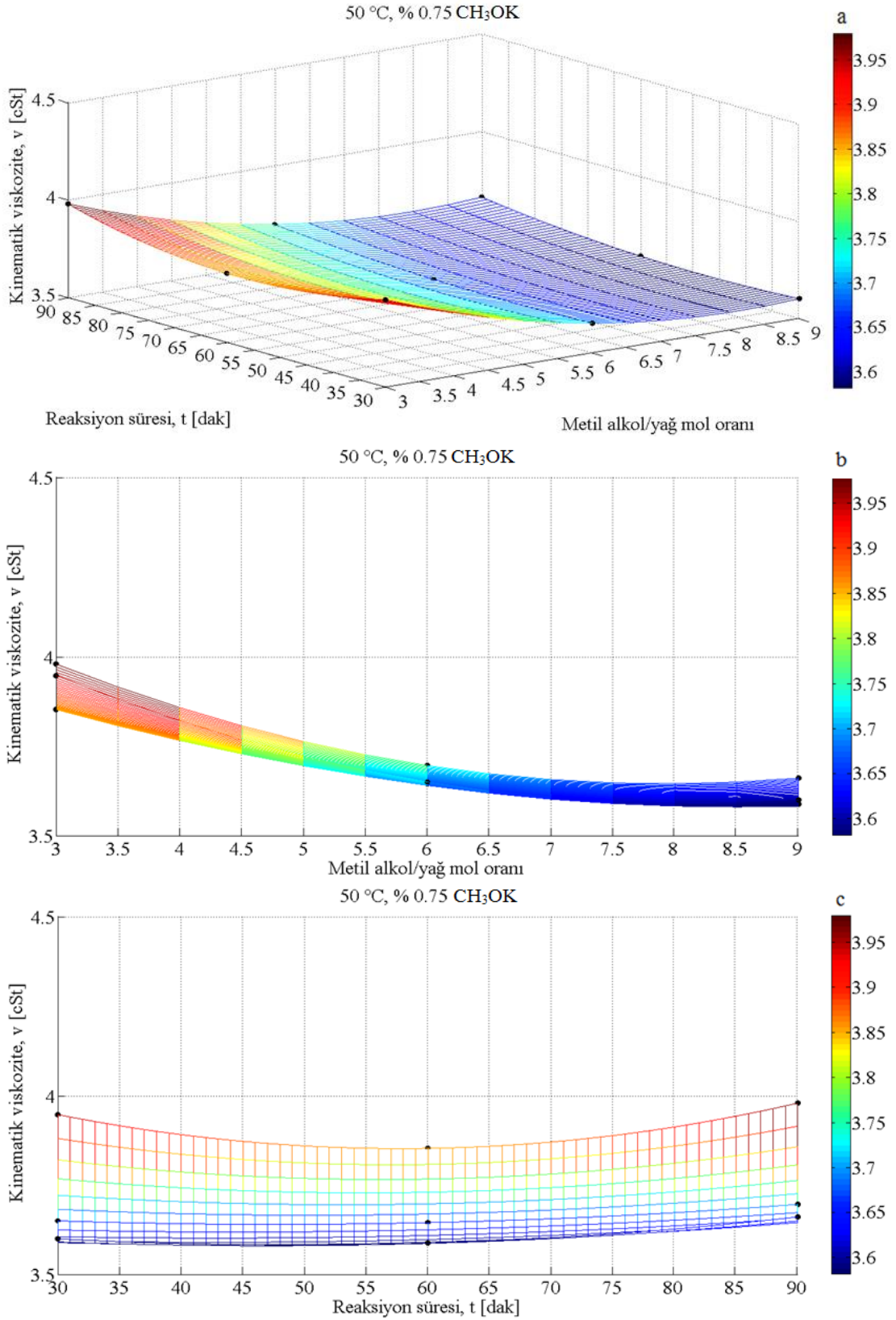
Katalizör (CH_3ONa) oranı	Reaksiyon sıcaklığı		
	50 °C	55 °C	60 °C
% 1,25	7,5:1 mol oranı ve 48 dak. reaksiyon süresinde 4,0357 cSt	7,5:1 mol oranı ve 47 dak. reaksiyon süresinde 3,8788 cSt	7,5:1 mol oranı ve 47 dak. reaksiyon süresinde 3,9599 cSt

Tablo 4.3 incelendiğinde, 7,5:1 metil alkol/yağ mol oranının kullanılması şartıyla, her reaksiyon sıcaklığı için, 47 ve 48 dakikalarda düşük viskoziteli biyodizellerin üretilbileceği görülebilir. Diğer bir anlatımla, reaksiyon sıcaklığının değişimi, düşük viskozitenin elde edilebileceği mol oranını etkilemediği gibi reaksiyon süresini de neredeyse etkilememiştir. Deneysel olarak, % 1,25 katalizör oranı, 55 °C reaksiyon sıcaklığı, 6:1 mol oranı ve 60 dakika reaksiyon süresinde düşük viskoziteli biyodizel üretilmiş olsa da, Tablo 4.3, yine 55 °C reaksiyon sıcaklığında mol oranı 7,5:1'e artırıldığında ve reaksiyon süresi 47 dakikaya düşürüldüğünde daha da düşük viskoziteli (3,8788 cSt) biyodizelin üretilbileceğini göstermektedir.

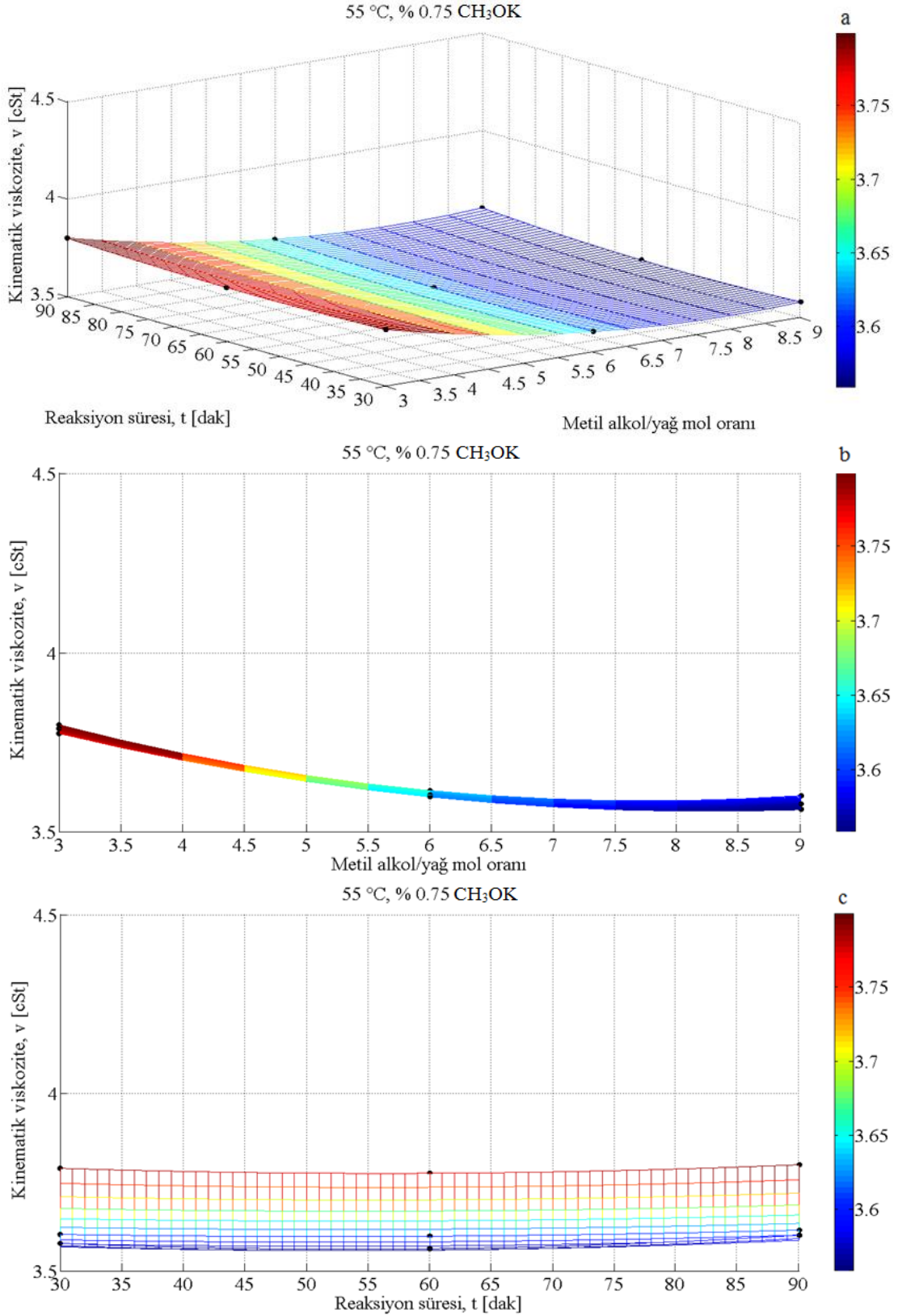
Sonuç olarak, Tablo 4.1, 4.2 ve 4.3'teki düşük viskoziteli biyodizeller kendi aralarında kıyaslandığında, 3:1, 6:1 ve 9:1 metil alkol/yağ mol oranları ve % 0,75, 1,00 ve 1,25 oranlarında CH_3ONa kullanılarak üretilebilecek, 3,8347 cSt (Tablo 4.2) ile düşük viskoziteye sahip biyodizelin reaksiyon parametreleri, % 1,00 katalizör oranı, 7,5:1 alkol/yağ mol oranı, 55 °C reaksiyon sıcaklığı ve 51 dakika reaksiyon süresi olarak belirlenmiştir.

4.1.1.4. CH_3OH ile % 0,75, % 1,00 ve % 1,25 Oranlarında CH_3OK Kullanılması Durumu

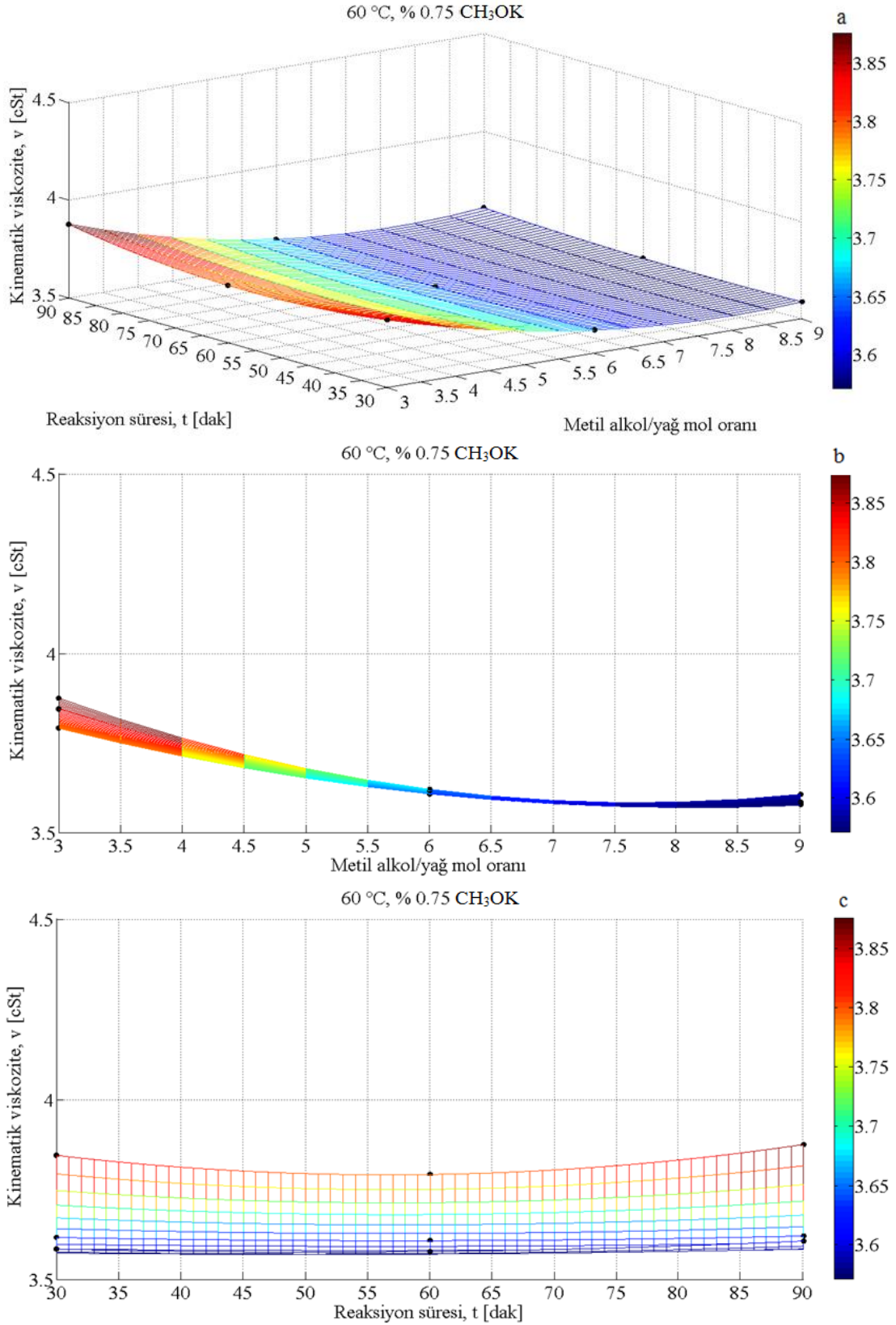
Şekil 4.10–4.18 a–c'de, CH_3OH ve CH_3OK kullanılarak farklı katalizör oranlarında (% 0,75, 1,00 ve 1,25) ve farklı reaksiyon sıcaklıklarında (50, 55 ve 60 °C) üretilen atık kızartma yağı biyodizellerinin kinematik viskozitelerinin metil alkol/yağ mol oranı (3:1, 6:1 ve 9:1) ve reaksiyon süresine (30, 60 ve 90 dak.) göre değişimleri 3- ve 2-boyutlu olarak verilmiştir.



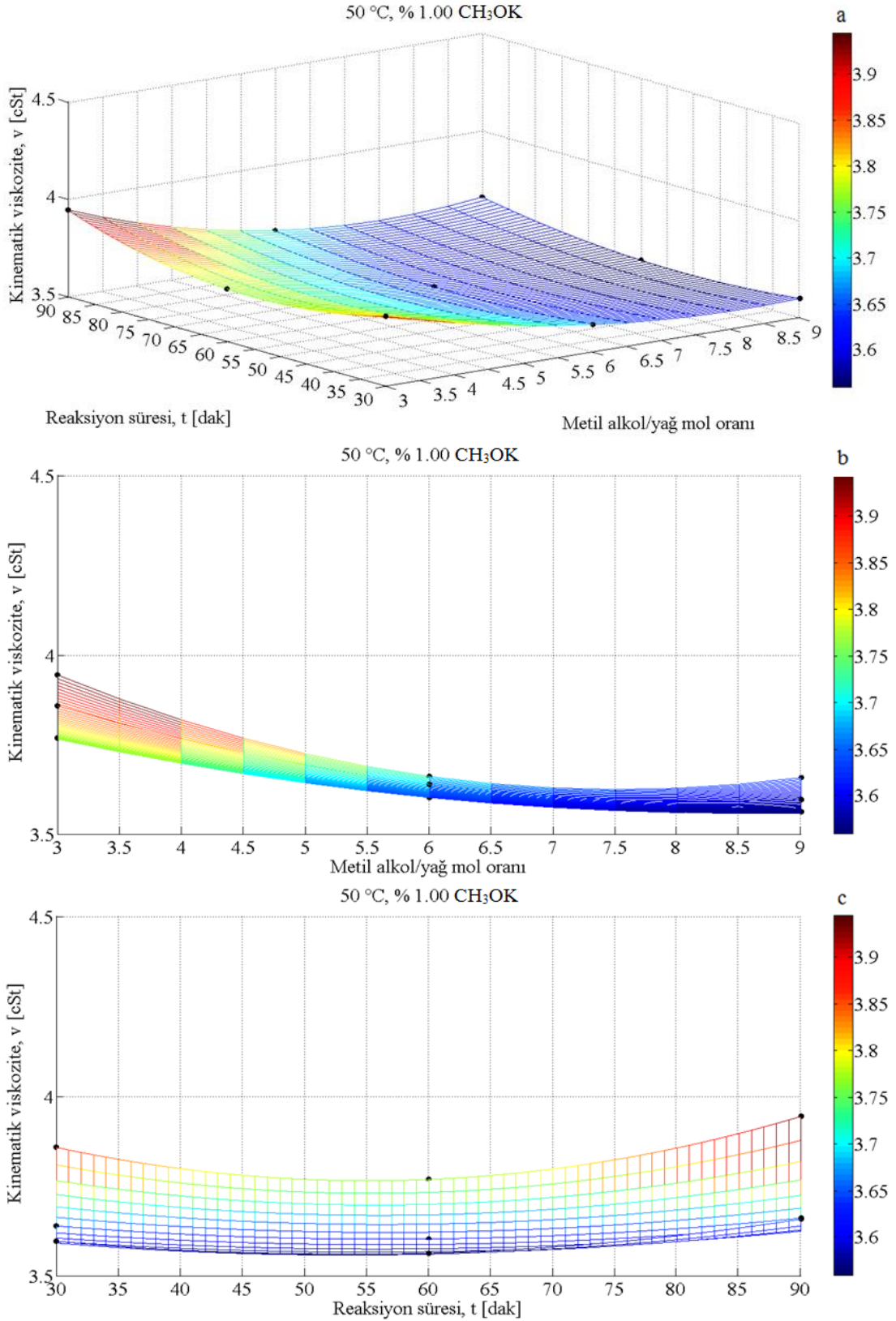
Şekil 4.10. CH₃OH ve % 0,75 oranında CH₃OK kullanılarak 50 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri



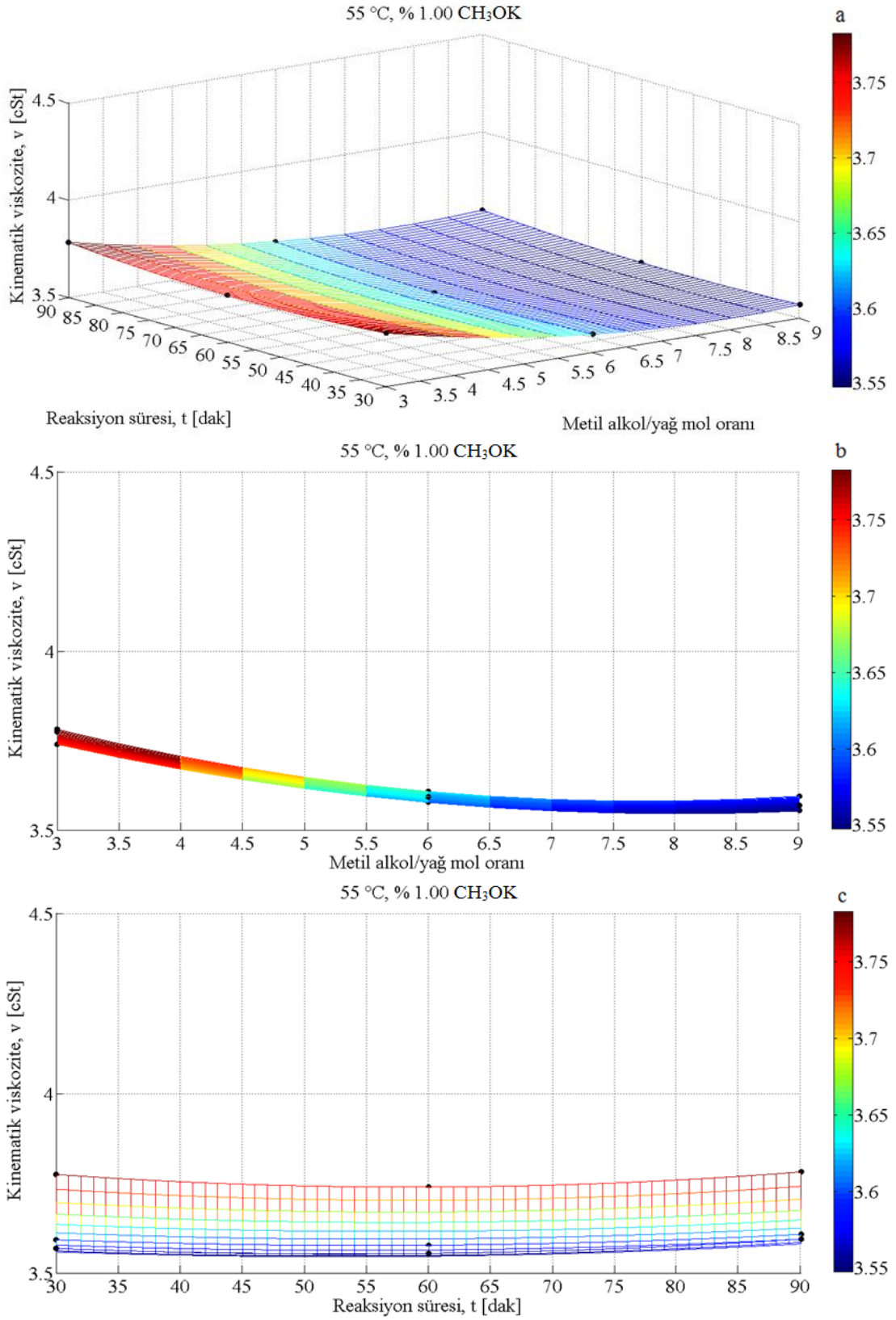
Şekil 4.11. CH₃OH ve % 0,75 oranında CH₃OK kullanılarak 55 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri



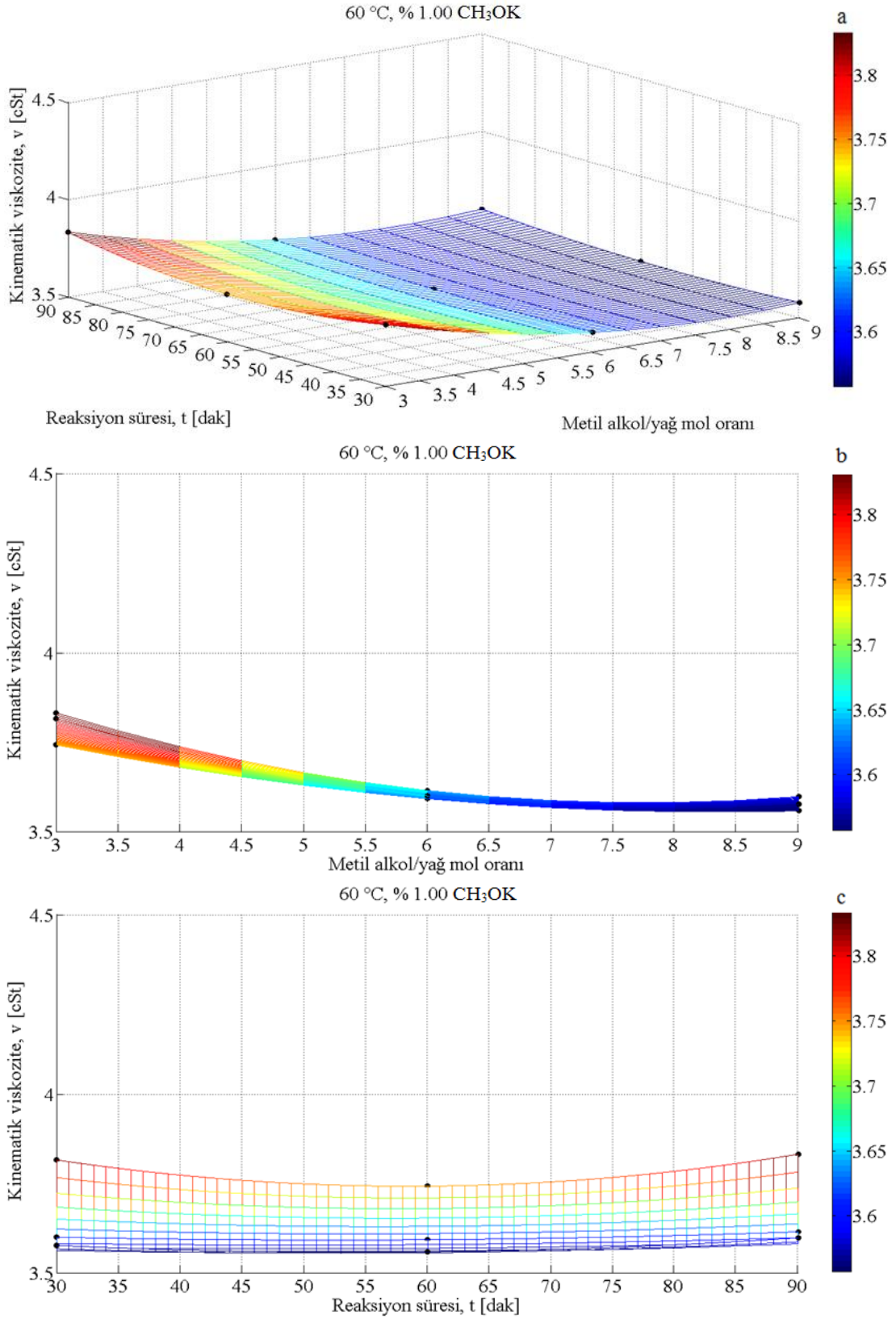
Şekil 4.12. CH₃OH ve % 0,75 oranında CH₃OK kullanılarak 60 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri



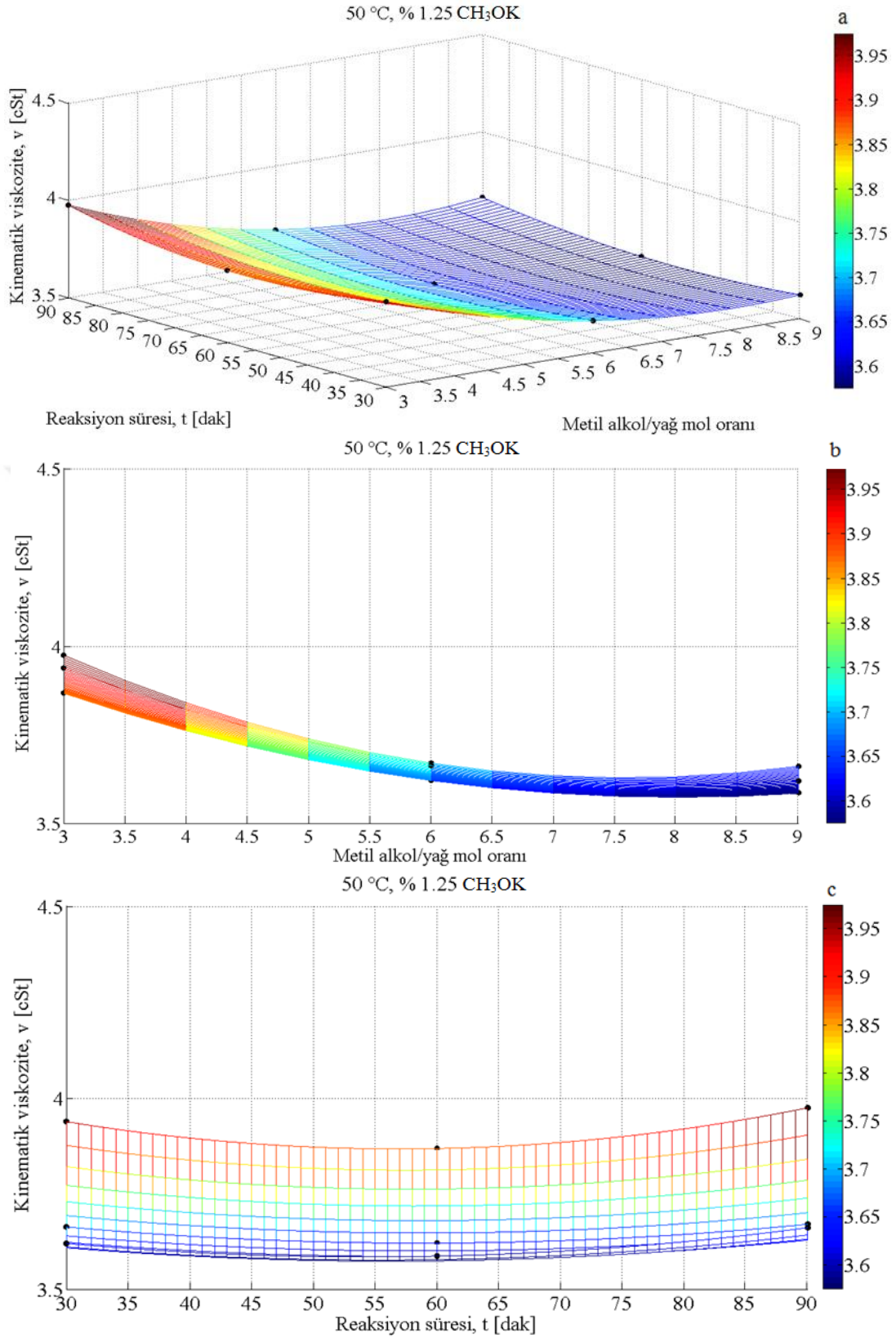
Şekil 4.13. CH₃OH ve % 1,00 oranında CH₃OK kullanılarak 50 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri



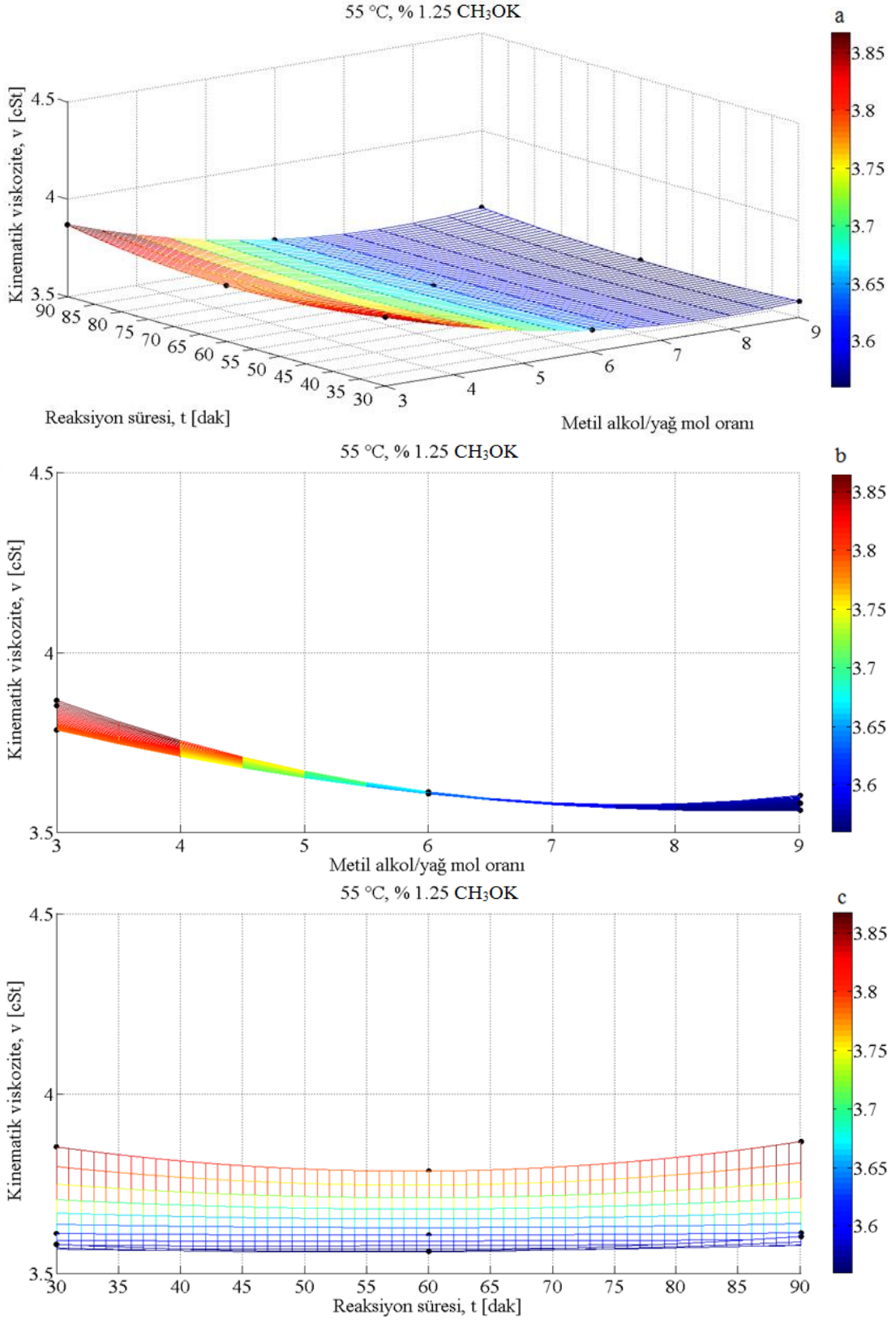
Şekil 4.14. CH₃OH ve % 1,00 oranında CH₃OK kullanılarak 55 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri



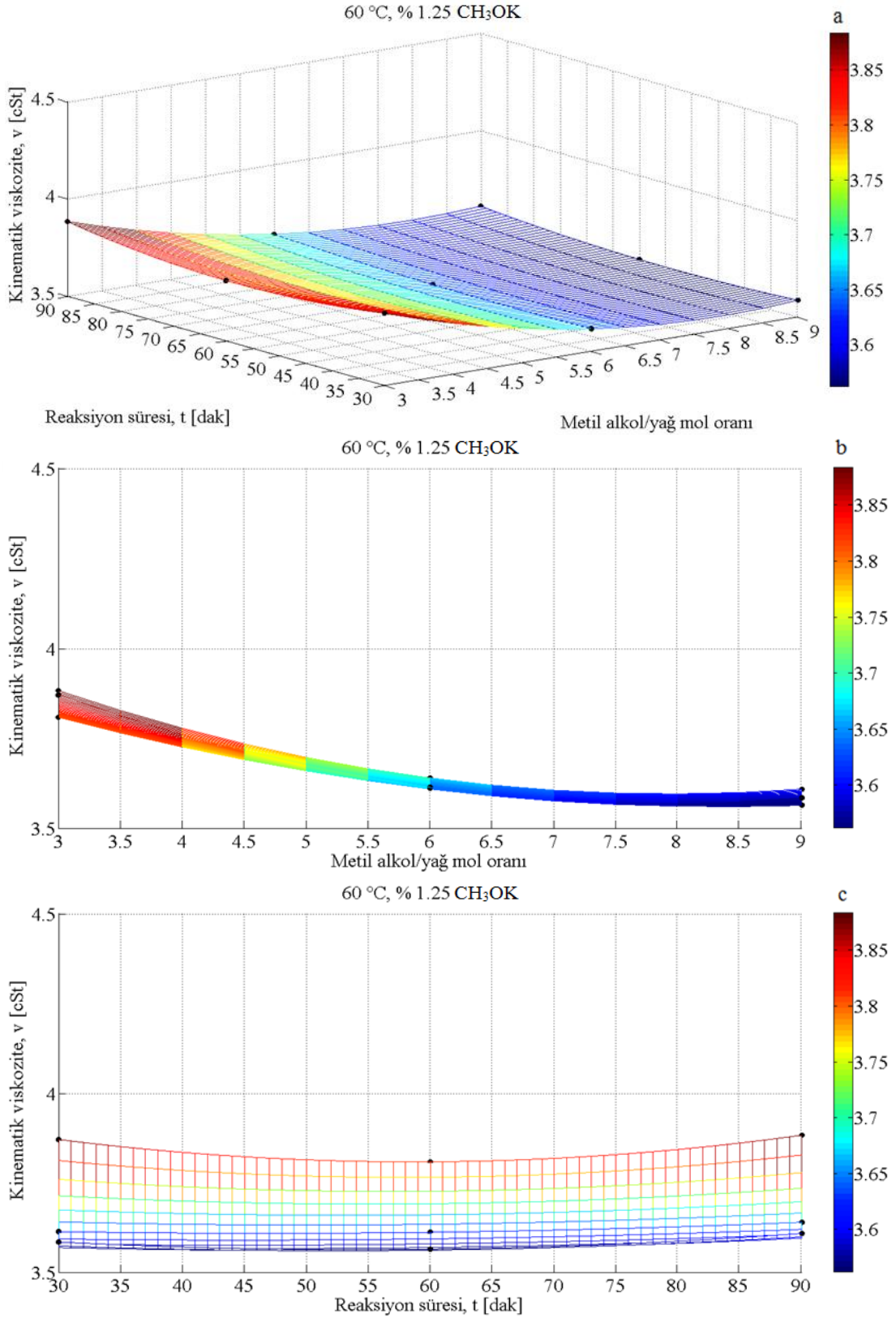
Şekil 4.15. CH₃OH ve % 1,00 oranında CH₃OK kullanılarak 60 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri



Şekil 4.16. CH₃OH ve % 1,25 oranında CH₃OK kullanılarak 50 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri



Şekil 4.17. CH₃OH ve % 1,25 oranında CH₃OK kullanılarak 55 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri



Şekil 4.18. CH₃OH ve % 1,25 oranında CH₃OK kullanılarak 60 °C reaksiyon sıcaklığında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresine, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon süresine göre değişimleri

Şekil 4.10–4.18 incelendiğinde, reaksiyon süresi ve metil alkol/yağ mol oranına göre kinematik viskozitenin değişim karakteristiğine, reaksiyon sıcaklığının çok fazla etki etmediği görülebilir. Düşük mol oranları kullanılarak üretilen biyodizellerin viskozitelerinin en yüksek değerleri aldığı, mol oranı 8:1 veya 8,5:1'e kadar artırıldığında viskozitelerin azalarak minimum viskoziteli biyodizellerin üretildiği (Şekil 4.10 a, b – Şekil 4.18 a, b), fakat mol oranının daha fazla artırılması durumunda viskozitelerin tekrar arttığı görülmüştür (Şekil 4.10–4.18 b). Düşük mol oranlarında reaksiyon süresiyle viskozitenin değişimi parabolik bir karakter sergilerken, yüksek mol oranlarında bu karakter azda olsa değişmiş ve viskozitenin reaksiyon süresinin değişiminden çok fazla etkilenmediği belirlenmiştir (Şekil 4.10–4.18 c). Diğer bir anlatımla, düşük mol oranlarında ve kısa reaksiyon sürelerinde yeterli reaksiyon verimi elde edilemediğinden, üretilen biyodizellerin viskoziteleri en yüksek değerleri almışken, reaksiyon süresinin artışı ile yeterli biyodizel dönüşümü elde edilmiş ve düşük viskoziteye sahip biyodizeller üretilebilmiştir. Reaksiyon süresi aşırı uzatıldığında ise, hidroliz ve sabunlaşma reaksiyonları nedeniyle viskozitelerin arttığı belirlenmiştir. Fakat yüksek mol oranlarında, reaksiyon süresinin değişimi üretilen biyodizelin viskozitesini çok fazla etkilememiştir.

CH_3OH ve % 0,75, 1,00 ve 1,25 oranlarında CH_3OK kullanılarak farklı reaksiyon sıcaklıklarında (50, 55 ve 60 °C), reaksiyon sürelerinde (30, 60 ve 90 dak.) ve metil alkol/yağ mol oranlarında (3:1, 6:1 ve 9:1) deneysel olarak üretilen atık kızartma yağı biyodizellerinin kinematik viskozite değerlerini kullanarak, 50, 55 ve 60 °C'de üretilebilecek biyodizellerin viskozite değerleri ve ilgili alkol/yağ mol oranı ile reaksiyon süresi değerleri Matlab programındaki interpolasyon yöntemi yardımıyla tahmin edilmiştir. Söz konusu değerler Tablo 4.4'te ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tablo 4.4. % 0,75, % 1,00 ve % 1,25 oranlarında CH₃OK kullanılarak farklı reaksiyon sıcaklıklarında üretilebilecek biyodizellerin tahmini viskozite değerleri ve ilgili metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon süresi parametreleri

Katalizör (CH ₃ OK) oranı	Reaksiyon sıcaklığı		
	50 °C	55 °C	60 °C
% 0,75	8,5:1 mol oranı ve 46 dak. reaksiyon süresinde 3,5817 cSt	8:1 mol oranı ve 54 dak. reaksiyon süresinde 3,5589 cSt	8:1 mol oranı ve 48 dak. reaksiyon süresinde 3,5711 cSt
% 1,00	8,5:1 mol oranı ve 53 dak. reaksiyon süresinde 3,5594 cSt	8:1 mol oranı ve 53 dak. reaksiyon süresinde 3,5470 cSt	8,5:1 mol oranı ve 52 dak. reaksiyon süresinde 3,5565 cSt
% 1,25	8:1 mol oranı ve 55 dak. reaksiyon süresinde 3,5751 cSt	8,5:1 mol oranı ve 52 dak. reaksiyon süresinde 3,5605 cSt	8,5:1 mol oranı ve 52 dak. reaksiyon süresinde 3,5618 cSt

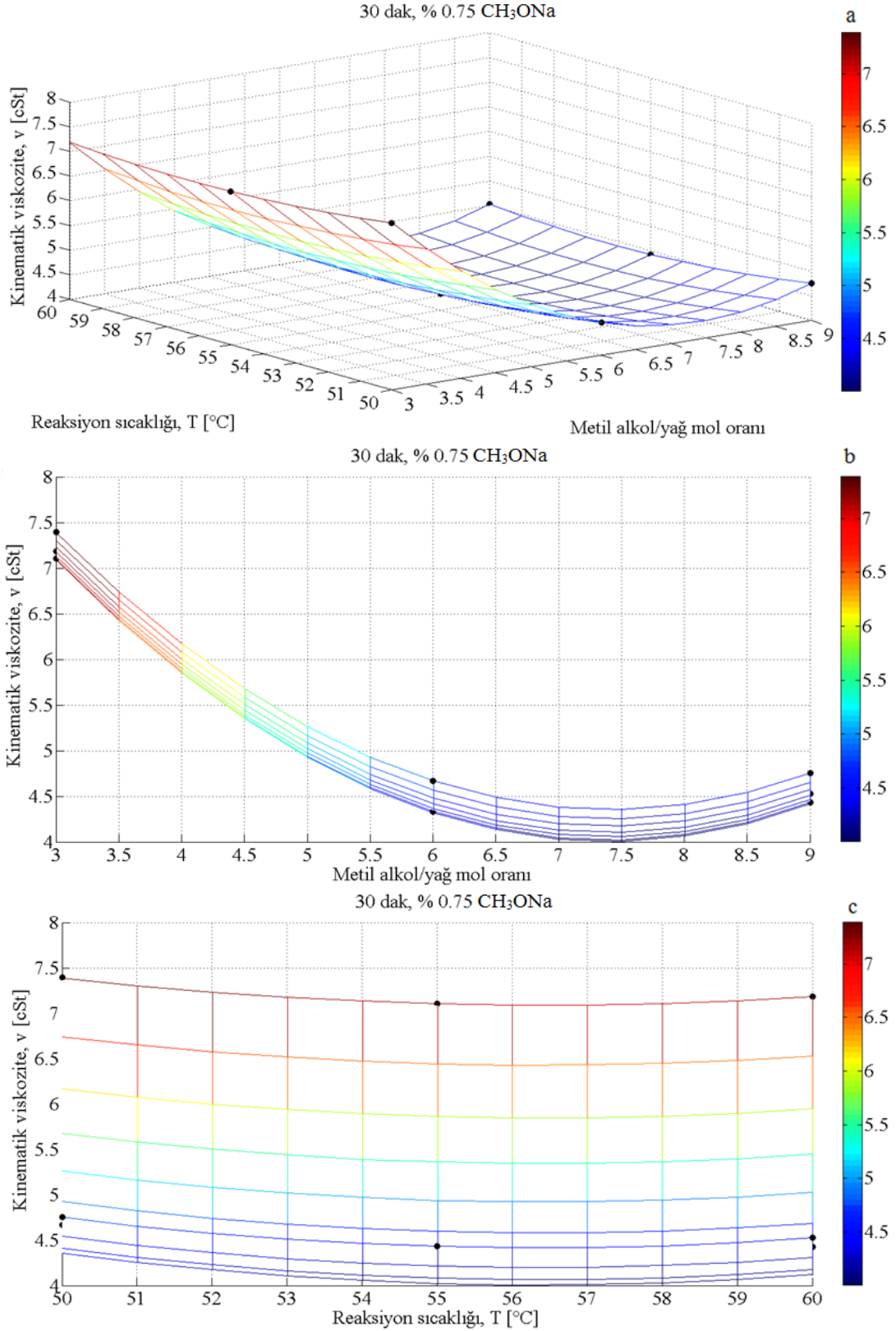
Tablo 4.4 incelendiğinde, her üç reaksiyon sıcaklığı için de % 1,00 oranında katalizör kullanımında viskozitelerin minimum değerler alabileceği, 50 ve 60 °C reaksiyon sıcaklıklarında genel olarak 8,5:1 mol oranında, 55 °C reaksiyon sıcaklığında ise genel olarak 8:1 mol oranında düşük viskoziteli biyodizellerin üretilebileceği, % 1,00 katalizör oranında 52 ve 53 dak. reaksiyon sürelerinde, % 1,25 katalizör oranında ise 52 ve 55 dakika reaksiyon sürelerinde viskozitelerin minimum değerler alabileceği görülmüştür. Deneysel olarak, % 1,00 katalizör oranında CH₃OK ve 9:1 mol oranında CH₃OH kullanılarak, 55 °C reaksiyon sıcaklığında ve 60 dakika reaksiyon süresinde düşük viskoziteli biyodizel üretilmiş olsa da, Tablo 4.4, yine aynı reaksiyon sıcaklığı ve katalizör oranında mol oranı 8:1'e azaltıldığında ve reaksiyon süresi 53 dakikaya düşürüldüğünde daha da düşük viskoziteli (3,5470 cSt) biyodizelin üretilebileceğini göstermektedir.

4.1.2. Farklı Katalizörler Kullanılarak Üretilen Atık Kızartma Yağı Biyodizelinin Viskozitesinin Reaksiyon Sıcaklığı ve Alkol/Yağ Mol Oranına Göre Değişimi

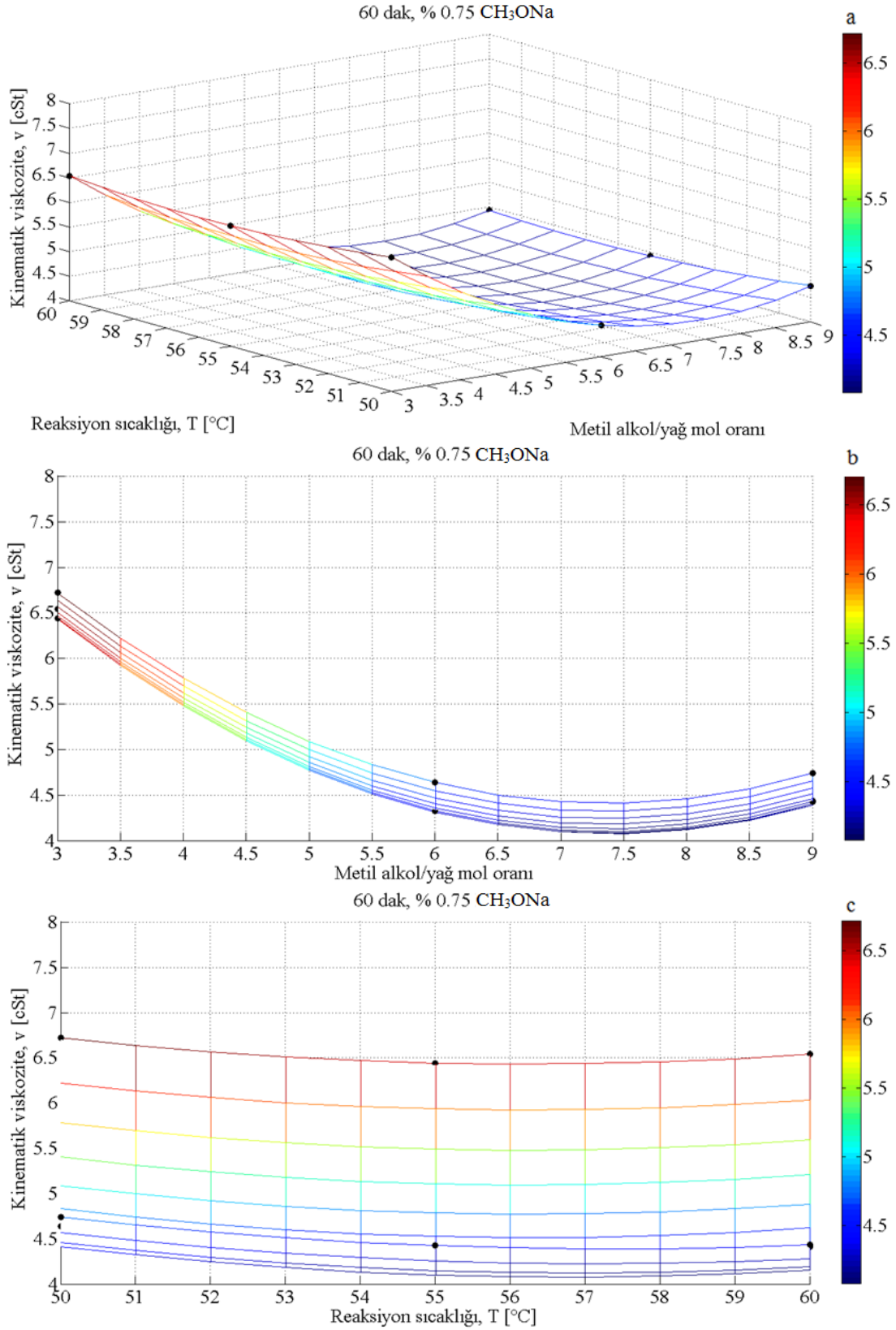
4.1.2.1. CH₃OH ile % 0,75, % 1,00 ve % 1,25 Oranlarında CH₃ONa Kullanılması Durumu

Şekil 4.19–4.27 a–c'de, CH₃OH ve CH₃ONa kullanılarak farklı katalizör oranlarında (% 0,75, 1,00 ve 1,25) ve farklı reaksiyon sürelerinde (30, 60 ve 90 dak.) üretilen atık kızartma yağı biyodizellerinin kinematik viskozitelerinin metil alkol/yağ mol

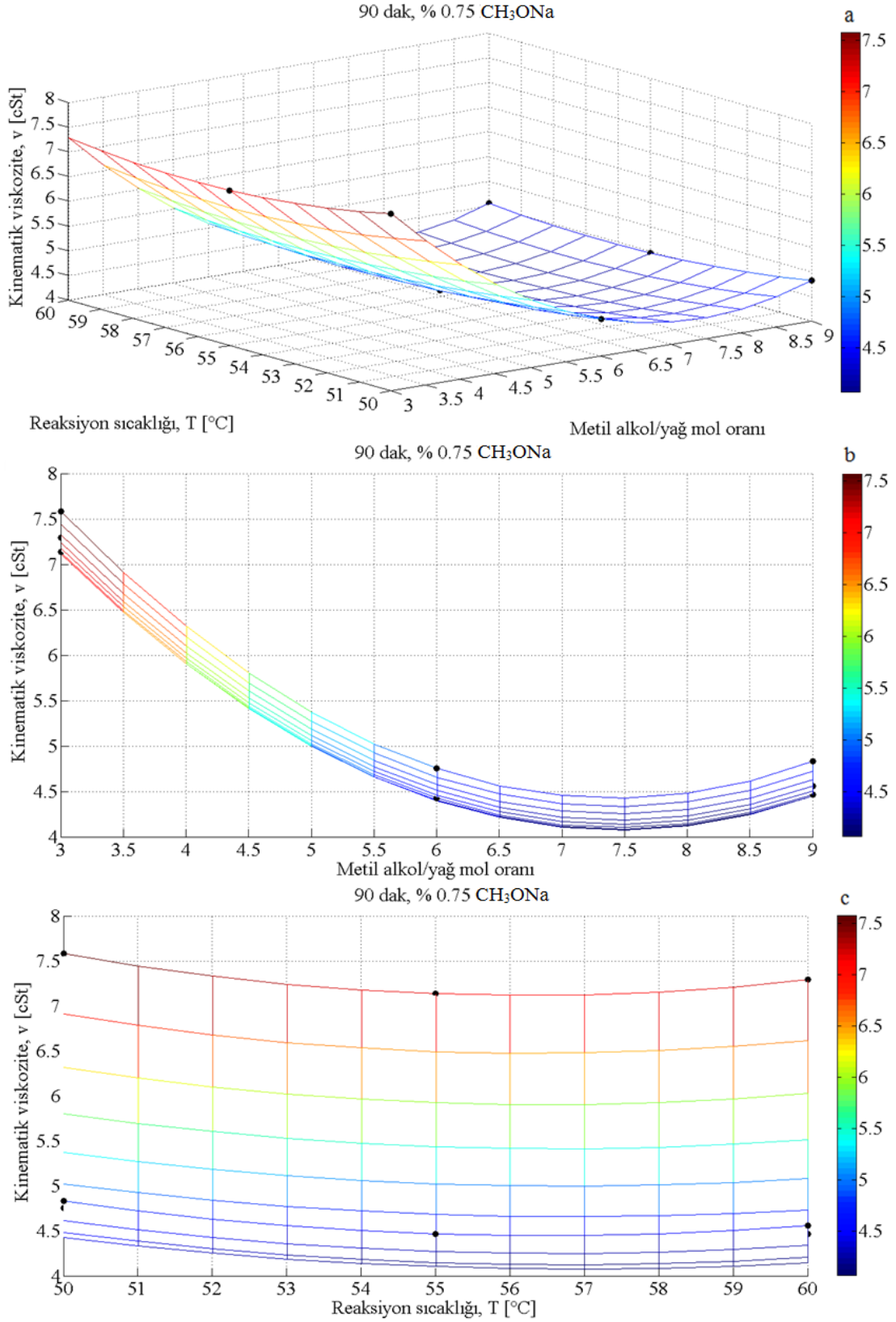
oranı (3:1, 6:1 ve 9:1) ve reaksiyon sıcaklığına (50, 55 ve 60 °C) göre değişimleri 3- ve 2-boyutlu olarak verilmiştir. Şekil 4.19–4.27 incelendiğinde, farklı reaksiyon sürelerinde, viskozitenin reaksiyon sıcaklığı ve metil alkol/yağ mol oranına göre değişimi için benzer karakteristiklerin elde edildiği görülmüştür. Düşük mol oranlarında ve reaksiyon sıcaklıklarında (örneğin 3:1 ve 50 °C) gerçekleştirilen transesterifikasyon reaksiyonunun, yeterince biyodizel dönüşümünü sağlayamaması nedeniyle, üretilen biyodizellerin viskozitelerinin en yüksek değerleri aldığı, mol oranının ve reaksiyon sıcaklığının belirli değerlere (örneğin 7,5:1 ve 56 veya 57 °C) kadar artırılmasıyla minimum viskoziteli biyodizellerin üretildiği, fakat alkol miktarının ve reaksiyon sıcaklığının artırılmaya (örneğin 9:1 ve 60 °C) devam edilmesi durumunda ise reaksiyon ortamındaki alkolün buharlaşmaya başlaması nedeniyle viskozitelerin artmaya başladığı görülmüştür (Şekil 4.19–4.27 a, b). Her reaksiyon süresi ve katalizör oranı için, kinematik viskozitenin metil alkol/yağ mol oranına göre parabolik olarak değiştiği görülmüştür (Şekil 4.19–4.27 b). % 0,75 oranında CH₃ONa kullanıldığında, viskozitenin reaksiyon sıcaklığıyla değişimi her üç reaksiyon süresi için de parabolik karakter gösterirken, % 1,00 ve 1,25 katalizör oranları için viskozitenin değişimi düşük mol oranlarında yine parabolik karaktere sahipken, mol oranının artışıyla bu karakter yaklaşık doğrusallaşma eğilimi göstermiştir (Şekil 4.19–4.27 c). Diğer bir anlatımla, viskozitenin değişimi, reaksiyon sıcaklığından bağımsızlaşma eğilimi göstermiştir. Viskozitenin reaksiyon sıcaklığıyla değişiminde, % 0,75 oranında CH₃ONa kullanıldığında, % 1,00 ve 1,25 oranları kullanımına göre, her üç reaksiyon süresi için de viskozitenin nispeten daha geniş bir aralıkta değiştiği görülmektedir (Şekil 4.19–4.27 c). Ayrıca, sabit reaksiyon sıcaklığı için, mol oranının azalmasıyla viskozitenin değişiminin daha fazla olduğu görülmüştür (Şekil 4.19–4.27 c).



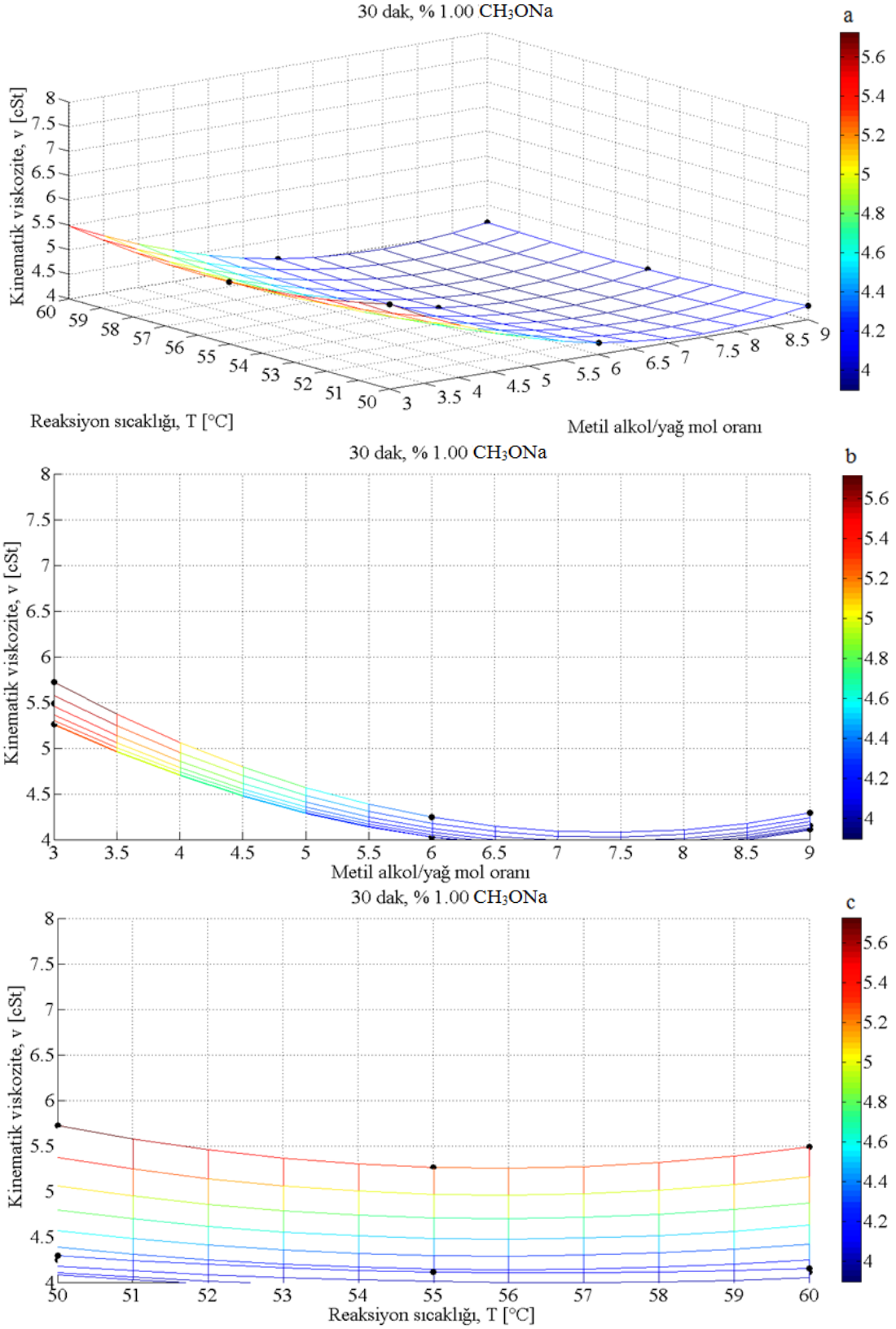
Şekil 4.19. CH₃OH ve % 0,75 oranında CH₃ONa kullanılarak 30 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



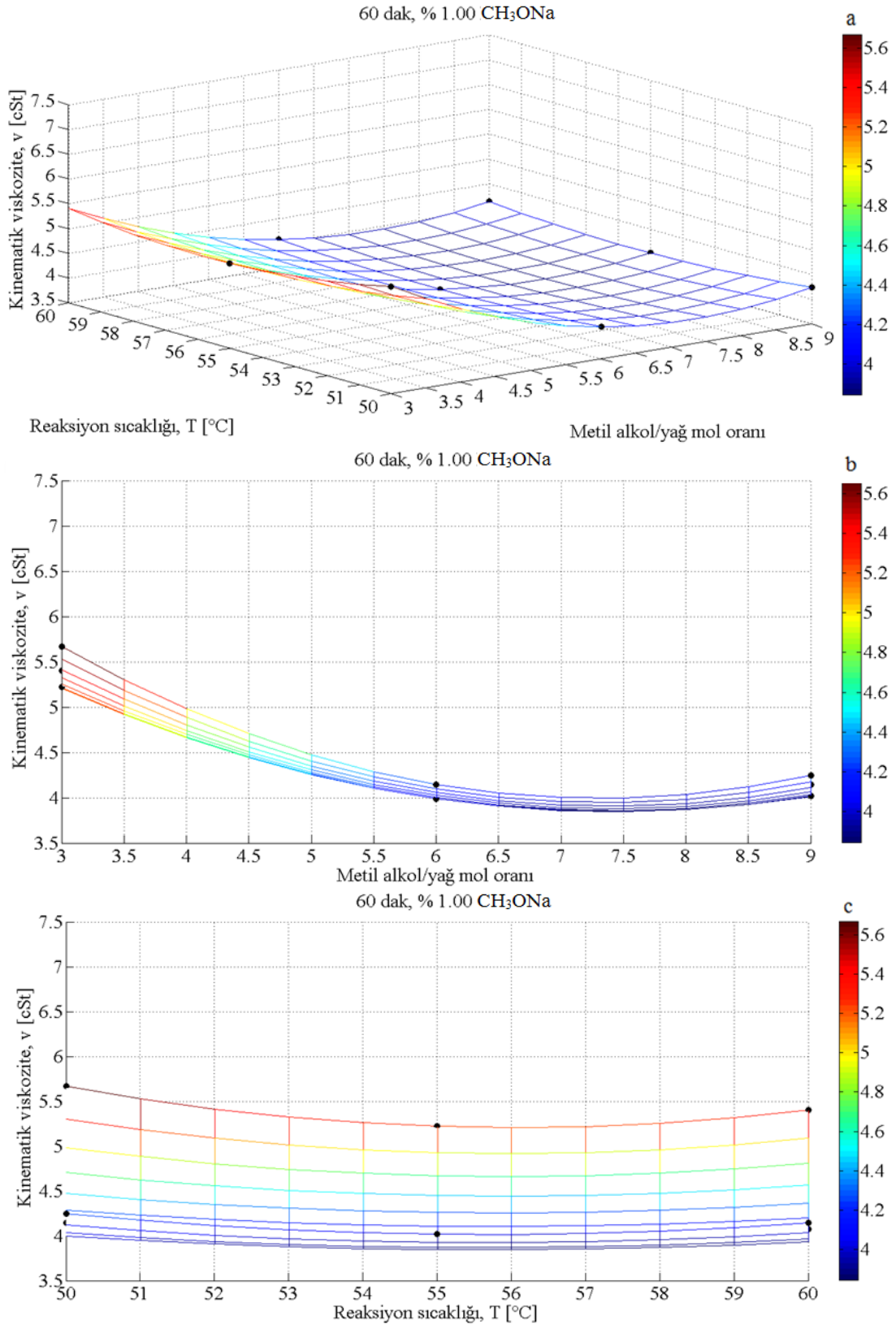
Şekil 4.20. CH₃OH ve % 0,75 oranında CH₃ONa kullanılarak 60 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



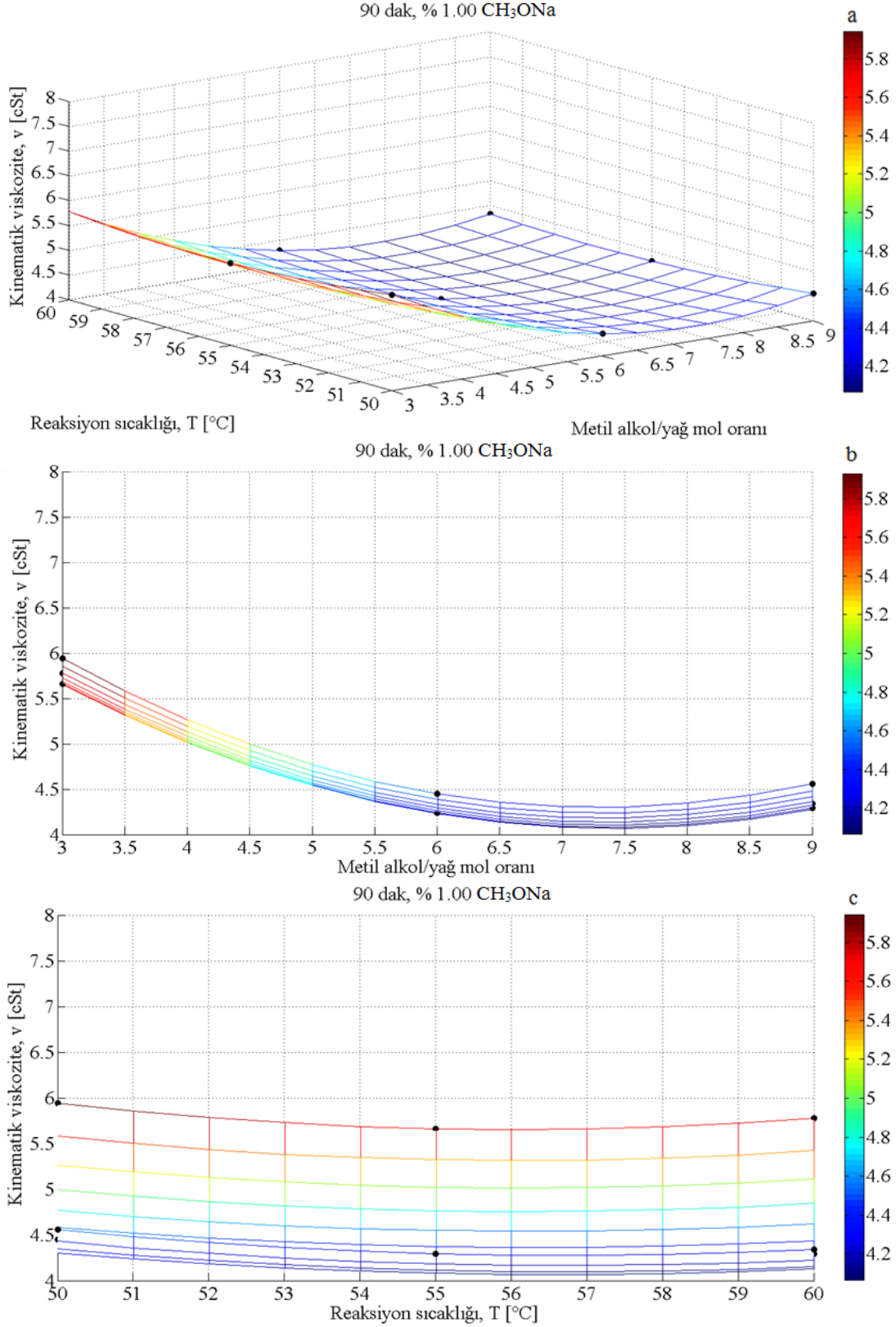
Şekil 4.21. CH₃OH ve % 0,75 oranında CH₃ONa kullanılarak 90 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



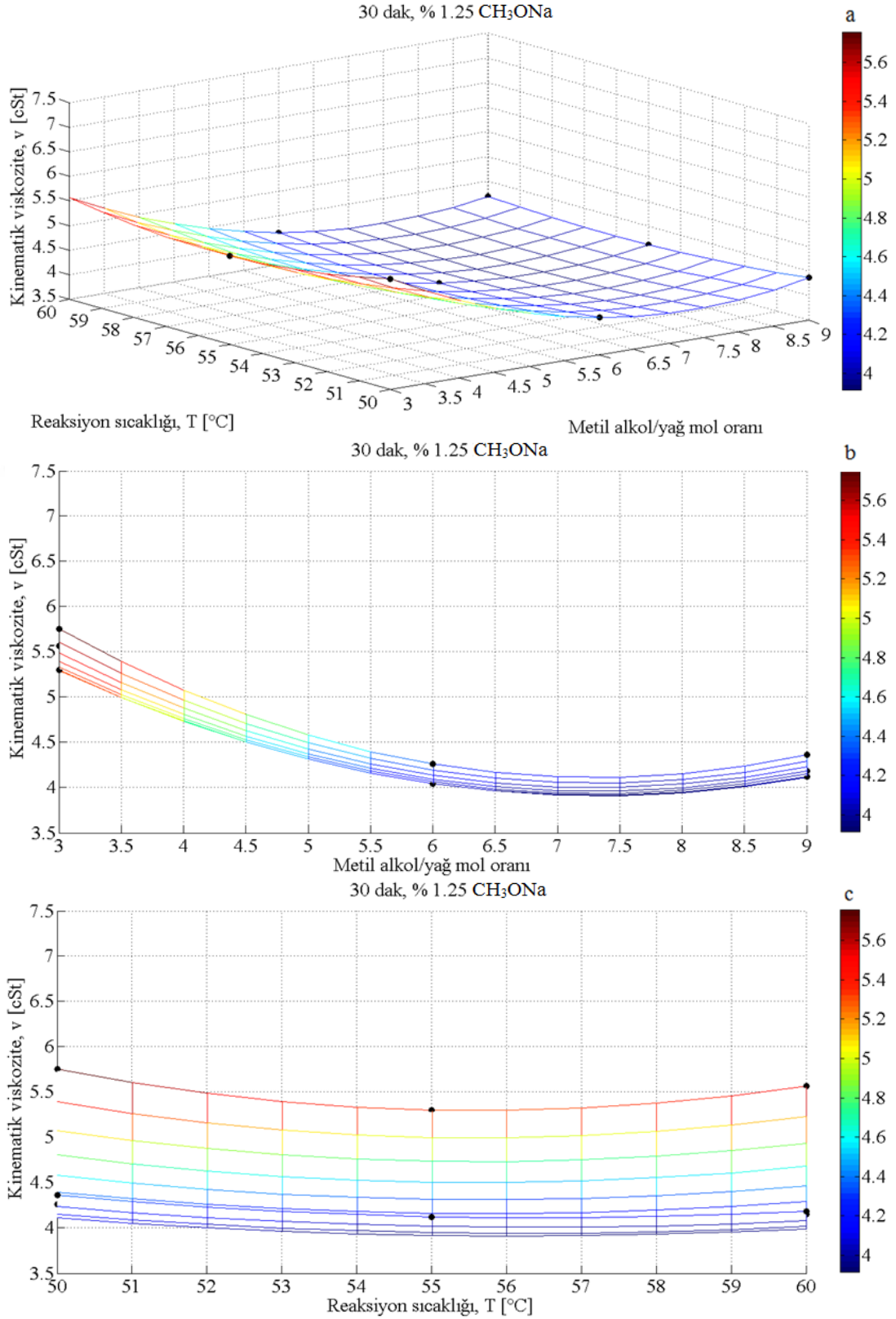
Şekil 4.22. CH₃OH ve % 1,00 oranında CH₃ONa kullanılarak 30 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



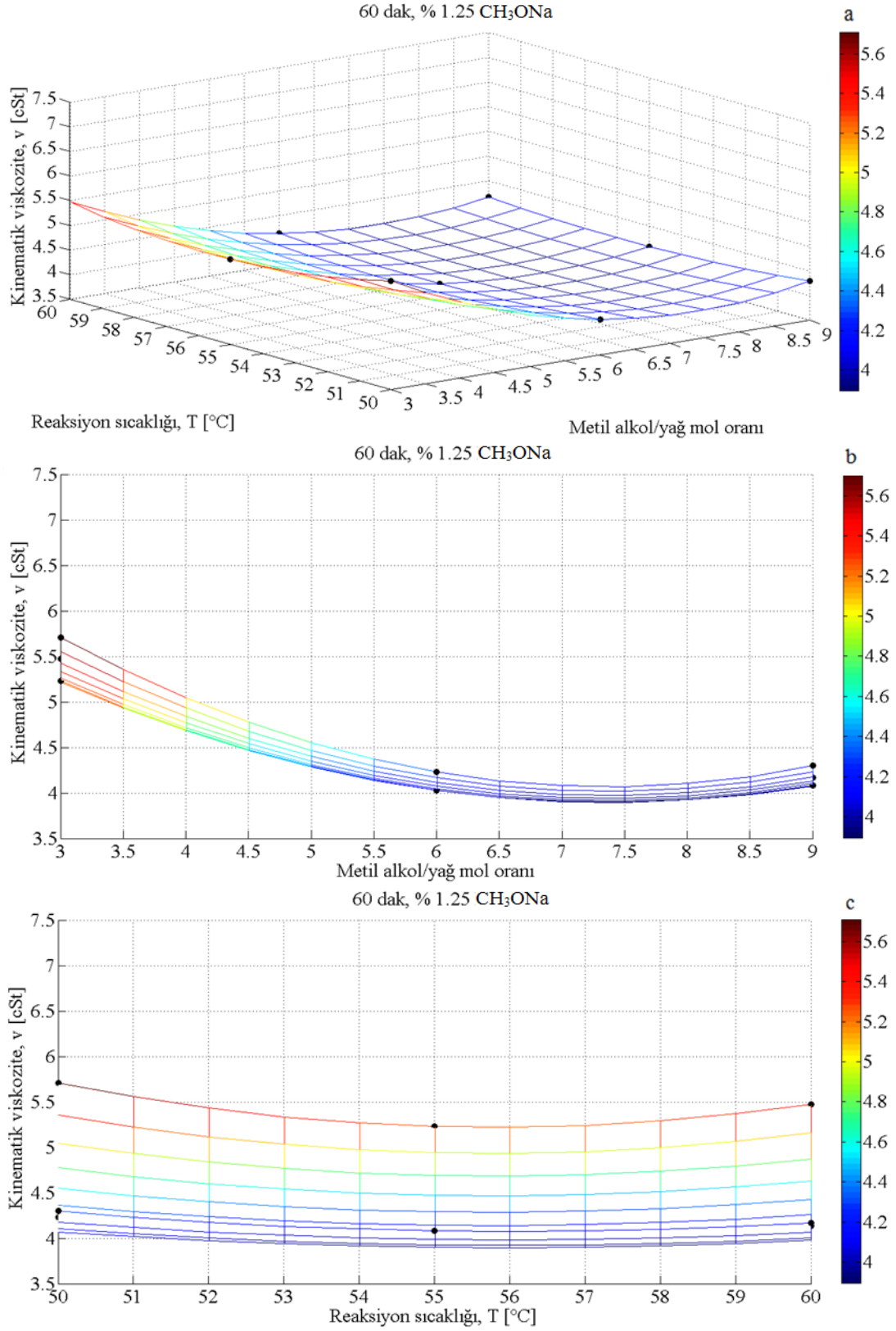
Şekil 4.23. CH₃OH ve % 1,00 oranında CH₃ONa kullanılarak 60 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



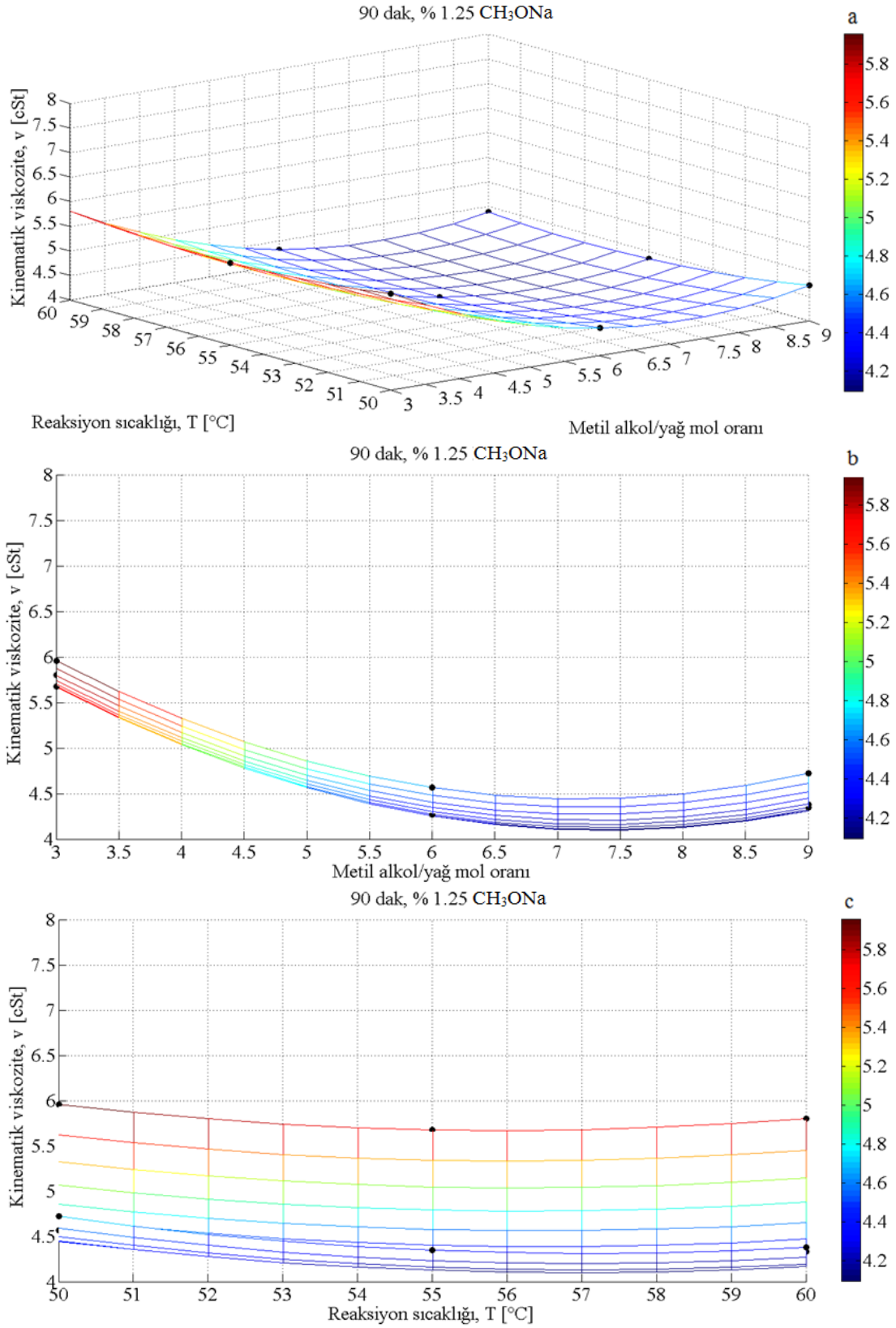
Şekil 4.24. CH₃OH ve % 1,00 oranında CH₃ONa kullanılarak 90 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



Şekil 4.25. CH₃OH ve % 1,25 oranında CH₃ONa kullanılarak 30 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



Şekil 4.26. CH₃OH ve % 1,25 oranında CH₃ONa kullanılarak 60 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



Şekil 4.27. CH₃OH ve % 1,25 oranında CH₃ONa kullanılarak 90 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri

CH₃OH ve % 0,75, 1,00 ve 1,25 oranlarında CH₃ONa kullanılarak, farklı reaksiyon sıcaklıklarında (50, 55 ve 60 °C), reaksiyon sürelerinde (30, 60 ve 90 dak.) ve metil alkol/yağ mol oranlarında (3:1, 6:1 ve 9:1) deneysel olarak üretilen atık kızartma yağı biyodizellerinin kinematik viskozite değerlerini kullanarak, 30, 60 ve 90 dak. reaksiyon sürelerinde üretilebilecek biyodizellerin viskozite değerleri ve ilgili alkol/yağ mol oranı ile reaksiyon sıcaklığı değerleri Matlab programında yer alan interpolasyon yöntemi yardımıyla tahmin edilmiştir. Söz konusu değerler ve parametreler Tablo 4.5'te ayrıntılı olarak verilmiştir.

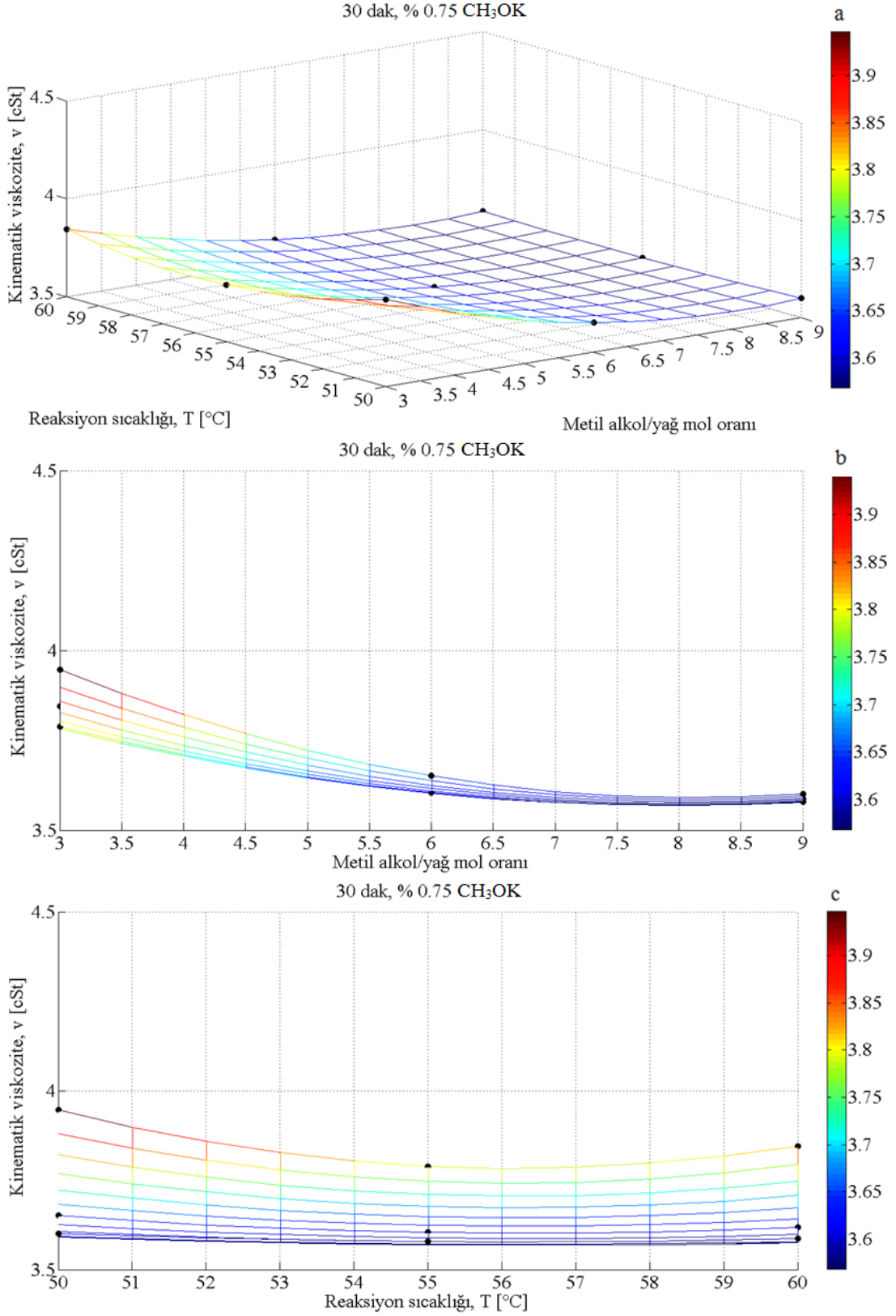
Tablo 4.5. % 0,75, % 1,00 ve % 1,25 oranlarında CH₃ONa kullanılarak farklı reaksiyon sürelerinde üretilebilecek biyodizellerin tahmini viskozite değerleri ve ilgili metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığı parametreleri

Katalizör (CH ₃ ONa) oranı	Reaksiyon süresi		
	30 dak.	60 dak.	90 dak.
% 0,75	7,5:1 mol oranı ve 56 °C reaksiyon sıcaklığında 4,0072 cSt	7,5:1 mol oranı ve 57 °C reaksiyon sıcaklığında 4,0772 cSt	7,5:1 mol oranı ve 57 °C reaksiyon sıcaklığında 4,0753 cSt
% 1,00	7,5:1 mol oranı ve 56 °C reaksiyon sıcaklığında 3,9001 cSt	7,5:1 mol oranı ve 56 °C reaksiyon sıcaklığında 3,8463 cSt	7,5:1 mol oranı ve 57 °C reaksiyon sıcaklığında 4,0680 cSt
% 1,25	7,5:1 mol oranı ve 56 °C reaksiyon sıcaklığında 3,9118 cSt	7,5:1 mol oranı ve 56 °C reaksiyon sıcaklığında 3,8967 cSt	7,5:1 mol oranı ve 57 °C reaksiyon sıcaklığında 4,0997 cSt

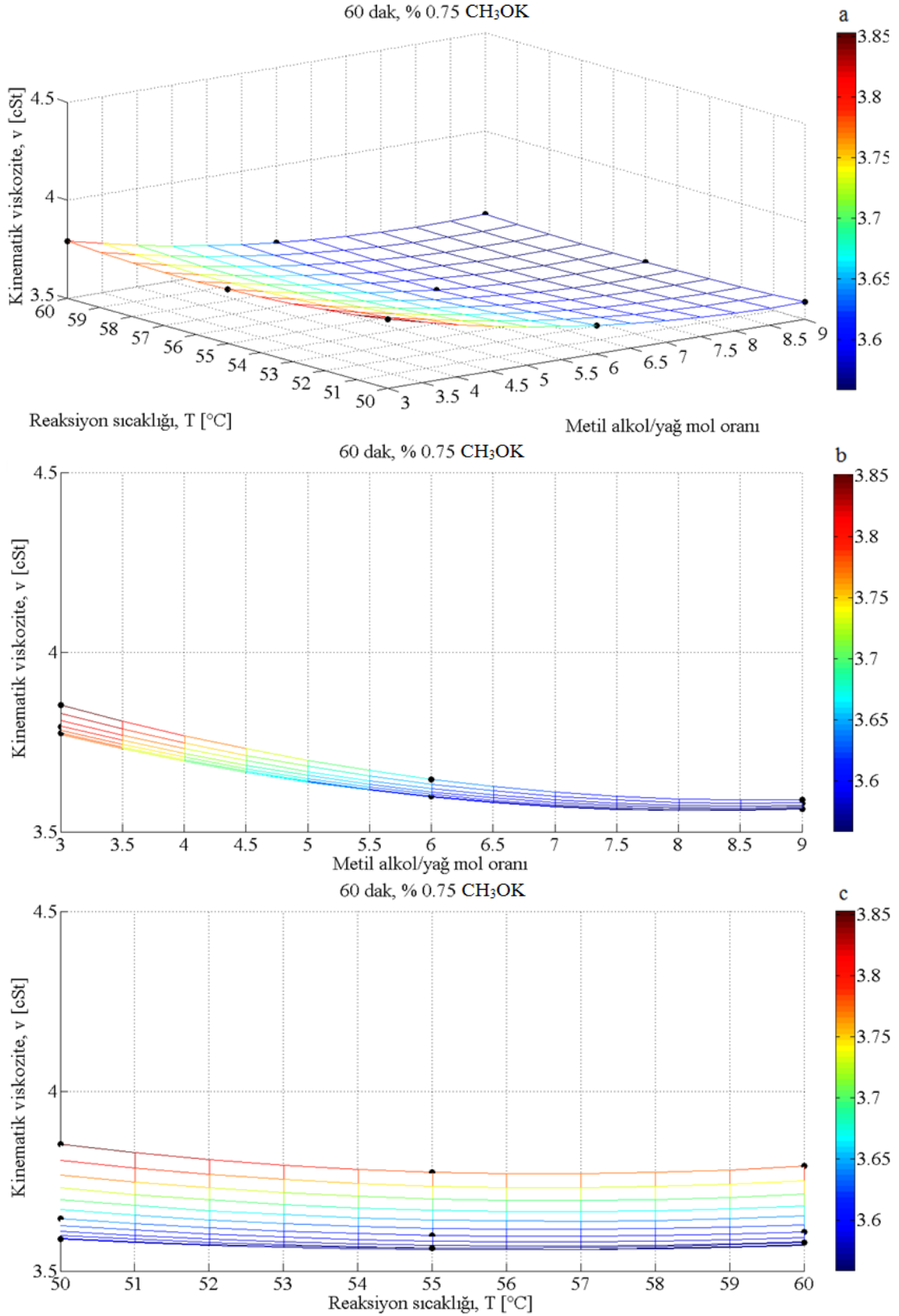
Tablo 4.5 incelendiğinde, her katalizör oranı ve reaksiyon süresi için 7,5:1 metil alkol/yağ mol oranı kullanımında düşük viskozitelerin elde edilebileceği, her üç reaksiyon süresi için de % 1,00 katalizör oranı kullanımında düşük viskoziteli biyodizellerin üretilebileceği, her üç katalizör oranı için de reaksiyon süresi uzasa da 56 veya 57 °C reaksiyon sıcaklıklarında düşük viskozitelerin elde edilebileceği görülmüştür. Deneysel olarak, % 1,00 katalizör oranında CH₃ONa ve 6:1 mol oranında CH₃OH kullanılarak, 55 °C reaksiyon sıcaklığında ve 60 dakika reaksiyon süresinde düşük viskoziteli biyodizel üretilmiş olsa da, Tablo 4.5, yine aynı reaksiyon süresi ve katalizör oranında, mol oranı 7,5:1'e, reaksiyon sıcaklığı ise 56 °C'ye çıkarıldığında daha da düşük viskoziteli (3,8463 cSt) biyodizelin üretilebileceğini göstermektedir.

4.1.2.2. CH₃OH ile % 0,75, % 1,00 ve % 1,25 Oranlarında CH₃OK Kullanılması Durumu

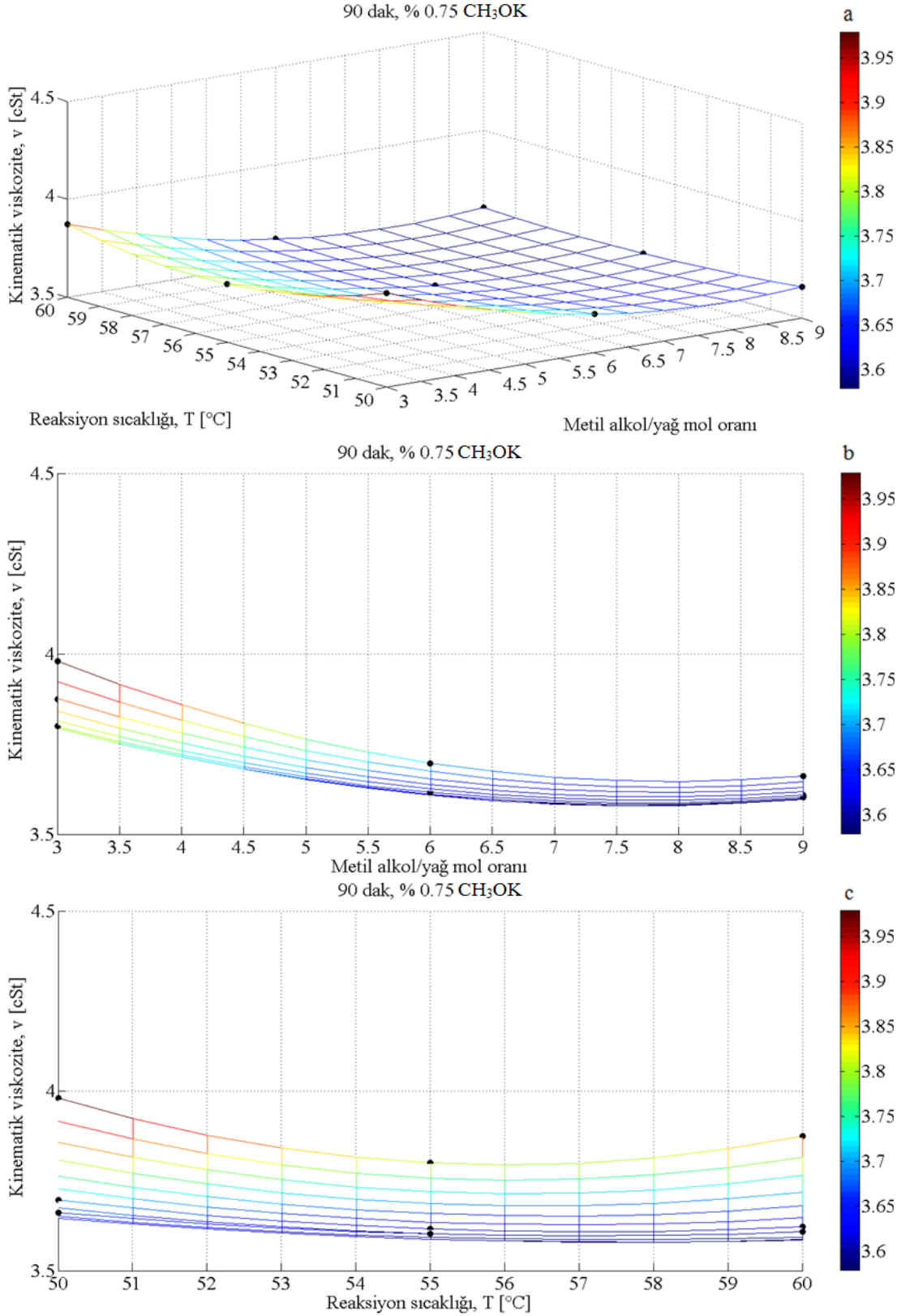
Şekil 4.28–4.36 a–c’de, CH₃OH ve CH₃OK kullanılarak, farklı katalizör oranlarında (% 0,75, 1,00 ve 1,25) ve farklı reaksiyon sürelerinde (30, 60 ve 90 dak.) üretilen atık kızartma yağı biyodizellerinin kinematik viskozitelerinin metil alkol/yağ mol oranı (3:1, 6:1 ve 9:1) ve reaksiyon sıcaklığına (50, 55 ve 60 °C) göre değişimleri 3- ve 2-boyutlu olarak verilmiştir. Şekil 4.28–4.36 incelendiğinde, farklı reaksiyon sürelerinde, viskozitenin reaksiyon sıcaklığı ve metil alkol/yağ mol oranına göre değişim karakteristiklerinin benzer yapıda olduğu görülmüştür. 3:1 ve 50 °C gibi düşük mol oranları ve reaksiyon sıcaklıklarında en yüksek viskoziteli biyodizellerin üretildiği, reaksiyon sıcaklığını 55–58 °C aralığına, mol oranını ise 7,5:1 ve 8:1’e kadar artırıldığında viskozitelerin düşük değerleri aldığı, fakat mol oranının ve sıcaklığın daha fazla artışıyla viskozitelerin de hafif bir artış eğilimine girdiği belirlenmiştir (Şekil 4.28–4.36 a, b). Reaksiyon süresi ve katalizör oranından bağımsız olarak, düşük mol oranlarında viskozitenin mol oranına göre nispeten daha geniş bir aralıkta değiştiği görülmüştür (Şekil 4.28–4.36 b). Viskozitenin alkol/yağ mol oranıyla değişimi, her reaksiyon süresi ve katalizör oranı için yaklaşık parabolik bir karakterdedir (Şekil 4.28–4.36 b). Ayrıca, reaksiyon süresi ve katalizör oranından bağımsız olarak, düşük mol oranlarında viskozitenin reaksiyon sıcaklığıyla değişimi parabolik bir karakter göstermekte iken, mol oranının artışıyla bu değişim yaklaşık doğrusal bir karakter göstermiştir (Şekil 4.28–4.36 c). Diğer bir anlatımla, düşük mol oranlarında viskozitenin reaksiyon sıcaklığıyla değişimi, yaklaşık 55–56 °C civarlarında minimum yapacak şekilde parabolik bir karakterde iken, yüksek mol oranlarında ise reaksiyon sıcaklığındaki değişim viskoziteyi çok fazla etkilememiştir. Bu durum, neredeyse tüm katalizör oranı ve reaksiyon süresi şartlarında görülmüştür (Şekil 4.28–4.36 c).



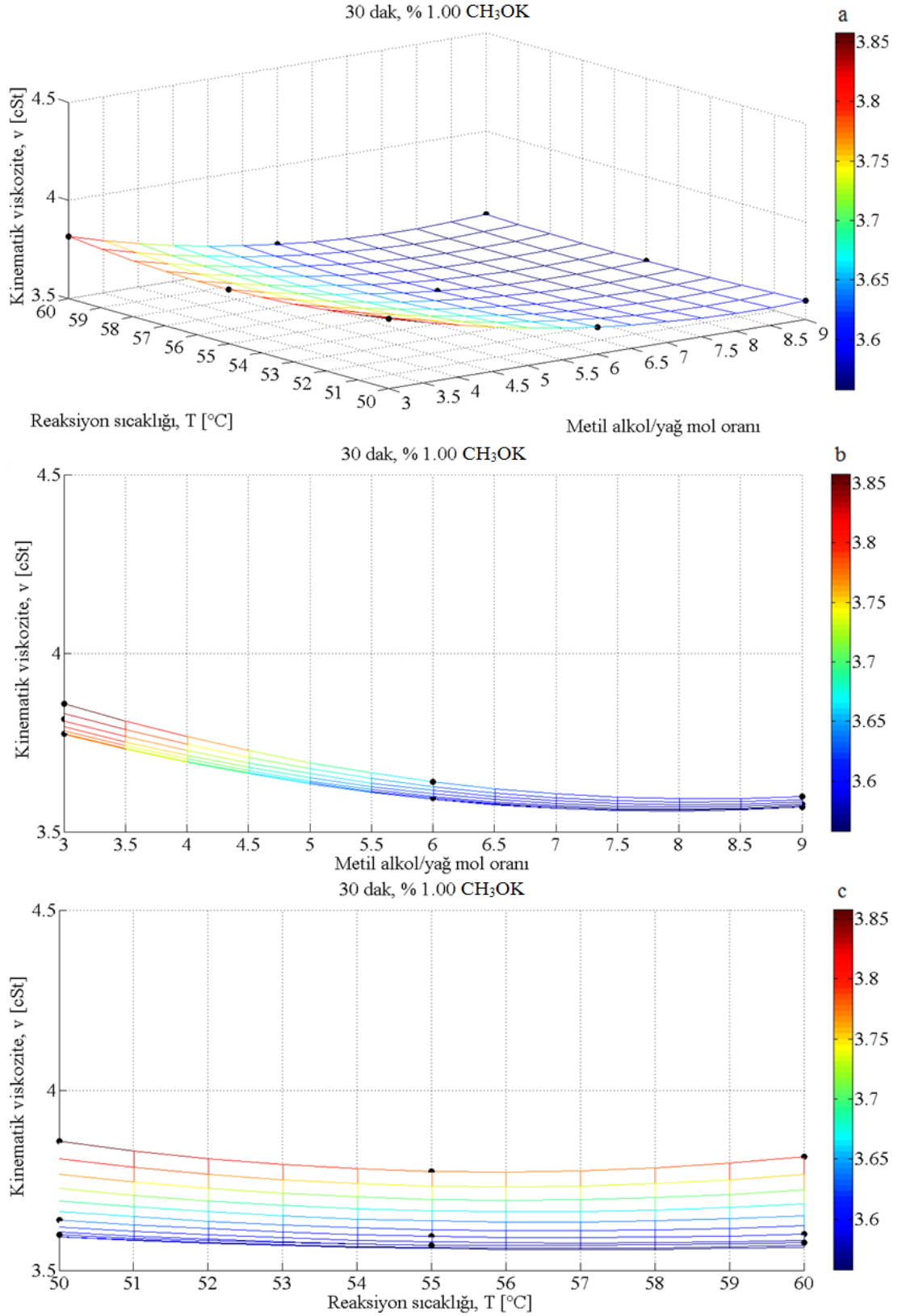
Şekil 4.28. CH₃OH ve % 0,75 oranında CH₃OK kullanılarak 30 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



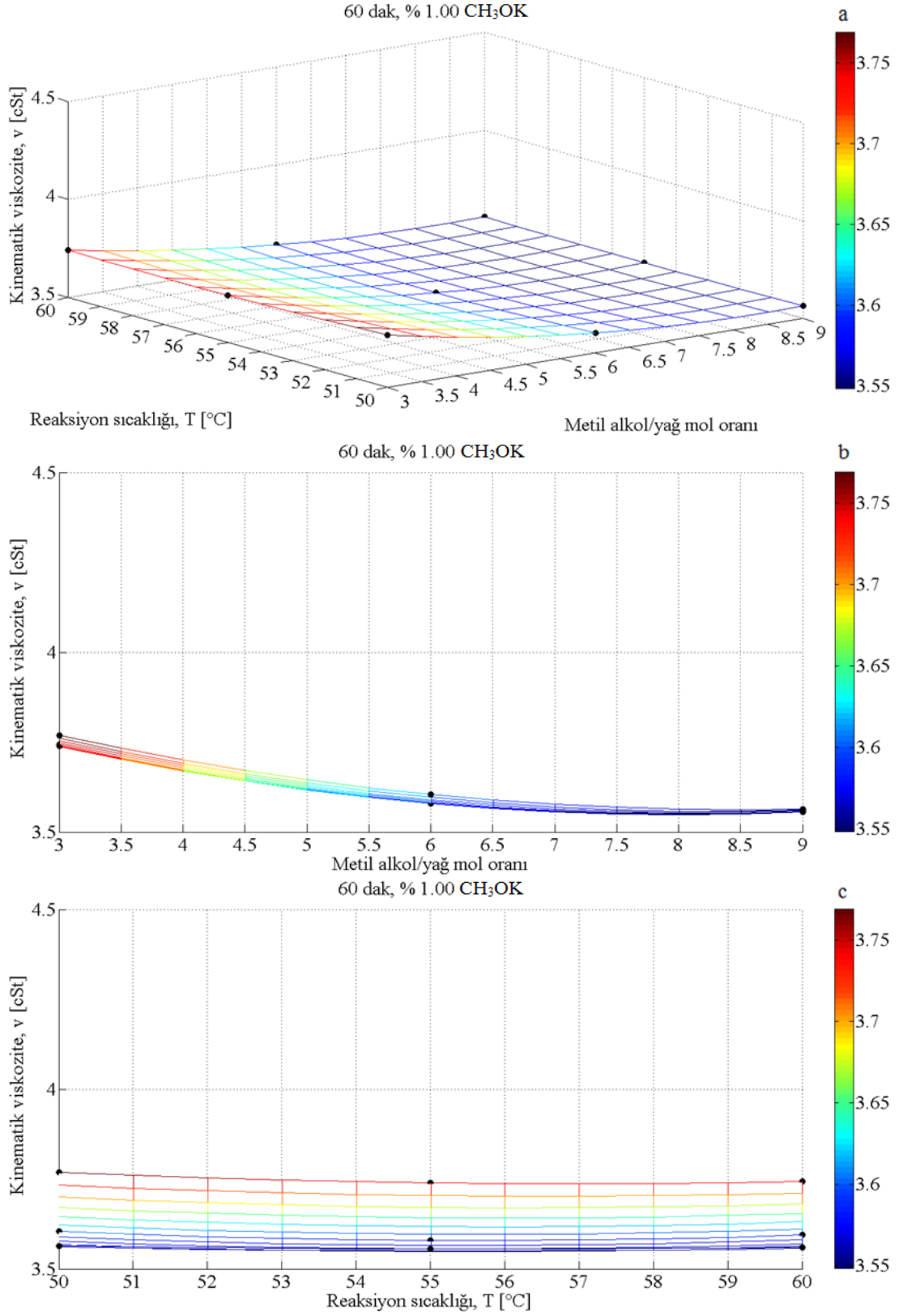
Şekil 4.29. CH₃OH ve % 0,75 oranında CH₃OK kullanılarak 60 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



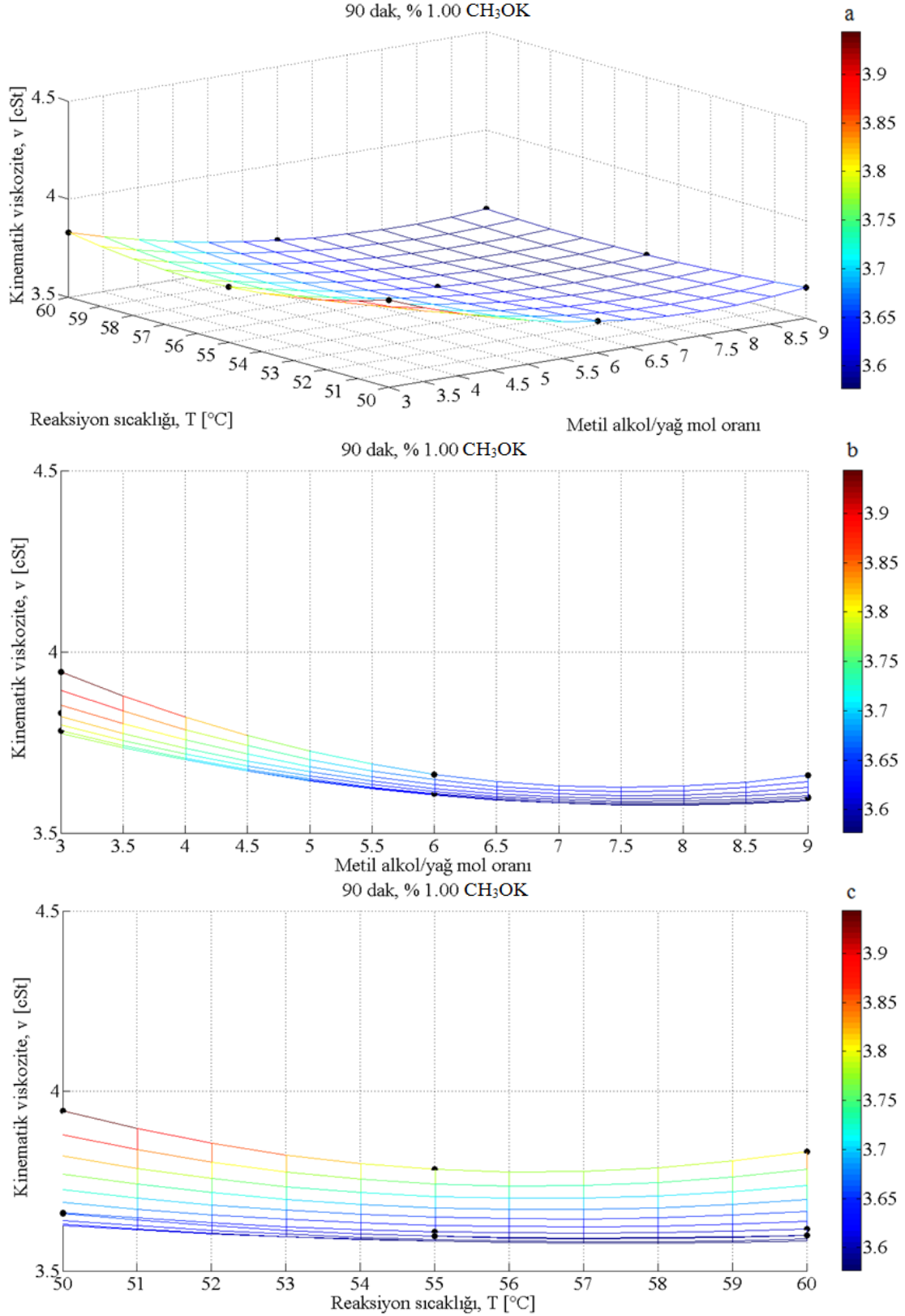
Şekil 4.30. CH₃OH ve % 0,75 oranında CH₃OK kullanılarak 90 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



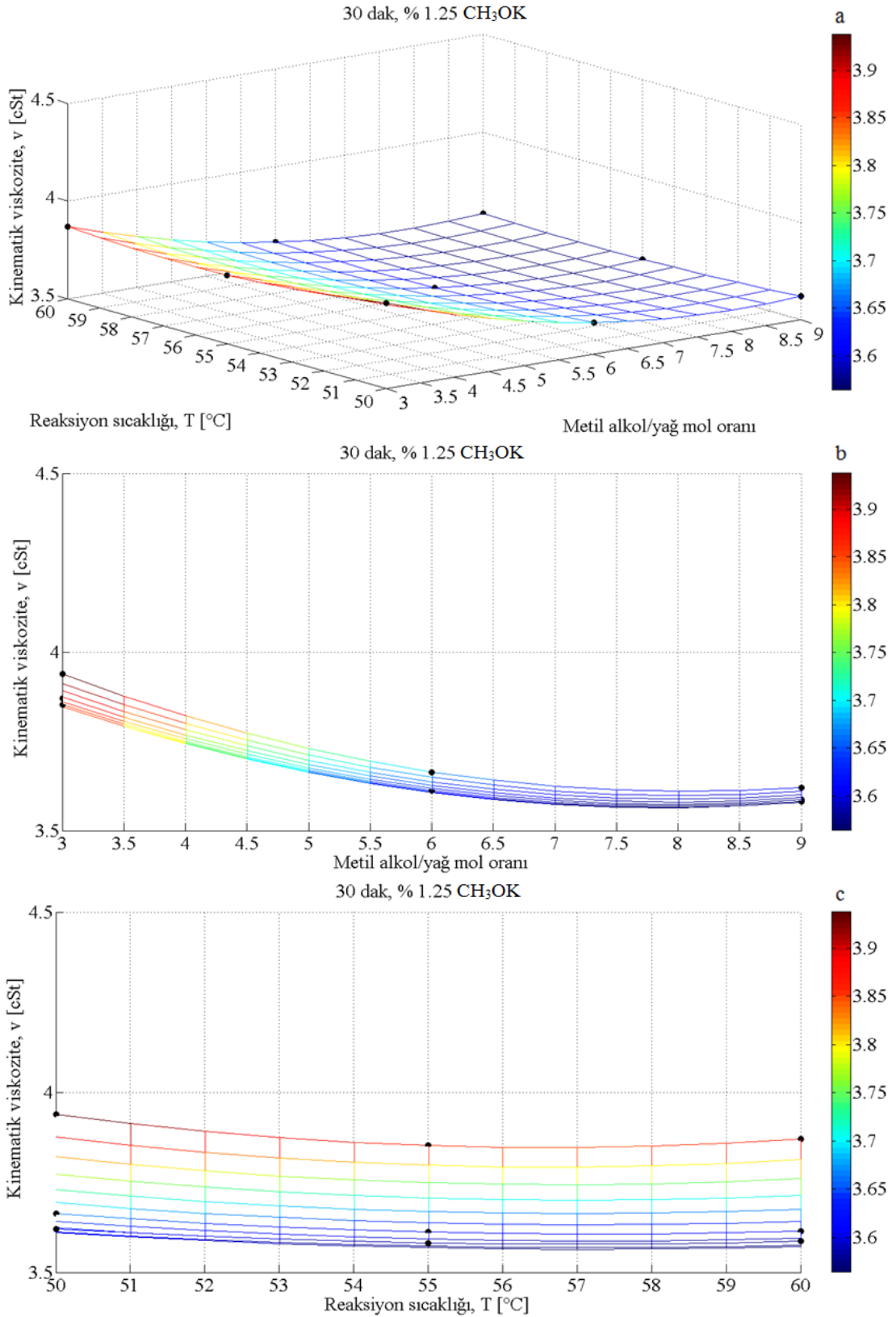
Şekil 4.31. CH₃OH ve % 1,00 oranında CH₃OK kullanılarak 30 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



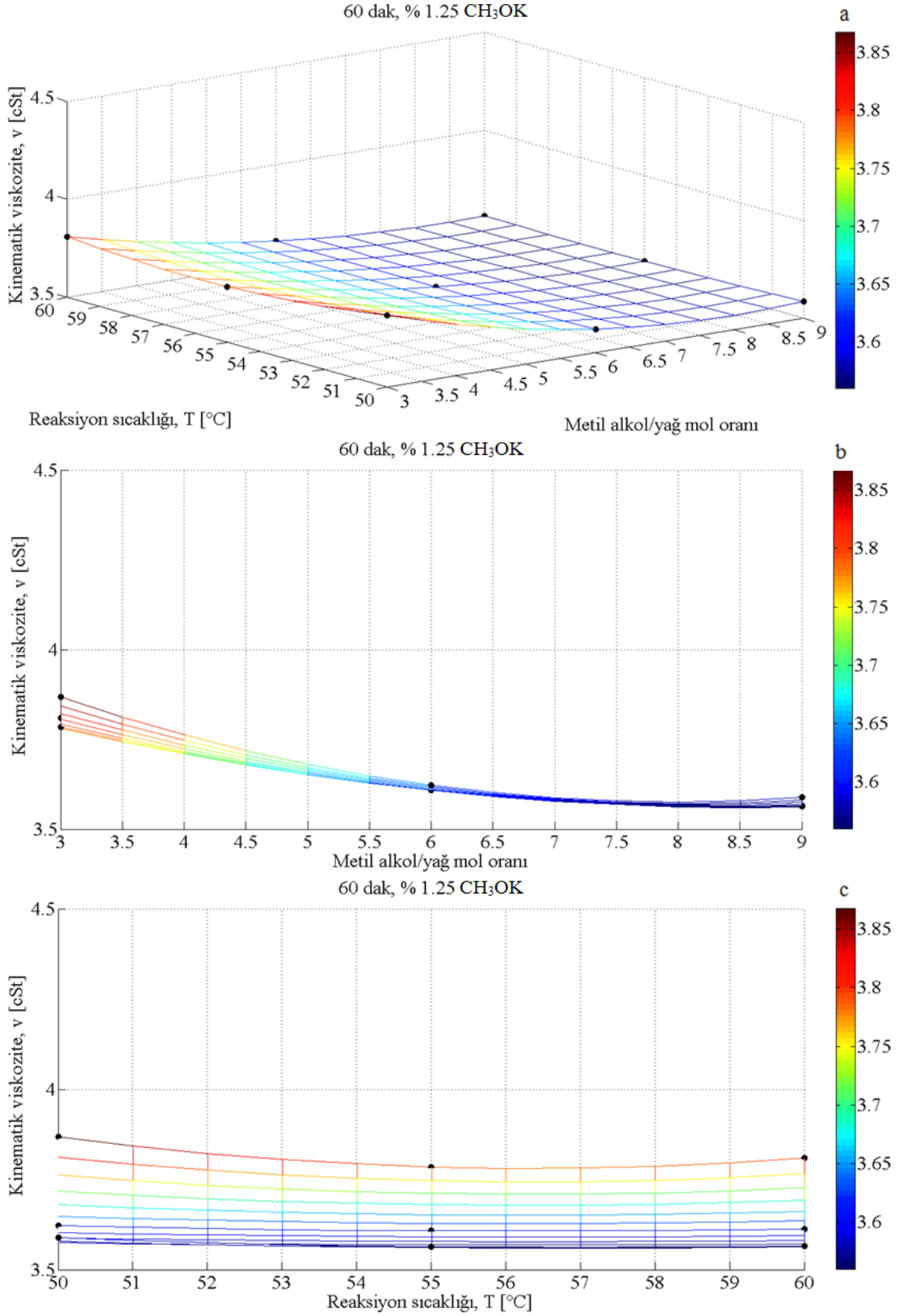
Şekil 4.32. CH₃OH ve % 1,00 oranında CH₃OK kullanılarak 60 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



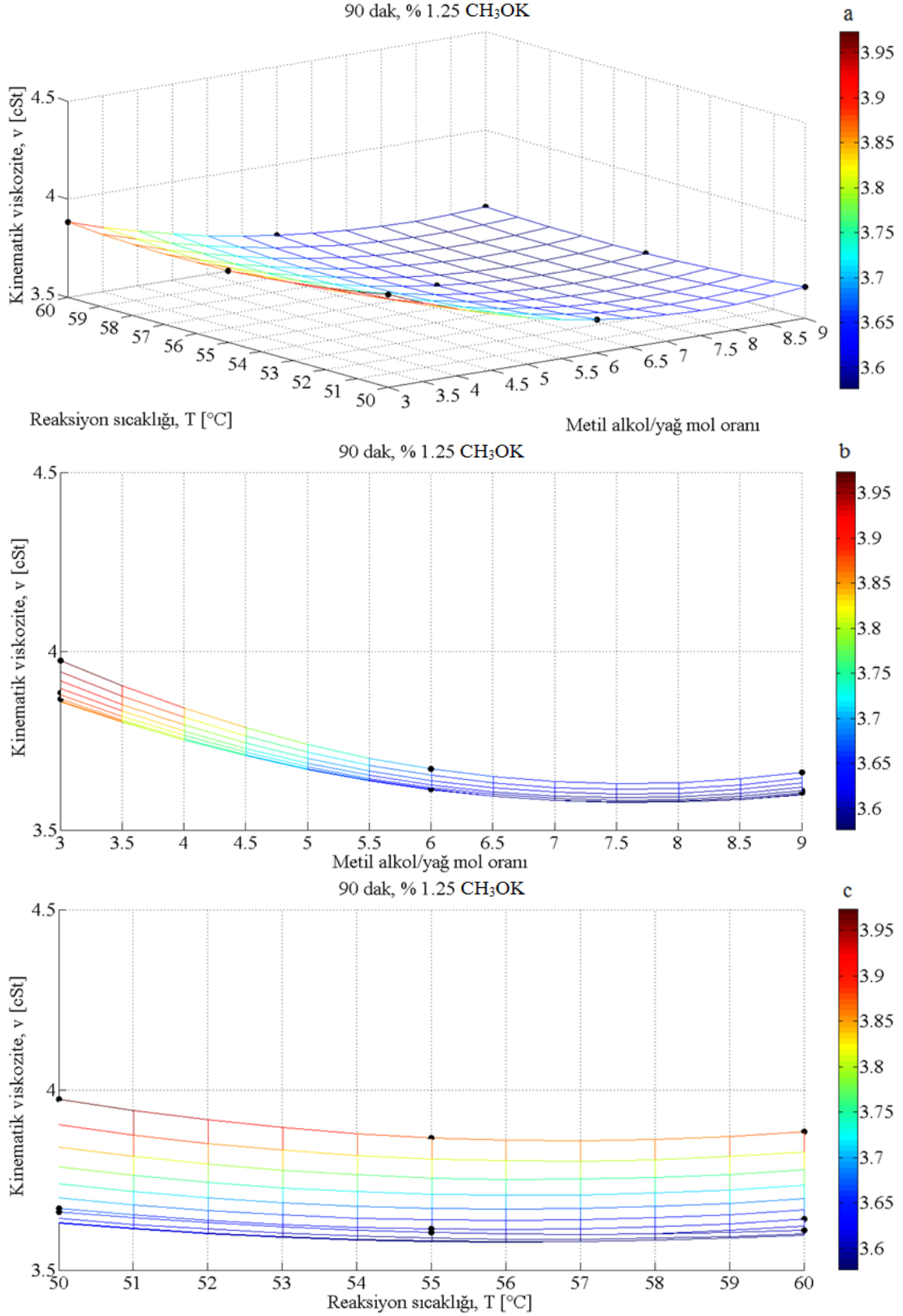
Şekil 4.33. CH₃OH ve % 1,00 oranında CH₃OK kullanılarak 90 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



Şekil 4.34. CH₃OH ve % 1,25 oranında CH₃OK kullanılarak 30 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



Şekil 4.35. CH₃OH ve % 1,25 oranında CH₃OK kullanılarak 60 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



Şekil 4.36. CH₃OH ve % 1,25 oranında CH₃OK kullanılarak 90 dak. reaksiyon süresinde üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığına, b) metil alkol/yağ mol oranına ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri

CH₃OH ve % 0,75, 1,00 ve 1,25 oranlarında CH₃OK kullanılarak, farklı reaksiyon sıcaklıklarında (50, 55 ve 60 °C), reaksiyon sürelerinde (30, 60 ve 90 dak.) ve metil alkol/yağ mol oranlarında (3:1, 6:1 ve 9:1) deneysel olarak üretilen atık kızartma yağı biyodizellerinin kinematik viskozite değerlerini kullanarak, 30, 60 ve 90 dak. reaksiyon sürelerinde üretilebilecek biyodizellerin viskozite değerleri ve ilgili alkol/yağ mol oranı ile reaksiyon sıcaklığı değerleri Matlab programında yer alan interpolasyon yöntemi yardımıyla tahmin edilmiştir. Söz konusu değerler ve parametreler Tablo 4.6'da ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tablo 4.6. % 0,75, % 1,00 ve % 1,25 oranlarında CH₃OK kullanılarak farklı reaksiyon sürelerinde üretilebilecek biyodizellerin tahmini viskozite değerleri ve ilgili metil alkol/yağ mol oranı ve reaksiyon sıcaklığı parametreleri

Katalizör (CH ₃ OK) oranı	Reaksiyon süresi		
	30 dak.	60 dak.	90 dak.
% 0,75	8:1 mol oranı ve 56 °C reaksiyon sıcaklığında 3,5685 cSt	8:1 mol oranı ve 56 °C reaksiyon sıcaklığında 3,5589 cSt	7.5:1 mol oranı ve 58 °C reaksiyon sıcaklığında 3,5793 cSt
% 1,00	8:1 mol oranı ve 57 °C reaksiyon sıcaklığında 3,5578 cSt	8:1 mol oranı ve 55 °C reaksiyon sıcaklığında 3,5483 cSt	8:1 mol oranı ve 57 °C reaksiyon sıcaklığında 3,5770 cSt
% 1,25	8:1 mol oranı ve 57 °C reaksiyon sıcaklığında 3,5642 cSt	8.5:1 mol oranı ve 57 °C reaksiyon sıcaklığında 3,5598 cSt	7.5:1 mol oranı ve 56 °C reaksiyon sıcaklığında 3,5770 cSt

Tablo 4.6 incelendiğinde, % 1,00 katalizör oranında reaksiyon süresinden bağımsız olarak 8:1 mol oranında, % 0,75 ve % 1,25 katalizör oranlarında ise reaksiyon süresine bağlı olarak 7,5:1, 8:1 veya 8,5:1 oranlarında düşük viskoziteli biyodizellerin üretilebileceği, her üç reaksiyon süresi için de % 1,00 katalizör oranı kullanımında düşük viskoziteli biyodizellerin elde edilebileceği, genel olarak 55–58 °C aralığında üretilen biyodizellerin viskozitelerinin düşük değerleri aldığı görülmüştür. Deneysel olarak % 1,00 katalizör oranında CH₃OK ve 9:1 mol oranında CH₃OH kullanılarak 55 °C reaksiyon sıcaklığında ve 60 dakika reaksiyon süresinde düşük viskoziteli biyodizel üretilmiş olsa da, Tablo 4.6, yine aynı reaksiyon süresi, reaksiyon sıcaklığı ve katalizör oranında, mol oranı 8:1'e azaltıldığında daha da düşük viskoziteli (3,5483 cSt) biyodizelin üretilebileceğini göstermektedir.

4.1.3. Farklı Katalizörler Kullanılarak Üretilen Atık Kızartma Yağı Biyodizelinin Viskozitesinin Reaksiyon Süresi ve Reaksiyon Sıcaklığına Göre Değişimi

4.1.3.1. CH₃OH ile % 0,75, % 1,00 ve % 1,25 Oranlarında CH₃ONa Kullanılması Durumu

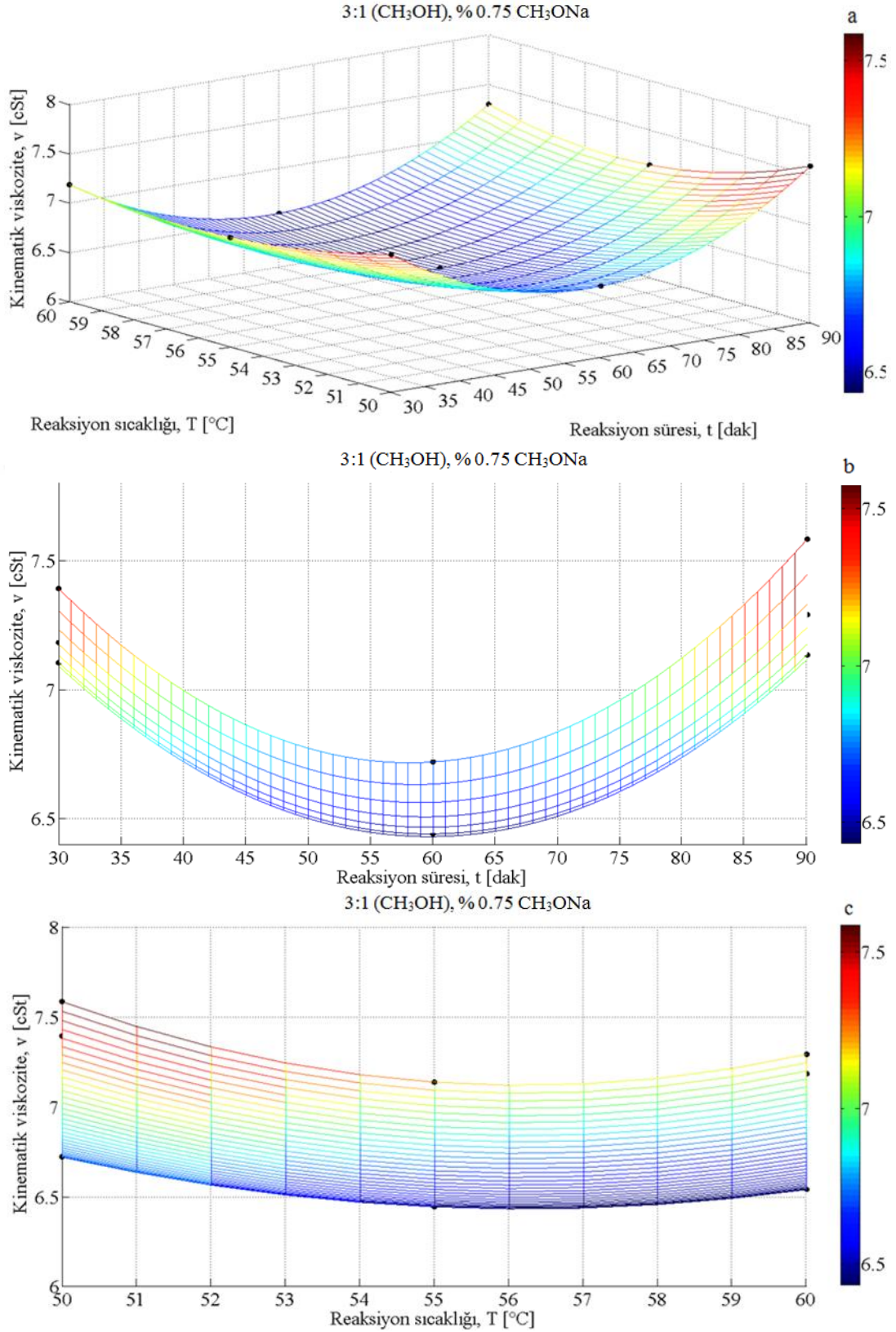
Şekil 4.37–4.45 a–c’de, CH₃OH ve CH₃ONa kullanılarak, farklı katalizör oranlarında (% 0,75, 1,00 ve 1,25) ve farklı metil alkol/yağ mol oranlarında (3:1, 6:1 ve 9:1) üretilen atık kızartma yağı biyodizellerinin kinematik viskozitelerinin reaksiyon süresi (30, 60 ve 90 dak.) ve reaksiyon sıcaklığına (50, 55 ve 60 °C) göre değişimleri 3- ve 2-boyutlu olarak verilmiştir. Şekil 4.37–4.45 incelendiğinde, her üç katalizör ve mol oranında da, viskozitenin reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına göre değişiminde benzer karakteristiklerin elde edildiği görülebilir. Kısa reaksiyon süreleri (örneğin 30 dak.) ve düşük reaksiyon sıcaklıklarında (örneğin 50 °C) üretilen biyodizellerin viskozitelerinin yüksek olduğu, reaksiyon süresinin 46–60 dakika aralığına kadar artırılmasıyla ve reaksiyon sıcaklığının 56 veya 57 °C’ye kadar düşürülmesiyle viskozitelerin azalarak düşük değerleri aldığı, reaksiyon sıcaklığının ve süresinin artırılmaya devam edilmesi durumunda esterlerin tekrar hidrolizlenmesi ve reaksiyon ortamında bulunan alkolün buharlaşmaya başlaması nedeniyle viskozitelerin artış eğilimine girdiği ve en yüksek değerleri aldığı görülmüştür (Şekil 4.37–4.45 a, b). Her üç katalizör oranı için de, viskozitenin reaksiyon süresine göre değişimi, 3:1 mol oranında nispeten daha geniş, 6:1 ve 9:1 mol oranlarında ise nispeten daha dar bir aralıkta gerçekleşmiştir (Şekil 4.37–4.45 a, b). % 0,75 katalizör oranı kullanımında her üç mol oranı için de, viskozitenin düşük reaksiyon sürelerindeki değişim aralığının artan reaksiyon süresiyle değişmediği (Şekil 4.37–4.39 b) fakat % 1,00 ve 1,25 katalizör oranları kullanımında 3:1 mol oranı için düşük reaksiyon sürelerindeki değişim aralığının artan reaksiyon süresiyle azaldığı, 6:1 ve 9:1 mol oranlarında ise değişim aralığının reaksiyon süresiyle yaklaşık sabit kaldığı görülmüştür (Şekil 4.40–4.45 b). Ayrıca, % 1,00 ve 1,25 katalizör oranlarında, her üç mol oranı için de reaksiyon süresiyle viskozite değerlerinin parabolik olarak değiştiği (Şekil 4.40–4.45 b), % 0,75 katalizör oranı için 3:1 mol oranında elde edilen parabolik değişimin (Şekil 4.37 b), 6:1 ve 9:1 mol oranlarında yaklaşık doğrusal bir karaktere dönüştüğü görülmüştür (Şekil 4.38 ve 4.39 b). Katalizör oranından bağımsız olarak, viskozitenin reaksiyon sıcaklığıyla değişiminin 3:1 mol oranında nispeten daha geniş, 6:1 ve 9:1 mol

oranlarında ise daha dar bir aralıkta gerçekleştiği (Şekil 4.37–4.45 c) belirlenmiştir. Her üç katalizör oranı için de, 3:1 mol oranındaki değişim aralığının, düşük ve yüksek reaksiyon sıcaklığı bölgesinde yaklaşık aynı olduğu yani değişim aralığının reaksiyon sıcaklığının artışıyla çok fazla değişmediği (Şekil 4.37, 4.40 ve 4.43 c) görülmüştür. 6:1 ve 9:1 mol oranlarında ise reaksiyon sıcaklığının artışıyla viskozitenin değişim aralığının görece daraldığı belirlenmiştir (Şekil 4.38, 4.39, 4.41, 4.42, 4.44 ve 4.45 c).

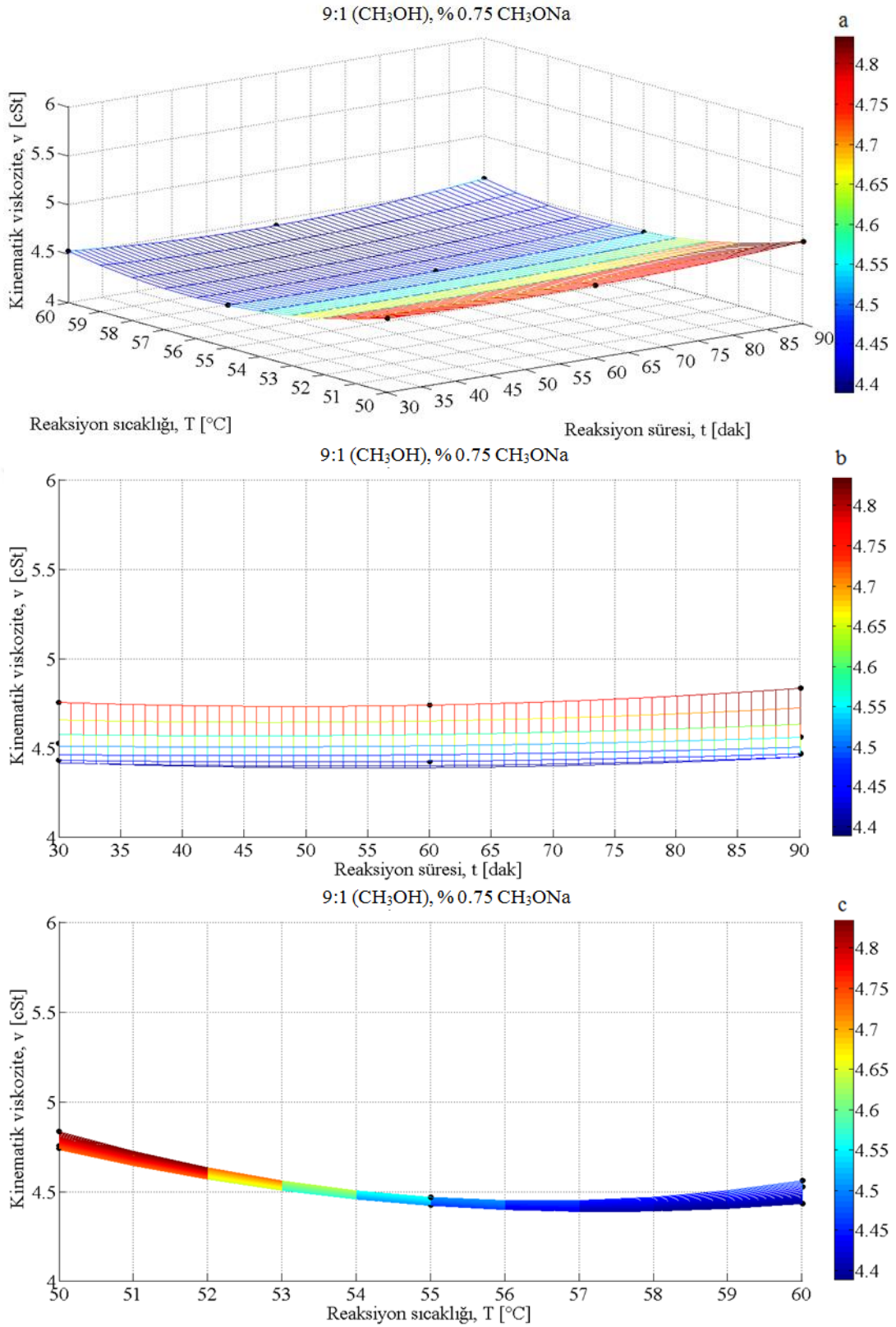
CH₃OH ve % 0,75, 1,00 ve 1,25 oranlarında CH₃ONa kullanılarak, farklı reaksiyon sıcaklıklarında (50, 55 ve 60 °C), reaksiyon sürelerinde (30, 60 ve 90 dak.) ve alkol/yağ mol oranlarında (3:1, 6:1 ve 9:1) deneysel olarak üretilen atık kızartma yağı biyodizellerinin kinematik viskozite değerlerini kullanarak, 3:1, 6:1 ve 9:1 mol oranlarında üretilebilecek biyodizellerin viskozite değerleri ve ilgili reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığı değerleri Matlab programındaki interpolasyon yöntemi yardımıyla tahmin edilmiştir. Söz konusu değerler Tablo 4.7’de verilmiştir.

Tablo 4.7. % 0,75, % 1,00 ve % 1,25 oranlarında CH₃ONa kullanılarak farklı metil alkol/yağ mol oranlarında üretilebilecek biyodizellerin tahmini viskozite değerleri ve ilgili reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığı parametreleri

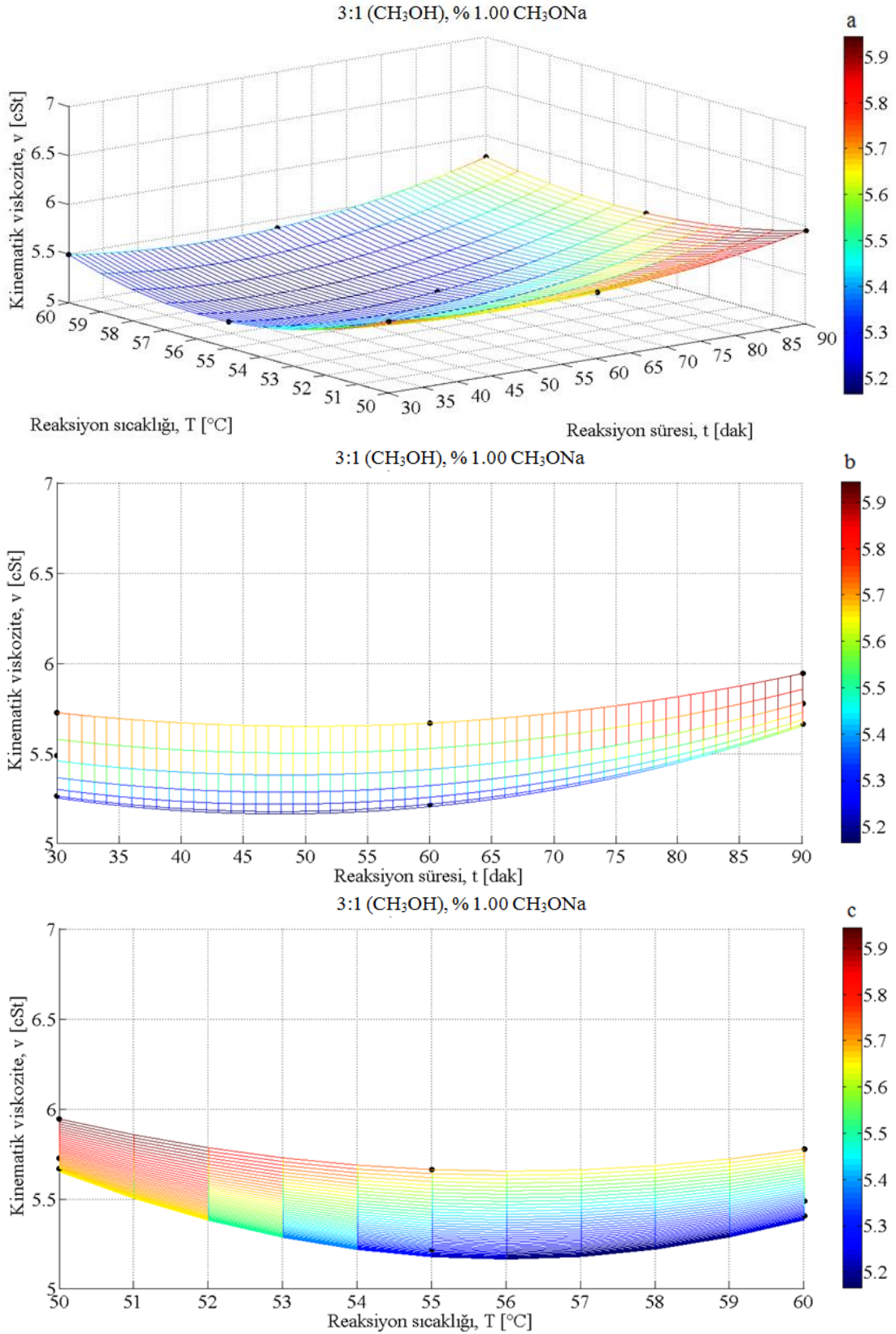
Katalizör (CH ₃ ONa) oranı	Alkol/yağ mol oranı		
	3:1	6:1	9:1
% 0,75	60 dak. reaksiyon süresi ve 56 °C reaksiyon sıcaklığında 6,4324 cSt	46 dak. reaksiyon süresi ve 56 °C reaksiyon sıcaklığında 4,3028 cSt	54 dak. reaksiyon süresi ve 57 °C reaksiyon sıcaklığında 4,3882 cSt
% 1,00	48 dak. reaksiyon süresi ve 56 °C reaksiyon sıcaklığında 5,1654 cSt	49 dak. reaksiyon süresi ve 56 °C reaksiyon sıcaklığında 3,9695 cSt	52 dak. reaksiyon süresi ve 56 °C reaksiyon sıcaklığında 4,0040 cSt
% 1,25	49 dak. reaksiyon süresi ve 56 °C reaksiyon sıcaklığında 5,1873 cSt	46 dak. reaksiyon süresi ve 56 °C reaksiyon sıcaklığında 4,0039 cSt	49 dak. reaksiyon süresi ve 56 °C reaksiyon sıcaklığında 4,0571 cSt



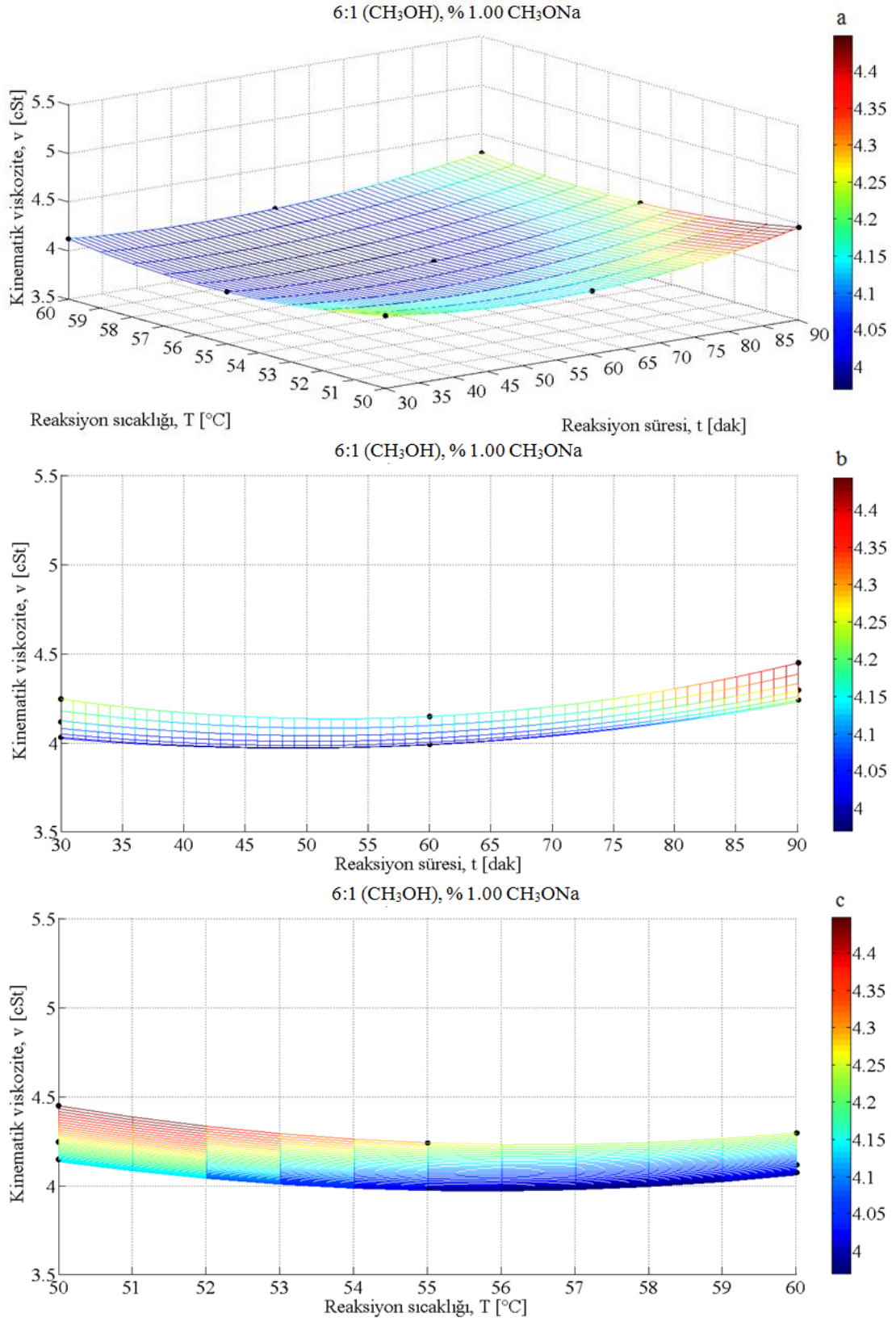
Şekil 4.37. 3:1 mol oranında CH₃OH ve % 0,75 oranında CH₃ONa kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



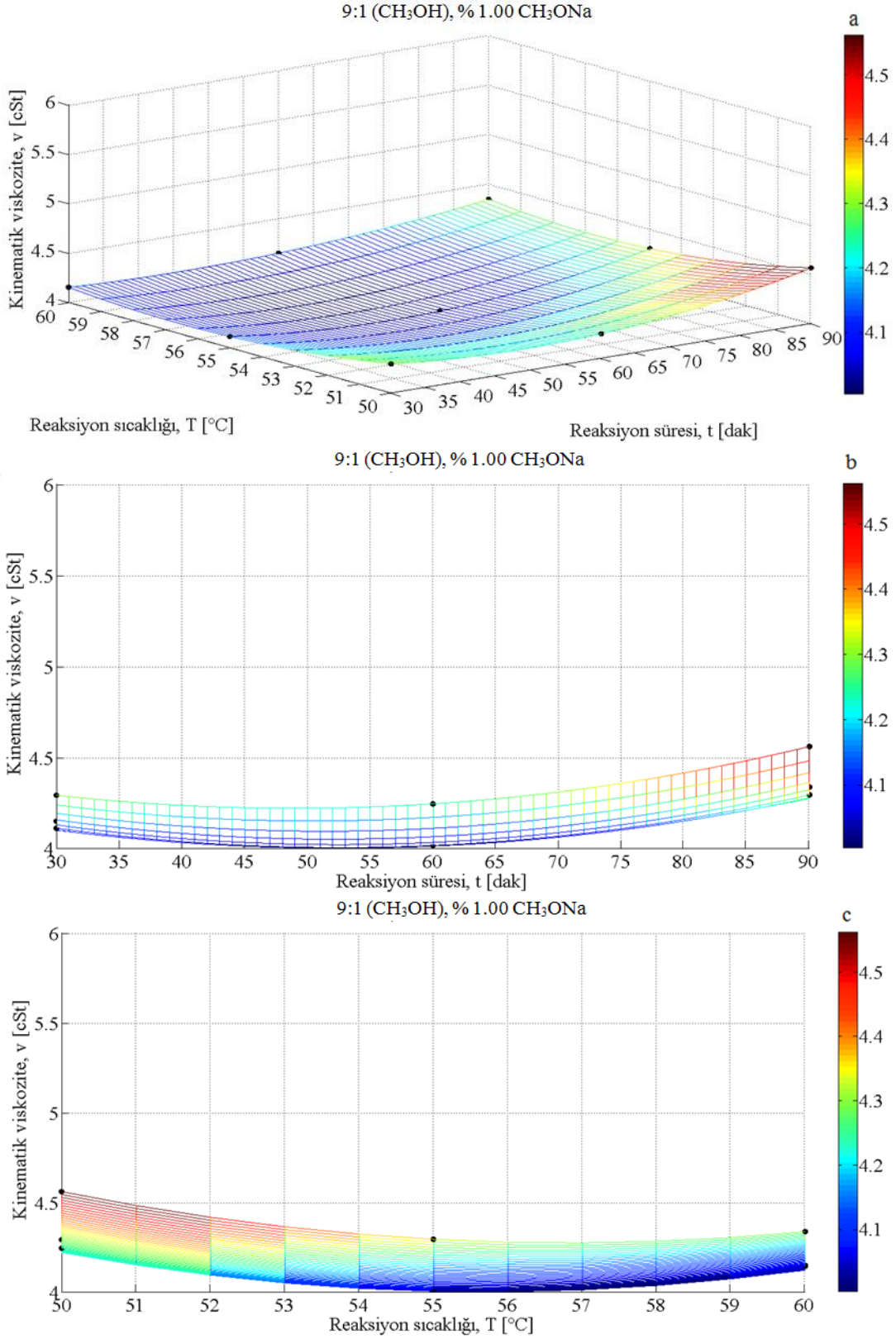
Şekil 4.39. 9:1 mol oranında CH₃OH ve % 0,75 oranında CH₃ONa kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



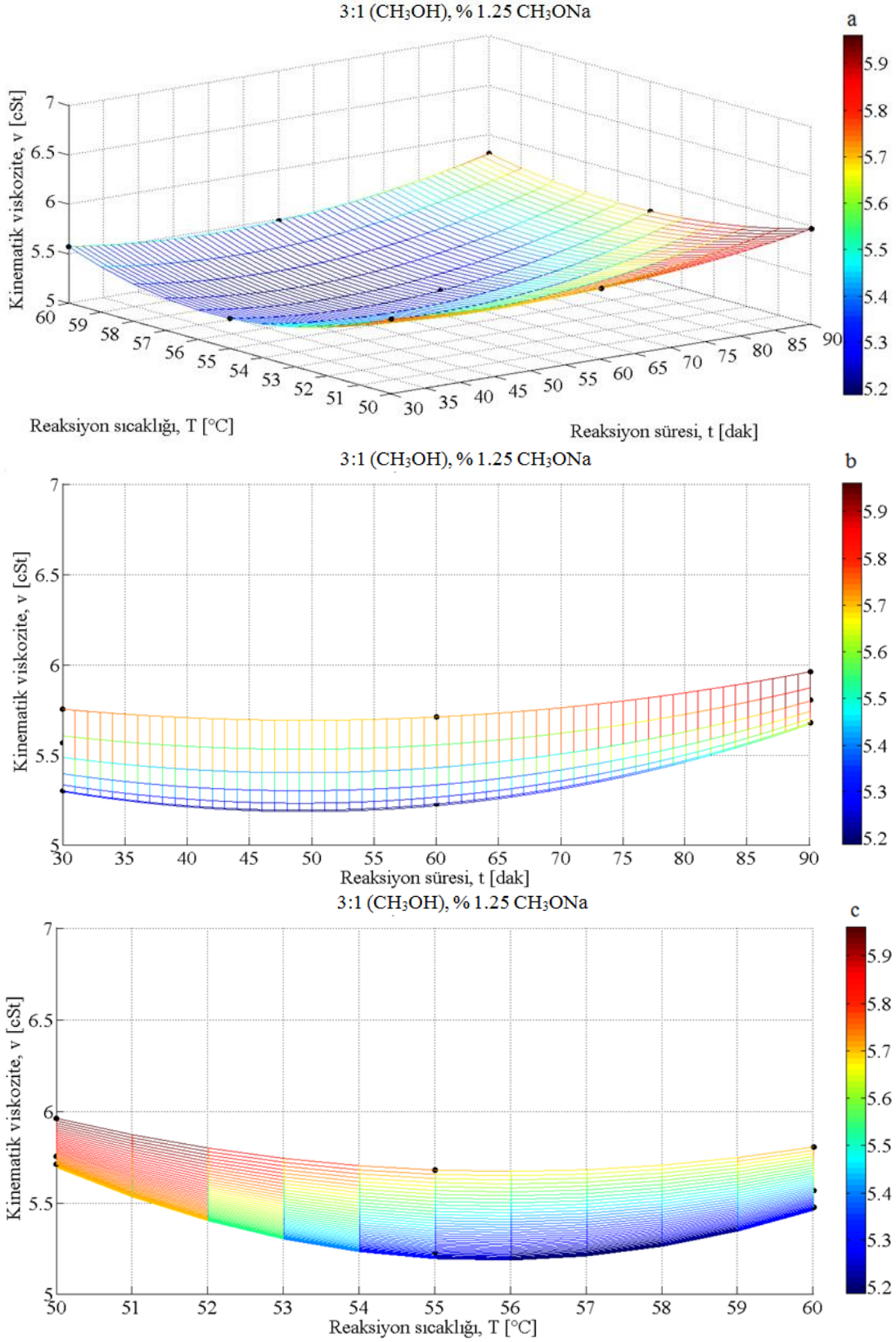
Şekil 4.40. 3:1 mol oranında CH₃OH ve % 1,00 oranında CH₃ONa kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



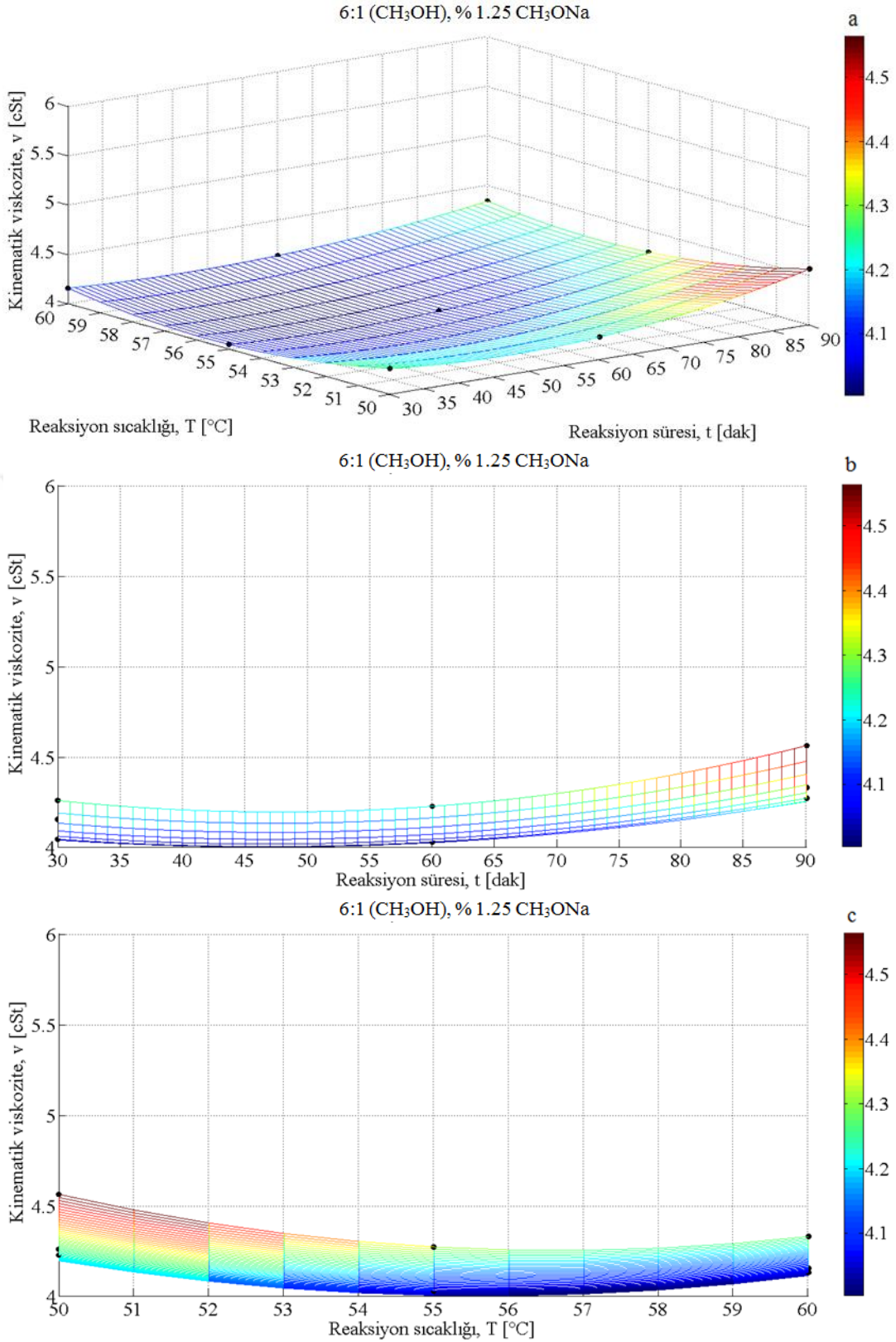
Şekil 4.41. 6:1 mol oranında CH₃OH ve % 1,00 oranında CH₃ONa kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



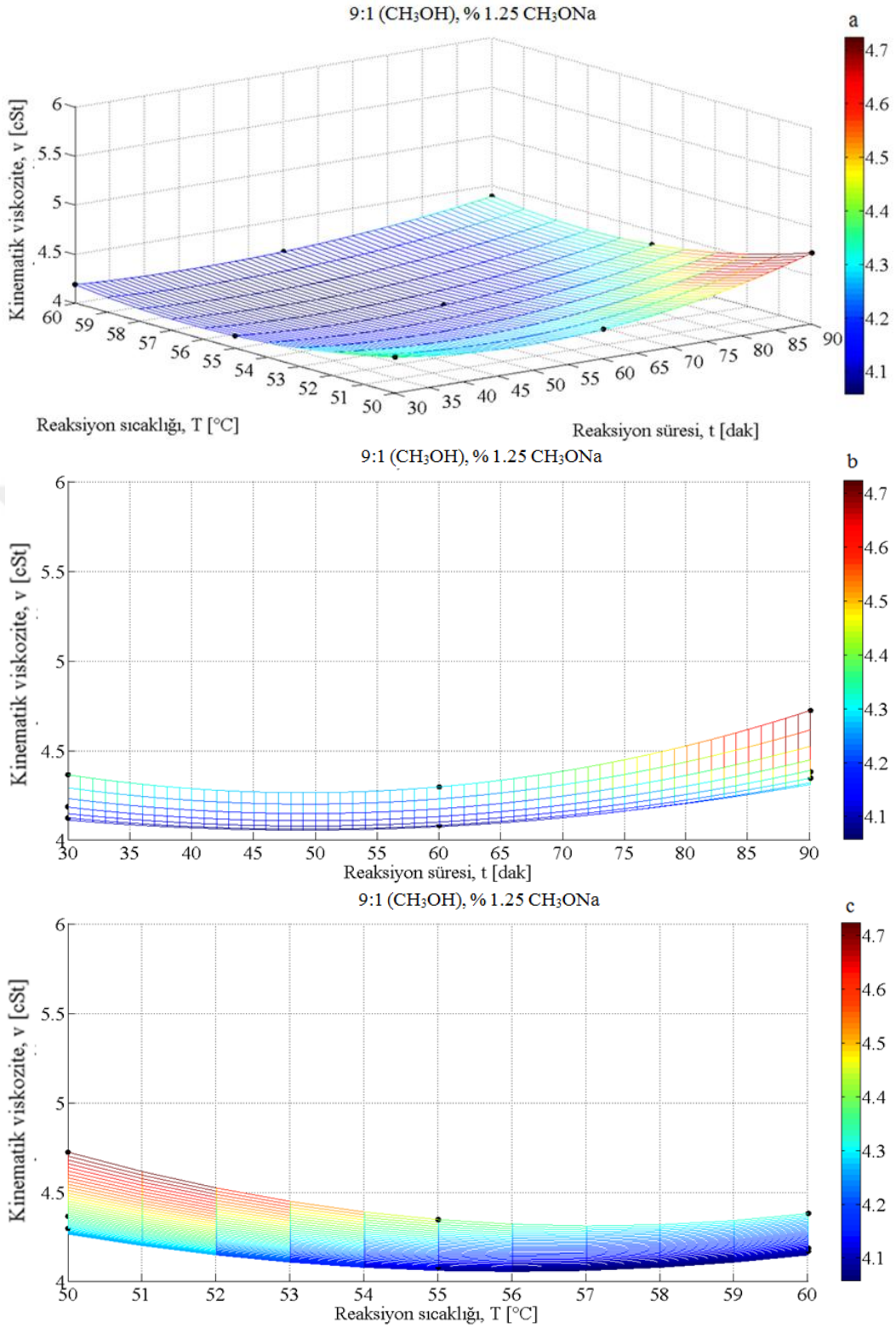
Şekil 4.42. 9:1 mol oranında CH₃OH ve % 1,00 oranında CH₃ONa kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



Şekil 4.43. 3:1 mol oranında CH₃OH ve % 1,25 oranında CH₃ONa kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



Şekil 4.44. 6:1 mol oranında CH₃OH ve % 1,25 oranında CH₃ONa kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri

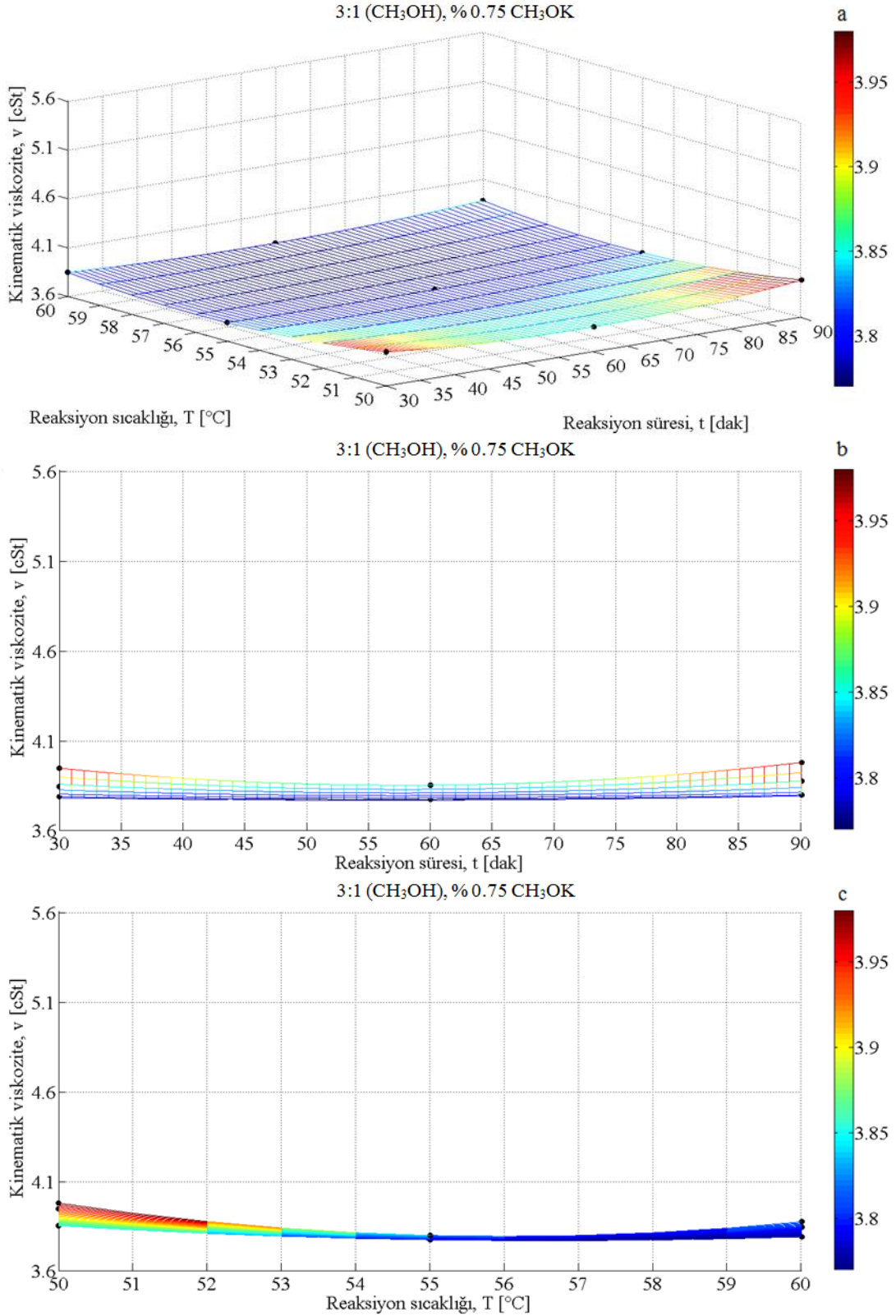


Şekil 4.45. 9:1 mol oranında CH₃OH ve % 1,25 oranında CH₃ONa kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri

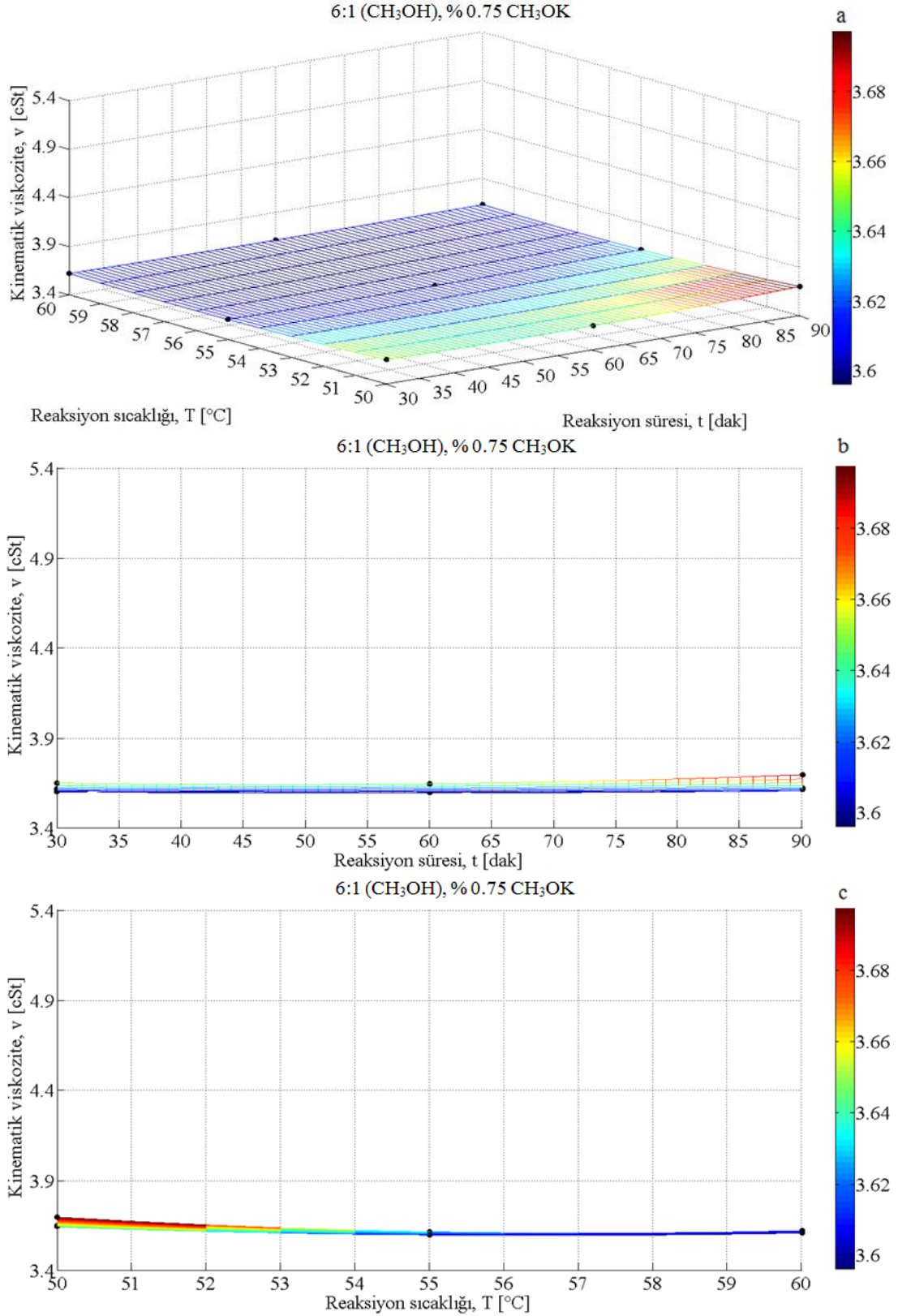
Tablo 4.7 incelendiğinde, % 1,00 ve 1,25 katalizör oranlarında alkol/yağ mol oranından bağımsız olarak 56 °C reaksiyon sıcaklığında, % 0,75 katalizör oranında ise alkol/yağ mol oranıyla değişmekle birlikte 56 veya 57 °C reaksiyon sıcaklığında düşük viskoziteli biyodizellerin üretilebileceği, her üç alkol/yağ mol oranı için de % 1,00 katalizör oranında düşük viskozitelerin elde edilebileceği, 6:1 mol oranı kullanımında her üç katalizör oranı için de düşük viskoziteli biyodizellerin üretilebileceği, % 1,00 katalizör oranı için mol oranı arttıkça düşük viskozitenin elde edileceği reaksiyon süresinin uzadığı belirlenmiştir. Deneysel olarak, % 1,00 katalizör oranında CH_3ONa ve 6:1 mol oranında CH_3OH kullanılarak, 55 °C reaksiyon sıcaklığında ve 60 dakika reaksiyon süresinde düşük viskoziteli biyodizel üretilmiş olsa da, Tablo 4.7, yine aynı mol oranı ve katalizör oranında, reaksiyon süresi 49 dakikaya düşürüldüğünde ve reaksiyon sıcaklığı 56 °C'ye çıkarıldığında, daha da düşük viskoziteli (3,9695 cSt) biyodizelin üretilebileceğini göstermektedir.

4.1.3.2. CH_3OH ile % 0,75, % 1,00 ve % 1,25 Oranlarında CH_3OK Kullanılması Durumu

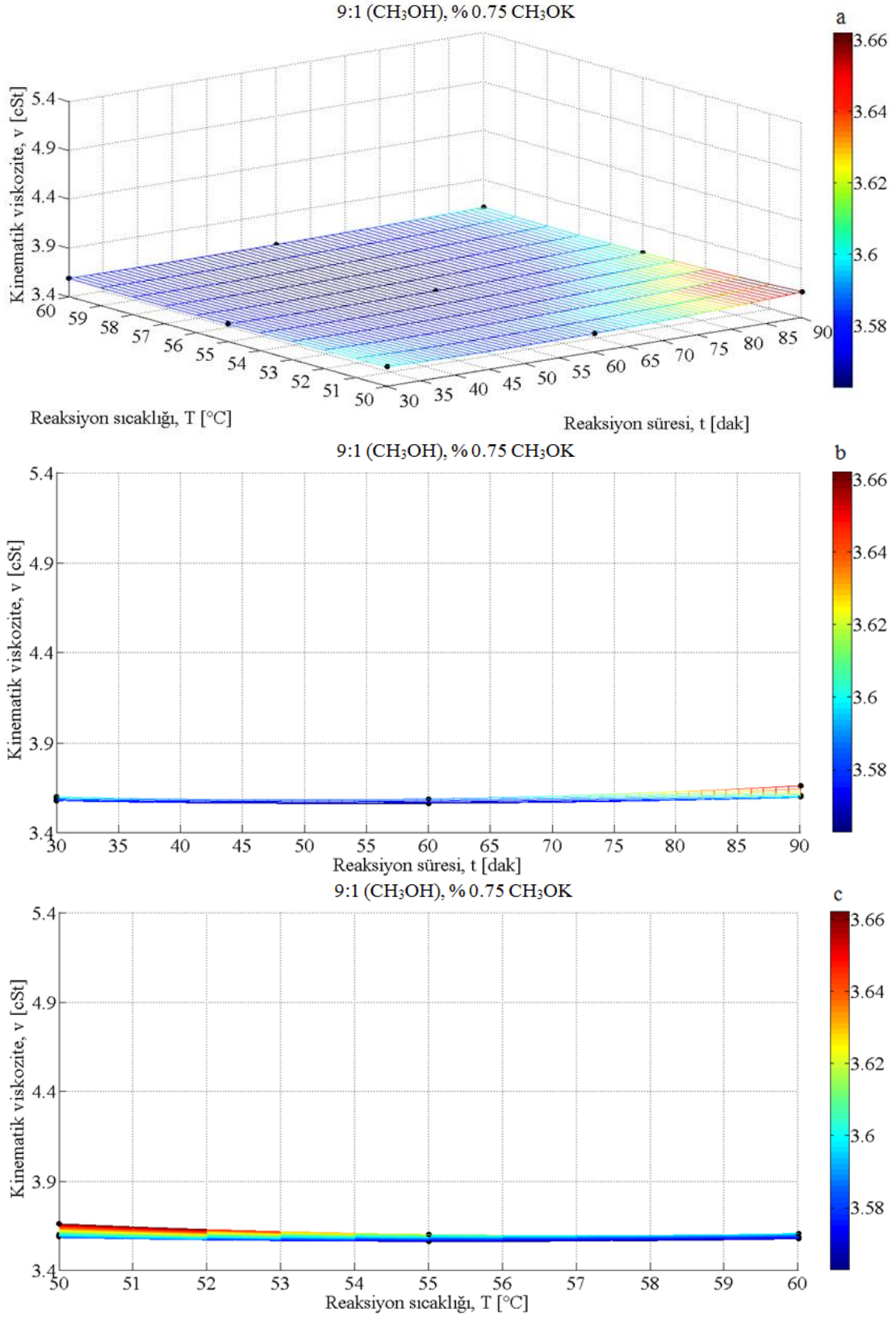
Şekil 4.46–4.54 a–c'de, CH_3OH ve CH_3OK kullanılarak, farklı katalizör oranlarında (% 0,75, 1,00 ve 1,25) ve farklı metil alkol/yağ mol oranlarında (3:1, 6:1 ve 9:1) üretilen atık kızartma yağı biyodizellerinin kinematik viskozitelerinin, reaksiyon süresi (30, 60 ve 90 dak.) ve reaksiyon sıcaklığına (50, 55 ve 60 °C) göre değişimleri 3- ve 2-boyutlu olarak verilmiştir.



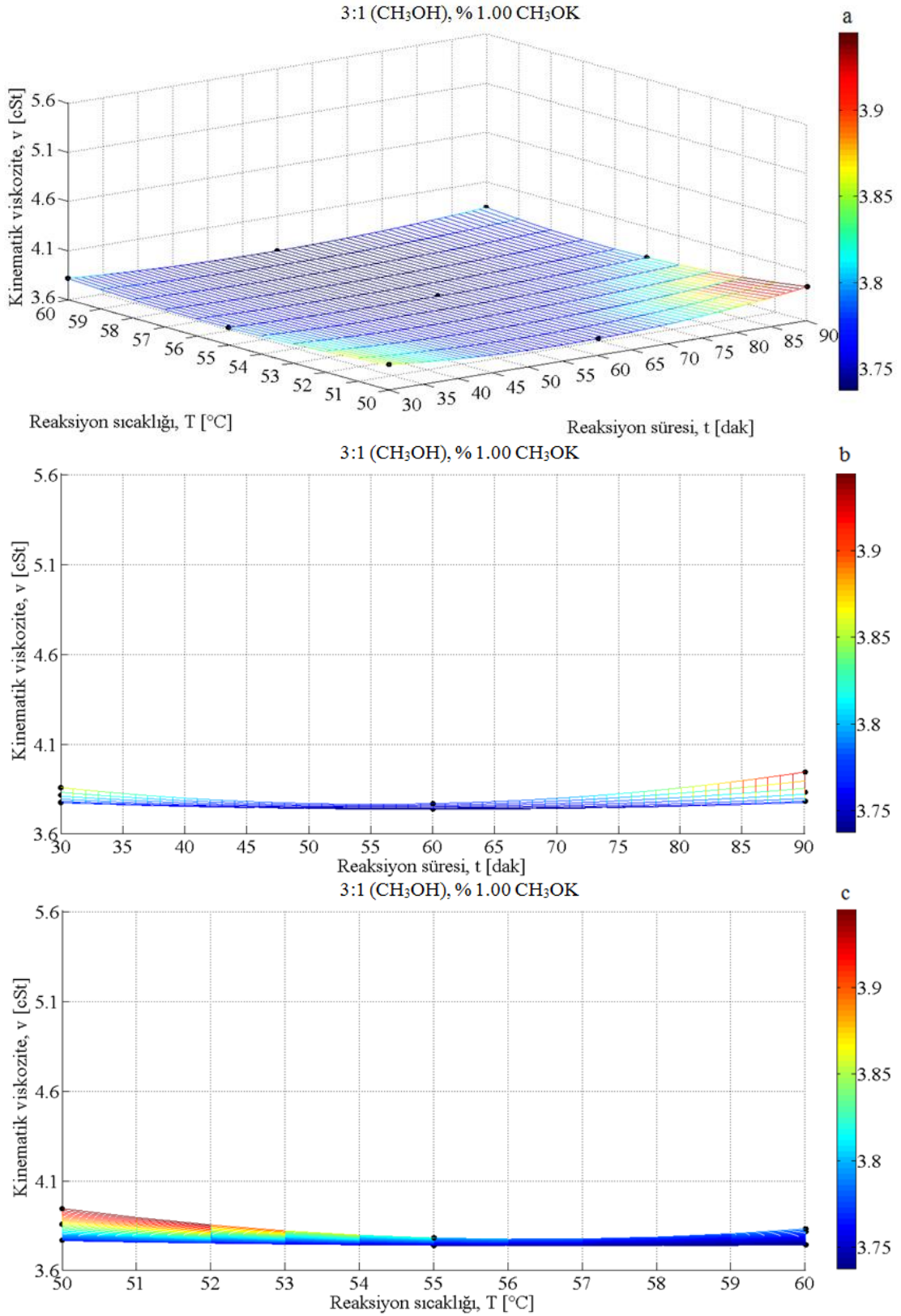
Şekil 4.46. 3:1 mol oranında CH₃OH ve % 0,75 oranında CH₃OK kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



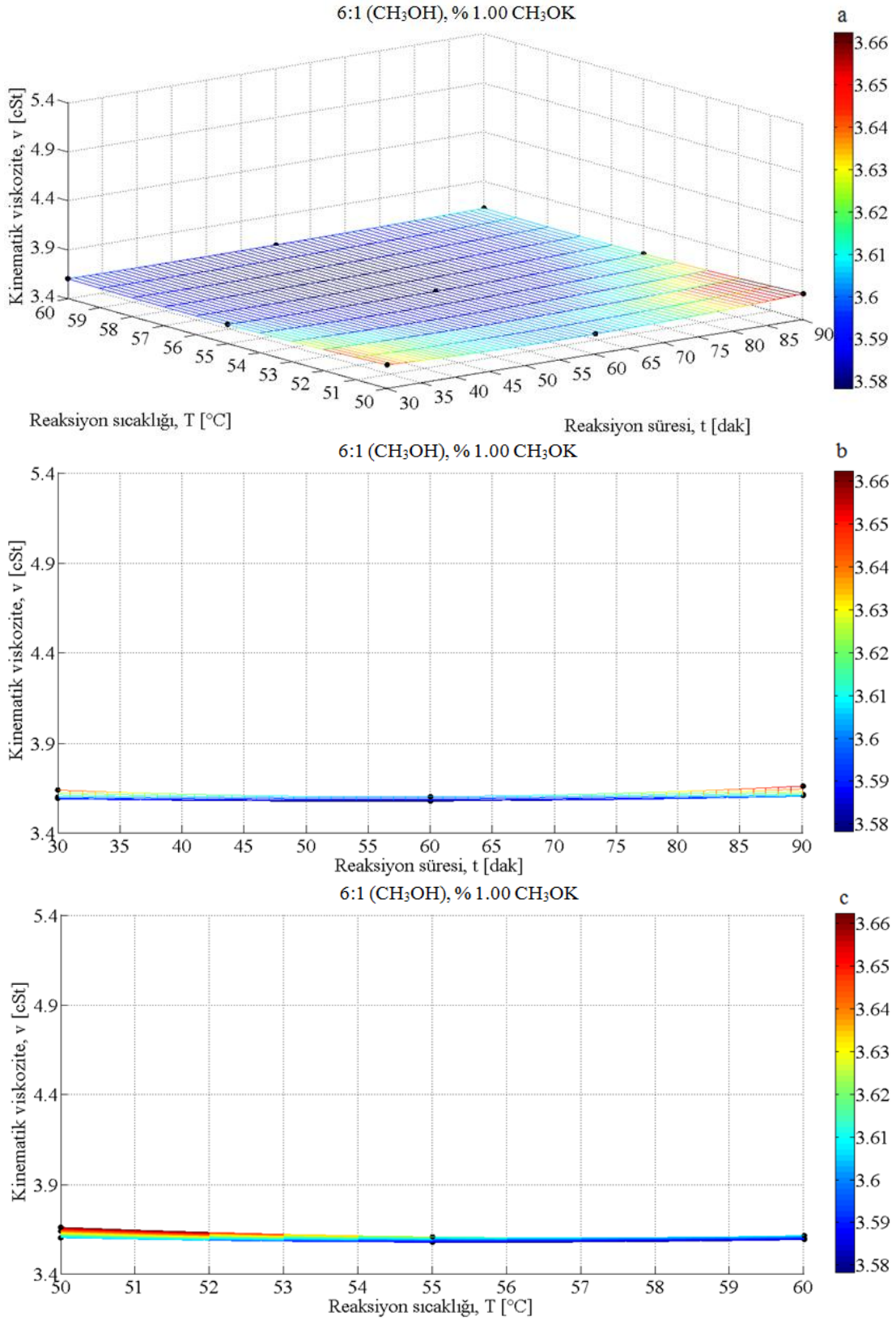
Şekil 4.47. 6:1 mol oranında CH₃OH ve % 0,75 oranında CH₃OK kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



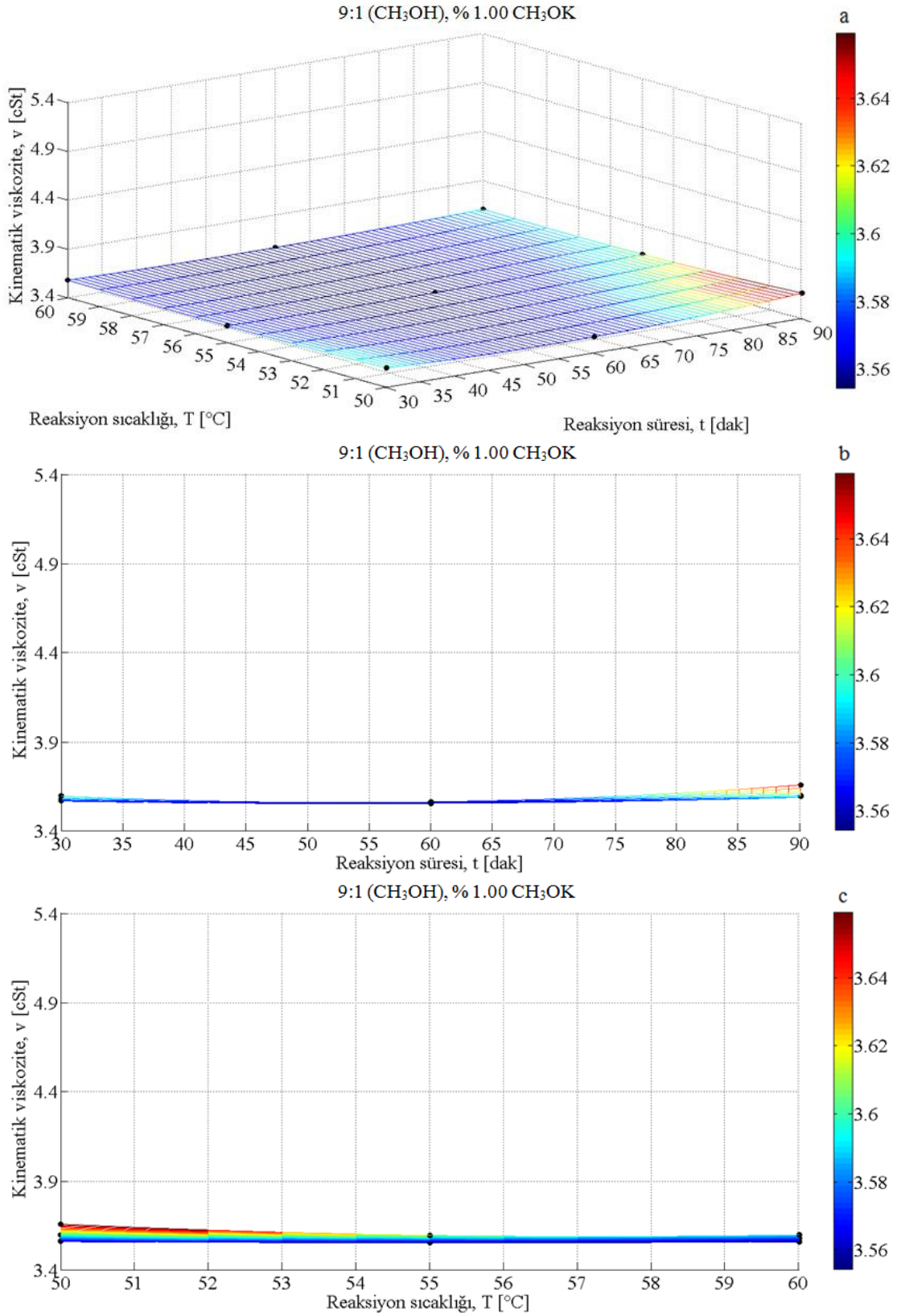
Şekil 4.48. 9:1 mol oranında CH₃OH ve % 0.75 oranında CH₃OK kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



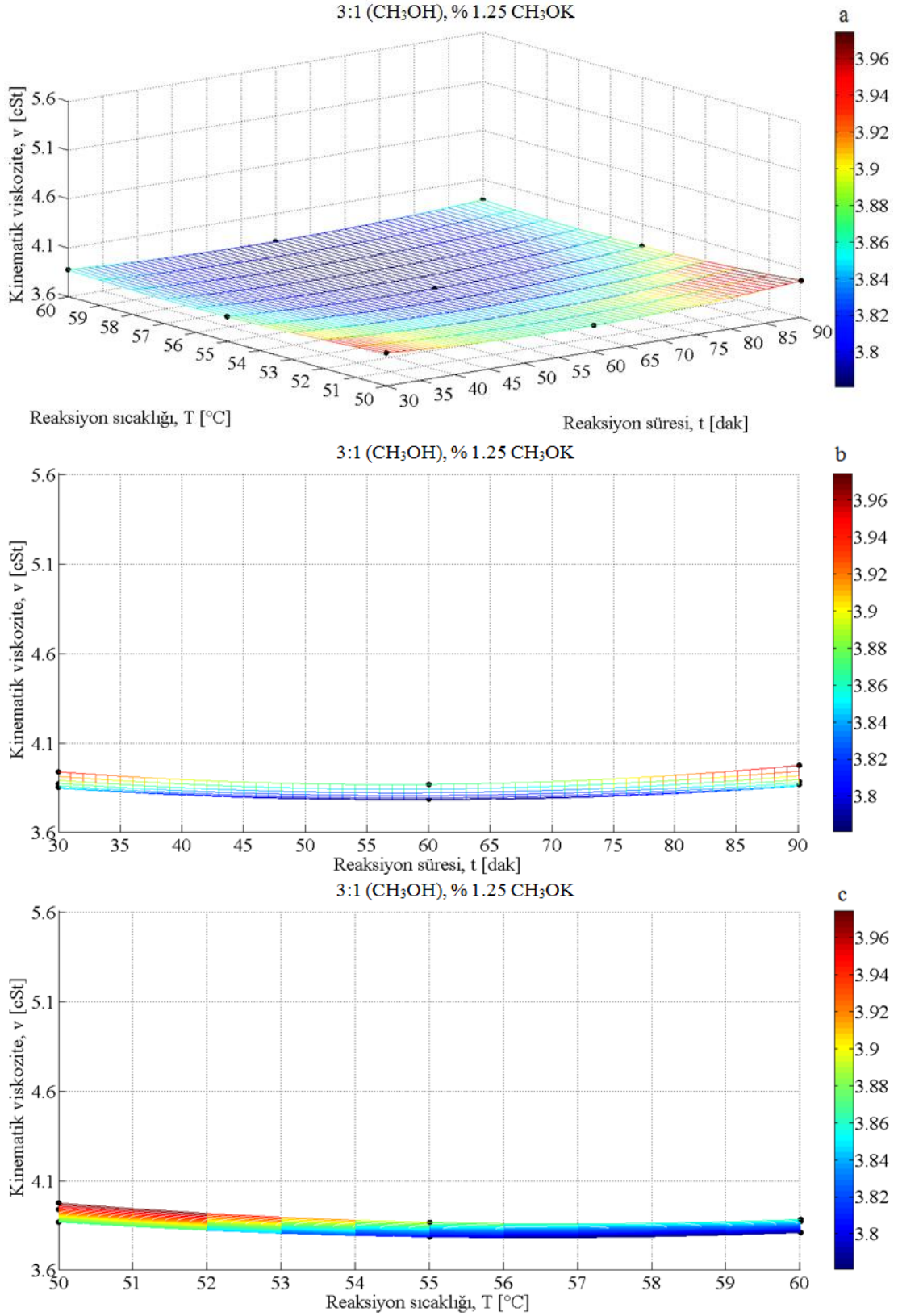
Şekil 4.49. 3:1 mol oranında CH₃OH ve % 1,00 oranında CH₃OK kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



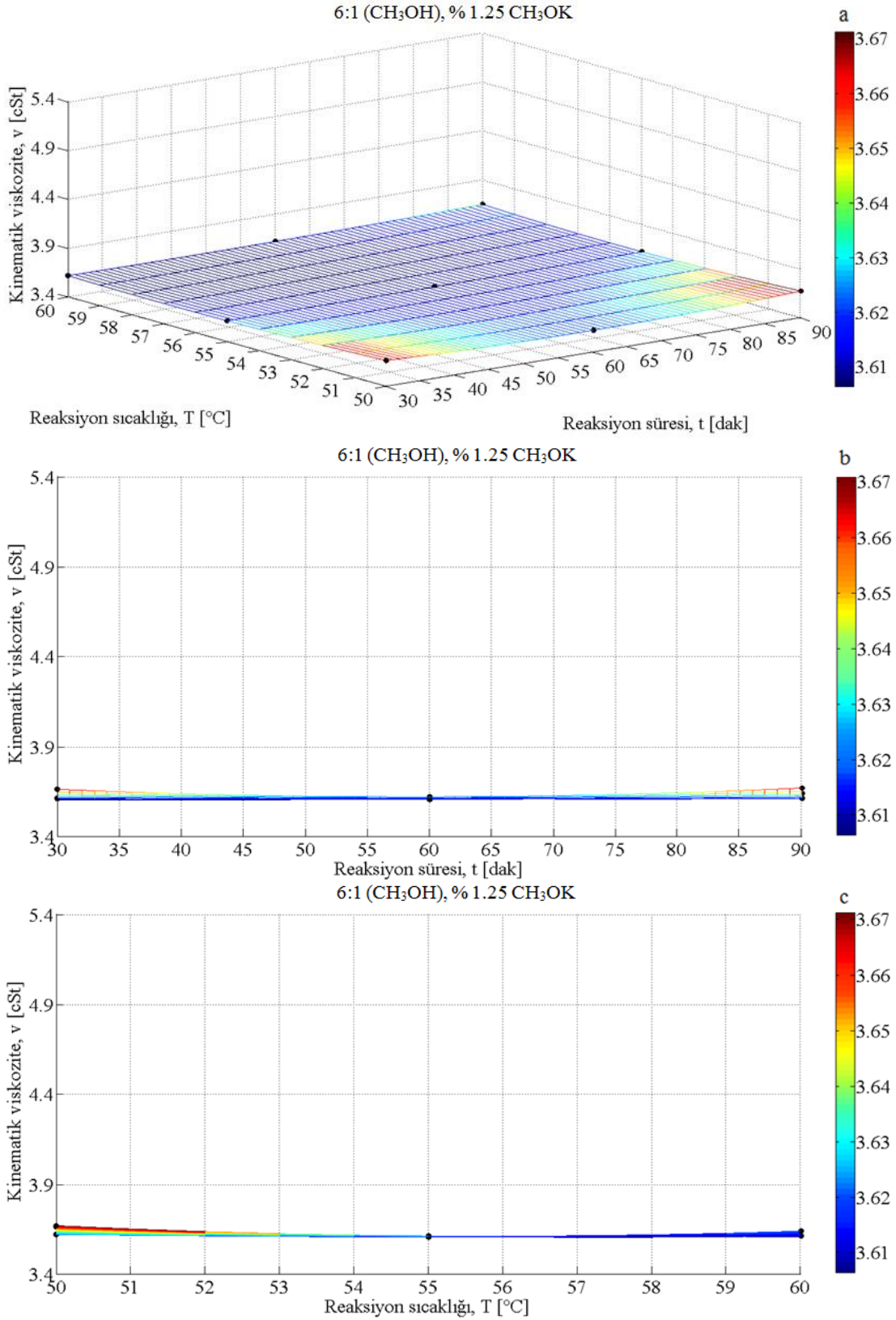
Şekil 4.50. 6:1 mol oranında CH₃OH ve % 1,00 oranında CH₃OK kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



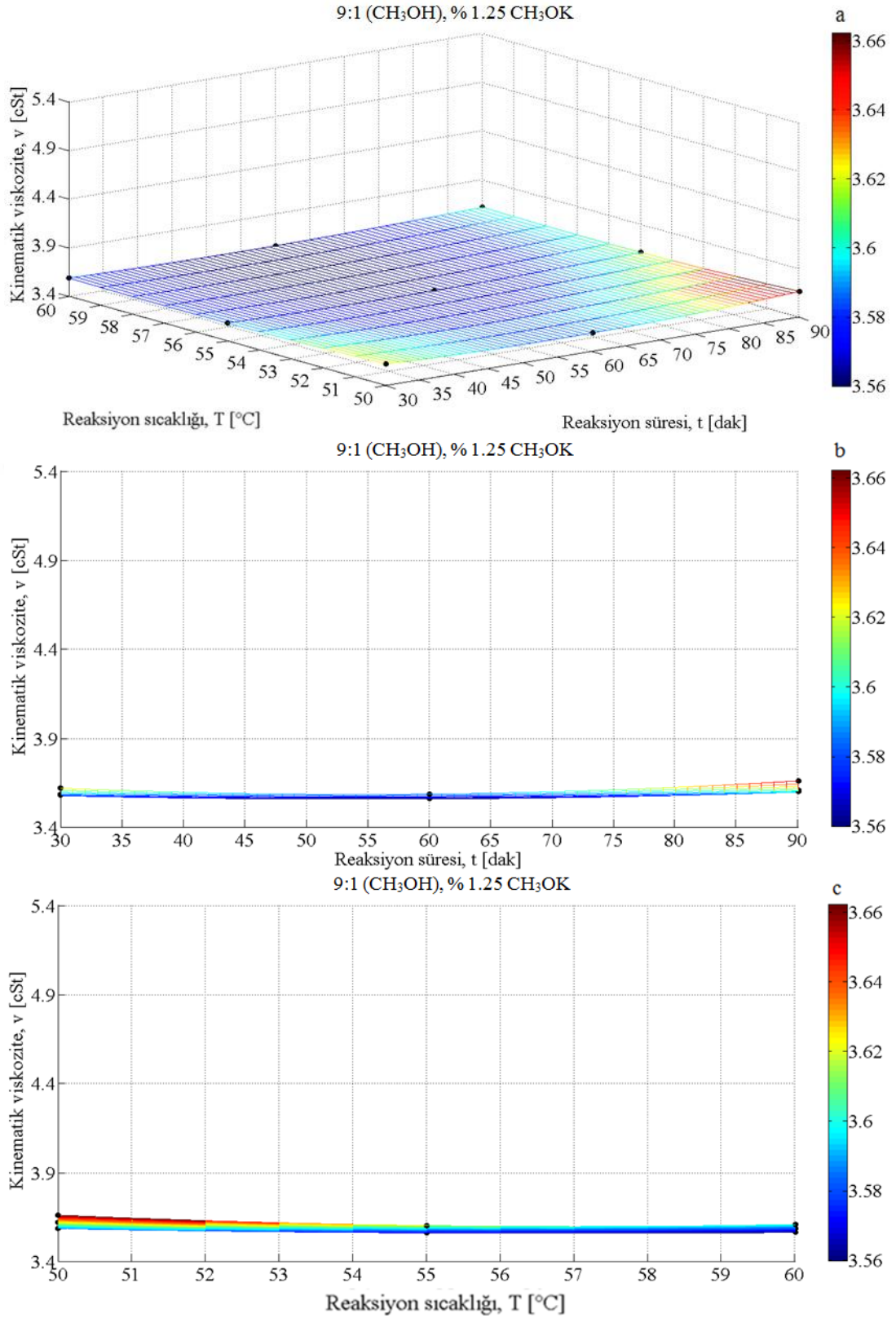
Şekil 4.51. 9:1 mol oranında CH₃OH ve % 1,00 oranında CH₃OK kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



Şekil 4.52. 3:1 mol oranında CH₃OH ve % 1,25 oranında CH₃OK kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



Şekil 4.53. 6:1 mol oranında CH₃OH ve % 1,25 oranında CH₃OK kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri



Şekil 4.54. 9:1 mol oranında CH₃OH ve % 1,25 oranında CH₃OK kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin kinematik viskozitesinin a) reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığına, b) reaksiyon süresine ve c) reaksiyon sıcaklığına göre değişimleri

Şekil 4.46–4.54 incelendiğinde, farklı mol oranlarında elde edilen, viskozitenin reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığıyla değişimi karakteristiklerinin benzer olduğu görülebilir. 30 dakika gibi kısa reaksiyon sürelerinde ve 50 °C gibi düşük reaksiyon sıcaklıklarında, yeterli biyodizel dönüşümü sağlanamadığından, üretilen biyodizellerin viskoziteleri yüksek değerlere sahip iken, reaksiyon süresinin 52–59 dakika aralığına, reaksiyon sıcaklığının ise 55–57 °C aralığına kadar artırılması durumunda düşük viskoziteli biyodizellerin üretildiği görülmüştür. Reaksiyon süresi ve sıcaklığının daha fazla artırılmasıyla viskozitelerin artarak en yüksek değerlerini aldığı belirlenmiştir (Şekil 4.46–4.54 a, b). Her üç katalizör oranı ve mol oranı için de, reaksiyon süresiyle viskozitenin değişimi nispeten dar bir aralıkta gerçekleşmiştir (Şekil 4.46–4.54 b). Ayrıca, genel olarak, kısa reaksiyon sürelerinde değişim aralığı görece genişken, artan reaksiyon süresiyle birlikte değişim aralığı önce daralmış, daha sonra nispeten genişleme eğilimine girmiştir (Şekil 4.46–4.54 b). İstisna olarak, 3:1 mol oranı ve % 1,25 katalizör oranı kullanımında, değişim aralığı, artan reaksiyon süresiyle birlikte yaklaşık sabit kalmıştır (Şekil 4.52 b). 3:1 mol oranı için % 0,75 ve 1,25 katalizör oranlarında, viskozitenin reaksiyon süresiyle yaklaşık parabolik olarak değiştiği belirlenmiştir (Şekil 4.46 ve 4.52 b). Fakat 3:1 mol oranı ve % 0,75 katalizör oranı kullanımında, düşük sıcaklık bölgesindeki parabolik değişim, sıcaklığın artışıyla yaklaşık doğrusal karaktere dönüşmüştür (Şekil 4.46 b). 6:1 ve 9:1 mol oranlarında her üç katalizör oranı için de, reaksiyon sıcaklığıyla viskozitenin değişimi, genel olarak nispeten dar bir aralıkta gerçekleşmiştir (Şekil 4.47, 4.48, 4.50, 4.51, 4.53 ve 4.54 c). 3:1 mol oranında ise, viskozitenin değişim aralığı reaksiyon sıcaklığının artışıyla % 0,75 ve 1,00 katalizör oranlarında önce daralmış daha sonra genişleme eğilimine girmiş (Şekil 4.46 ve 4.49 c) fakat % 1,25 katalizör oranında yaklaşık aynı kalmıştır (Şekil 4.52 c).

CH_3OH ve % 0,75, 1,00 ve 1,25 oranlarında CH_3OK kullanılarak, farklı reaksiyon sıcaklıklarında (50, 55 ve 60 °C), reaksiyon sürelerinde (30, 60 ve 90 dak.) ve alkol/yağ mol oranlarında (3:1, 6:1 ve 9:1) deneysel olarak üretilen atık kızartma yağı biyodizellerinin kinematik viskozite değerlerini kullanarak, 3:1, 6:1 ve 9:1 mol oranlarında üretilebilecek biyodizellerin viskozite değerleri ve ilgili reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığı değerleri Matlab programındaki interpolasyon yöntemi yardımıyla tahmin edilmiştir. Söz konusu değerler Tablo 4.8’de verilmiştir.

Tablo 4.8. % 0,75, % 1,00 ve % 1,25 oranlarında CH₃OK kullanılarak farklı metil alkol/yağ mol oranlarında üretilebilecek biyodizellerin tahmini viskozite değerleri ve ilgili reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığı parametreleri

Katalizör (CH ₃ OK) oranı	Alkol/yağ mol oranı		
	3:1	6:1	9:1
% 0,75	55 dak. reaksiyon süresi ve 57 °C reaksiyon sıcaklığında 3,7699 cSt	55 dak. reaksiyon süresi ve 57 °C reaksiyon sıcaklığında 3,5959 cSt	52 dak. reaksiyon süresi ve 55 °C reaksiyon sıcaklığında 3,5628 cSt
% 1,00	59 dak. reaksiyon süresi ve 57 °C reaksiyon sıcaklığında 3,7374 cSt	54 dak. reaksiyon süresi ve 56 °C reaksiyon sıcaklığında 3,5781 cSt	53 dak. reaksiyon süresi ve 55 °C reaksiyon sıcaklığında 3,5544 cSt
% 1,25	58 dak. reaksiyon süresi ve 56 °C reaksiyon sıcaklığında 3,7811 cSt	57 dak. reaksiyon süresi ve 57 °C reaksiyon sıcaklığında 3,6063 cSt	54 dak. reaksiyon süresi ve 57 °C reaksiyon sıcaklığında 3,5599 cSt

Tablo 4.8 incelendiğinde, katalizör oranından bağımsız olarak 9:1 mol oranında düşük viskoziteli biyodizellerin üretilebileceği, katalizör oranı ve alkol/yağ mol oranıyla değişmekle birlikte 55–57 °C sıcaklığı aralığında viskozitelerin düşük değerleri alabileceği, her üç mol oranı için de % 1,00 katalizör oranında minimum viskoziteli biyodizellerin üretilebileceği, % 1,00 ve 1,25 katalizör oranlarında mol oranı arttığında düşük viskozitenin elde edilebileceği süresinin kısaldığı, mol oranı ve katalizör oranıyla değişmekle birlikte 52–59 dak. aralığında düşük viskozitelerin elde edilebileceği belirlenmiştir. Deneysel olarak, % 1,00 katalizör oranında CH₃OK ve 9:1 mol oranında CH₃OH kullanılarak, 55 °C reaksiyon sıcaklığında ve 60 dakika reaksiyon süresinde düşük viskoziteli biyodizel üretilmiş olsa da, Tablo 4.8, yine aynı mol oranı, reaksiyon sıcaklığı ve katalizör oranında reaksiyon süresi 53 dakikaya düşürüldüğünde daha da düşük viskoziteli biyodizelin üretilebileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, Tablo 4.1–4.8’de verilen bütün değerler kıyaslandığında, 8:1 alkol (CH₃OH)/yağ mol oranının, % 1,00 katalizör (CH₃OK) oranının, 55 °C reaksiyon sıcaklığının ve 53 dakika reaksiyon süresinin optimum parametreler olabileceği belirlenmiştir. Bu şartlarda üretilen biyodizelin viskozitesi 3,5470 cSt (3,545 cSt) olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, Tablo 4.9’da, optimum biyodizelin (B100) fiziksel ve kimyasal özellikleri, EN 14214 standartıyla karşılaştırılarak verilmiştir. Söz konusu tablodan görüldüğü gibi, üretilen biyodizelin tüm özellikleri EN14214 standardına uygundur.

Tablo 4.9. Optimum biyodizelin yakıt özellikleri ve EN 14214 standart değerleri

Özellikler	B100	Belirsizlik	EN 14214		
			En az	En çok	
Hacimsel % 10 kaynama noktası sıcaklığı, [°C]	346,5	±1,0	-	-	
Hacimsel % 50 kaynama noktası sıcaklığı, [°C]	350,5	±1,0	-	-	
Hacimsel % 90 kaynama noktası sıcaklığı, [°C]	353	±1,0	-	360	
Setan indeksi	55,9	-	51	-	
Üst ısıl değer, [kJ/kg]	39,790	±0,12	35,000	-	
Parlama noktası sıcaklığı, [°C]	180	±1,0	101	-	
Soğukta filtre tıkanma noktası, [°C]	-11	±1,0	-	+5 (Yaz) -5 (Kış)	
Akma noktası sıcaklığı, [°C]	-6	±1,0	-	0	
Toplam kirlilik, [mg/kg]	17,8	±1,5	-	24	
Karbon kalıntısı, [% g/g]	0,22	-	-	0,30	
110°C'de oksidasyon kararlılığı, [s]	9	-	6	-	
Gliserit, [% g/g]	Mono	0,38	±0,03	-	0,70 (Yaz) 0,40 (kış)
	Di	0,12	-	-	0,20
	Tri	0,09	±0,01	-	0,20
Asit sayısı, [mg KOH/g]	0,41	±0,06	-	0,50	
Çoklu doymamış metil ester içeriği [% g/g]	0,20	±0,03	-	1,00	
Bakır şerit korozyonu, Derece	1A	-	Sınıf 1		
Metanol içeriği, [% g/g]	0,03	-	-	0,20	
Su içeriği, [mg/kg]	401,4	±25,9	-	500	
Sülfatlanmış kül içeriği, [% g/g]	0,007	-	-	0,02	
Kükürt içeriği, [mg/kg]	<3	-	-	10,0	
İyot sayısı, [g I ₂ /100 g]	101,2	±2,0	-	120	

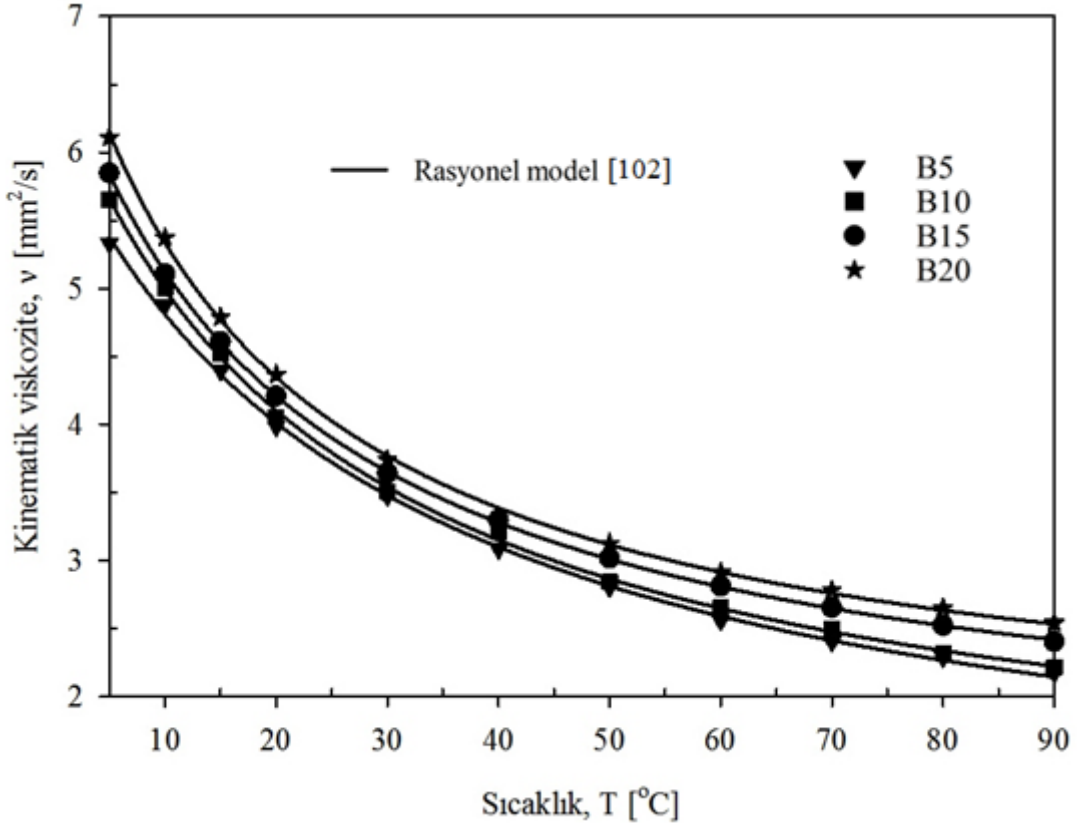
4.1.4. Üretilen Biyodizeli İçeren Biyodizel-Dizel Yakıtı Karışımlarının Viskozitelerinin Sıcaklıkla Değişimi

Şekil 4.55'te, yukarıda belirlenen optimum şartlarda (8:1 mol oranında CH₃OH ve % 1,00 oranında CH₃OK kullanılarak, 55 °C reaksiyon sıcaklığında ve 53 dakika reaksiyon süresinde) üretilen atık kızartma yağı biyodizelini (BD) hacimsel olarak % 5 (B5), 10 (B10), 15 (B15) ve 20 (B20) oranlarında içeren biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60 70, 80 ve 90 °C'deki kinematik viskozite değerleri verilmiştir. Viskozite değerlerinin sıcaklıkla değişimi dikkate alınarak, en küçük kareler yöntemi

(hatalar karelerinin toplamını minimize etmek) yardımıyla, deneysel verilere, Gülüm ve Bilgin tarafından 2018’de önerilen rasyonel (oransal) model [102] ile eğri uyumlama işlemi gerçekleştirilmiştir:

$$v = (a + T)/(b + c \cdot T) \quad (4.1)$$

Burada, v , T , a , b ve c sırasıyla yakıtın kinematik viskozitesini (cSt), yakıt sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$) ve regresyon katsayılarını temsil etmektedir. Bu model yardımıyla, yakıt sıcaklığının yakıt demeti özelliklerine olan etkisinin incelenmesi kapsamında anlatılacağı üzere, ticari saf dizel yakıtının $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’deki kinematik viskozitesine eşit viskozite değerini veren sıcaklık değerleri söz konusu biyodizel-dizel yakıtı karışımları (B5, B10, B15 ve B20) için belirlenmiştir. Diğer bir anlatımla, belirlenecek bu sıcaklık değerlerinde biyodizel-dizel yakıtı karışımlarıyla, saf dizel yakıtının $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’deki kinematik viskozite değeri eşittir. Tablo 4.10–4.12’de, B5, B10, B15 ve B20’nin farklı sıcaklıklarda ölçülen kinematik viskozite değerleri, uyumlanan rasyonel modelin (4.1) regresyon ve korelasyon katsayıları, ve ölçülen viskozite değeri ile rasyonel model kullanılarak hesaplanan (tahmin edilen) viskozite değeri arasındaki hata oranları verilmiştir. En büyük hata oranının % 2,3392 ve en küçük korelasyon katsayısının 0,9995 olarak hesaplanması, uyumlanan modelin (4.1), viskozitenin sıcaklıkla değişimini hem niteliksel hem de niceliksel olarak çok iyi derecede tahmin ettiğini göstermektedir.



Şekil 4.55. Belirlenen reaksiyon şartlarına göre üretilen atık kızartma yağı biyodizelini içeren biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kinematik viskozitelerinin sıcaklıkla değişimleri

Tablo 4.10. Biyodizel-dizel karışımlarının viskozite değerleri

Sıcaklık T [°C]	Ölçülen kinematik viskozite değeri, v [mm ² /s]			
	Hacimsel biyodizel oranı, X [%]			
	5	10	15	20
5	5,331	5,654	5,849	6,110
10	4,878	5,005	5,106	5,375
15	4,395	4,522	4,610	4,791
20	3,985	4,053	4,208	4,367
30	3,473	3,508	3,640	3,741
40	3,084	3,215	3,297	3,309
50	2,804	2,846	3,016	3,124
60	2,557	2,653	2,812	2,914
70	2,404	2,496	2,653	2,782
80	2,287	2,319	2,521	2,651
90	2,174	2,218	2,403	2,541

Tablo 4.11. Rasyonel model ile ilgili regresyon ve korelasyon katsayıları

Karışımındaki hacimsel biyodizel oranı, X [%]	Regresyon katsayıları			Korelasyon katsayıları R
	a	b	c	
5	228,40	37,220	1,235	0,9995
10	158,50	24,01	0,9749	0,9996
15	107,20	15,55	0,7336	0,9999
20	89,11	12,07	0,6514	0,9996

Tablo 4.12. Rasyonel modelden hesaplanan ve ölçülen viskozite değerleri arasındaki gerçek hata oranı

Gerçek hata oranı [%]									
Sıcaklık, T [°C]									
5	10	15	20	30	40	50	60	70	80
0,8910	1,4071	0,6528	0,6682	0,1784	0,4731	0,3200	1,3191	0,3691	0,8608
0,1145	0,2745	0,6873	1,2261	0,8963	2,0064	0,6951	0,1750	0,7659	0,8275
0,1833	0,2945	0,1748	0,0203	0,3576	0,5510	0,2067	0,1789	0,1640	0,0246
0,4934	0,7799	0,5067	0,4498	0,7183	2,3392	0,2476	0,0317	0,8243	0,6092

4.1.5. Üretilen Biyodizelin Maliyet Analizi

Bu kısımda, optimum parametreler kullanılarak üretilmiş olan atık kızartma yağı biyodizelinin basit bir maliyet analizi yapılmıştır. En uygun parametrelerin, % 1 oranında CH₃OK, 55 °C reaksiyon sıcaklığı, 53 dakika reaksiyon süresi ve 8:1 CH₃OH/yağ mol oranı olduğu belirlenmiştir. Transesterifikasyon reaksiyonunda kullanılan atık kızartma yağının herhangi bir maliyeti yoktur. CH₃OH kütle bazında kullanıldığı için maliyet analizinde, 0,7918 g/cm³ olan 20 °C'deki yoğunluğu göz önüne alınmıştır. Tablo 4.13'te, biyodizel üretiminde kullanılan reaktanların miktarları ve fiyatları verilmektedir [191].

Tablo 4.13. Biyodizel üretiminde kullanılan malzemelerin miktarı ve fiyatları

Reaktanlar	Birim fiyatı	Kullanılan miktar	Tutar (TL)
CH ₃ OH	50 TL/2,5 Litre	88 gram	$(88/791,80) \cdot 20 = 2,223$ TL
CH ₃ OK	100 TL/1 kg	3 gram	$(3 \cdot 10^{-3} \cdot 100) = 0,3$ TL
			Toplam: 2,523 TL

Biyodizel üretimi aşamasında, yağın ısıtılması ve reaksiyonun gerçekleşmesi için 0,43 kW'lık manyetik karıştırıcılı ısıtıcı, yaklaşık 1 saat kullanılmıştır. Bu süre içerisindeki elektrik tüketiminin tutarı Tablo 4.14'te verilmiştir. Elektriğin birim fiyatı, 01.07.2020 tarihinden itibaren 2020 yılının üçüncü çeyreği için mesken tipi abone kabul edilerek uygulanan ortalama elektrik fiyatı dikkate alınmıştır [192].

Tablo 4.14. Manyetik karıştırıcılı ısıtıcının harcadığı elektrik miktarı ve tutarı

Alet	Güç [kW]	Çalıştığı süre [saat]	Harcanan enerji [kWh]	Elektriğin birim fiyatı [kr/kWh]	Tutar [TL]
Manyetik karıştırıcılı ısıtıcı	0,43	1	0,43	36,5564	0,1572

Manyetik karıştırıcılı ısıtıcının harcadığı elektrik tutarı da eklenirse, toplamda atık kızartma yağı biyodizelinin üretiminde $(2,523 + 0,1572)$ 2,6802 TL'nin harcadığı belirlenmiştir. Başka bir ifade ile söz konusu giderler hesaba katıldığında, 1 kg biyodizelin maliyeti 9,0701 TL olarak belirlenmiştir. Bu maliyetin üzerine personel gideri, işletme gideri, bakım masrafları, yasal vergiler, vb. masraflar da eklendiğinde, maliyet daha fazla artacaktır. Atık kızartma yağı biyodizelinin litre fiyatı, 20 °C'deki yoğunluğu referans alınarak 8,0933 TL olarak hesaplanmıştır. Tablo 4.15'te, üretilen biyodizelin ve ticari saf dizel yakıtının litre fiyatları verilmiştir [193]. Görüldüğü gibi, üretimi yapılan biyodizel, dizel yakıtına göre daha pahalıdır. Ancak, üretimde kullanılan kimyasalların, özellikle alkolün, küçük ölçekli alımlarının yapılması ve laboratuvar şartlarında üretimin gerçekleştirilmesi nedeniyle maliyetler yüksek çıkmıştır. Büyük ölçekli seri üretimde maliyetlerin azalacağı açıktır. Ülkemizin tarımsal potansiyeli dikkate alındığında (özellikle metil alkol üretiminde), dünyada petrol fiyatlarının sürekli artış göstermesi ve petrolün çok da uzak olmayan bir gelecekte tükenecek olması nedeniyle, atık kızartma yağı biyodizelinin dizel motorlar için dizel yakıtına alternatif olması kaçınılmazdır. Ayrıca, atık kızartma yağının, biyodizel üretimi için toplanmasıyla çevre kirliliğinin önüne de geçilmiş olacaktır.

Tablo 4.15. Üretilen biyodizelin ve ticari dizel yakıtının litre fiyatları

Yakıt	Litre fiyatı [TL/Litre]
Dizel yakıtı	6,26
Atık kızartma yağı biyodizeli	8,0933

4.2. Üretilen Biyodizelin ve Biyodizel-Dizel Yakıtı Karışımlarının Yakıt Demeti Özelliklerinin İncelenmesi

Tezin bu kısmında, kısaca, farklı yakıtların yakıt demeti özellikleri Fluent paket programı yardımıyla sayısal olarak (hesaplama akışkanlar dinamiği yaklaşımı kullanılarak) incelenmiştir. Sayısal sonuçların doğruluğunu göstermek adına, öncelikle Wang ve arkadaşları tarafından 2010'da gerçekleştirilen bir deneysel çalışmanın [126] koşulları için sayısal sonuçlar elde edilmiş ve sayısal sonuçlar ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sayısal sonuçlar doğrulandıktan sonra, ticari saf dizel yakıtının, bir öndeki bölümde anlatıldığı gibi bu tez çalışması kapsamında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin (8:1 alkol/yağ mol oranında CH_3OH ve % 1 oranında CH_3OK kullanılarak, 55 °C reaksiyon sıcaklığında ve 53 dakika reaksiyon süresinde üretilen) ve bu biyodizeli hacimsel olarak % 5 (B5), 10 (B10), 15 (B15) ve 20 (B20) oranlarında içeren biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının, yakıt demeti özellikleri (nüfuz derinliği, Sauter ortalama damlacık çapı, sprej koni açısı ve sprej hacmi), farklı

- püskürtme basınçlarında (100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa)
- karşı-hava yoğunluklarında (15 kg/m^3 ve 30 kg/m^3)
- enjektör delik çaplarında (0,08 mm, 0,16 mm, 0,32 mm ve 0,64 mm) ve
- yakıt sıcaklıklarında (295,15 K, 309,15 K, 311,15 K, 315,15 K, 319,15 K, 329,15 K vb.)

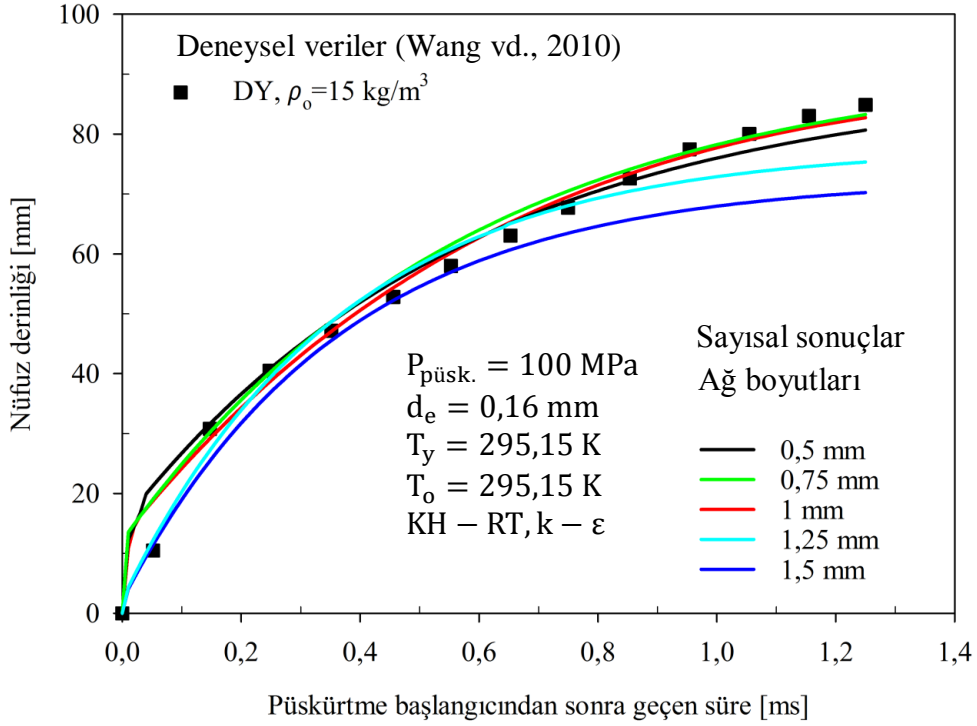
sayısal olarak incelenmiştir.

4.2.1. Akışkanlar Mekaniği Yaklaşımıyla Yakıt Demeti Özelliklerinin Sayısal Olarak İncelenmesi

Bu aşamada, Wang ve arkadaşları tarafından 2010'da gerçekleştirilen bir deneysel çalışmadaki [126] yakıt demeti karakteristikleri değerlerine ve değişim eğilimlerine en yakın sonuçları verecek şekilde, sayısal çalışmanın sırasıyla en uygun ağ boyutu (0,5 mm, 0,75 mm, 1 mm, 1,25 mm ve 1,5 mm), türbülans modeli (standart $k - \omega$, Reynolds

gerilme (stress) ve standart $k - \epsilon$ ve parçalanma modeli (KH-RT ve Wave) belirlenmiştir. Sayısal sonuçların doğruluğunu kontrol etmek adına referans alınan deneysel çalışmada [126], 100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa püskürtme basıncı, 15 kg/m^3 ve 30 kg/m^3 karşı-ortam yoğunluğu, 0,16 mm enjektör delik çapı, 295,15 K karşı-ortam sıcaklığı için, saf dizel yakıtının ve atık kızartma yağı biyodizelinin yakıt demeti özellikleri (nüfuz derinliği, sprej açısı ve sprej hacmi) incelenmiştir. Enjektör boy/çap oranının 7,5 olduğu belirtilmiştir [126].

Şekil 4.56'da, 100 MPa püskürtme basıncı, 0,16 mm enjektör delik çapı (d_e), 295,15 K yakıt (T_y) ve karşı-ortam sıcaklığı (T_o) ile 15 kg/m^3 karşı-ortam yoğunluğunda (ρ_o), saf dizel yakıtı için, Wang ve arkadaşları tarafından 2010'da gerçekleştirilen çalışmada [126] deneysel olarak elde edilen nüfuz derinliğinin püskürtme başlangıcından sonra geçen süreyle değişimi değerleri, KH-RT parçalanma modeli, standart $k - \epsilon$ türbülans modeli ve farklı ağ boyutları (0,5 mm, 0,75 mm, 1 mm, 1,25 mm ve 1,5 mm) kullanılarak Fluent paket programı yardımıyla elde edilen sayısal değerler ile karşılaştırılmıştır. Söz konusu şekil incelendiğinde, ağ boyutu 0,5 mm'den 1 mm'ye doğru artırıldıkça, elde edilen sayısal değerlerin deneysel sonuçları daha iyi temsil ettiği, fakat ağ boyutu daha fazla artırıldığında (yani 1,25 mm den 1,5 mm ye), sayısal değerlerin deneysel sonuçlardan uzaklaştığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, çalışmanın geri kalan kısımlarında, ağ boyutu 1 mm olarak alınmıştır.

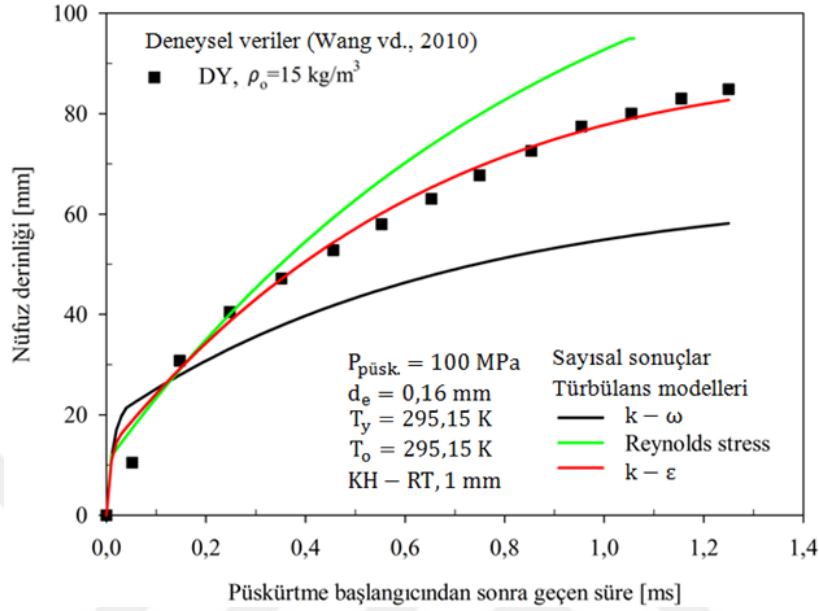


Şekil 4.56. Farklı ağ boyutları kullanılarak elde edilen sayısal nüfuz derinliği değerlerinin deneysel veriler ile karşılaştırılması

Şekil 4.57'de, deneysel çalışmadaki [126] parametreler ($P_{\text{püsk.}}$, d_e , T_y ve T_o) aynı tutularak, saf dizel yakıtı için belirlenen nüfuz derinliğinin püskürtme başlangıcından sonra geçen süreyle değişimi, KH-RT parçalanma modeli, 1 mm ağ boyutu ve farklı türbülans modelleri (standart k – ϵ , standart k – ω ve Reynolds gerilmeleri) kullanılarak Fluent paket programı yardımıyla elde edilen sayısal değerler ile karşılaştırılmıştır. Söz konusu şekil incelendiğinde, standart k – ϵ türbülans modeli kullanılarak elde edilen sayısal sonuçların, deneysel nüfuz derinliği değerlerini ve değişimi eğilimini daha iyi temsil ettiği görülebilir.

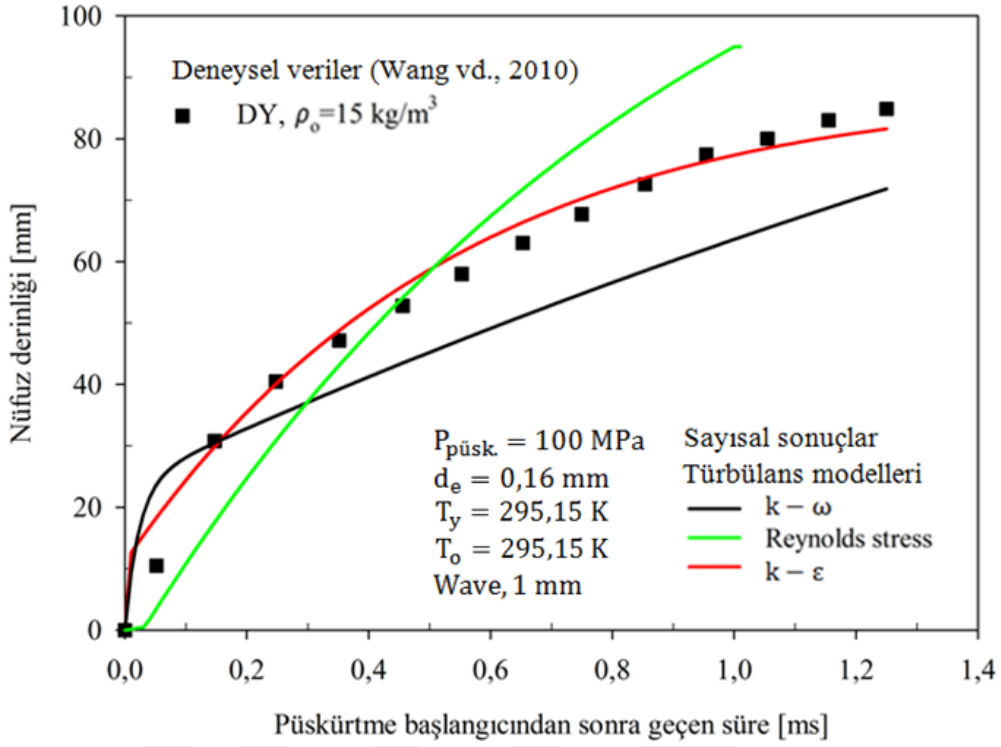
Şekil 4.58'de, deneysel çalışmadaki [126] parametreler aynı tutularak, saf dizel yakıtı için belirlenen nüfuz derinliğinin püskürtme başlangıcından sonra geçen süreyle değişimi, 1 mm ağ boyutu, Wave parçalanma modeli ve farklı türbülans modelleri (standart k – ϵ , standart k – ω ve Reynolds gerilmeleri) kullanılarak Fluent paket programı yardımıyla elde edilen sayısal değerler ile karşılaştırılmıştır. Wave parçalanma modeli kullanımında da, standart k – ϵ türbülans modeli yardımıyla elde edilen sayısal sonuçların, deneysel sonuçların değerlerini ve değişim eğilimini, diğer türbülans modellerine göre daha iyi

temsil ettiği belirlenmiştir. Bu yüzden, çalışmanın bundan sonraki kısımlarında, türbülans modeli olarak standart $k - \varepsilon$ kullanılmıştır.



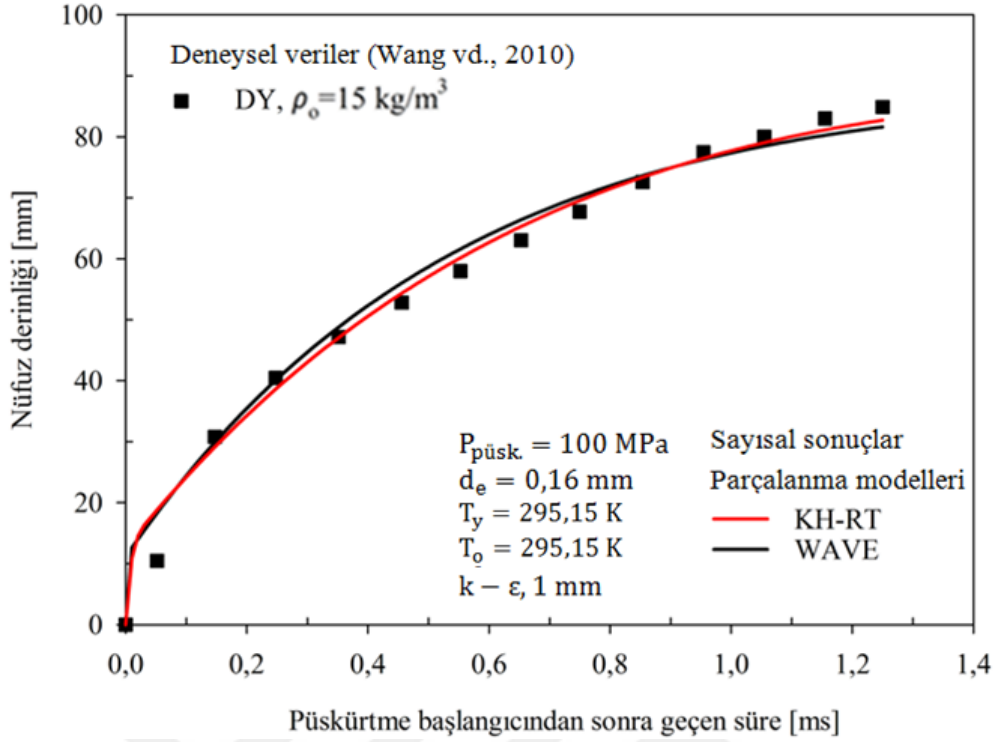
Şekil 4.57. Farklı türbülans modelleri ve KH-RT parçalanma modeli kullanılarak elde edilen sayısal nüfuz derinliği değerlerinin deneysel veriler ile karşılaştırılması

Şekil 4.59'da, deneysel çalışmadaki [126] parametreler aynı tutularak, saf dizel yakıtı için belirlenen nüfuz derinliğinin püskürtme başlangıcından sonra geçen süreyle değişimi, 1 mm ağ boyutu, standart $k - \varepsilon$ türbülans modeli ve farklı parçalanma modelleri kullanılarak, Fluent paket programı yardımıyla elde edilen sayısal değerler ile karşılaştırılmıştır. Genel olarak, her iki parçalanma modeli de, deneysel verilerin değerlerini ve değişim karakteristiğini iyi temsil etseler de, KH-RT modelinin yaklaşık 0,4 ms'den sonra deneysel değerlere daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Sonuç olarak, Şekil 4.56–4.59'a göre, Wang ve arkadaşları tarafından 2010'da gerçekleştirilen deneysel çalışmadaki [126], saf dizel yakıtının ve atık kızartma yağı biyodizelinin yakıt demeti karakteristiklerinin değerlerine ve değişim eğilimlerine, en yakın sonuçları, sayısal çalışmada, 1 mm ağ boyutu, standart $k - \varepsilon$ türbülans modeli ve KH-RT parçalanma modeli kullanıldığında elde edilmiştir. Bu yüzden, sayısal çalışmanın geri kalan kısmında, söz konusu parametreleri kullanılmıştır.



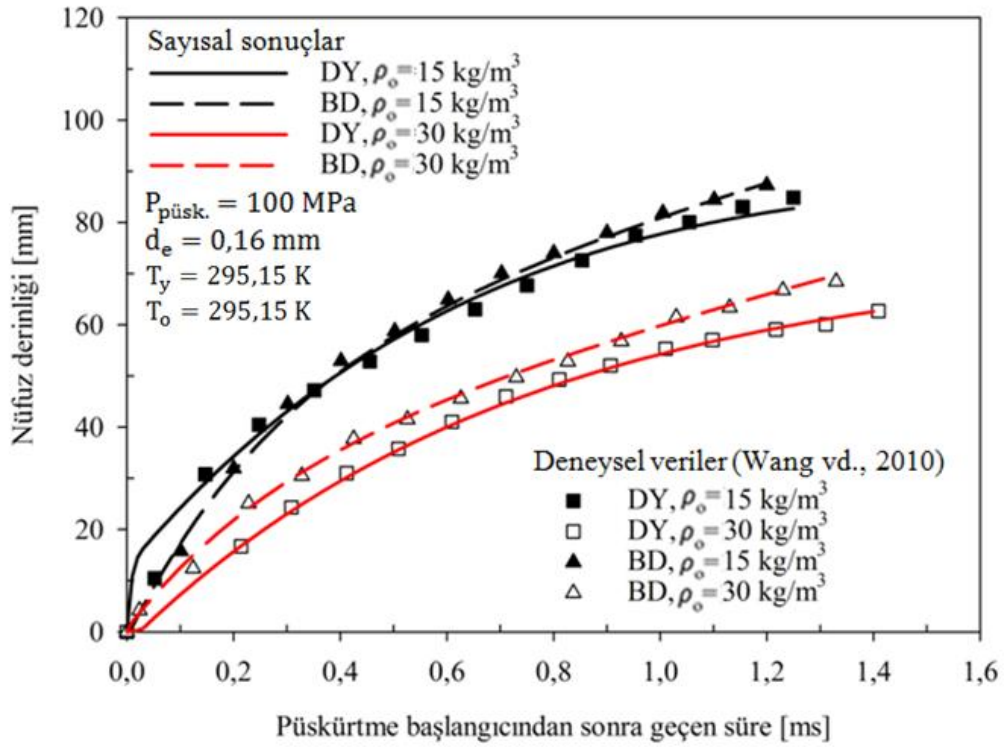
Şekil 4.58. Farklı türbülans modelleri ve Wave parçalanma modeli kullanılarak elde edilen sayısal nüfuz derinliği değerlerinin deneysel veriler ile karşılaştırılması

Şekil 4.60–4.62’de, deneysel çalışmadaki [126] parametreler (d_e , T_y ve T_o) aynı tutularak, farklı püskürtme basınçları (100 MPa (Şekil 4.60), 200 MPa (Şekil 4.61) ve 300 (Şekil 4.62) MPa) ve karşı-ortam yoğunluklarında (15 kg/m^3 ve 30 kg/m^3), saf dizel yakıtı ile atık kızartma biyodizeli için elde edilen deneysel nüfuz derinliği değerlerinin püskürtme başlangıcından sonra geçen süreyle değişimleri, yukarıda belirlenen parametreler (ağ boyutu, türbülans modeli ve parçalanma modeli) kullanılarak Fluent paket programı yardımıyla elde edilen sayısal değerler ile karşılaştırılmıştır. Şekiller incelendiğinde, her iki yakıt için de, farklı püskürtme basınçları ve karşı-ortam yoğunluklarında elde edilen sayısal sonuçların, deneysel sonuçları hem karakteristik hem de değer olarak iyi temsil ettiği görülmüştür.



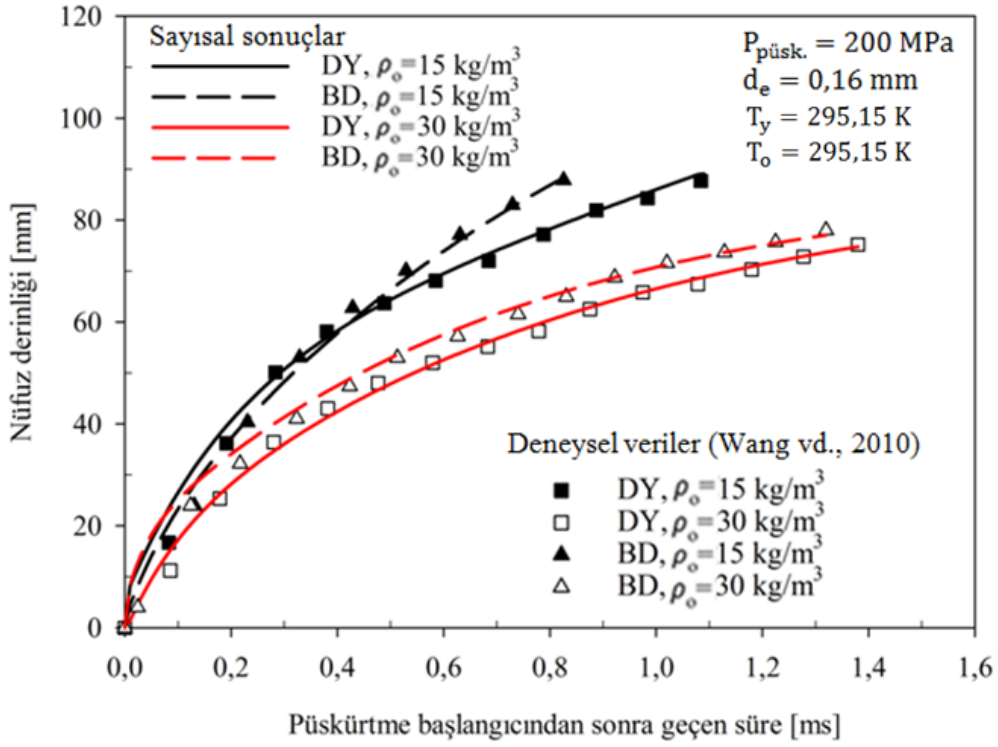
Şekil 4.59. Farklı parçalanma modelleri ve standart $k - \varepsilon$ türbülans modeli kullanılarak elde edilen sayısal nüfuz derinliği değerlerinin deneysel veriler ile karşılaştırılması

Şekil 4.63 ve 4.64'te, deneysel çalışmadaki [126] parametreler (d_e , T_y ve T_o) aynı tutularak, farklı püskürtme basınçları (100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa) ve karşı-ortam yoğunluklarında (15 kg/m^3 ve 30 kg/m^3), saf dizel yakıtı (Şekil 4.63) ile atık kızartma yağı biyodizeli (Şekil 4.64) için, yukarıda belirlenen en uygun parametreler (ağ boyutu, türbülans modeli ve parçalanma modeli) kullanılarak Fluent paket programı yardımıyla elde edilen Sauter ortalama damlacık çapı değerlerinin değişimleri, ampirik modeller ile karşılaştırılmıştır. Tüm tez boyunca, Sauter ortalama damlacık çapının hesabında kullanılan ampirik modeller (Ejim ve arkadaşları [185], ile Hiroyasu ve Arai [169] tarafından önerilen) sırasıyla (3.112) ve (3.113) numaralı denklemlerde verilmiştir. Deneysel çalışmada [126], Sauter ortalama çap değerleri belirlenmediğinden, tez çalışmasındaki sayısal değerler, sadece ampirik modellerle karşılaştırılabilmektedir. Her iki yakıt türü ve karşı-ortam yoğunluğu için de, sayısal Sauter ortalama çap değerlerinin püskürtme basıncıyla değişimi değerleri, literatürde sıklıkla kullanılan Ejim ve arkadaşları [185] tarafından önerilen modelden elde edilen sonuçlara yakın olduğu görülmüştür.



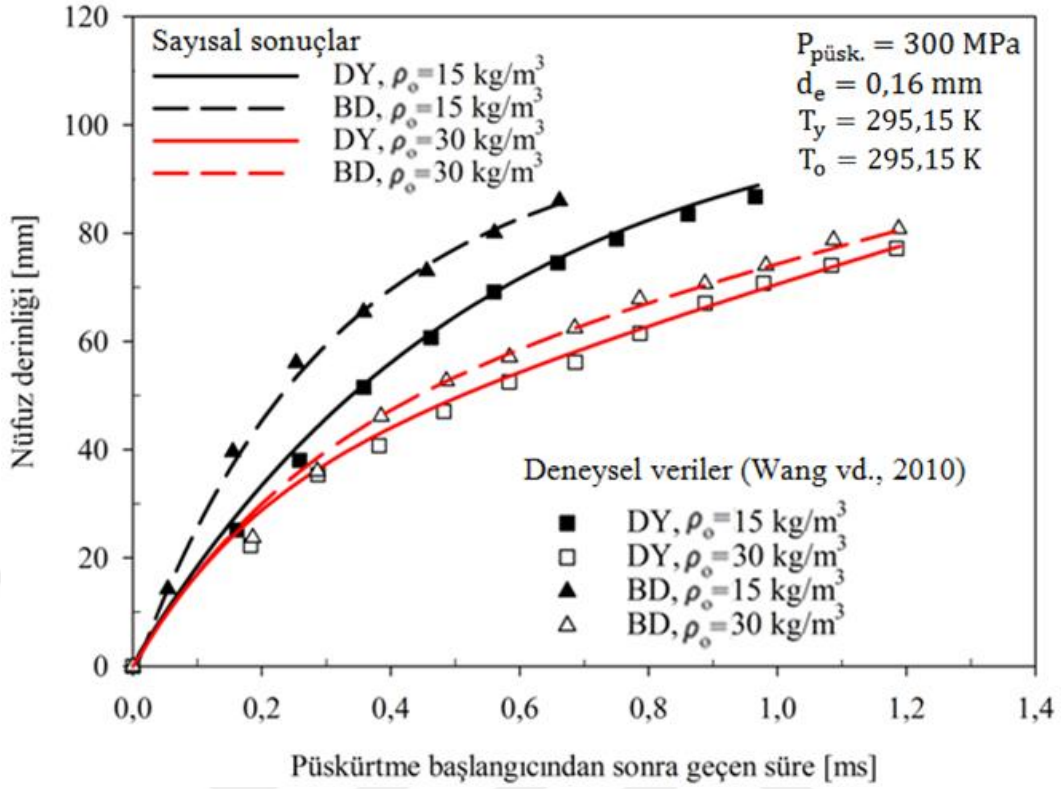
Şekil 4.60. Farklı karşı-ortam yoğunluklarında ve 100 MPa püskürtme basıncında, saf dizel yakıtı ve atık kızartma yağı biyodizelinin nüfuz derinliğinin zamanla değişimi için elde edilen sayısal sonuçların deneysel veriler ile karşılaştırılması

Şekil 4.65 ve 4.66'da, deneysel çalışmadaki [126] parametreler (d_e , T_y ve T_o) aynı tutularak, farklı püskürtme basınçları (100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa) ve karşı-ortam yoğunluklarında (15 kg/m^3 ve 30 kg/m^3), saf dizel yakıtı (Şekil 4.65) ile atık kızartma yağı biyodizeli (Şekil 4.66) için belirlenen deneysel sprej açısı değerleri, ampirik modeller ve yukarıda belirlenen en uygun parametreler (ağ boyutu, türbülans modeli ve parçalanma modeli) kullanılarak Fluent paket programı yardımıyla elde edilen sayısal değerler ile kıyaslanmıştır. Tüm tez boyunca, sayısal olarak elde edilen sprej açısı değerlerinin karşılaştırılmasında kullanılan ampirik modeller (Heywood [169] ve Sitkei [183] tarafından önerilen) sırasıyla (3.110) ve (3.111) numaralı denklemlerde verilmiştir. Şekiller incelendiğinde, ampirik modellerin, her iki yakıt türü için de, püskürtme basıncı ve karşı-ortam yoğunluğunun sprej açısına olan etkilerini niteliksel ve niceliksel olarak iyi derecede temsil edemediği, diğer bir ifadeyle modellerden elde edilen sonuçların deneysel sonuçlardan farklı olduğu görülmüştür. Oysaki söz konusu parametreler kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlar, deneysel sonuçlara her iki yakıt türü ve karşı-ortam yoğunluğu durumunda da yakındır.



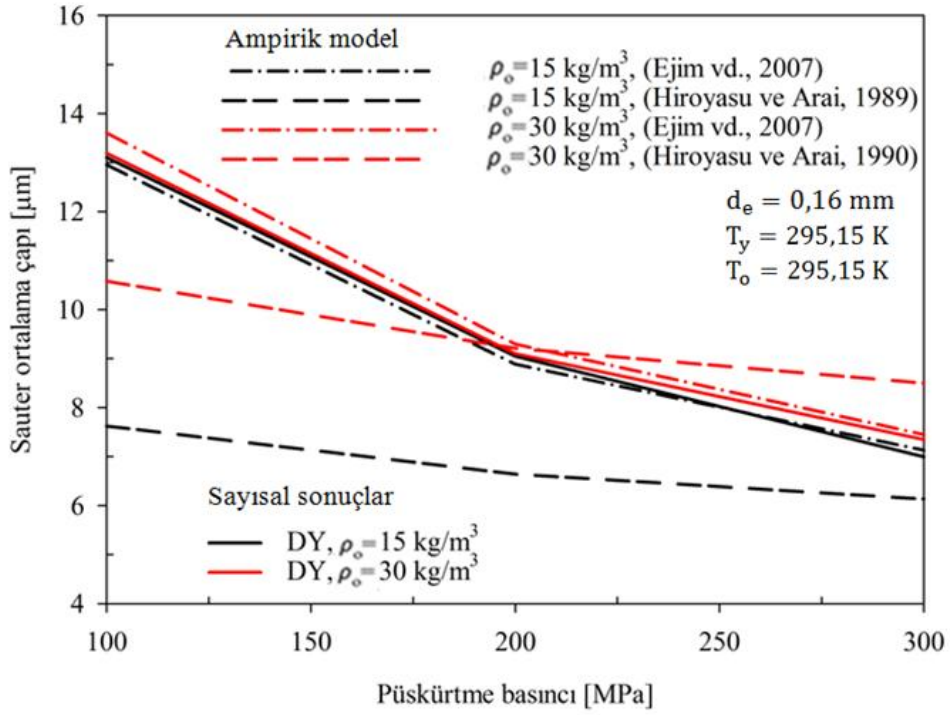
Şekil 4.61. Farklı karşı-ortam yoğunluklarında ve 200 MPa püskürtme basıncında, saf dizel yakıtı ve atık kızartma yağı biyodizelinin nüfuz derinliğinin zamanla değişimi için elde edilen sayısal sonuçların deneysel verileri ile karşılaştırılması

Şekil 4.67’de, deneysel çalışmadaki parametreler [126] (d_e , T_y ve T_o) aynı tutularak, farklı püskürtme basınçları (100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa) ve karşı-ortam yoğunluklarında (15 kg/m^3 ve 30 kg/m^3), saf dizel yakıtı ile atık kızartma yağı biyodizeli için deneysel olarak belirlenen nüfuz derinliği ve spray açısı değerlerini kullanarak (3.114) numaralı denklemden [186] hesaplanan spray hacmi değerleri, yukarıda belirlenen en uygun parametreler (ağ boyutu, türbülans modeli ve parçalanma modeli) kullanılarak Fluent paket programı yardımıyla elde edilen sayısal nüfuz derinliği ve spray açısı değerlerini kullanarak (3.114) numaralı denklemden hesaplanan spray hacmi değerleri ile kıyaslanmıştır. Söz konusu şekil incelendiğinde, her iki karşı-ortam yoğunluğunda da, yakıtların deneysel ve sayısal olarak belirlenen nüfuz derinliği ve spray açısı değerleri birbirlerine yakın olduklarından, spray hacmi değerlerinin de yakın oldukları görülmüştür. Diğer bir ifadeyle, elde edilen sayısal sonuçların deneysel verileri iyi karakterize ettiği belirlenmiştir.

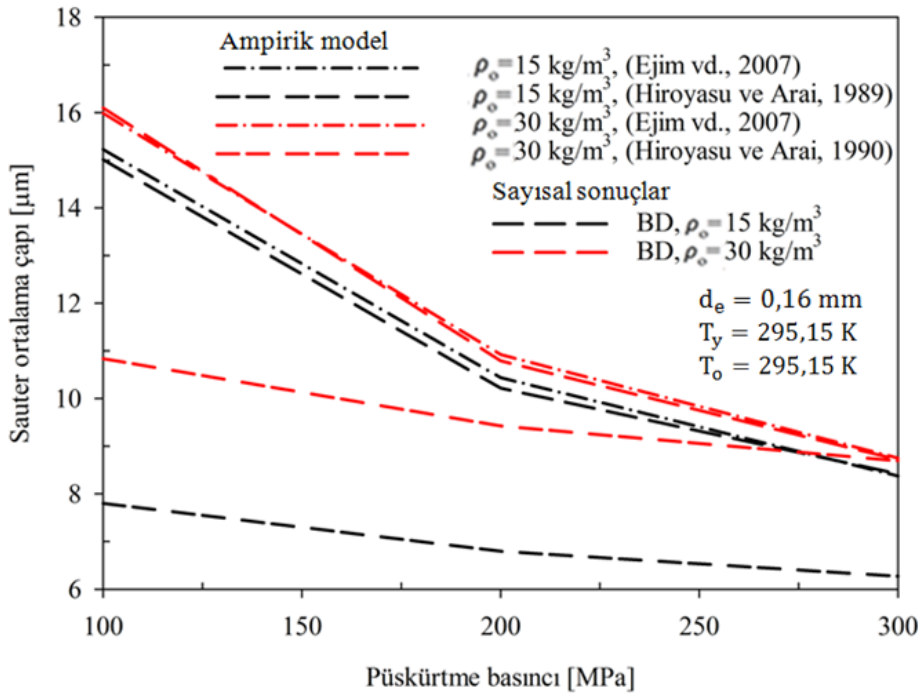


Şekil 4.62. Farklı karşı-ortam yoğunluklarında ve 300 MPa püskürtme basıncında, saf dizel yakıtı ve atık kızartma yağı biyodizelinin nüfuz derinliğinin zamanla değişimi için elde edilen sayısal sonuçların deneysel veriler ile karşılaştırılması

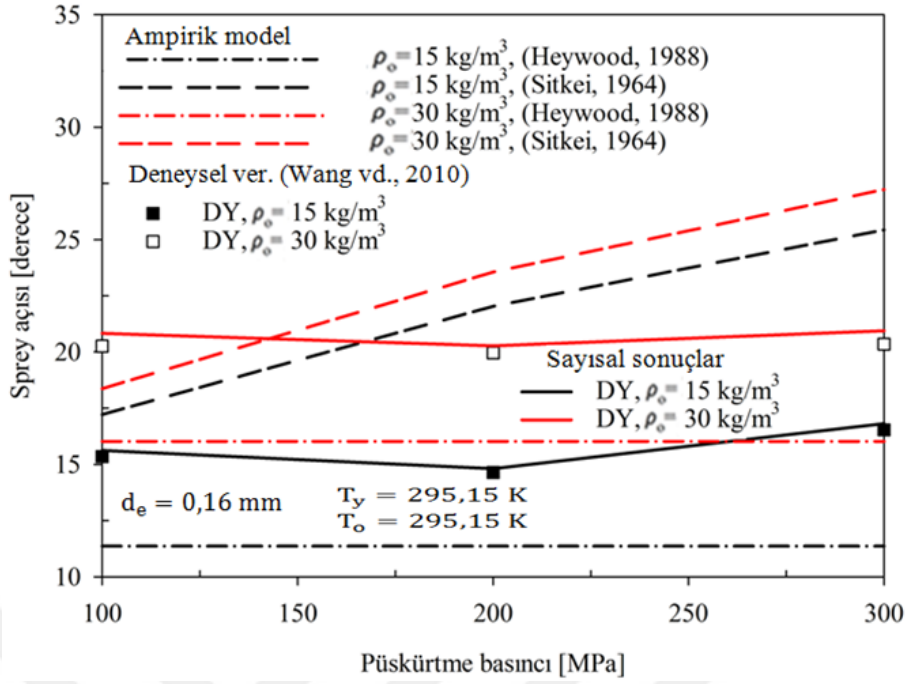
Sonuç olarak, Şekil 4.56–4.67’ye göre, yukarıda belirlenen en uygun ağ boyutu (1 mm), türbülans modeli (standart $k - \epsilon$) ve parçalanma modeli (KH-RT) kullanılarak Fluent paket programı yardımıyla belirlenen sayısal sonuçların, saf dizel yakıtının ve atık kızartma yağı biyodizelinin farklı püskürtme basınçlarında ve karşı-ortam yoğunluklarında deneysel olarak [126] belirlenen nüfuz derinliği, sprej açısı ve sprej hacmi değerlerini iyi karakterize ve tahmin ettiği belirlenmiştir. Yine, sayısal olarak belirlenen Sauter ortalama çap değerlerinin, literatürde sıklıkla kullanılan Ejim ve arkadaşları [185] tarafından önerilen modelden elde edilen sonuçlara daha yakın olduğu görülmüştür. Böylece, sayısal çalışmanın doğruluğu gösterilmiştir. Bu yüzden, tez çalışmasının bundan sonraki aşamasında, satın alınan ticari saf dizel yakıtının, bu tez çalışması kapsamında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin ve bunların karışımlarının (B5, B10, B15 ve B20), yakıt demeti özellikleri yine aynı parametreler kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir.



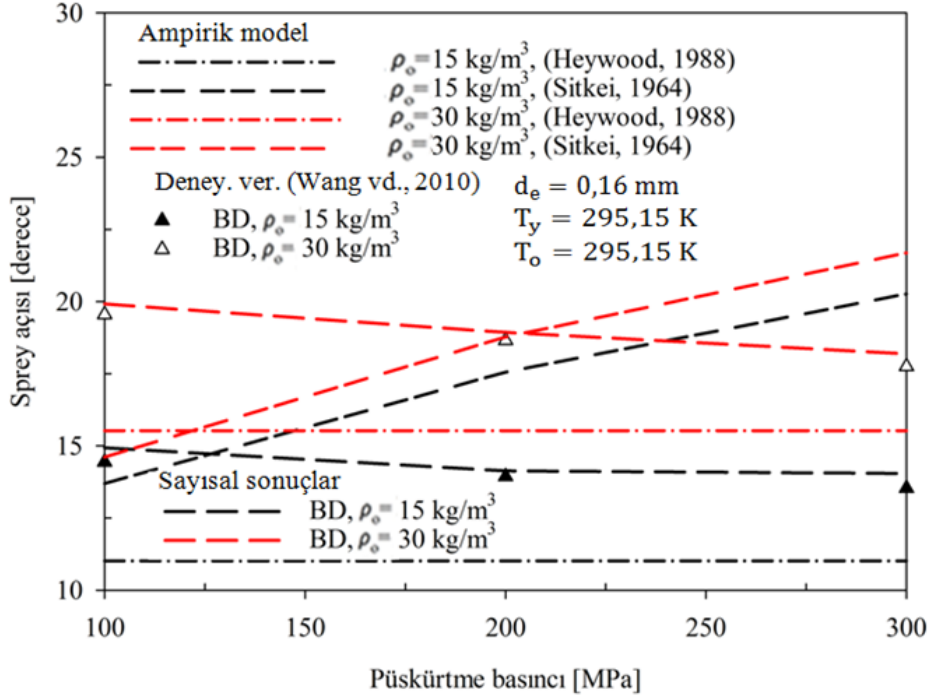
Şekil 4.63. Farklı karşı-ortam yoğunluklarında, saf dizel yakıtının Sauter ortalama çapının püskürtme basıncıyla değişimi için elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması



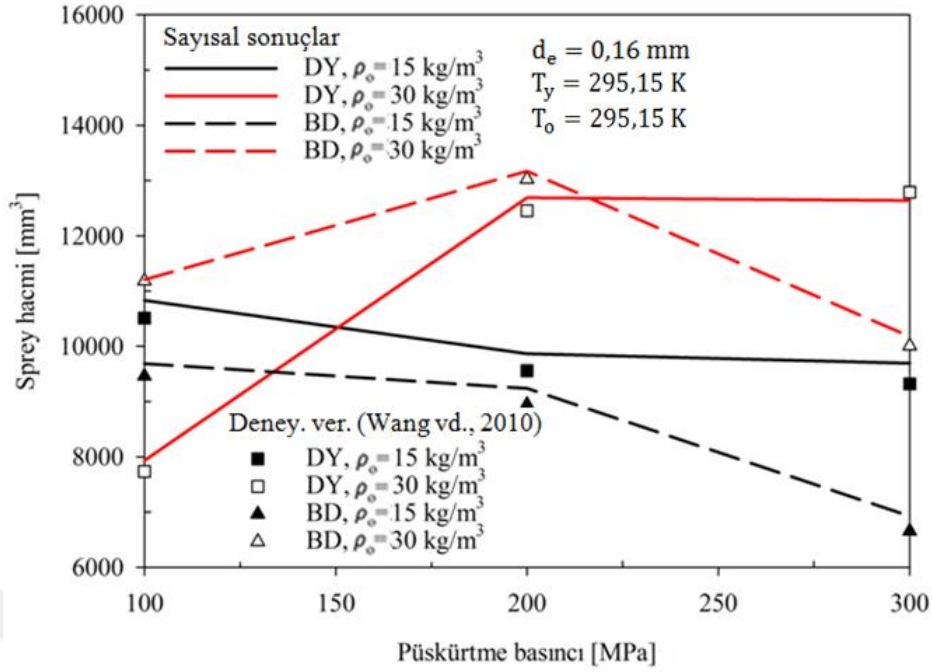
Şekil 4.64. Farklı karşı-ortam yoğunluklarında, saf atık kızartma yağı biyodizelinin Sauter ortalama çapının püskürtme basıncıyla değişimi için elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması



Şekil 4.65. Farklı karşı-ortam yoğunluklarında, saf dizel yakıtının sprej açısının püskürtme basıncıyla değişimi için elde edilen sayısal sonuçların, deneysel veriler ve ampirik modeller ile karşılaştırılması



Şekil 4.66. Farklı karşı-ortam yoğunluklarında, saf atık kızartma yağı biyodizelinin sprej açısının püskürtme basıncıyla değişimi için elde edilen sayısal sonuçların, deneysel veriler ve ampirik modeller ile karşılaştırılması



Şekil 4.67. Farklı karşı-ortam yoğunluklarında, saf dizel yakıtı ve atık kızartma yağı biyodizelinin spray hacimlerinin püskürtme basıncıyla değişimi için elde edilen sayısal sonuçların deneysel veriler ile karşılaştırılması

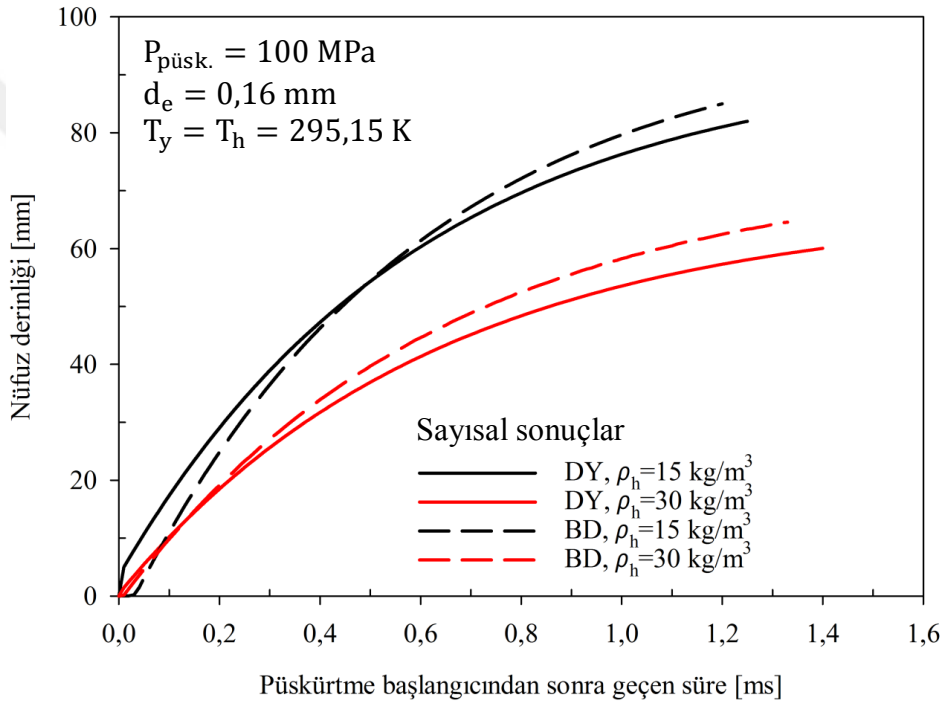
4.2.2. Püskürtme Basıncı ve Karşı-Hava Yoğunluğunun Etkisi

Şekil 4.68–4.70’te, deneysel çalışmadaki [126] parametreler (d_e , T_y ve T_h) aynı tutularak, farklı püskürtme basınçları (100 MPa (Şekil 4.68), 200 MPa (Şekil 4.69) ve 300 MPa (Şekil 4.70) ve karşı-hava yoğunluklarında (15 kg/m^3 ve 30 kg/m^3), satın alınan ticari saf dizel yakıtının ve bu tez çalışması kapsamında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin nüfuz derinliklerinin püskürtme başlangıcından sonra geçen süreyle değişimleri, yukarıda belirlenen en uygun parametreler (ağ boyutu, türbülans modeli ve parçalanma modeli) kullanılarak Fluent paket programı yardımıyla sayısal olarak belirlenmiştir. Diğer bir ifade ile söz konusu yakıtların, nüfuz derinlikleri karşılaştırılmıştır. İlgili şekiller incelendiğinde, genel olarak, nüfuz derinliğinin püskürtme başlangıcından sonra çok kısa bir süre için (t_{kopma} anına kadar) yaklaşık doğrusal olarak arttığı, daha sonra azalarak artan bir karakteristik gösterdiği görülmektedir. Yakıt demeti, enjektörden çok yüksek hızlarda püskürtüldüğü için belirli bir kopma anına (t_{kopma}) kadar momentumunu koruyup nüfuz derinliği yaklaşık doğrusal olarak artmakta, fakat t_{kopma} anından sonra parçalanıp damlacıklar haline geldiğinden dolayı hızını ve dolayısıyla momentumunu kaybettiğinden

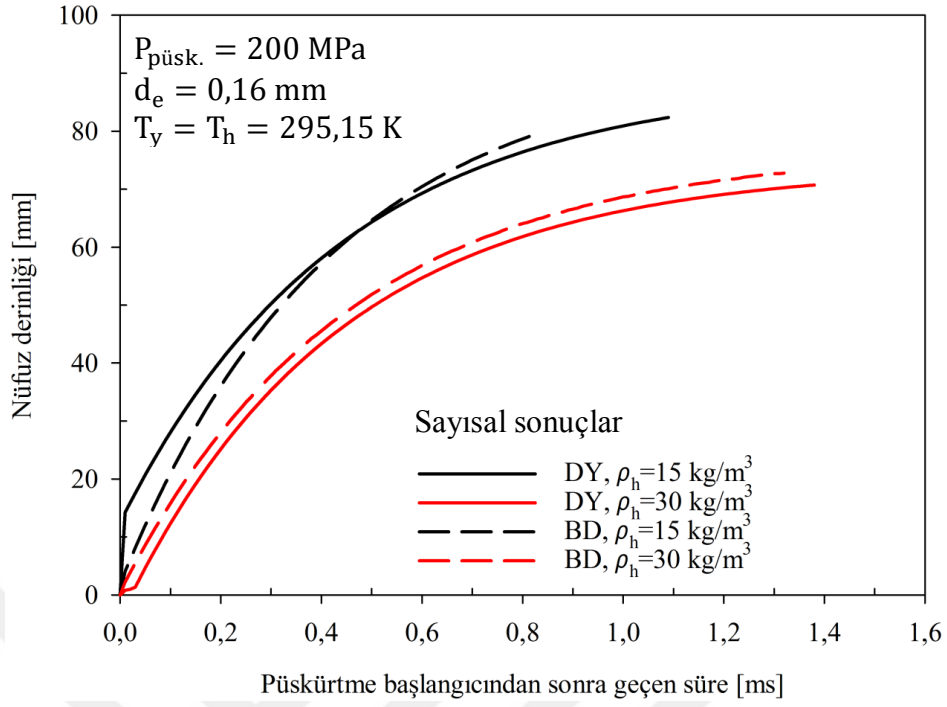
karşı-havanın neden olduğu aerodinamik sürtünme kuvveti etkisiyle yakıt demetinin nüfuz derinliği zamanla azalmaktadır. Diğer taraftan, her üç püskürtme basıncı için de, karşı-hava yoğunluğu arttığında, yakıtların nüfuz derinliği değerlerinin azaldığı; ayrıca yine püskürtme basıncından bağımsız olarak her iki karşı-hava yoğunluğunda da genel olarak saf biyodizelin saf dizele göre nüfuz derinliğinin daha fazla olduğu belirlenmiştir. Yakıtların bazı fiziksel özellikleri (yoğunluğu, viskozitesi ve yüzey gerilimi) yakıt demeti karakteristiklerini doğrudan etkilemektedir. Saf biyodizelin yoğunluğu, viskozitesi ve yüzey gerilimi dizel yakıtına göre daha yüksek olduğundan dolayı, sahip olduğu yakıt demeti momentumu, diğer bir ifadeyle yakıt damlacıklarının parçalanmasına neden olan kuvvetlere olan direnci, daha yüksek olduğundan, saf biyodizel daha geç parçalanarak (daha zor atomize olarak) momentumunu korur ve yanma odasında daha derinlere nüfuz edebilir. Yani saf biyodizelin nüfuz derinliği değerleri daha fazladır. Fakat özellikle 15 kg/m³ karşı-hava yoğunluğunda, saf dizel yakıtının nüfuz derinliğinin, daha önceden bahsedilen doğrusal bölgenin etkisinin ön plana çıkmasıyla, saf biyodizelin nüfuz derinliğinden daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durum, biyodizelin yüksek viskozitesi nedeniyle, enjektör iç yüzeyi ile arasındaki sürtünmenin artıp, enjektör çıkış hızının azalmasıyla açıklanabilir. Diğer bir ifade ile biyodizelin yüksek viskozitesi nedeniyle çıkış hızı azaldığından, 100 MPa ve 200 MPa püskürtme basınçlarında yaklaşık 0–0,5 ms ve 300 MPa püskürtme basıncında yaklaşık 0–0,2 ms aralıklarında, nüfuz derinliği saf dizel yakıtına göre azalmıştır. Diğer taraftan, karşı-hava yoğunluğu arttığında, (i) yakıt demetinin ucundaki yakıt damlacıkları daha yüksek aerodinamik sürtünme (direnc) kuvvetine maruz kaldığından ve (ii) yakıt demetiyle etkileşim halinde olan karşı-havanın kütlesi arttığından dolayı, yakıt demetinin difüzyonu zorlaşır, spreyn hızı azalır ve neticede momentumu azalarak, yakıtların nüfuz derinlikleri azalır.

Şekil 4.71 ve 4.72’de, deneysel çalışmadaki [126] parametreler (d_e , T_y ve T_h) aynı tutularak, farklı karşı-hava yoğunluklarında (15 kg/m³ ve 30 kg/m³), satın alınan ticari saf dizel yakıtının (Şekil 4.71) ve bu tez çalışması kapsamında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin (Şekil 4.72) nüfuz derinliklerinin püskürtme başlangıcından sonra geçen süreyle değişimleri, çeşitli püskürtme basınçları (100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa) altında, yukarıda belirlenen en uygun parametreler (ağ boyutu, türbülans modeli ve parçalanma modeli) kullanılarak Fluent paket programı yardımıyla sayısal olarak belirlenmiştir. Diğer bir anlatımla, her bir yakıt için, karşı-hava yoğunluğunun nüfuz derinliğine olan etkisi çeşitli püskürtme basınçlarında incelenmiştir. Söz konusu şekillere göre, püskürtme basıncı

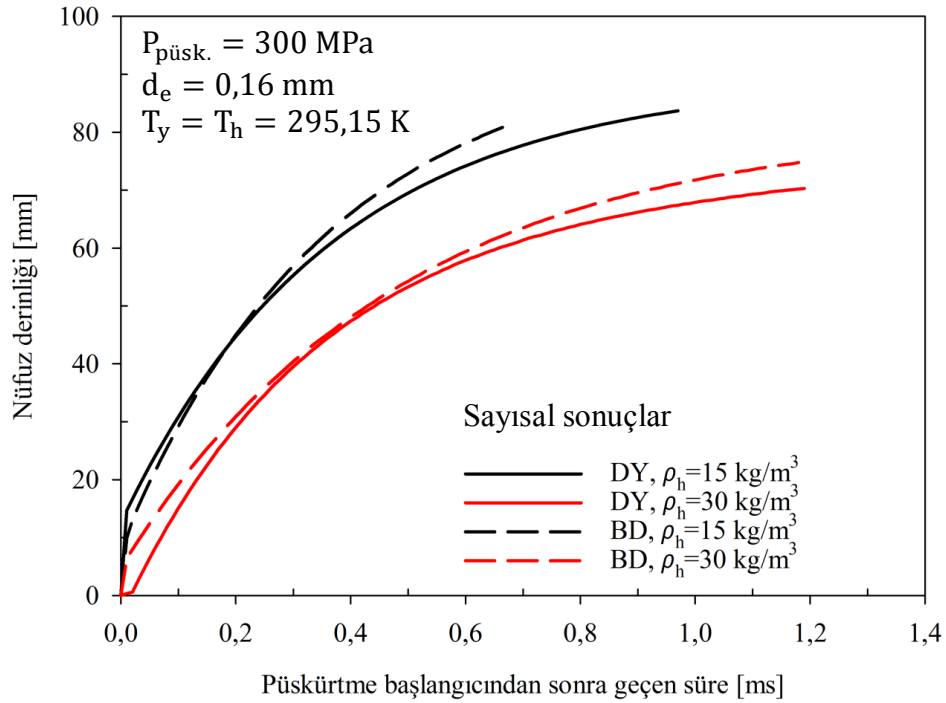
arttığında, yakıt demetinin enjektörden çıkış hızı arttığından (yani daha zor parçalandığından) dolayı nüfuz derinliği de artmaktadır. Fakat püskürtme basıncının daha fazla artırılması (200 MPa'dan 300 MPa'a) nüfuz derinliğini çok fazla artırmamıştır. Bu durum, çok yüksek püskürtme basınçlarında atomizasyon sürecinin (t_{kopma} süresinin) kısalarak, yakıt demetinin çok hızlı bir şekilde atomize olmasıyla açıklanabilir. Ayrıca, karşı-hava yoğunluğu arttığında, yukarıda açıklandığı gibi, yakıt demetinin ucundaki yakıt damlacıkları daha yüksek aerodinamik sürtünme (direnç) kuvvetine maruz kaldıklarından dolayı, her iki yakıt için de, nüfuz derinliği azalmıştır.



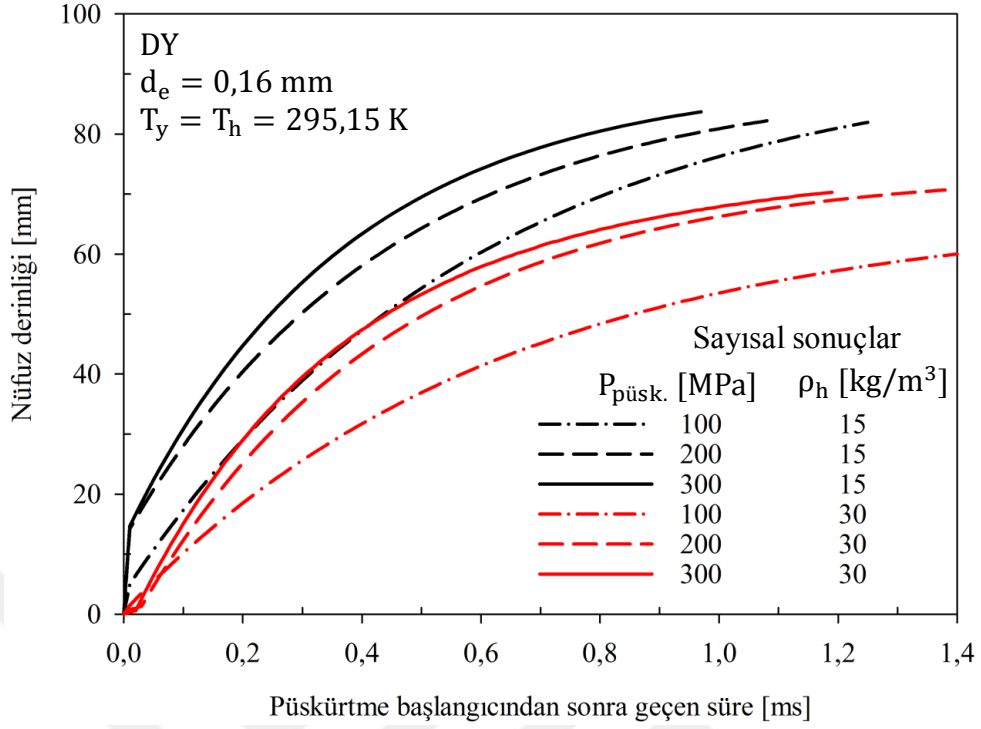
Şekil 4.68. Farklı karşı-hava yoğunluklarında ve 100 MPa püskürtme basıncında, ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin nüfuz derinliğinin zamanla değişimi için elde edilen sayısal sonuçlar



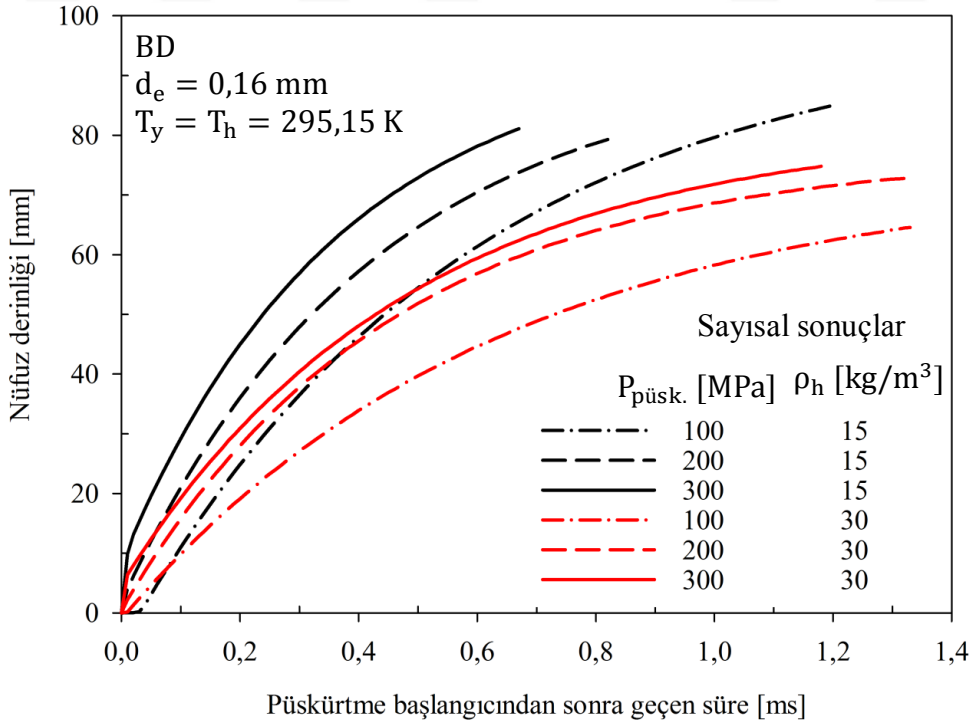
Şekil 4.69. Farklı karşı-hava yoğunluklarında ve 200 MPa püskürtme basıncında, ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin nüfuz derinliğinin zamanla değişimi için elde edilen sayısal sonuçlar



Şekil 4.70. Farklı karşı-hava yoğunluklarında ve 300 MPa püskürtme basıncında, ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin nüfuz derinliğinin zamanla değişimi için elde edilen sayısal sonuçlar

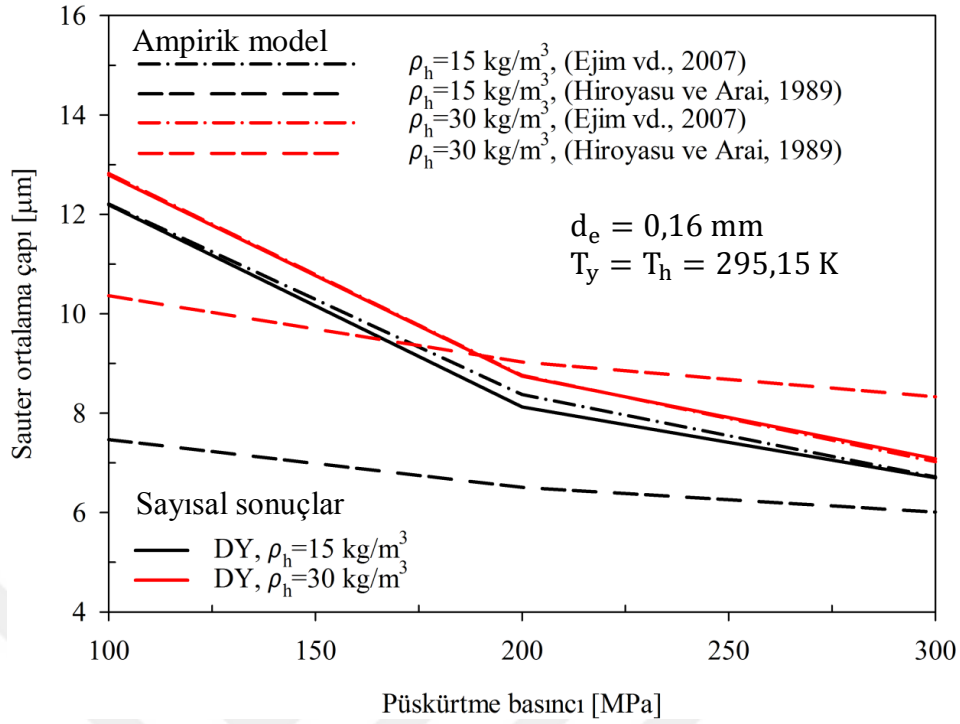


Şekil 4.71. Farklı karşı-hava yoğunluklarında ve püskürtme basınçlarında, ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliğinin zamanla değişimi için elde edilen sayısal sonuçlar

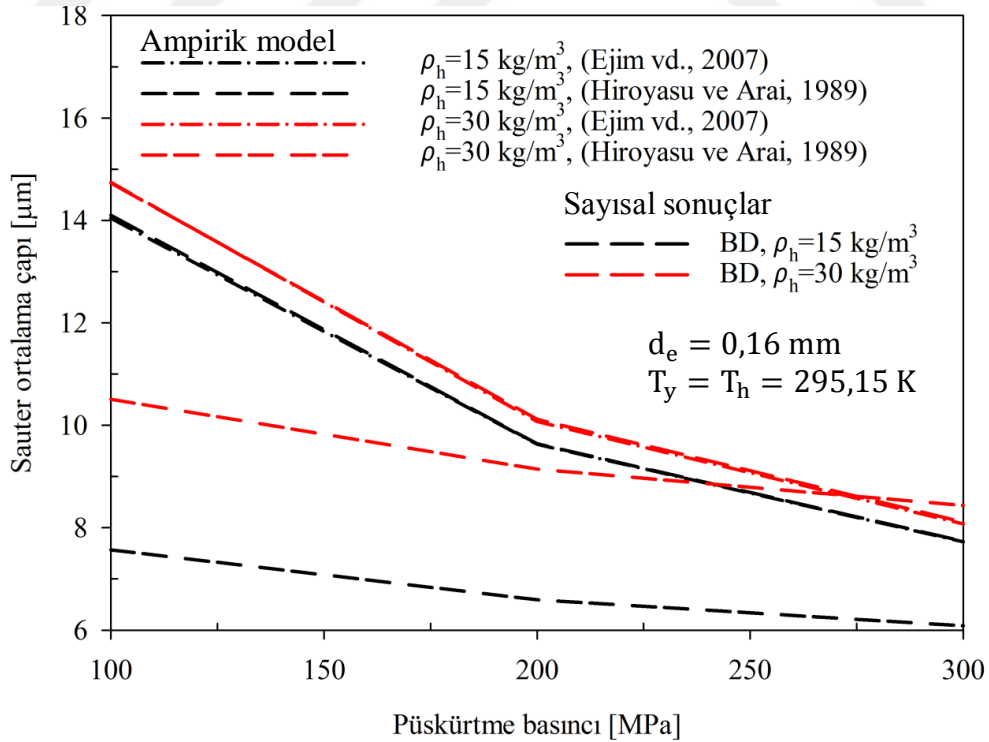


Şekil 4.72. Farklı karşı-hava yoğunluklarında ve püskürtme basınçlarında, üretilen saf biyodizelin nüfuz derinliğinin zamanla değişimi için elde edilen sayısal sonuçlar

Şekil 4.73 ve 4.74'te, deneysel çalışmadaki [126] parametreler (d_e , T_y ve T_h) aynı tutularak, farklı püskürtme basınçları (100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa) ve karşı-hava yoğunluklarında (15 kg/m^3 ve 30 kg/m^3), satın alınan ticari saf dizel yakıtının (Şekil 4.73) ve bu tez çalışması kapsamında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin (Şekil 4.74), yukarıda belirlenen en uygun parametreler (ağ boyutu, türbülans modeli ve parçalanma modeli) kullanılarak Fluent paket programı yardımıyla elde edilen Sauter ortalama çap değerlerinin değişimleri, ampirik modeller ile karşılaştırılmıştır. Diğer bir anlatımla, her bir yakıtın, Sauter ortalama çap değerlerinin farklı püskürtme basıncı ve karşı-hava yoğunluğuyla değişimleri incelenmiştir. Söz konusu değişimlerden, sayısal sonuçlar ile Ejim ve arkadaşları [185] tarafından önerilen modelin sonuçlarının birbirlerine yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca, her iki yakıt için de, püskürtme basıncı arttığında ortalama çap değerlerinin azaldığı, karşı-hava yoğunluğu arttığında ise ortalama çap değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Karşı-hava yoğunluğunun artışıyla, yakıt damlacıklarının birbirlerine çarpma (collision) olasılıkları arttığı için, bir araya gelip nispeten daha büyük çaplı yakıt damlacıkları meydana getirdiklerinden dolayı yakıtların ortalama çap değerleri artar. Diğer bir anlatımla, Ejim ve arkadaşları [185] tarafından önerilen ampirik modelden (3.112 numaralı denklem) de görüldüğü üzere, karşı-hava yoğunluğuyla (ρ_{hava}) Sauter ortalama damlacık çapı doğru orantılıdır. Yani, karşı-hava yoğunluğunun artışı daha büyük çaplı yakıt damlacıklarının oluşmasına neden olacağı için ortalama çap değerleri artar. Diğer taraftan, püskürtme basıncı arttığında, öncelikle, birincil parçalanmaya (primary break-up) neden olan yakıt demeti üzerindeki kararsızlıkların (Kelvin-Helmholtz instability) artması, sonrasında, yakıt demetinin hızının artışıyla, yakıt demeti daha küçük damlacıklara parçalanır. Dolayısıyla, Sauter ortalama çap değeri de azalır. Ayrıca, yine (3.112) numaralı denklemden görüldüğü gibi, püskürtme basıncı artırıldığında, püskürtme basıncıyla karşı-hava basıncı arasındaki fark (ΔP) artar, bu durum, ΔP ile ters orantılı olan Sauter ortalama çap değerlerinin azalmasına neden olur.

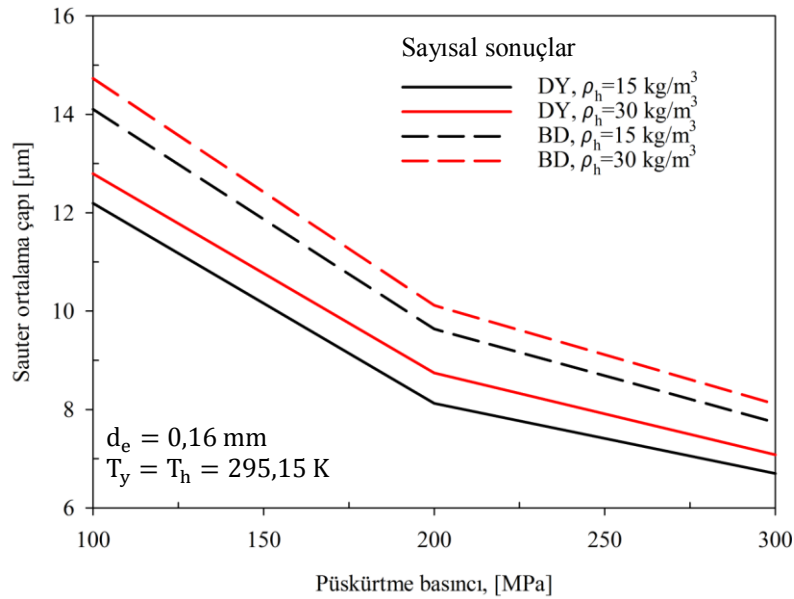


Şekil 4.73. Farklı karşı-hava yoğunluklarında, ticari saf dizel yakıtının Sauter ortalama çapının püskürtme basıncıyla değişimi için elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması



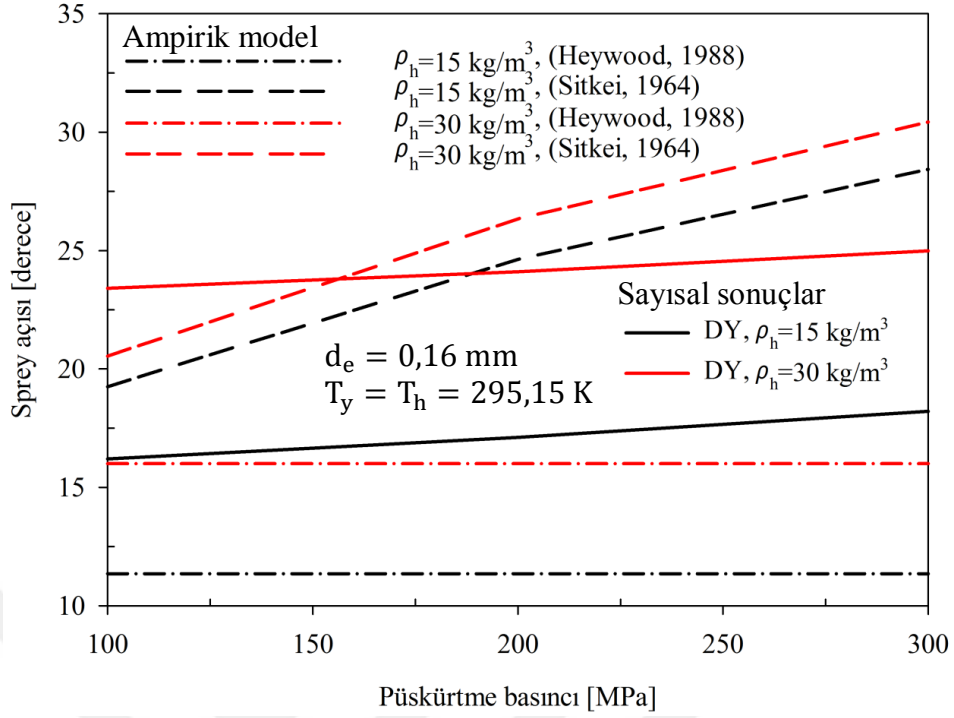
Şekil 4.74. Farklı karşı-hava yoğunluklarında, üretilen saf biyodizelin Sauter ortalama çapının püskürtme basıncıyla değişimi için elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması

Şekil 4.75'te, deneysel çalışmadaki [126] parametreler (d_e , T_y ve T_h) aynı tutularak, farklı püskürtme basınçları (100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa) ve karşı-hava yoğunluklarında (15 kg/m^3 ve 30 kg/m^3), satın alınan ticari saf dizel yakıtının ve bu tez çalışması kapsamında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin, yukarıda belirlenen en uygun parametreler (ağ boyutu, türbülans modeli ve parçalanma modeli) kullanılarak Fluent paket programı yardımıyla elde edilen Sauter ortalama çap değerlerinin değişimleri karşılaştırılmıştır. Söz konusu şekil incelendiğinde, tüm püskürtme basıncı ve karşı-hava yoğunluğu durumları için, saf dizel yakıtının ortalama çap değerlerinin biyodizelininkinden daha küçük olduğu görülmüştür. Saf dizel yakıtının yüzey gerilimi ve viskozitesi daha düşük olduğundan, görece daha büyük çaplı yakıt damlacıkları daha kolay parçalanarak daha küçük çaplı damlacıklar haline geldiğinden dolayı, saf dizel yakıtının Sauter ortalama çap değerleri daha düşüktür. Diğer bir anlatımla, saf biyodizelin viskozitesi daha yüksek olduğundan, enjektör iç yüzeyi ile olan sürtünme kuvveti daha büyüktür (yani sürtünme kayıpları fazladır). Bu durum, saf biyodizelin enjektör çıkış hızının azalmasına neden olur. Çıkış hızının azalması da karşı-hava ile olan bağıl hızın azalmasına neden olur ki, bu da yakıt damlacıklarının tam anlamıyla atomize olamamasına, yani damlacık çaplarının artmasına neden olur. Damlacık çaplarının artışıyla Sauter ortalama çap değerleri de artar. Sonuç olarak, saf dizel yakıtına göre, biyodizelin atomizasyon performansı daha kötüdür.

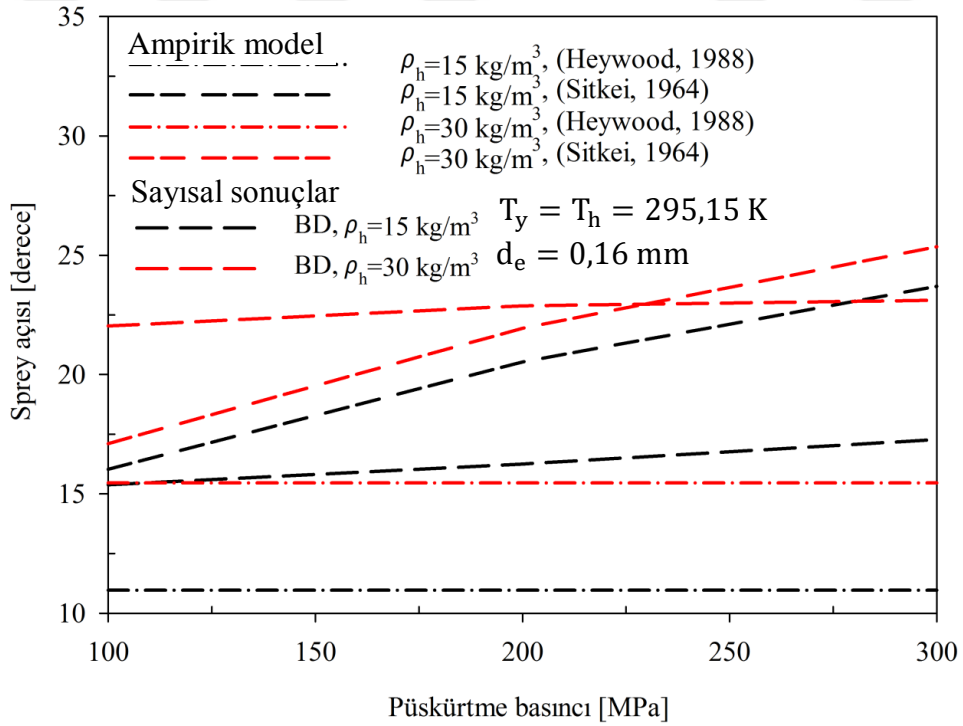


Şekil 4.75. Farklı karşı-hava yoğunluklarında, ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin Sauter ortalama çapının püskürtme basıncıyla değişimi için elde edilen sayısal sonuçlar

Şekil 4.76 ve 4.77’de, deneysel çalışmadaki [126] parametreler (d_e , T_y ve T_h) aynı tutularak, farklı püskürtme basınçları (100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa) ve karşı-hava yoğunluklarında (15 kg/m^3 ve 30 kg/m^3), satın alınan ticari saf dizel yakıtının (Şekil 4.76) ve bu tez çalışması kapsamında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin (Şekil 4.77), yukarıda belirlenen en uygun parametreler (ağ boyutu, türbülans modeli ve parçalanma modeli) kullanılarak Fluent paket programı yardımıyla elde edilen sprej açısı değerlerinin değişimleri, ampirik modeller ile karşılaştırılmıştır. Diğer bir anlatımla, her bir yakıtın, sprej açısı değerlerinin, farklı püskürtme basıncı ve karşı-hava yoğunluğuyla olan değişimleri incelenmiştir. Ortak-hatlı püskürtme (common-rail) sisteminin yaygınlaşmadığı, püskürtme basınçlarının nispeten daha düşük olduğu yıllarda Heywood [169] tarafından önerilen ampirik model, günümüz koşullarındaki yüksek püskürtme basınçlarında elde edilen sprej açısı değerlerini ne sayısal değer ne de karakteristik olarak iyi tahmin edebilmiştir. Oysaki Sitkei [183] tarafından önerilen modelin, sprej açısının püskürtme basıncıyla olan değişimi için Fluent paket programından elde edilen değerleri sayısal değer olarak olmasa da, karakteristik olarak iyi tahmin ettiği belirlenmiştir. Söz konusu şekillerden görüleceği üzere, her iki yakıt için de, püskürtme basıncı ve karşı-hava yoğunluğu arttığında sprej açısı değerleri artmıştır. Fakat püskürtme basıncıyla olan ki artış daha az iken, karşı-hava yoğunluğuyla olan ki artış çok daha belirgindir. Karşı-hava yoğunluğu arttığında, (i) yakıt demetine etki eden aerodinamik sürtünme (direnc) kuvvetinin artışıyla ve (ii) yakıt demeti ile etkileşim halinde olan karşı-havanın kütesinin artışıyla, yakıt demeti aksel olarak daha fazla ilerleyemez (nüfuz derinliği azalır) ve anlık olarak durarak momentumun korunumu gereği radyal yöne saçılır. Yani, yakıt damlacıkları radyal yöne doğru harekete zorlanır. Bu durum sonucunda, sprej açısı değeri artar. Püskürtme basıncı arttığında ise, yakıt damlacıklarının başlangıç hızı daha yüksek olduğundan, yakıt demeti karşı-havanın da etkisiyle yanma odası içerisinde aksel (nüfuz derinliğinin artması) ve radyal olarak görece daha geniş bir alana yayılır (dağılır). Bu durum, yakıt demetinin sınırlarını genişletir, dolayısıyla sprejin açısının artmasına neden olur. Diğer bir ifade ile, püskürtme basıncının artışıyla türbülans titreşiminin şiddetinin artması, sprej açısının artmasına neden olur [176].

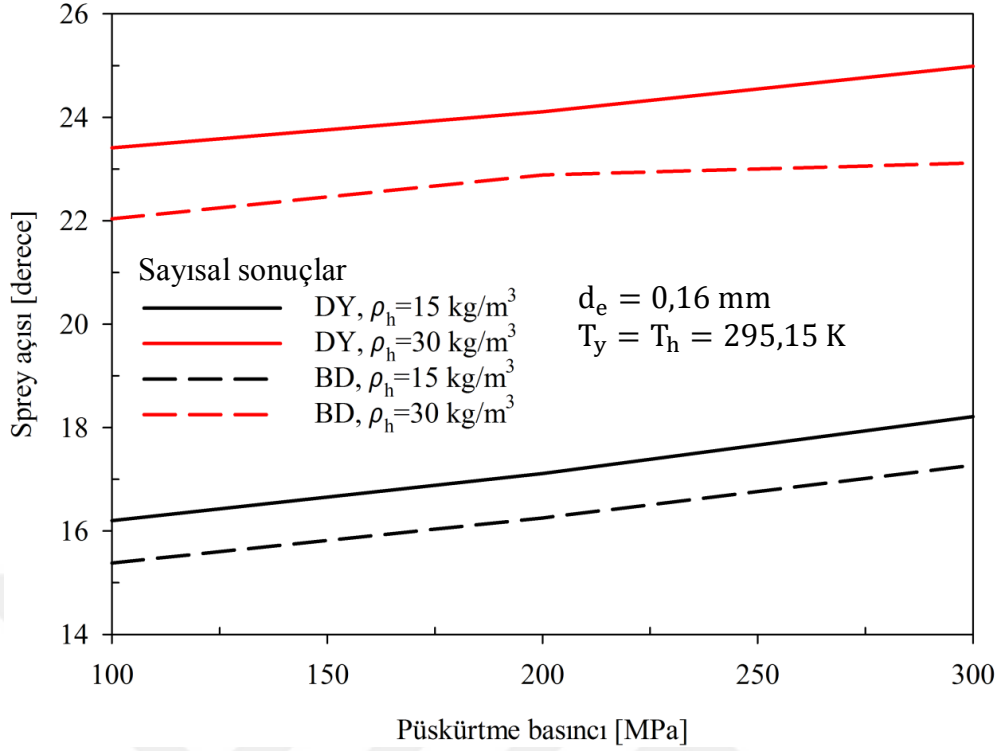


Şekil 4.76. Farklı karşı-hava yoğunluklarında, ticari saf dizel yakıtının spray açısının püskürtme basıncıyla değişimi için elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması



Şekil 4.77. Farklı karşı-hava yoğunluklarında, üretilen saf biyodizelin spray açısının püskürtme basıncıyla değişimi için elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması

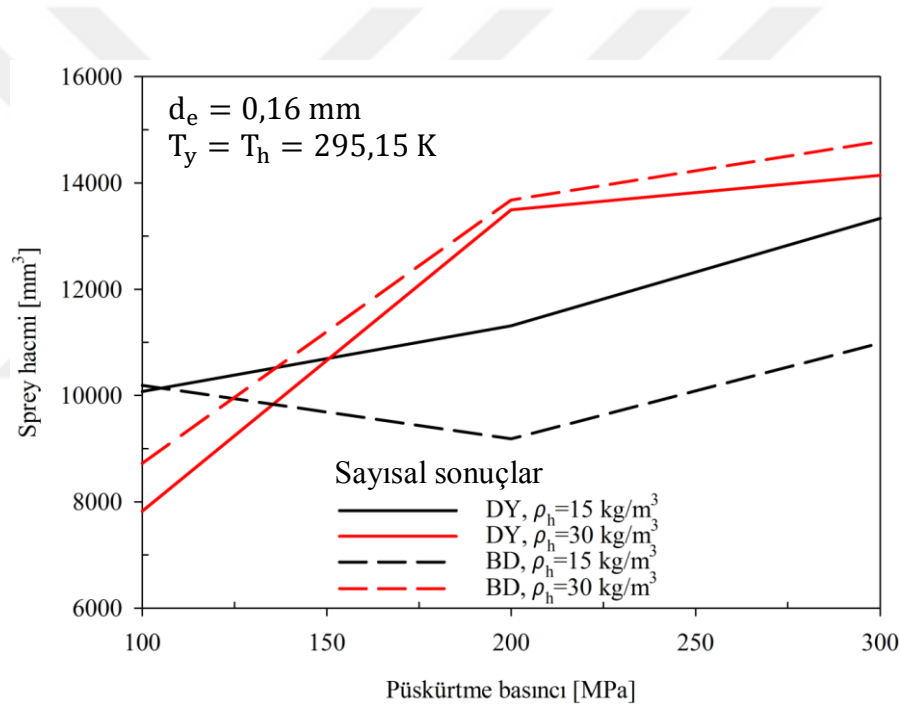
Şekil 4.78’de, deneysel çalışmadaki [126] parametreler (d_e , T_y ve T_h) aynı tutularak, farklı püskürtme basınçları (100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa) ve karşı-hava yoğunluklarında (15 kg/m^3 ve 30 kg/m^3), satın alınan ticari saf dizel yakıtının ve bu tez çalışması kapsamında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin, yukarıda belirlenen en uygun parametreler (ağ boyutu, türbülans modeli ve parçalanma modeli) kullanılarak Fluent paket programı yardımıyla elde edilen sprej açısı değerlerinin birbirleriyle karşılaştırılması yapılmıştır. Söz konusu şekilden görüldüğü gibi, tüm püskürtme basınçları ve karşı-hava yoğunlukları için, saf biyodizelin sprej açısı değerleri dizel yakıtınınkinden daha küçüktür. Yakıtın yoğunluğuyla, sprej açısı ters orantılıdır. Dizel yakıtının yoğunluğunun daha düşük olması, karşı-havanın etkisiyle yakıt demetinin ucundaki yakıt damlacıklarının daha kolay bir şekilde parçalanıp, yanma odası içerisinde radyal olarak görece daha uzak noktalara dağılmasına, dolayısıyla sprej alanının büyümesine yani sprej açısının artmasına neden olur. Fakat biyodizelin yüksek yoğunluk, viskozite ve yüzey gerilimi nedeniyle, görece büyük çaplı yakıt damlacıkları (özellikle yakıt demetinin kenarlarında bulunan) kolayca parçalanamaz ve yanma odası içerisinde geniş bir alana yayılamaz (sprej projeksiyon alanı azalır). Diğer bir ifade ile saf dizel yakıtının yoğunluğu daha düşük olduğu için, karşı-havanın etkisiyle, yakıt damlacıkları atomize olup, aksel olarak daha fazla ilerleyemeyip (nüfuz derinliği azalır), radyal yöne doğru hareket eder. Bu yüzden, dizel yakıtının sprej açısı değeri daha fazladır. Karşı-hava yoğunluğunun artışıyla artan aerodinamik sürtünme kuvvetinin etkisiyle, yakıt demeti aksel olarak daha fazla ilerleyemediğinden dolayı, momentumun korunumu gereği yakıt demeti radyal yöne harekete zorlanır. Bu durum, yakıtların sprej açılarının artmasına neden olmuştur. Ayrıca, püskürtme basıncının artışıyla, yakıt damlacıklarının enjektörden çıkış hızı arttığından dolayı, karşı-havanın etkisiyle yakıt demeti yanma odası içerisinde aksel ve radyal olarak görece daha geniş bir alana yayılır (saçılır). Bu durum yine, yakıtların sprej açılarının artmasına neden olmuştur.



Şekil 4.78. Farklı karşı-hava yoğunluklarında, ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin spray açılarının püskürtme basıncıyla değişimi için elde edilen sayısal sonuçlar

Şekil 4.79’da, deneysel çalışmadaki [126] parametreler (d_e , T_y ve T_h) aynı tutularak, farklı püskürtme basınçları (100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa) ve karşı-hava yoğunluklarında (15 kg/m^3 ve 30 kg/m^3), satın alınan ticari saf dizel yakıtının ve bu tez çalışması kapsamında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin, yukarıda belirlenen en uygun parametreleri (ağ boyutu, türbülans modeli ve parçalanma modeli) ve Fluent paket programı yardımıyla elde edilen nüfuz derinliği ile spray açısı değerlerini kullanarak, (3.114) numaralı denklemden hesaplanan spray hacmi değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Söz konusu şekilden görüldüğü gibi, 100 MPa püskürtme basıncında, nüfuz derinliğindeki artışın spray hacminin değişiminde daha baskın hale gelmesi nedeniyle, 15 kg/m^3 karşı-hava yoğunluğu için, yakıtların spray hacmi değerleri, 30 kg/m^3 karşı-hava yoğunluğunda elde edilen değerlerden daha fazladır. Diğer püskürtme basınçlarında (200 MPa ve 300 MPa), tam tersi olarak, spray açısındaki artışın ön plana çıkması nedeniyle, 30 kg/m^3 karşı-hava yoğunluğunda elde edilen spray hacmi değerleri daha fazladır. Saf biyodizelin spray açısı değerlerinin daha küçük olmasına rağmen nüfuz derinliği değerlerinin daha fazla olması nedeniyle, 30 kg/m^3 karşı-hava yoğunluğunda saf

biyodizelin spray hacmi değerleri, saf dizel yakıtıninkine göre tüm püskürtme basınçlarında daha yüksektir. Fakat 15 kg/m^3 karşı-hava yoğunluğunda, spray açısının etkisinin daha belirgin hale gelmesi nedeniyle (30 kg/m^3 karşı-hava yoğunluğunda nüfuz derinliği daha etkili), saf dizel yakıtının nüfuz derinliği değerleri daha az olmasına rağmen, spray açısı değerleri daha yüksek olduğundan, spray hacmi değerleri tüm püskürtme basınçlarında daha fazladır. Püskürtme basıncının artışıyla, hem nüfuz derinliği hem de spray açısı değerleri arttığından dolayı, karşı-hava yoğunluğundan bağımsız olarak, yakıtların spray hacmi değerleri artmıştır. Sadece, püskürtme basıncı 100 MPa'dan 200 MPa'a artırıldığında, 15 kg/m^3 karşı-hava yoğunluğu için, saf biyodizelin spray hacmi değeri azda olsa azalmıştır.



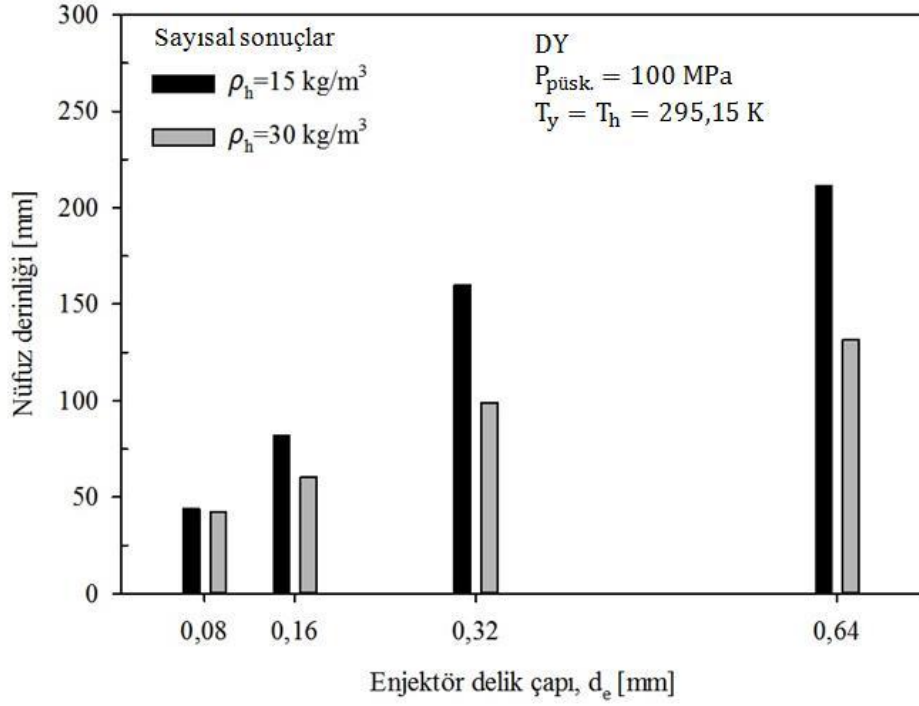
Şekil 4.79. Farklı karşı-hava yoğunluklarında, ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin spray hacimlerinin püskürtme basıncıyla değişimleri için elde edilen sayısal sonuçlar

4.2.3. Enjektör Delik Çapının Etkisi

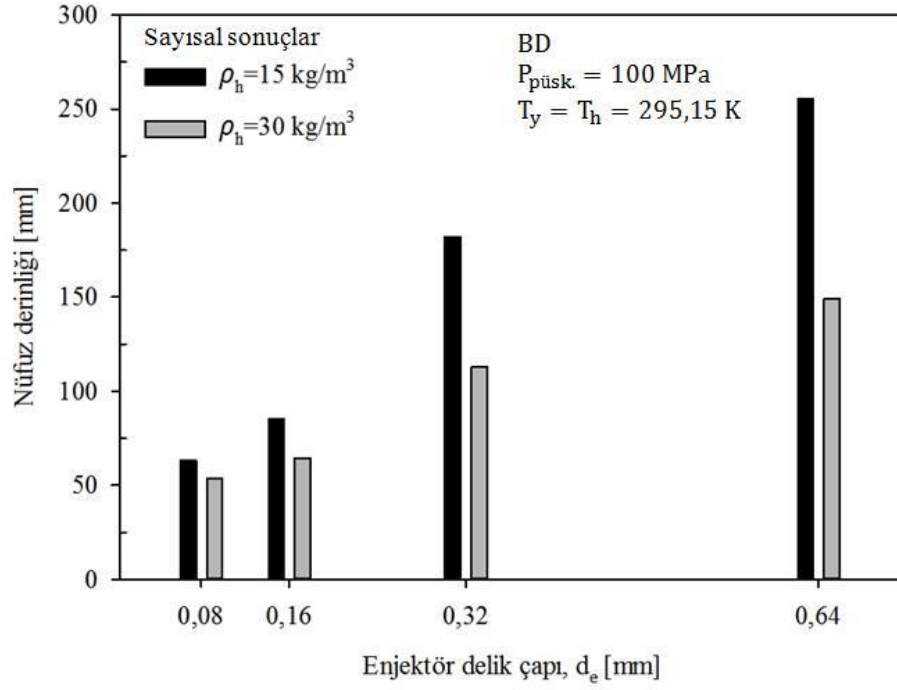
Şekil 4.80–4.85'te, deneysel çalışmadaki [126] parametreler (T_y ve T_h) aynı tutularak, farklı püskürtme basınçları (100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa), karşı-hava yoğunlukları (15 kg/m^3 ve 30 kg/m^3) ve enjektör delik çaplarında (0,08 mm, 0,16 mm, 0,32 mm ve 0,64 mm), satın alınan ticari saf dizel yakıtının (Şekil 4.80, 4.82 ve 4.84) ve

bu tez çalışması kapsamında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin (Şekil 4.81, 4.83 ve 4.85) nüfuz derinliklerinin değişimleri, yukarıda belirlenen en uygun parametreler (ağ boyutu, türbülans modeli ve parçalanma modeli) kullanılarak Fluent paket programı yardımıyla sayısal olarak belirlenmiştir. Diğer bir ifade ile enjektör delik çapının söz konusu yakıtların nüfuz derinliklerine olan etkisi incelenmiştir. Sunulan tez çalışmasında kullanılan enjektör delik çapı değerleri (0,08 mm, 0,16 mm, 0,32 mm ve 0,64 mm) literatüre uygundur [194-200]. Söz konusu şekiller incelendiğinde, her üç püskürtme basıncında da, enjektör delik çapı arttığında ve karşı-hava yoğunluğu azaldığında, yakıtların nüfuz derinliklerinin arttığı görülmüştür. Genel olarak, enjektör delik çapındaki birim artış başına, yakıtların nüfuz derinliklerindeki artış, 15 kg/m^3 karşı-hava yoğunluğunda daha fazladır. Ayrıca, her iki karşı-hava yoğunluğunda da, orta büyüklükteki enjektör delik çaplarına karşılık gelen (0,16 mm ve 0,32 mm) değerler için nüfuz derinliğindeki artış, daha düşük (0,08 mm) ve daha yüksek (0,64 mm) enjektör delik çaplarındaki artışa göre daha fazladır. Diğer bir ifade ile enjektör delik çapı 0,08 mm'den 0,16 mm'ye ve 0,32 mm'den 0,64 mm'ye arttırıldığında, nüfuz derinliklerinde çok fazla artış olmazken, enjektör delik çapı 0,16 mm'den 0,32 mm'ye arttırıldığında nüfuz derinliği görece daha fazla artmıştır. Enjektör delik çapı arttırıldığında püskürtülen yakıtın debisi artar. Bu durum, artan yakıt demetinin momentumuyla birlikte yakıt demeti daha geç parçalanarak nüfuz derinliğinin artmasına neden olur. Diğer taraftan, enjektör delik çapı 0,08 mm'den 0,16 mm'ye çıkarıldığında yani 2 kat arttırıldığında, hidrodinamik sınır tabakalar enjektör deliğinin içerisini tam olarak kapladığından dolayı hız profilleri benzer yapıda ve tam gelişmiş olacağından, kütleli debi yaklaşık 4 kat artar. Ancak, enjektör delik çapı 0,16 mm'den 0,32 mm'ye çıkarıldığında, 0,32 mm çaplı enjektörde sınır tabakanın etkisi, 0,16 mm çaplı enjektördeki sınır tabakaya göre, daha düşük düzeyde olduğundan ve hız profili silindirik yapıya daha benzer duruma geldiğinden dolayı, söz konusu hidrodinamik etki nedeniyle, debi 4 kattan daha fazla artar. Enjektör delik çapı 0,32 mm'den 0,64 mm'ye çıkarıldığında ise, akışın yapısı 0,32 mm çaplı enjektördeki gibi olduğundan, yani hız profilleri tam gelişmemiş ve benzer yapıda olduğundan dolayı, debi yine yaklaşık 4 kat artar. Buna bağlı olarak, enjektör delik çapı 0,08 mm'den 0,16 mm'ye çıkarıldığında, nüfuz derinliği çok fazla artmazken, enjektör delik çapı 0,16 mm'den 0,32 mm'ye çıkarıldığında nüfuz derinliği daha fazla artmış, fakat enjektör delik çapı 0,32 mm'den 0,64 mm'ye çıkarıldığında ise nüfuz derinliğindeki artış oranı bir miktar azalmıştır. Enjektör delik çapının artışıyla nüfuz derinliğindeki artış, karşı-hava

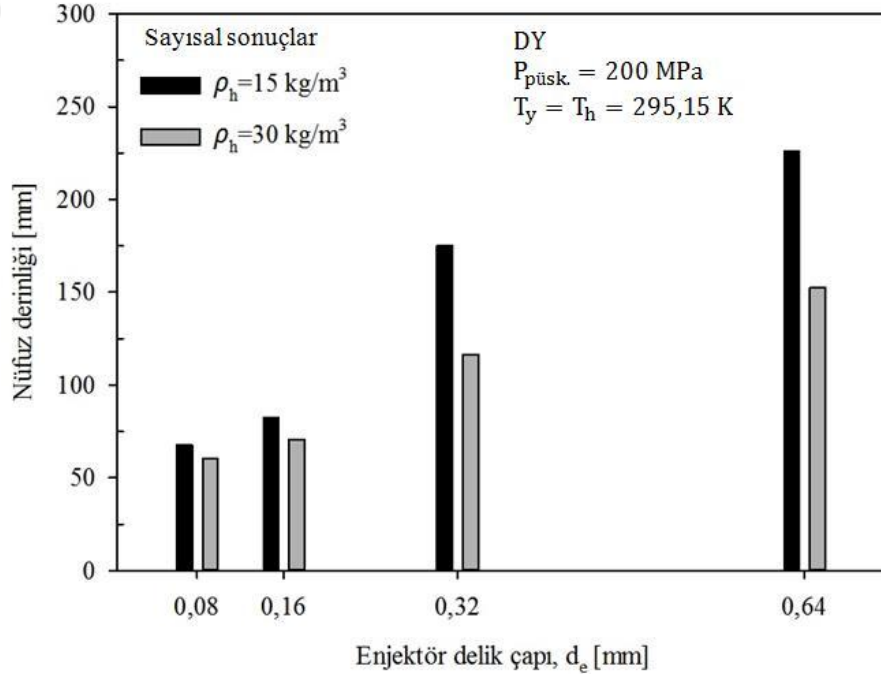
yoğunluğunun artışıyla artan aerodinamik direnç kuvvetinin etkisiyle (yakıt demetinin difüzyonunun zorlaşması) azalmıştır. Ayrıca, saf biyodizelin yoğunluğu, viskozitesi ve yüzey gerilimi daha yüksek olduğundan dolayı, yakıt demetinin parçalanmaya olan direnci daha yüksektir. Bu yüzden, daha geç parçalanan saf biyodizelin, enjektör delik çapından bağımsız olarak, nüfuz derinliği daha yüksek değerler almıştır.



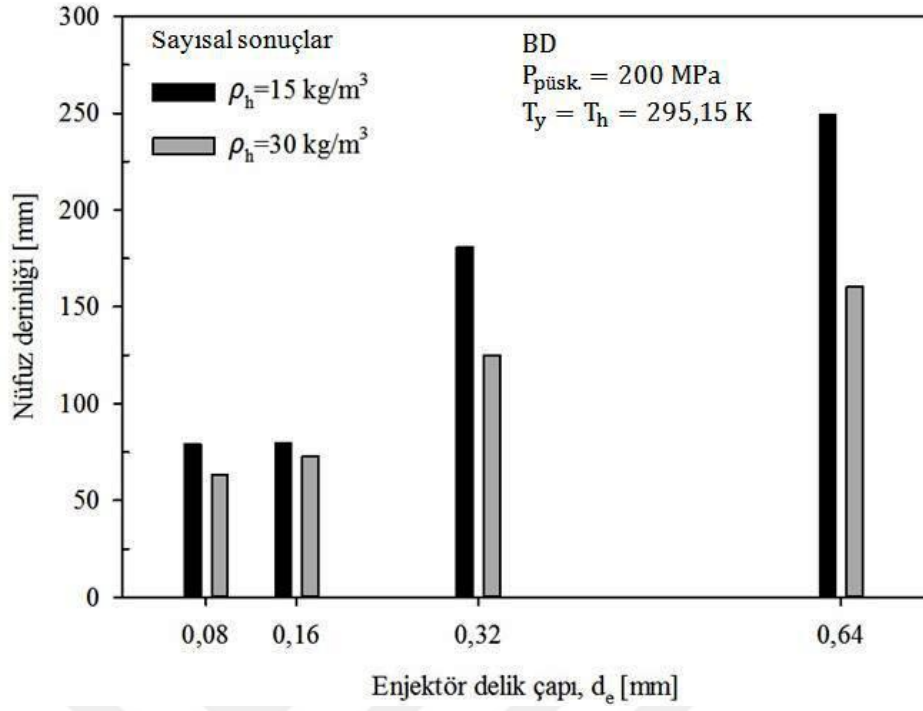
Şekil 4.80. Farklı karşı-hava yoğunlukları ve enjektör delik çapları ile 100 MPa püskürtme basıncı için ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



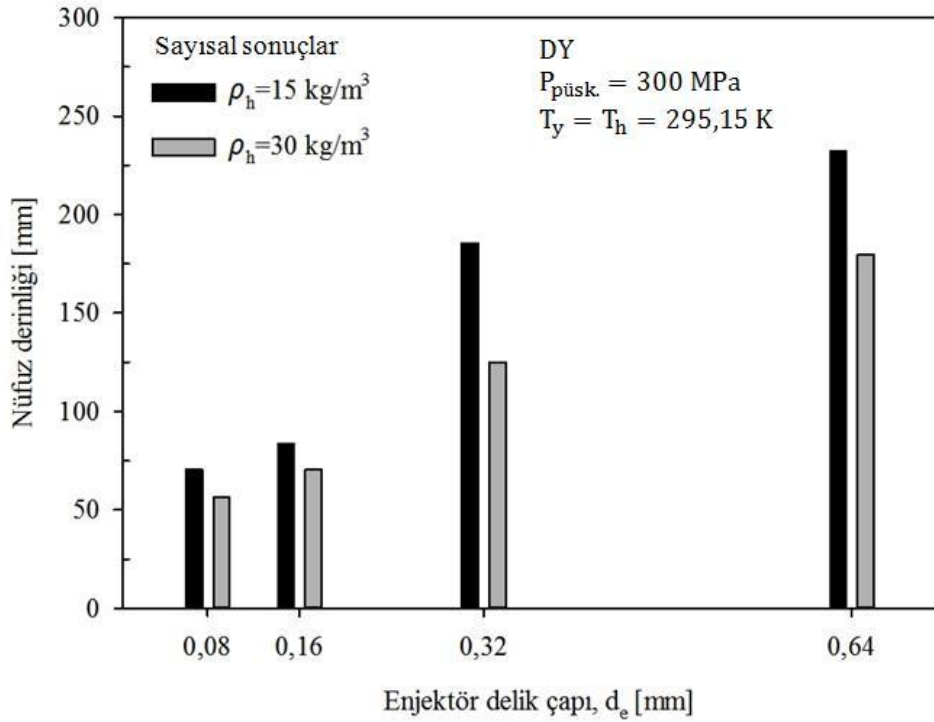
Şekil 4.81. Farklı karşı-hava yoğunlukları ve enjektör delik çapları ile 100 MPa püskürtme basıncı için üretilen saf biyodizelin nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



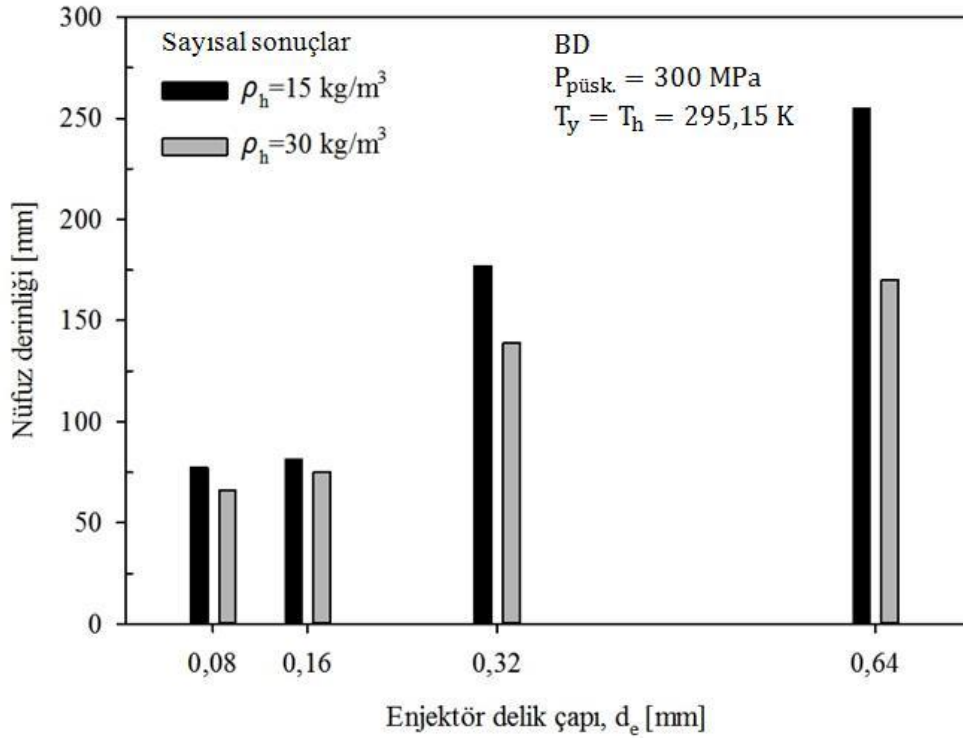
Şekil 4.82. Farklı karşı-hava yoğunlukları ve enjektör delik çapları ile 200 MPa püskürtme basıncı için ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



Şekil 4.83. Farklı karşı-hava yoğunlukları ve enjektör delik çapları ile 200 MPa püskürtme basıncı için üretilen saf biyodizelin nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



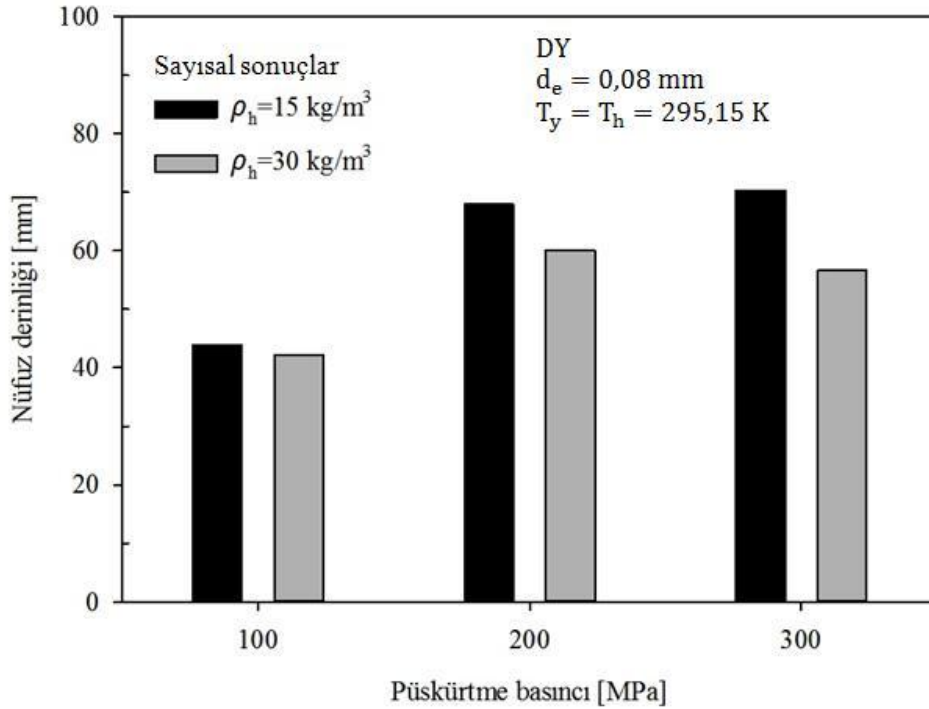
Şekil 4.84. Farklı karşı-hava yoğunlukları ve enjektör delik çapları ile 300 MPa püskürtme basıncı için ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



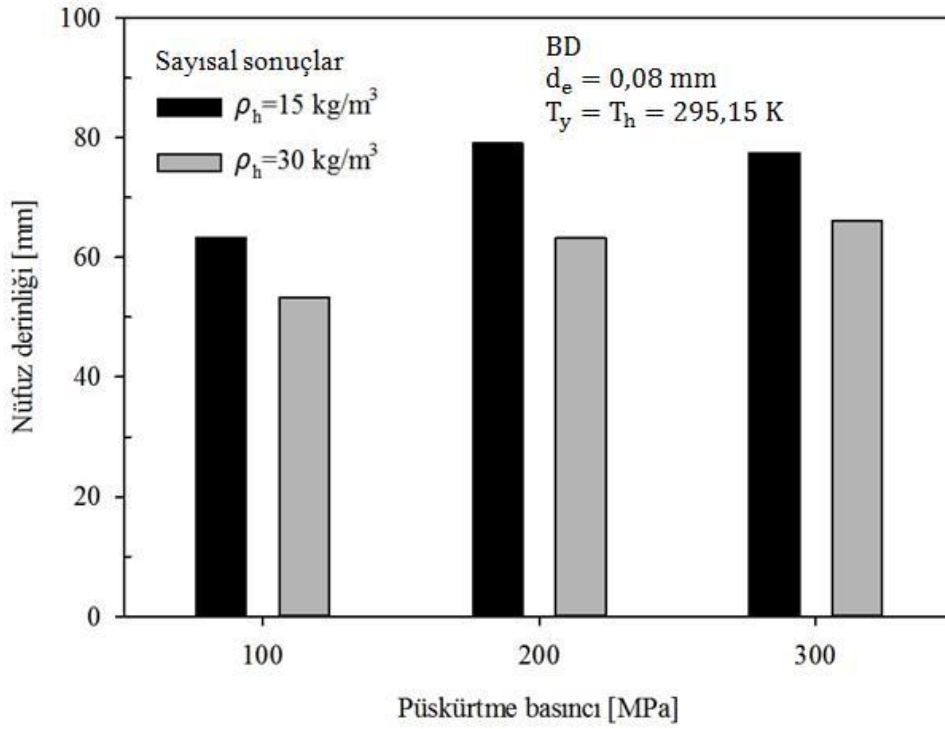
Şekil 4.85. Farklı karşı-hava yoğunlukları ve enjektör delik çapları ile 300 MPa püskürtme basıncı için üretilen saf biyodizelin nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar

Şekil 4.86–4.91’de, deneysel çalışmadaki [126] parametreler (T_y ve T_h) aynı tutularak, farklı karşı-hava yoğunluklarında (15 kg/m^3 ve 30 kg/m^3), satın alınan ticari saf dizel yakıtının (Şekil 4.86, 4.88 ve 4.90) ve bu tez çalışması kapsamında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin (Şekil 4.87, 4.89 ve 4.91) nüfuz derinliklerinin değişimleri, çeşitli enjektör delik çapları (0,08 mm, 0,32 mm ve 0,64 mm) ve püskürtme basınçları (100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa) altında, yukarıda belirlenen en uygun parametreler (ağ boyutu, türbülans modeli ve parçalanma modeli) kullanılarak Fluent paket programı yardımıyla sayısal olarak belirlenmiştir. Diğer bir ifade ile her bir yakıtın, çeşitli enjektör delik çaplarında elde edilen nüfuz derinliklerinin, farklı püskürtme basıncı ve karşı-hava yoğunluğuyla değişimleri incelenmiştir. Şekil 4.71 ve 4.72’de, aynı parametreler ve deney koşullarında, 0,16 mm enjektör delik çapı için, ticari saf dizel yakıtının ve saf biyodizelin nüfuz derinliği değerleri verildiğinden bu kısımda tekrar verilmemiştir. Söz konusu şekillere göre, enjektör delik çapı değerinden bağımsız olarak, püskürtme basıncı arttığında, yakıt demetinin enjektörden çıkış hızı arttığından dolayı, yakıtların nüfuz derinlikleri her iki karşı-hava yoğunluğu durumunda da genel olarak artmıştır. Enjektör

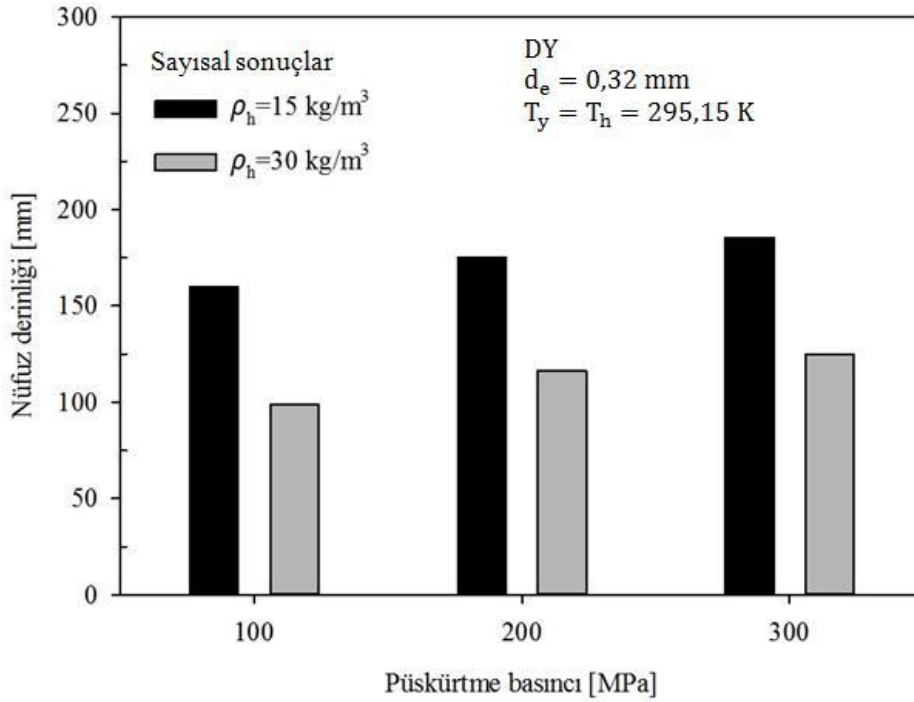
delik çapından bağımsız olarak, 30 kg/m^3 karşı-hava yoğunluğunda, püskürtme basıncının artışıyla yakıtların nüfuz derinliklerindeki artışın, genel olarak 15 kg/m^3 karşı-hava yoğunluğundaki artışa göre, daha az olduğu belirlenmiştir. Bu durum, karşı-hava yoğunluğu arttığında nüfuz derinliğinin azalmasına neden olan aerodinamik sürtünme kuvvetinin artışıyla açıklanabilir. Yani, 30 kg/m^3 karşı-hava yoğunluğunda artan aerodinamik sürtünme kuvvetinin etkisi, püskürtme basıncının nüfuz derinliğini artıran etkisini bir ölçüde azaltmıştır (baskılamıştır). Ayrıca, hem enjektör delik çapından hem de karşı-hava yoğunluğundan bağımsız olarak, püskürtme basıncı 100 MPa 'dan 200 MPa 'a artırıldığında, yakıtların nüfuz derinlikleri belirgin bir şekilde artarken, püskürtme basıncının daha fazla artırılması (200 MPa 'dan 300 MPa 'a) nüfuz derinliğini çok fazla artırmamıştır. Bu durum, çok yüksek püskürtme basınçlarında, yakıt demeti çok hızlı bir şekilde atomize olup karşı-havanın etkisiyle parçalanıp nüfuz derinliğinin azalmaya başlamasıyla açıklanabilir.



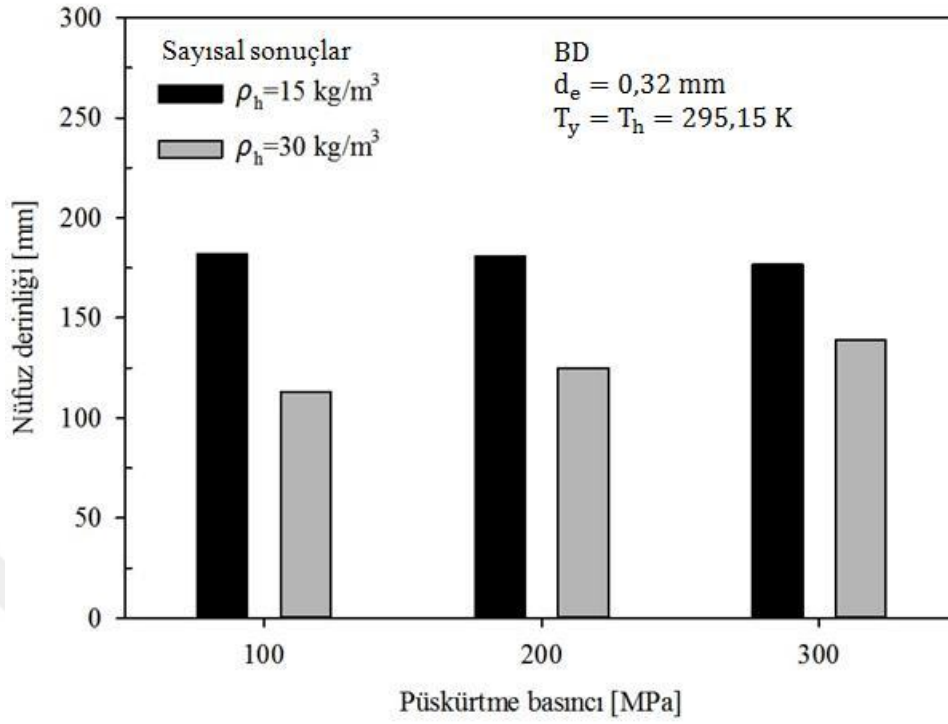
Şekil 4.86. Farklı karşı-hava yoğunlukları ve püskürtme basınçları ile $0,08 \text{ mm}$ enjektör delik çapı için ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



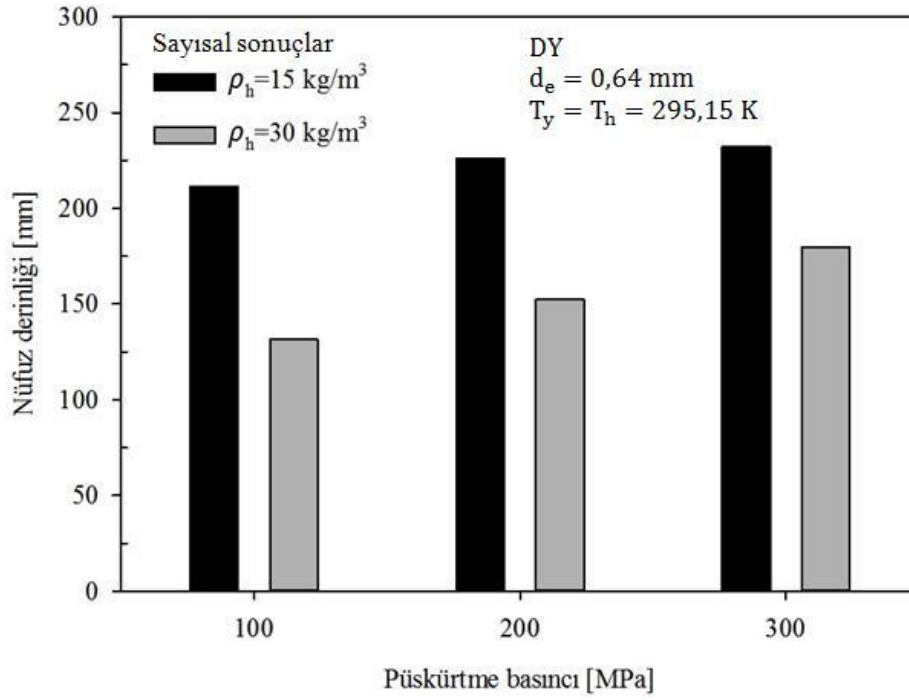
Şekil 4.87. Farklı karşı-hava yoğunlukları ve püskürtme basınçları ile 0,08 mm enjektör delik çapı için üretilen saf biyodizelin nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



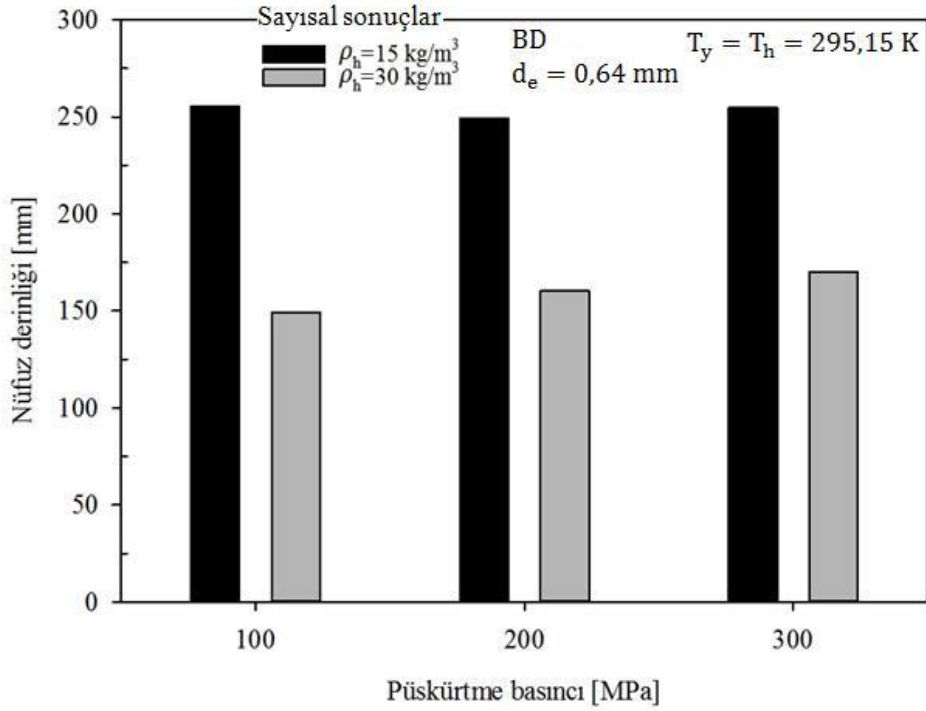
Şekil 4.88. Farklı karşı-hava yoğunlukları ve püskürtme basınçları ile 0,32 mm enjektör delik çapı için ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



Şekil 4.89. Farklı karşı-hava yoğunlukları ve püskürtme basınçları ile 0,32 mm enjektör delik çapı için üretilen saf biyodizelin nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



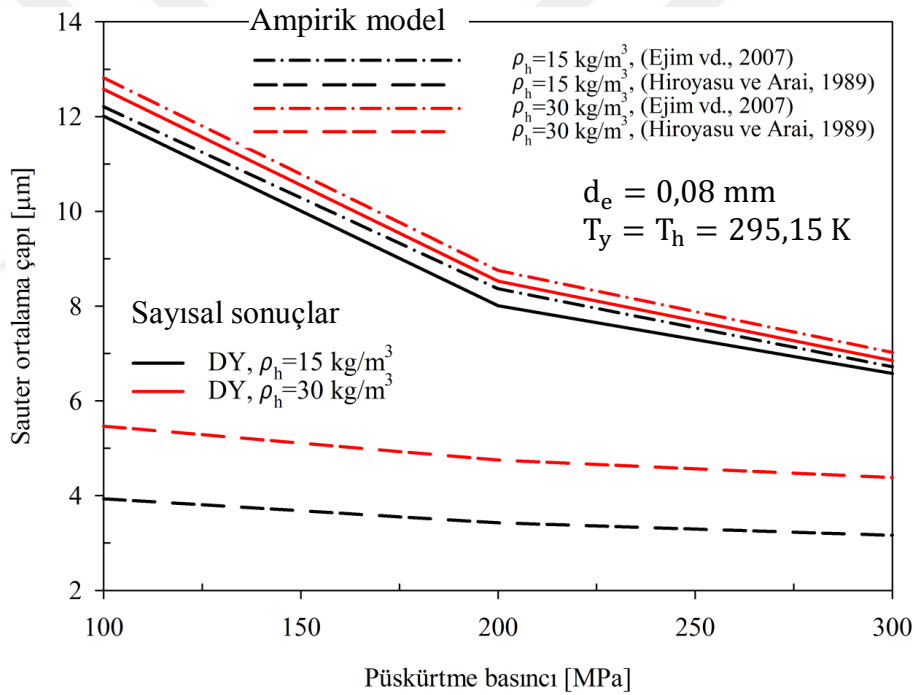
Şekil 4.90. Farklı karşı-hava yoğunlukları ve püskürtme basınçları ile 0,64 mm enjektör delik çapı için ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



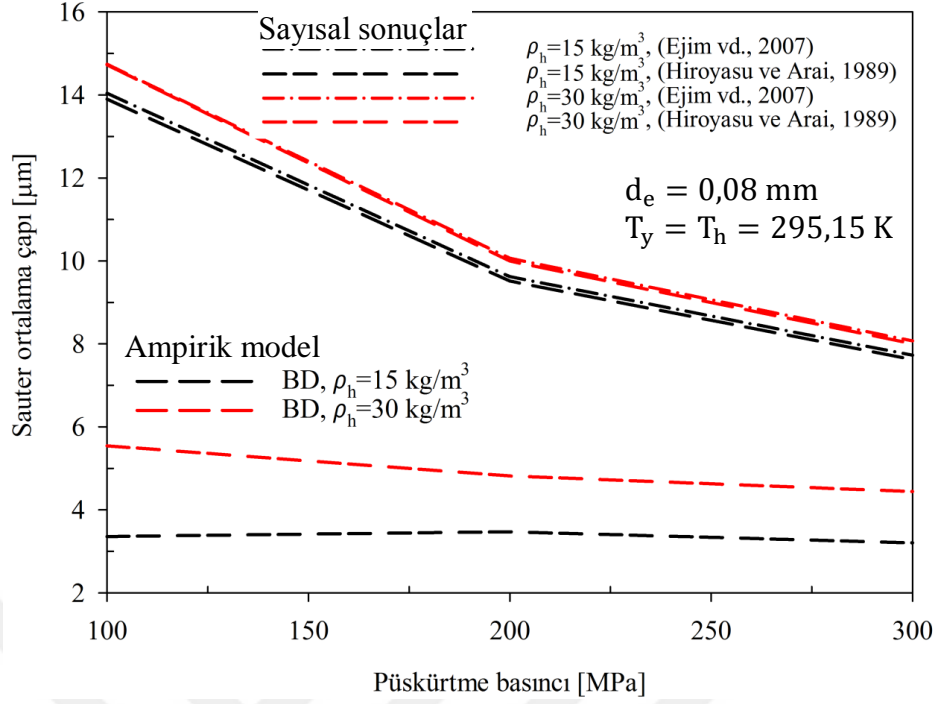
Şekil 4.91. Farklı karşı-hava yoğunlukları ve püskürtme basınçları ile 0,64 mm enjektör delik çapı için üretilen saf biyodizelin nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar

Şekil 4.92–4.97’de, deneysel çalışmadaki [126] parametreler (T_y ve T_h) aynı tutularak, farklı püskürtme basınçları (100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa), karşı-hava yoğunlukları (15 kg/m^3 ve 30 kg/m^3) ve enjektör delik çaplarında (0,08 mm, 0,32 mm ve 0,64 mm), satın alınan ticari saf dizel yakıtının (Şekil 4.92, 4.94 ve 4.96) ve bu tez çalışması kapsamında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin (Şekil 4.93, 4.95 ve 4.97), yukarıda belirlenen en uygun parametreler (ağ boyutu, türbülans modeli ve parçalanma modeli) kullanılarak Fluent paket programı yardımıyla elde edilen Sauter ortalama çap değerlerinin değişimleri ampirik modeller ile karşılaştırılmıştır. Diğer bir anlatımla, her bir yakıtın, çeşitli enjektör delik çaplarında, Sauter ortalama çap değerlerinin farklı püskürtme basıncı ve karşı-hava yoğunluğuyla olan değişimleri incelenmiştir. Şekil 4.73 ve 4.74’te, aynı parametreler ve deney koşulları ile farklı püskürtme basıncı ve karşı-hava yoğunluğunda, 0,16 mm enjektör delik çapı için saf dizel yakıtının ve saf biyodizelin sayısal olarak elde edilen Sauter ortalama çap değerlerinin değişimleri verildiğinden, bu kısımda tekrar verilmemiştir. Söz konusu şekillere göre, enjektör delik çapı değerinden bağımsız olarak, karşı-havanın yoğunluğu azaldığında ve püskürtme basıncı arttığında, yakıtların Sauter ortalama çap değerleri azalmıştır. Ayrıca, tüm enjektör delik çapları,

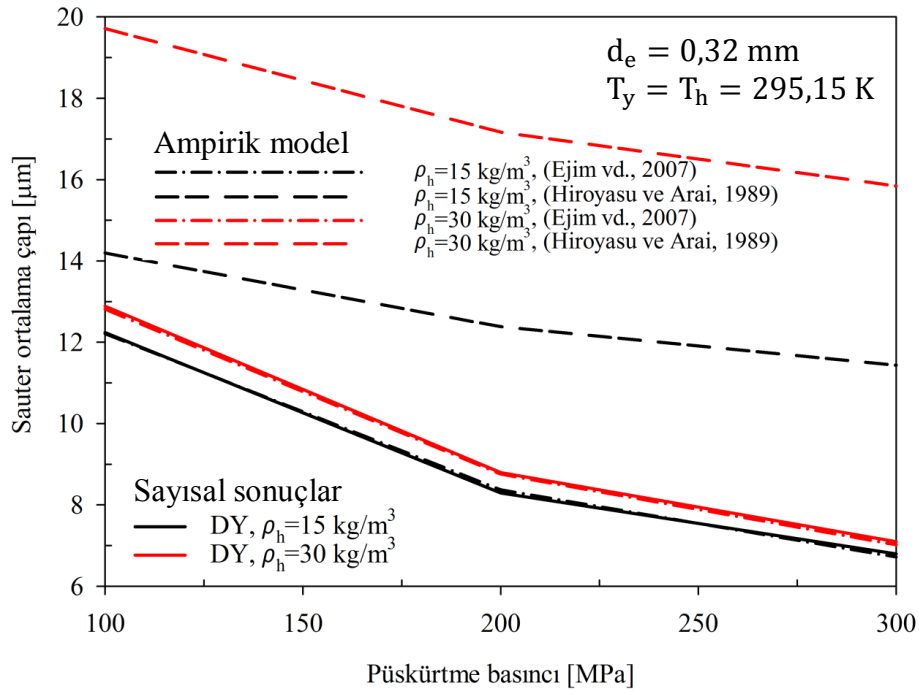
püskürtme basınçları ve karşı-hava yoğunluğu değerleri için, yakıtların sayısal ortalama çap değerlerinin, Ejim ve arkadaşları [185] tarafından önerilen modelin sonuçlarına yakın olduğu görülmüştür. Nispeten, 0,08 mm enjektör delik çapında (Şekil 4.92) saf dizel yakıtı için elde edilen sayısal sonuçlar ile Ejim ve arkadaşları [185] tarafından önerilen ampirik model arasında farklılıklar görülmektedir. Karşı-hava yoğunluğu arttığında, yakıt damlacıklarının birbirlerine çarpma (collision) olasılıkları arttığı için bir araya gelip nispeten daha büyük çaplı yakıt damlacıkları meydana getirdiklerinden dolayı yakıtların ortalama çap değerleri artar. Tam tersi olarak, karşı-hava yoğunluğu azaldığında, yakıtların ortalama çap değerleri azalır. Ayrıca, püskürtme basıncının artışı da, yakıt demetinin hızının artmasına, dolayısıyla daha küçük damlacıklara parçalanmasına neden olur ki, bu durum Sauter ortalama çap değerlerinin azalmasına neden olur.



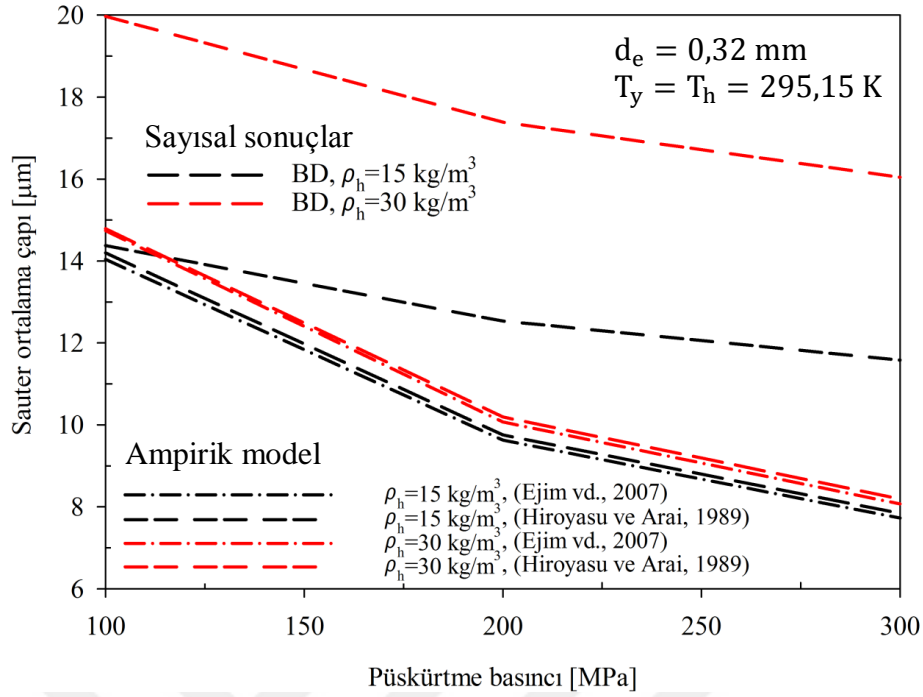
Şekil 4.92. Farklı karşı-hava yoğunlukları ve 0,08 mm enjektör delik çapı için ticari saf dizel yakıtının Sauter ortalama çapının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması



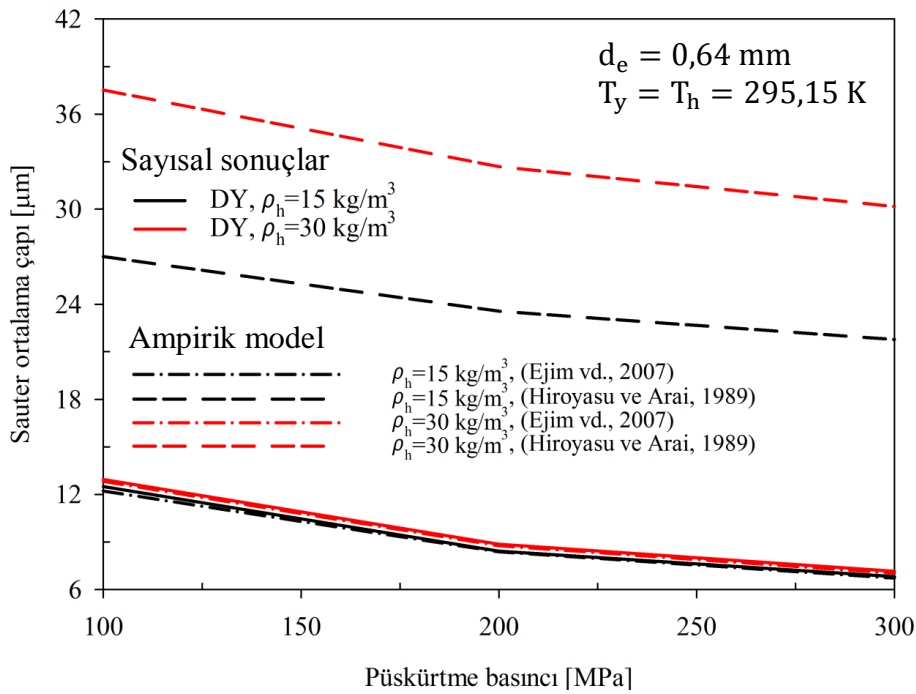
Şekil 4.93. Farklı karşı-hava yoğunlukları ve 0,08 mm enjektör delik çapı için üretilen saf biyodizelin Sauter ortalamama çapının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması



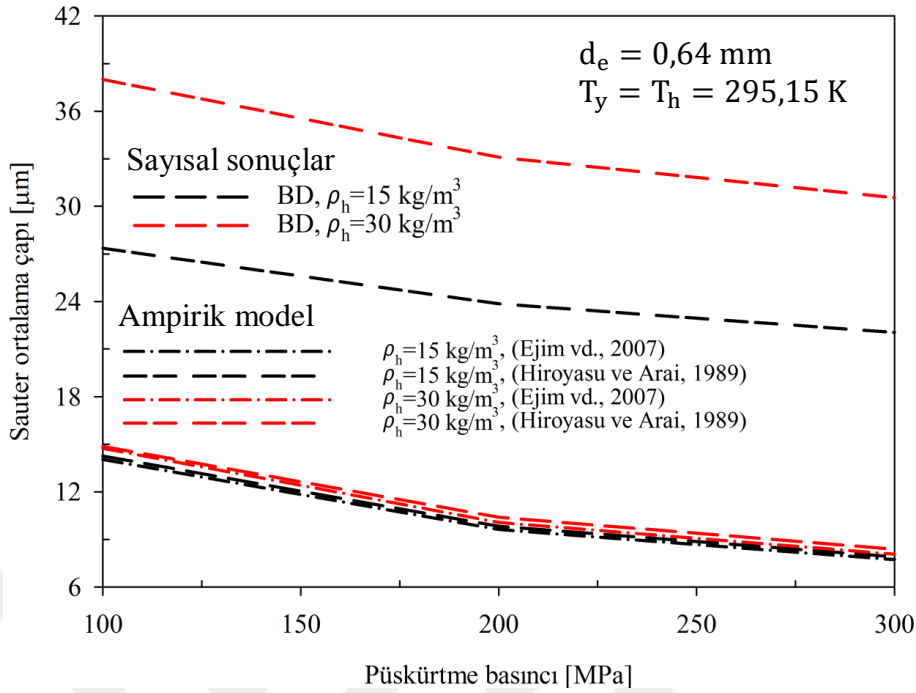
Şekil 4.94. Farklı karşı-hava yoğunlukları ve 0,32 mm enjektör delik çapı için ticari saf dizel yakıtının Sauter ortalamama çapının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması



Şekil 4.95. Farklı karşı-hava yoğunlukları ve 0,32 mm enjektör delik çapı için üretilen saf biyodizelin Sauter ortalama çapının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması



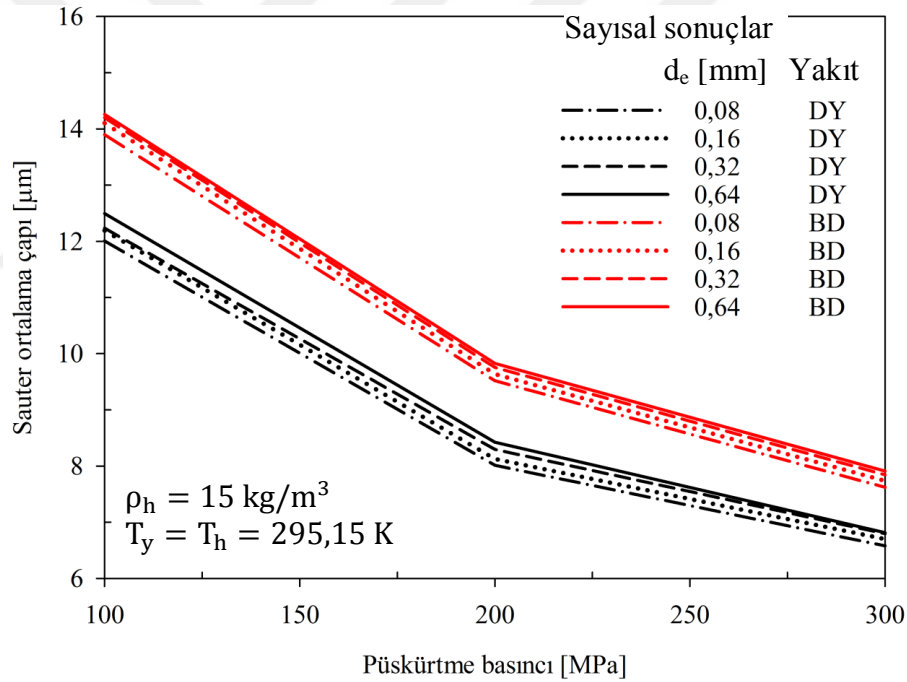
Şekil 4.96. Farklı karşı-hava yoğunlukları ve 0,64 mm enjektör delik çapı için ticari saf dizel yakıtının Sauter ortalama çapının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması



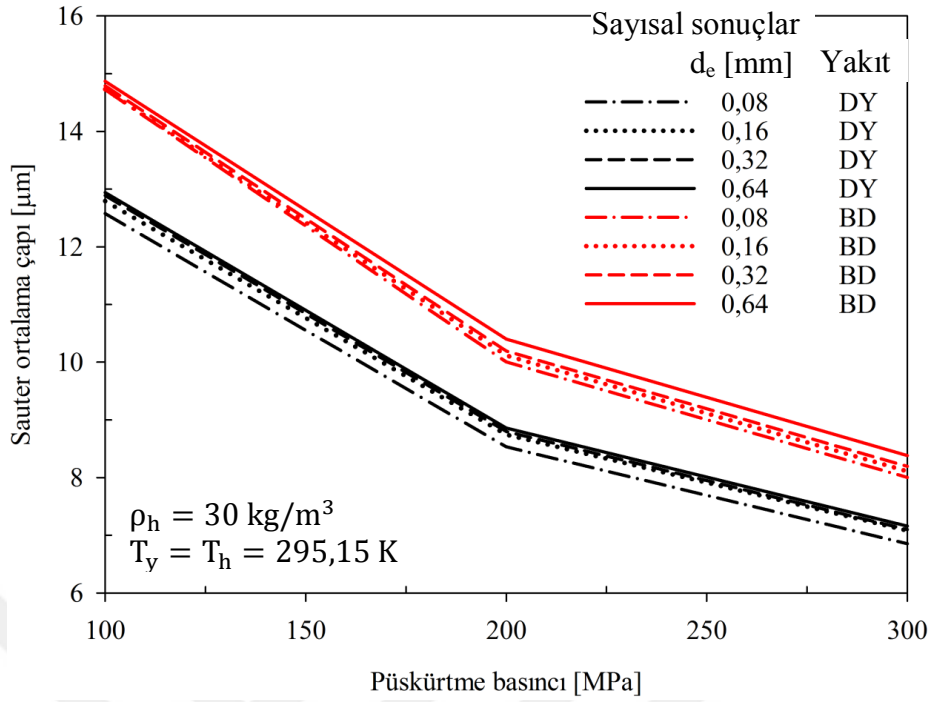
Şekil 4.97. Farklı karşı-hava yoğunlukları ve 0,64 mm enjektör delik çapı için üretilen saf biyodizelin Sauter ortalama çapının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması

Şekil 4.98 ve 4.99'da, deneysel çalışmadaki [126] parametreler (T_y ve T_h) aynı tutularak, farklı püskürtme basınçlarında (100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa), satın alınan ticari saf dizel yakıtının ve bu tez çalışması kapsamında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin, yukarıda belirlenen en uygun parametreler (ağ boyutu, türbülans modeli ve parçalanma modeli) kullanılarak Fluent paket programı yardımıyla elde edilen Sauter ortalama çap değerlerinin, farklı enjektör delik çapına (0,08 mm, 0,16 mm, 0,32 mm ve 0,64 mm) göre değişimleri, 15 kg/m^3 (Şekil 4.98) ve 30 kg/m^3 (Şekil 4.99) karşı-hava yoğunluklarında karşılaştırılmıştır. Diğer bir ifade ile enjektör delik çapının söz konusu yakıtların Sauter ortalama çap değerlerine olan etkileri incelenmiştir. Söz konusu şekillerden, her iki karşı-hava yoğunluğu değerinde de, enjektör delik çapı arttığında, yakıtların Sauter ortalama çap değerlerinin arttığı görülmüştür. Ayrıca, enjektör delik çapından bağımsız olarak, her iki karşı-hava yoğunluğunda da, saf biyodizelin Sauter ortalama çap değerlerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bilindiği gibi, saf dizel yakıtının viskozite ve yüzey gerilimi değerleri daha düşük olduğundan, yakıt damlacıkları karşı-havanın etkisiyle rahatça parçalanarak daha küçük damlacıklar haline geldiğinden

dolayı, dizel yakıtının Sauter ortalama çap değerleri, her iki karşı-hava yoğunluğu değerinde de, enjektör delik çapından bağımsız olarak daha düşüktür. Bunun aksine, saf biyodizelin yüksek viskozite ve yüzey gerilimi nedeniyle, yakıt damlacıkları aerodinamik sürtünme kuvvetine nispeten daha fazla direnç göstererek parçalanması zorlaşır yani daha büyük çaplı yakıt damlacıkları meydana gelir. Bu yüzden, saf biyodizelin Sauter ortalama çap değerleri daha yüksektir. Diğer taraftan, enjektör delik çapı arttığında, doğal olarak enjektörden püskürtülen yakıt damlacıklarının başlangıç (ilk) çap değerleri de artacağından, yakıtların Sauter ortalama çap değerleri, her iki karşı-hava yoğunluğunda da artmıştır. Son olarak, yukarıda açıklanan nedenlerden dolayı, karşı-hava yoğunluğu ve enjektör delik çapından bağımsız olarak, püskürtme basıncının artışıyla, yakıtların ortalama çap değerleri azalmıştır.



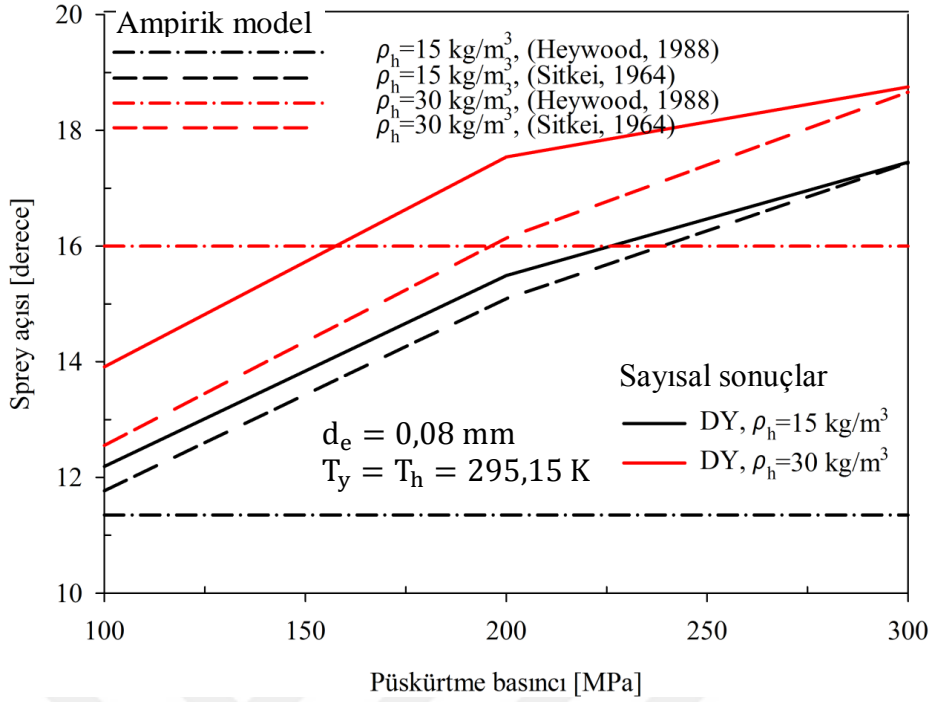
Şekil 4.98. Farklı enjektör delik çapları ve 15 kg/m^3 karşı-hava yoğunluğu için ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin Sauter ortalama çaplarının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması



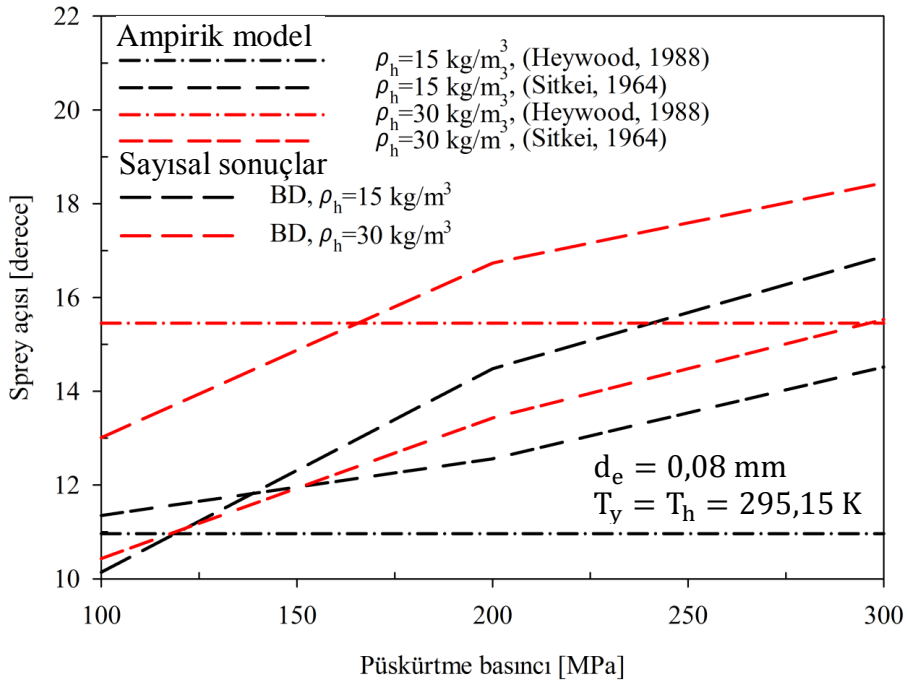
Şekil 4.99. Farklı enjektör delik çapları ve 30 kg/m^3 karşı-hava yoğunluğu için ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin Sauter ortalama çaplarının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması

Şekil 4.100–4.105’te, deneysel çalışmadaki [126] parametreler (T_y ve T_h) aynı tutularak, farklı püskürtme basınçları (100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa), karşı-hava yoğunlukları (15 kg/m^3 ve 30 kg/m^3) ve enjektör delik çaplarında (0,08 mm, 0,32 mm ve 0,64 mm), satın alınan ticari saf dizel yakıtının (Şekil 4.100, 4.102 ve 4.104) ve bu tez çalışması kapsamında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin (Şekil 4.101, 4.103 ve 4.105), yukarıda belirlenen en uygun parametreler (ağ boyutu, türbülans modeli ve parçalanma modeli) kullanılarak Fluent paket programı yardımıyla elde edilen spray açısı değerlerinin değişimleri, ampirik modeller ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.76 ve 4.77’de, aynı parametreler ve deney koşullarında, 0,16 mm enjektör delik çapı için saf dizel yakıtı ve saf biyodizelin spray açısı değerleri verildiğinden bu kısımda tekrar verilmemiştir. Söz konusu şekillerden, enjektör delik çapı değerlerinden bağımsız olarak, karşı-hava yoğunluğu ve püskürtme basıncı arttığında, yakıtların spray açısı değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Heywood [169] tarafından önerilen model, günümüz koşullarındaki yüksek püskürtme basınçlarında elde edilen spray açısı değerlerini, ne sayısal değer olarak ne de karakteristik olarak iyi tahmin edebilmiştir. Bunun aksine, Sitkei [183] tarafından önerilen model, spray

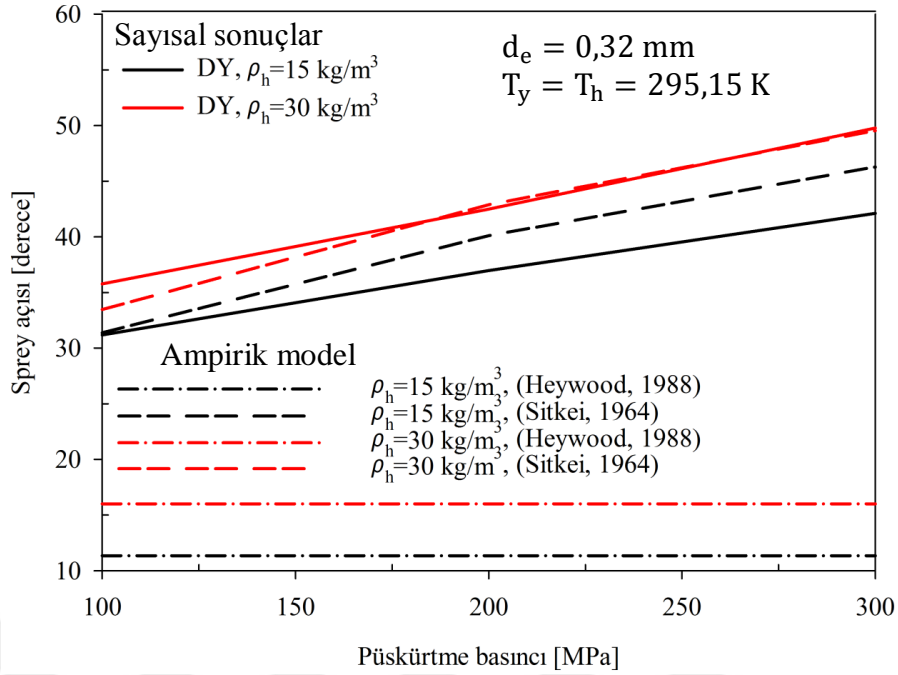
açısının püskürtme basıncı ve karşı-hava yoğunluğuyla olan değişimini, karakteristik olarak iyi tahmin etmiş olsa da, sayısal değer olarak bazı durumlar hariç (0,08 mm enjektör delik çapı, 15 kg/m³ ve 30 kg/m³ karşı-hava yoğunlukları, 300 MPa püskürtme basıncında (Şekil 4.100); 0,32 mm enjektör delik çapı, 15 kg/m³ karşı-hava yoğunluğu, 100 MPa püskürtme basıncı ile 30 kg/m³ karşı-hava yoğunluğunda 200 MPa ve 300 MPa püskürtme basınçlarında (Şekil 4.102); son olarak 0,64 mm enjektör delik çapı, 15 kg/m³ ve 30 kg/m³ karşı-hava yoğunlukları, 100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa püskürtme basınçlarında (Şekil 4.104) saf dizel yakıtı için elde edilen değerler) yine iyi tahmin edememiştir. Enjektör delik çapı değerinden bağımsız olarak, karşı-hava yoğunluğunun artışıyla artan aerodinamik sürtünme kuvvetinin etkisiyle, yakıt demeti aksel olarak daha fazla ilerleyemediğinden dolayı, momentumun korunumu gereği yakıt demeti radyal yöne harekete zorlanır. Bu durum, yakıtların sprey açılarının artmasına neden olmuştur. Ayrıca, yine enjektör delik çapı değerinden bağımsız olarak, püskürtme basıncının artışıyla, yakıt damlacıklarının enjektörden çıkış hızı arttığından dolayı, karşı-havanın etkisiyle yakıt demeti yanma odası içerisinde aksel ve radyal olarak görece daha geniş bir alana yayılır (saçılır). Bu durum yine, yakıtların sprey açılarının artmasına neden olmuştur. Diğer bir anlatımla, püskürtme basıncının artışıyla artan türbülans titreşim şiddeti nedeniyle, yakıtların sprey açıları artmıştır [176]. Yakıtın yoğunluğuyla, sprey açısı ters orantılıdır. Dizel yakıtının yoğunluğunun daha düşük olması, karşı-havanın etkisiyle yakıt demetinin ucundaki yakıt damlacıklarının daha kolay bir şekilde parçalanıp, yanma odası içerisinde radyal olarak görece daha uzak noktalara dağılmasına, dolayısıyla sprey alanının büyümesine yani sprey açısının artmasına neden olur. Tam tersi olarak, biyodizelin yüksek yoğunluk, viskozite ve yüzey gerilimi nedeniyle, görece büyük çaplı yakıt damlacıkları (özellikle yakıt demetinin kenarlarında bulunan) kolayca parçalanamaz ve yanma odası içerisinde geniş bir alana yayılamaz (sprey projeksiyon alanı azalır). Bu yüzden, dizel yakıtının sprey açısı değeri daha fazladır.



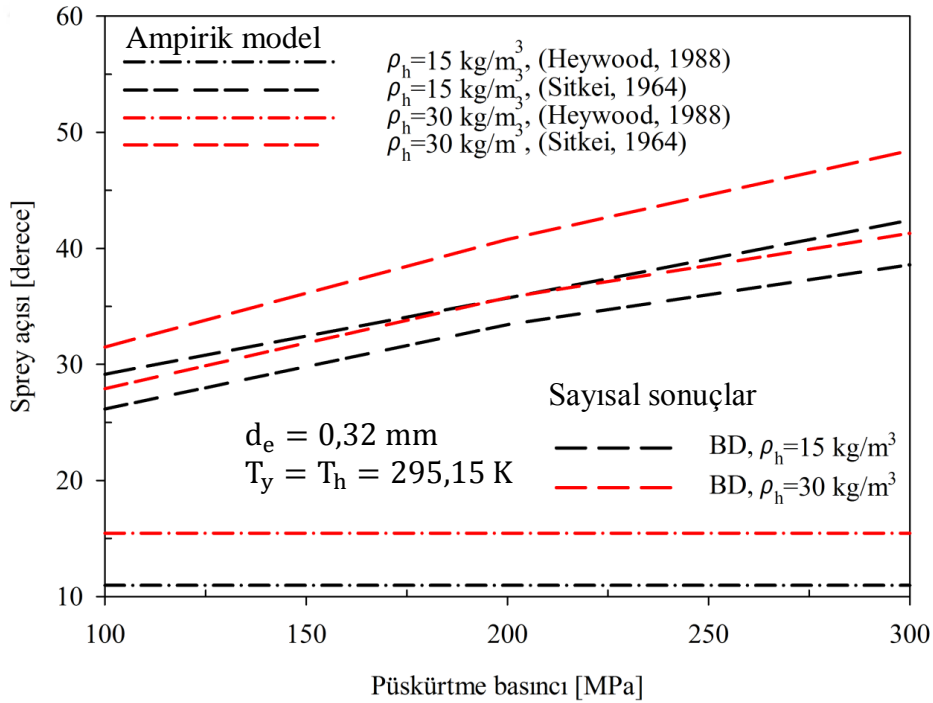
Şekil 4.100. Farklı karşı-hava yoğunlukları ve 0,08 mm enjektör delik çapı için ticari saf dizel yakıtının spray açısının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması



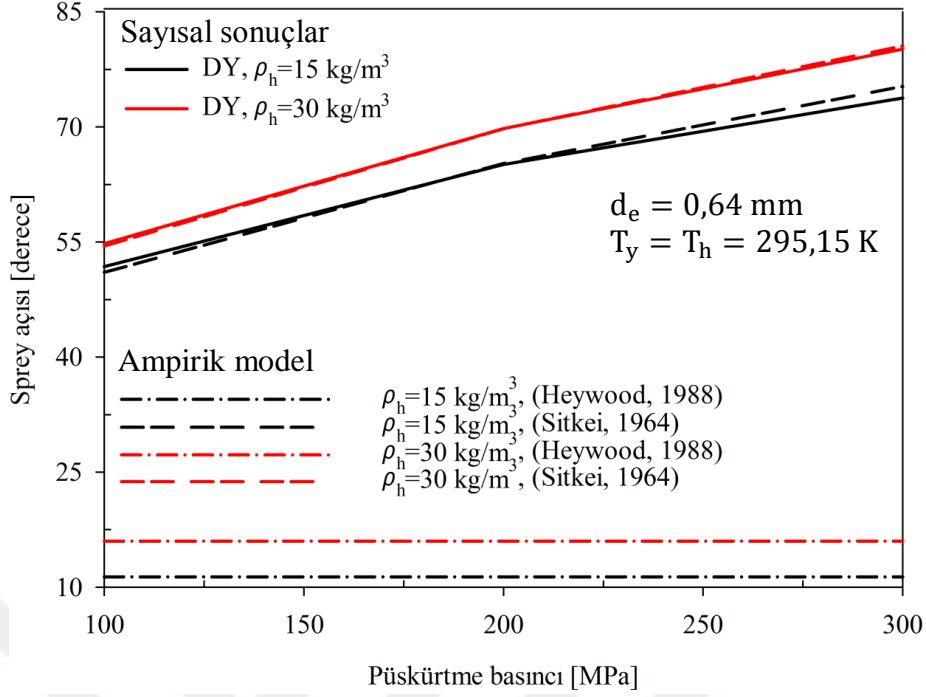
Şekil 4.101. Farklı karşı-hava yoğunlukları ve 0,08 mm enjektör delik çapı için üretilen saf biyodizelin spray açısının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması



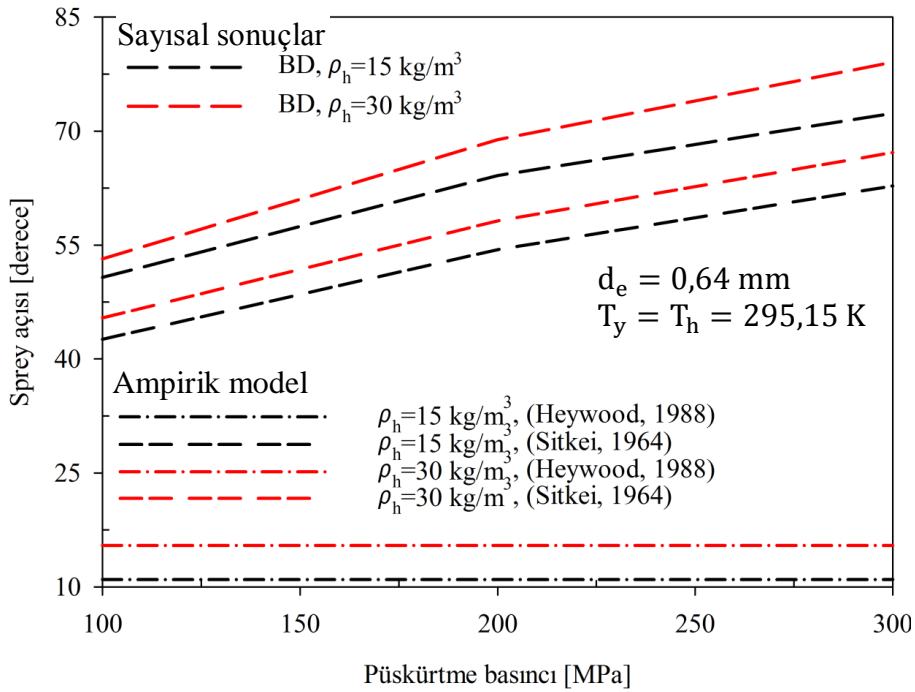
Şekil 4.102. Farklı karşı-hava yoğunlukları ve 0,32 mm enjektör delik çapı için ticari saf dizel yakıtının spray açısının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması



Şekil 4.103. Farklı karşı-hava yoğunlukları ve 0,32 mm enjektör delik çapı için üretilen saf biyodizelin spray açısının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması

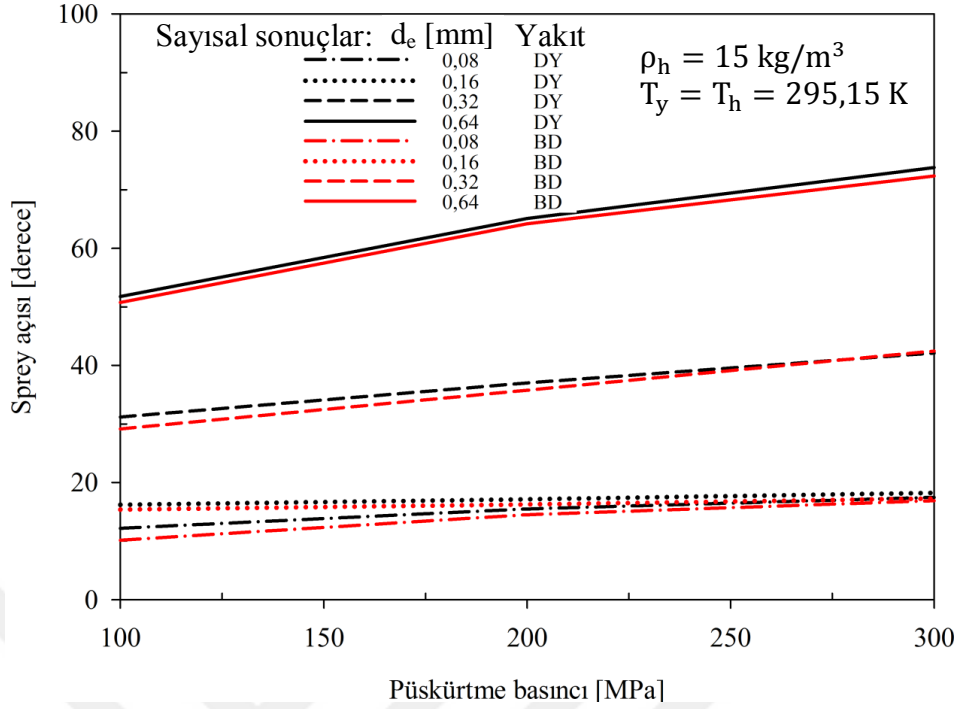


Şekil 4.104. Farklı karşı-hava yoğunlukları ve 0,64 mm enjektör delik çapı için ticari saf dizel yakıtının sprej açısının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması

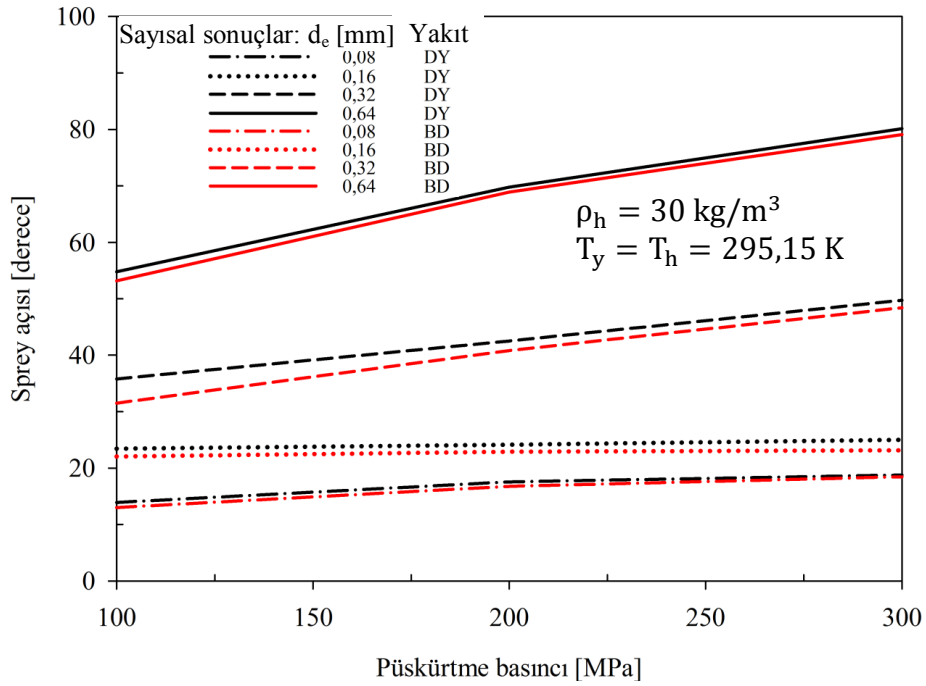


Şekil 4.105. Farklı karşı-hava yoğunlukları ve 0,64 mm enjektör delik çapı için üretilen saf biyodizelin sprej açısının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması

Şekil 4.106 ve 4.107’de, deneysel çalışmadaki [126] parametreler (T_y ve T_h) aynı tutularak, farklı püskürtme basınçlarında (100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa), satın alınan ticari saf dizel yakıtının ve bu tez çalışması kapsamında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin, yukarıda belirlenen en uygun parametreler (ağ boyutu, türbülans modeli ve parçalanma modeli) kullanılarak Fluent paket programı yardımıyla elde edilen sprej açısı değerlerinin, farklı enjektör delik çapına (0,08 mm, 0,16 mm, 0,32 mm ve 0,64 mm) göre değişimleri, 15 kg/m^3 (Şekil 4.106) ve 30 kg/m^3 (Şekil 4.107) karşı-hava yoğunluklarında karşılaştırılmıştır. Diğer bir ifade ile enjektör delik çapının, yakıtların sprej açısı değerlerine olan etkileri incelenmiştir. Söz konusu şekillerden görüldüğü gibi, enjektör delik çapı değerlerinden bağımsız olarak, her iki karşı-hava yoğunluğunda da, saf dizel yakıtının sprej açısı değerleri saf biyodizelininkine göre daha fazladır. Ayrıca, her iki karşı-hava yoğunluğunda da, enjektör delik çapı değeri arttıkça, yakıtların sprej açısı değerleri artmıştır. Biyodizelin viskozitesi ve yüzey gerilimi daha yüksek olduğundan dolayı, yakıt demetinin özellikle kenarlarında bulunan görece daha büyük çaplı yakıt damlacıkları, kolayca parçalanmadığından sprejin projeksiyon alanı genişleyemez yani yakıt demeti yanma odasında daha dar bir alana yayılır. Oysaki viskozitesi ve yüzey gerilimi daha düşük olan saf dizel yakıtı, karşı-havanın etkisiyle kolayca parçalandığından dolayı, yakıt demeti radyal olarak görece daha geniş bir alana yayılır. Bu durum, saf biyodizelin sprej açısı değerini azaltırken, saf dizel yakıtınınkini artırır. Son olarak, enjektör delik çapı değeri arttığında, süreklilik denklemi gereği, yanma odasına püskürtülen yakıtın debisi de arttığı için, yakıt demetinin momentumu ve yakıt damlacıklarının birbirlerine çarpma ihtimali artar. Böylece, yakıt demeti, karşı-havanın da etkisiyle aksel (nüfuz derinliği artar) ve radyal olarak görece daha geniş bir alana yayılır ki, bu durum yakıtların sprej açılarının artmasına neden olur.

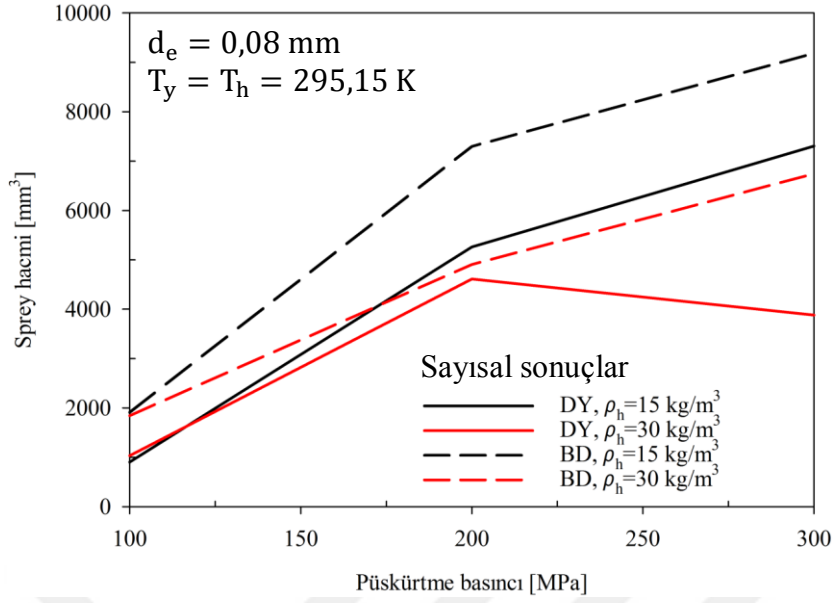


Şekil 4.106. Farklı enjektör delik çapları ve 15 kg/m^3 karşı-hava yoğunluğu için ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin spray açılarının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması

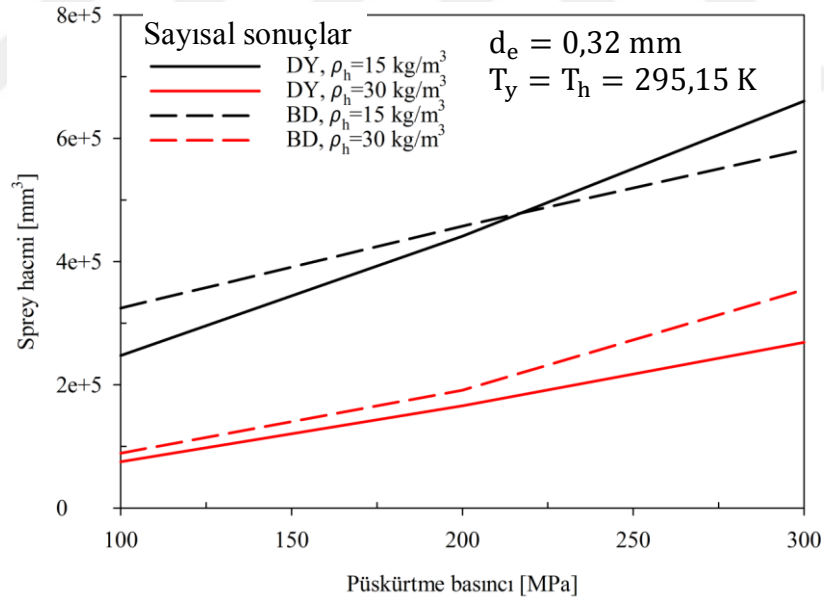


Şekil 4.107. Farklı enjektör delik çapları ve 30 kg/m^3 karşı-hava yoğunluğu için dizel yakıtının ve üretilen biyodizelin spray açılarının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması

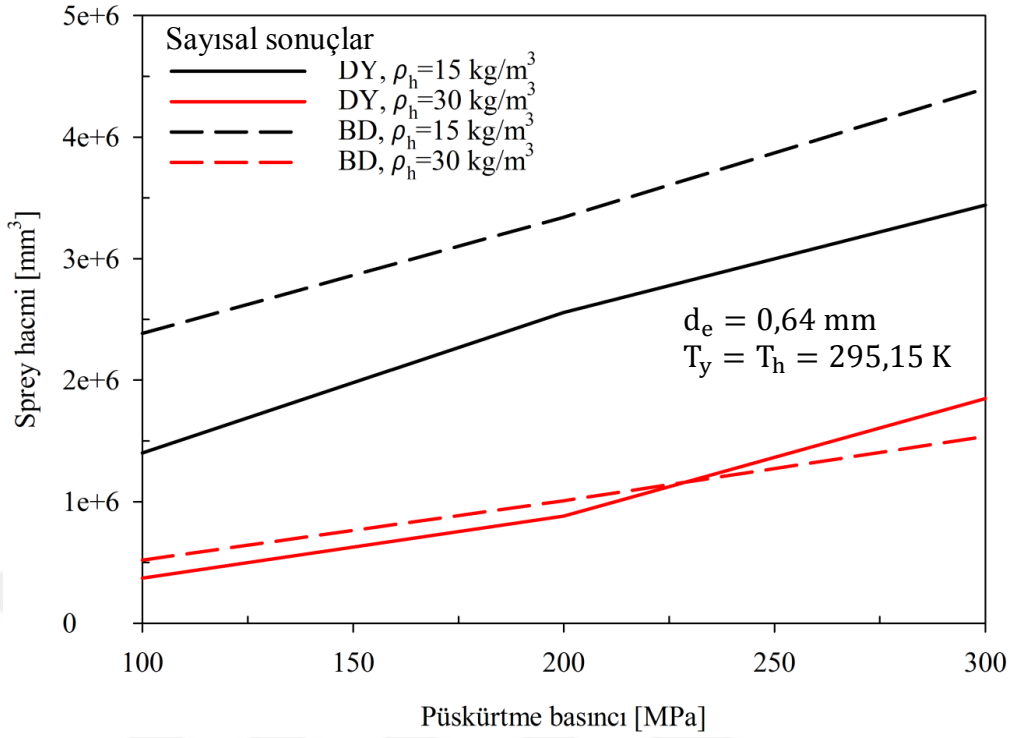
Şekil 4.108–4.110’da, deneysel çalışmadaki [126] parametreler (T_y ve T_h) aynı tutularak, farklı püskürtme basınçları (100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa), karşı-hava yoğunlukları (15 kg/m^3 ve 30 kg/m^3) ve enjektör delik çaplarında (0,08 mm, 0,32 mm ve 0,64 mm), satın alınan ticari saf dizel yakıtının ve bu tez çalışması kapsamında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin, yukarıda belirlenen en uygun parametreler (ağ boyutu, türbülans modeli ve parçalanma modeli) ve Fluent paket programı yardımıyla elde edilen nüfuz derinliği ile spray açısı değerlerini kullanarak, (3.114) numaralı denklemden hesaplanan spray hacmi değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Diğer bir anlatımla, her bir yakıtın, çeşitli enjektör delik çaplarında elde edilen spray hacmi değerlerinin, farklı püskürtme basıncı ve karşı-hava yoğunluğuyla olan değişimleri incelenmiştir. Şekil 4.79’da, aynı parametreler ve deney koşullarında, 0,16 mm enjektör delik çapı için saf dizel yakıtının ve saf biyodizelin spray hacmi değerleri verildiğinden bu kısımda tekrar verilmemiştir. Söz konusu şekillere göre, enjektör delik çapı değerinden bağımsız olarak, tüm püskürtme basınçlarında, nüfuz derinliğinin etkisinin ön plana çıkması nedeniyle, yakıtların 15 kg/m^3 karşı-hava yoğunluğundaki spray hacmi değerlerinin 30 kg/m^3 karşı-hava yoğunluğundaki spray hacmi değerlerinden daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, yine aynı sebepten ötürü (biyodizel kullanımında artan nüfuz derinliğinin etkisinin ön plana çıkması), enjektör delik çapı değerinden ve karşı-hava yoğunluğundan bağımsız olarak, genelde saf biyodizelin spray hacmi değerlerinin daha fazla olduğu görülmüştür. Sadece, 0,32 mm enjektör delik çapı, 15 kg/m^3 karşı-hava yoğunluğu, 300 MPa püskürtme basıncında (Şekil 4.109) ve 0,64 mm enjektör delik çapı, 30 kg/m^3 karşı-hava yoğunluğu, 300 MPa püskürtme basıncında (Şekil 4.110), saf dizel yakıtının spray hacmi değerleri spray açısının etkisinden dolayı daha fazladır. Püskürtme basıncının artışıyla, hem spray açısı hem de nüfuz derinliği değerleri arttığından dolayı, karşı-hava yoğunluğundan bağımsız olarak yakıtların spray hacmi değerleri artmıştır.



Şekil 4.108. Farklı karşı-hava yoğunlukları ve 0,08 mm enjektör delik çapı için ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin sprey hacimlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin sayısal sonuçlar

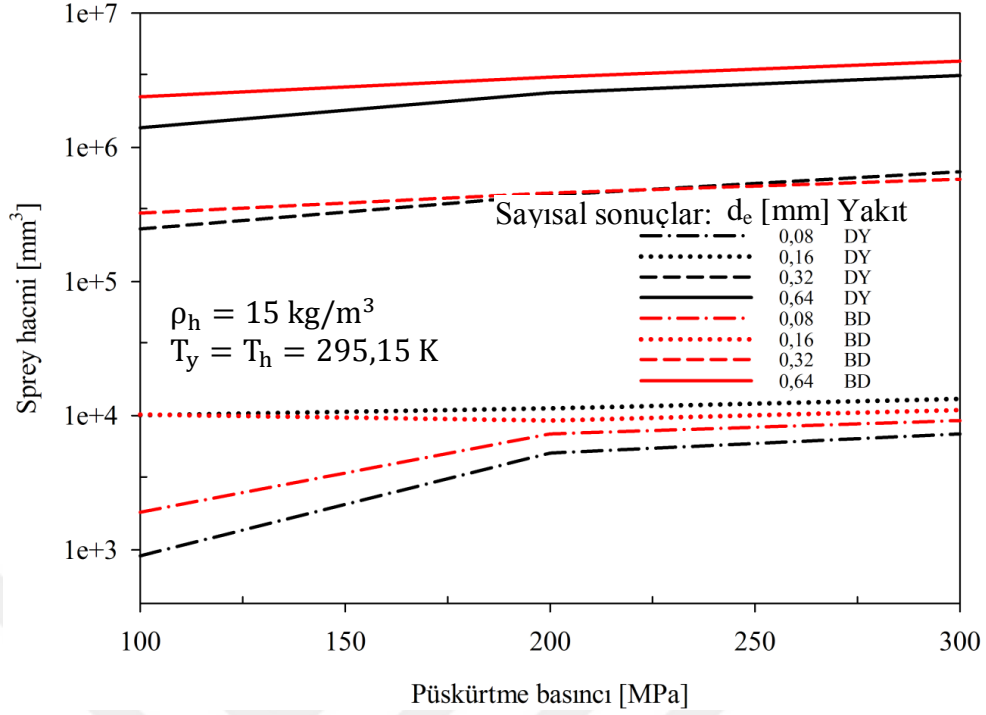


Şekil 4.109. Farklı karşı-hava yoğunlukları ve 0,32 mm enjektör delik çapı için ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin sprey hacimlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin sayısal sonuçlar

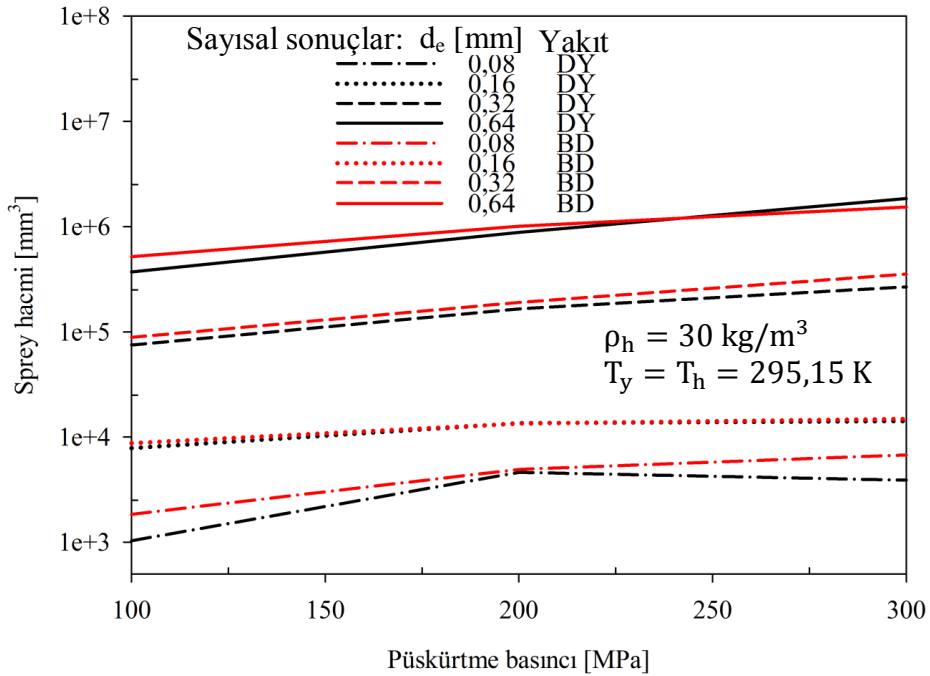


Şekil 4.110. Farklı karşı-hava yoğunlukları ve 0,64 mm enjektör delik çapı için ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin spray hacimlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin sayısal sonuçlar

Şekil 4.111 ve 4.112’de, deneysel çalışmadaki [126] parametreler (T_y ve T_h) aynı tutularak, satın alınan ticari saf dizel yakıtının ve bu tez çalışması kapsamında üretilen atık kızartma yağı biyodizelinin, yukarıda belirlenen en uygun parametreler (ağ boyutu, türbülans modeli ve parçalanma modeli) ve Fluent paket programı yardımıyla elde edilen nüfuz derinliği ve spray açısı değerlerini kullanarak, (3.114) numaralı denklemden hesaplanan spray hacmi değerlerinin, farklı püskürtme basınçları altında (100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa), enjektör delik çapıyla (0,08 mm, 0,16 mm, 0,32 mm ve 0,64 mm) olan değişimleri, 15 kg/m^3 (Şekil 4.111) ve 30 kg/m^3 (Şekil 4.112) karşı-hava yoğunluklarında karşılaştırılmıştır. Diğer bir ifade ile enjektör delik çapının söz konusu yakıtların spray hacimlerine olan etkileri incelenmiştir. Söz konusu şekillerden görüldüğü gibi, her iki karşı-hava yoğunluğunda da, enjektör delik çapı değeri arttığında, yakıtların nüfuz derinlikleri ve spray açıları arttığından dolayı, spray hacmi değerleri de artmıştır.



Şekil 4.111. Farklı enjektör delik çapları ve 15 kg/m^3 karşı-hava yoğunluğu için ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin spray hacimlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması



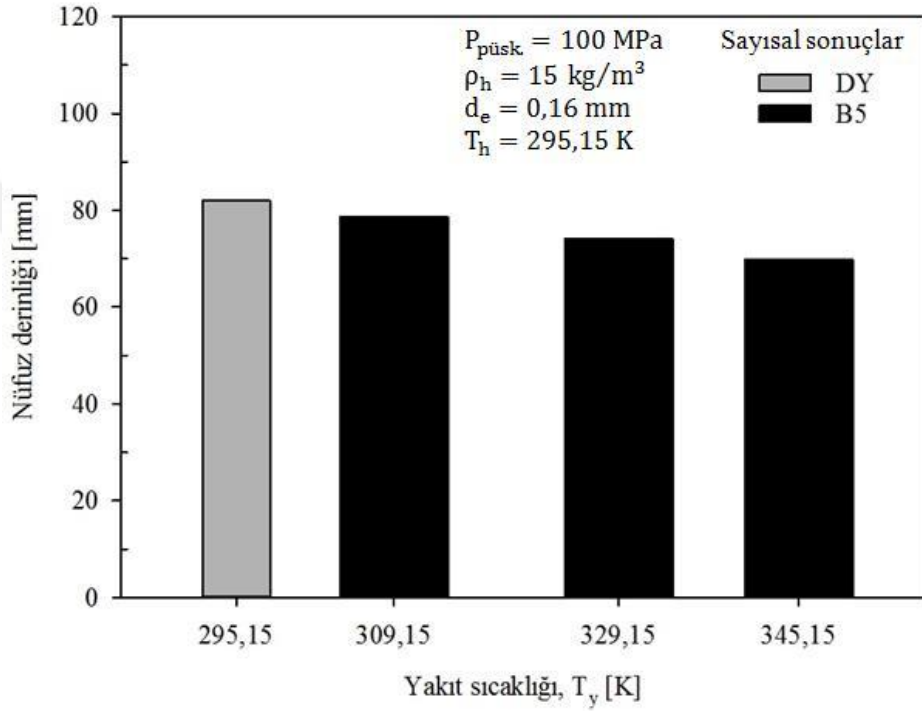
Şekil 4.112. Farklı enjektör delik çapları ve 30 kg/m^3 karşı-hava yoğunluğu için ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin spray hacimlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması

4.2.4. Yakıt Sıcaklığının Etkisi

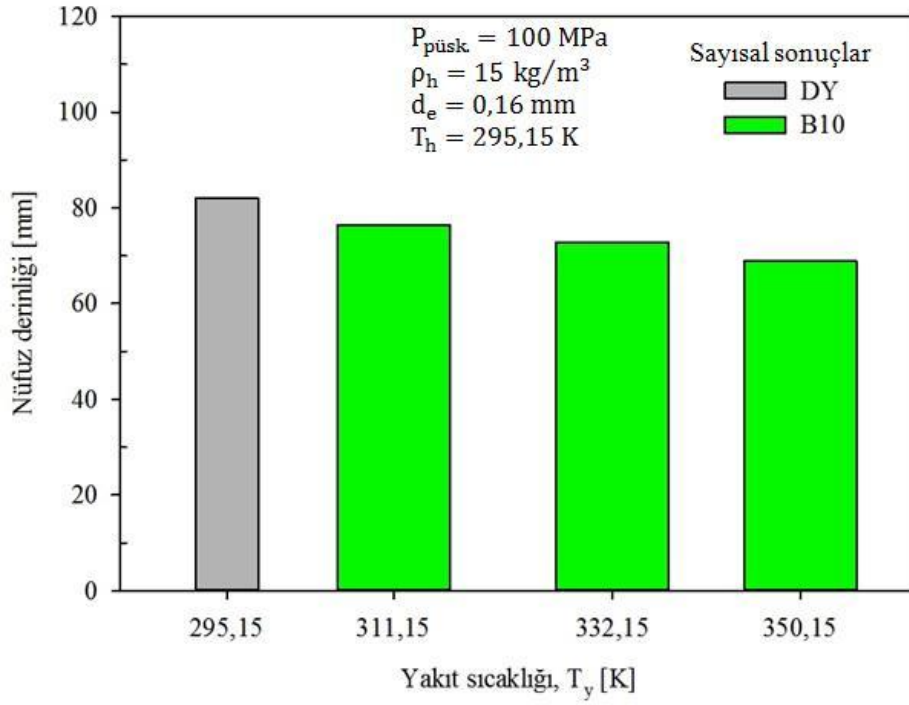
Şekil 4.113–4.124’te, deneysel çalışmadaki [126] parametreler (d_e ve T_h) aynı tutularak, farklı püskürtme basınçları (100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa) ve yakıt sıcaklıklarında, B5 (Şekil 4.113, 4.117 ve 4.121), B10 (Şekil 4.114, 4.118 ve 4.122), B15 (Şekil 4.115, 4.119 ve 4.123) ve B20 (Şekil 4.116, 4.120 ve 4.124) yakıt karışımlarının nüfuz derinliklerinin değişimleri, yukarıda belirlenen en uygun parametreler (ağ boyutu, türbülans modeli ve parçalanma modeli) kullanılarak Fluent paket programı yardımıyla, 15 kg/m^3 karşı-hava yoğunluğunda sayısal olarak belirlenmiş ve 295,15 K sıcaklığındaki ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliğiyle karşılaştırılmıştır. Diğer bir ifade ile yakıt sıcaklığının söz konusu karışımların nüfuz derinliklerine olan etkisi farklı püskürtme basınçları altında incelenmiş ve 295,15 K’deki saf dizel yakıtıninkiyle karşılaştırılmıştır. Yakıt karışımlarının sıcaklıklarının belirlenmesinde, referans alınan deneysel çalışmada [126] olduğu gibi, her bir yakıt karışımı için (B5, B10, B15 ve B20), satın alınan ticari saf dizel yakıtının 295,15 K’deki kinematik viskozitesine eşit viskozite değerini veren sıcaklık değerleri, Bölüm 4.1.4’te verilen $\nu = (a + T)/(b + c \cdot T)$ regresyon denklemi yardımıyla belirlenmiştir. Örneğin, B5 için, Tablo 4.11 kullanılarak, $a = 228,40$, $b = 37,220$, $c = 1,235$ ve $\nu = 3,226$ alındığında, $T \approx 36^\circ\text{C}$ (309,15 K) olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde, B10, B15 ve B20 için, aynı viskozite değerini veren sıcaklık değerleri sırasıyla 311,15 K, 315,15 K ve 319,15 K olarak hesaplanmıştır. Yani, hesaplanan sıcaklıklardaki biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının viskozite değerleri ile saf dizel yakıtının 295,15 K’deki viskozite değeri eşittir. Daha sonra, 295,15 K’den 15 K artırımla 310,15 K’deki ticari saf dizel yakıtının kinematik viskozitesine ($2,683 \text{ mm}^2/\text{s}$) eşit viskoziteyi veren sıcaklık değerleri B5, B10, B15 ve B20 için sırasıyla 329,15 K, 332,15 K, 341,15 K ve 349,15 K olarak hesaplanmıştır. Son olarak, 310,15 K’den 15 K artırımla 325,15 K için ticari saf dizel yakıtının viskozite değeri ($2,388 \text{ mm}^2/\text{s}$), B5, B10, B15 ve B20 karışımlarını sırasıyla 345,15 K, 350,15 K, 367,15 K ve 382,15 K’e ısıtıldıklarında elde edilmiştir. Böylece, eşit viskoziteli fakat farklı sıcaklıklardaki yakıtların nüfuz derinliklerinin değişimleri karşılaştırılmıştır. Viskozitenin yanında yakıtların yoğunluk değeri de yakıt demeti karakteristiğini önemli oranda etkilemektedir. Yoğunluğun artması durumunda, yakıtın parçalanmaya karşı direnci artar ve böylece yanma odasında daha derinlere nüfuz edebilir. Söz konusu şekillere göre, püskürtme basıncından bağımsız olarak, karışım yakıtlarının viskoziteleriyle saf dizel yakıtının viskoziteleri eşit olsa da, B5 ve B10’un

yoğunluk değerleri ilgili tüm sıcaklıklarda (B5 için 309,15 K'de 829,06 kg/m³, 329,15 K'de 822,17 kg/m³, 345,15 K'de 814,79 kg/m³ ve B10 için 311,15 K'de 828,90 kg/m³, 332,15 K'de 820,94 kg/m³, 350,15 K'de 812,80 kg/m³) saf dizel yakıtının 295,15 K'deki yoğunluk değerinden daha düşük olduğundan dolayı nüfuz derinlikleri (Şekil 4.113, 4.114, 4.117, 4.118, 4.121 ve 4.122) saf dizel yakıtının kine göre daha az, B15 ve B20'nin yoğunluk değerleri ise ilgili sıcaklıklarda (295,15 K'deki saf dizel yakıtının viskozitesine eşit viskozitenin elde edildiği sıcaklıklar) (B15 için 315,15 K'de 833,62 kg/m³, B20 için 319,15 K'de 833,85 kg/m³) saf dizel yakıtının yoğunluk değerinden daha fazla oldukları için nüfuz derinlikleri saf dizel yakıtınınkinden daha fazladır (Şekil 4.115, 4.116, 4.119, 4.120, 4.123 ve 4.124). Fakat, B15 ve B20'nin yoğunluk değerleri diğer sıcaklıklarda (B15 için 341,15 K'de 822,96 kg/m³, 367,15 K'de 809,46 kg/m³ ve B20 için 349,15 K'de 820,67 kg/m³ ve 382,15 K'de 802,16 kg/m³) saf dizel yakıtının yoğunluk değerinden daha az oldukları için nüfuz derinlikleri saf dizel yakıtınınkinden daha azdır (Şekil 4.115, 4.116, 4.119, 4.120, 4.123 ve 4.124). Bununla birlikte, püskürtme basıncından bağımsız olarak, yakıt karışımlarının sıcaklıkları arttıkça (örneğin Şekil 4.113'te görüldüğü gibi B5 için 309,15 K'den 329,15 K'e) yoğunlukları azaldığı için daha kolay parçalandıklarından dolayı nüfuz derinlikleri azalır. 295,15 K'deki ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliği karakteristiğinin elde edilebilmesi için, B5 ve B10 karışımlarının yakıt sıcaklığı arttıkça (B5 için 309,15 K'den 345,15 K'e, B10 için 311,15 K'den 350,15 K'e) nüfuz derinliği değerleri azaldığından (Şekil 4.113, 4.114, 4.117, 4.118, 4.121 ve 4.122), söz konusu karışımlar belirtilen sıcaklıklarda kullanıldığında, püskürtme basıncı artırılabilir (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki püskürtme basıncına göre) veya püskürtme basıncından bağımsız olarak karşı-hava yoğunluğu azaltılabilir (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki karşı-hava yoğunluğuna göre) veya daha büyük çapa sahip enjektör (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki enjektör çapına göre) kullanılabilir. Ayrıca, incelenen püskürtme basınçlarının hepsinde, 315,15 K'deki B15'in ve 319,15 K'deki B20'nin nüfuz derinliği değerleri 295,15 K'deki ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliği değerlerinden daha fazla olduğu için (Şekil 4.115, 4.116, 4.119, 4.120, 4.123 ve 4.124), söz konusu sıcaklıklarda B15 ve B20 kullanıldığında püskürtme basıncı azaltılabilir (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki püskürtme basıncına göre) veya püskürtme basıncından bağımsız olarak karşı-hava yoğunluğu (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki karşı-hava yoğunluğuna göre) artırılabilir veya daha küçük çapa sahip enjektör (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki enjektör delik çapına göre) kullanılabilir. Diğer sıcaklıklarda (B15 için 341,15 K ve 367,15 K, B20 için 349,15 K ve 382,15 K) B15 ve

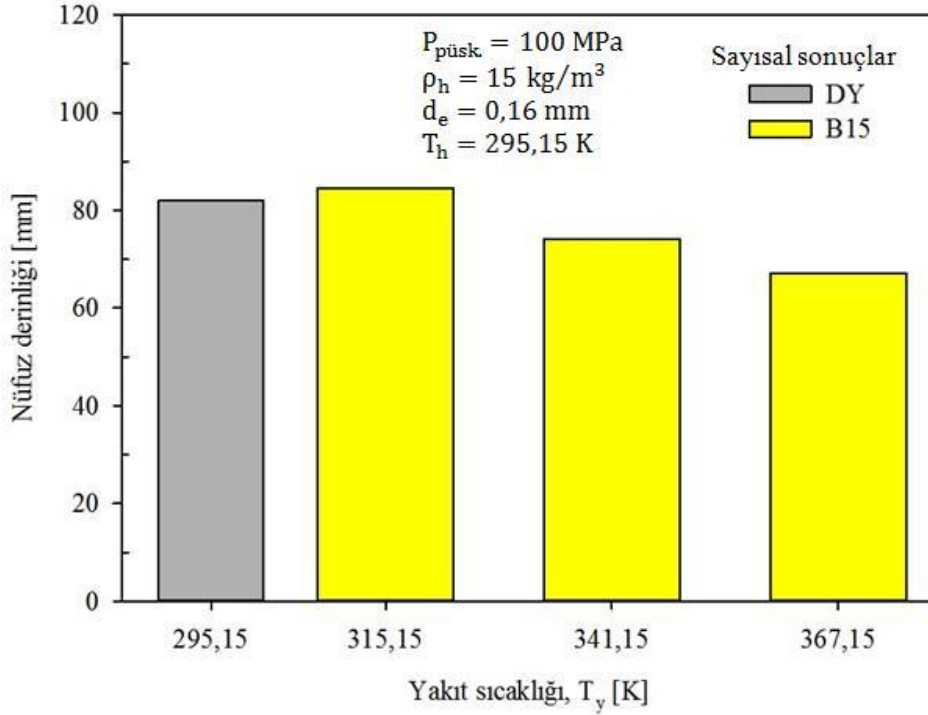
B20 karışımları kullanıldığında ise, 295,15 K'deki ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliği değerlerinden daha düşük olduğundan, nüfuz derinliğini artırmak için püskürtme basıncı artırılabilir (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki püskürtme basıncına göre) veya püskürtme basıncından bağımsız olarak karşı-hava yoğunluğu (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki karşı-hava yoğunluğuna göre) azaltılabilir veya daha büyük çapa sahip enjektör (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki enjektör delik çapına göre) kullanılabilir.



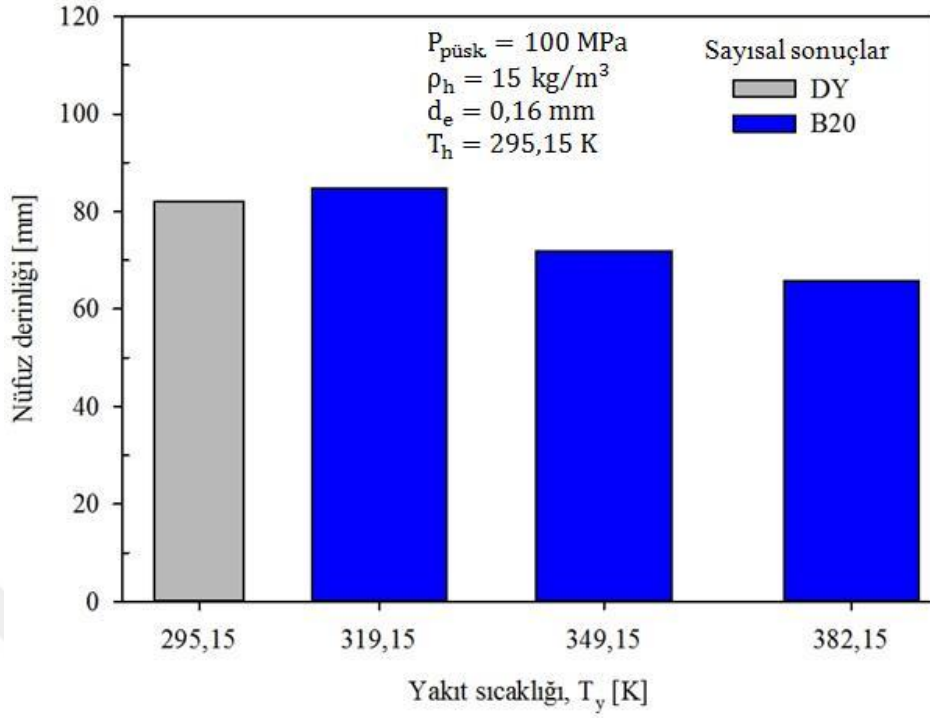
Şekil 4.113. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 100 MPa püskürtme basıncı altında B5 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



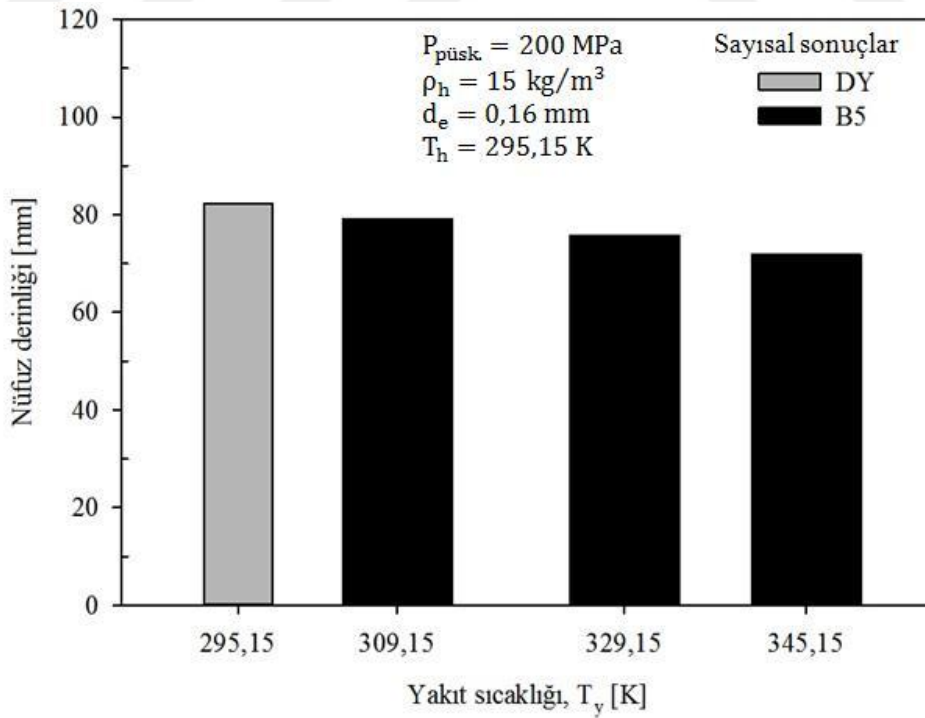
Şekil 4.114. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 100 MPa püskürtme basıncı altında B10 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



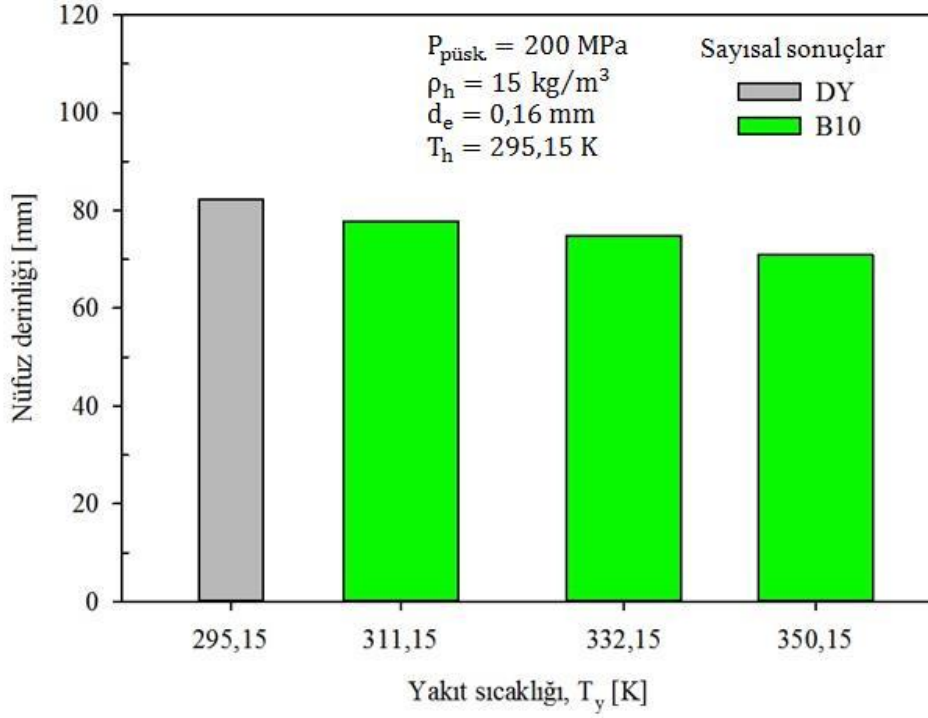
Şekil 4.115. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 100 MPa püskürtme basıncı altında B15 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



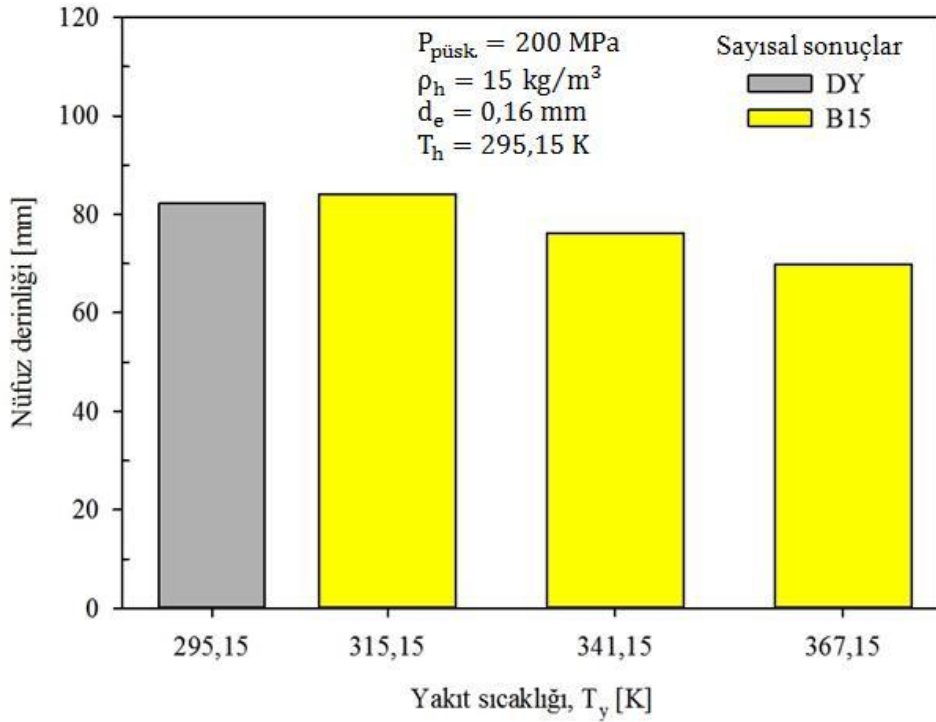
Şekil 4.116. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 100 MPa püskürtme basıncı altında B20 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



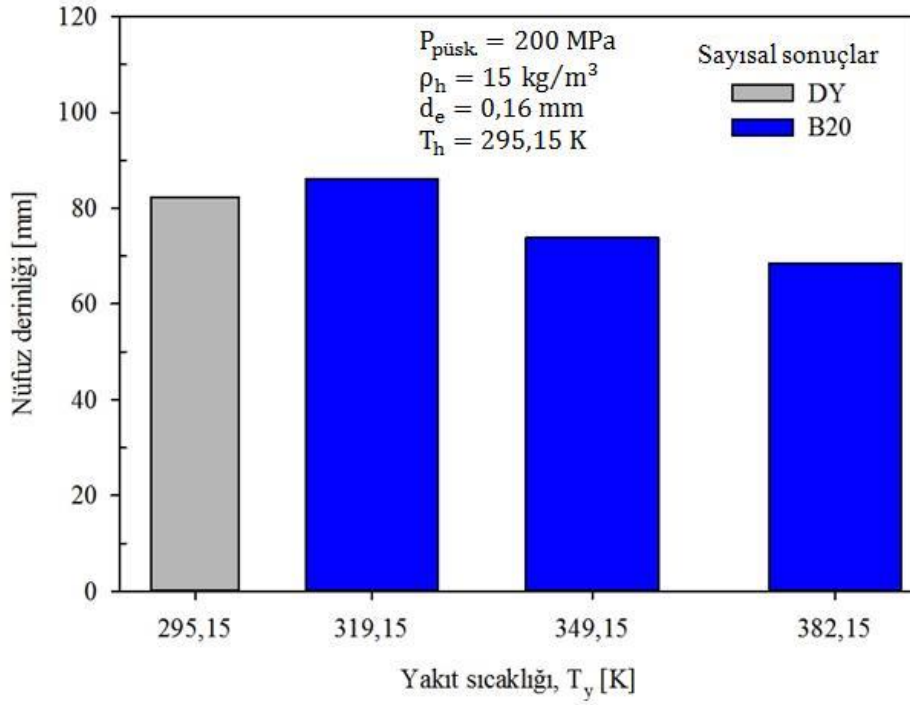
Şekil 4.117. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 200 MPa püskürtme basıncı altında B5 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



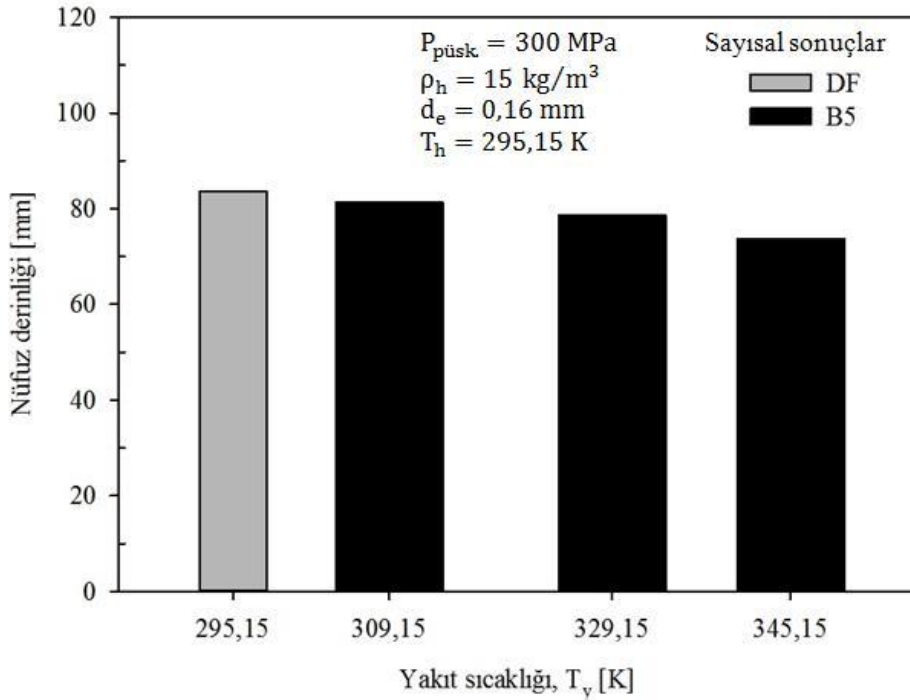
Şekil 4.118. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 200 MPa püskürtme basıncı altında B10 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



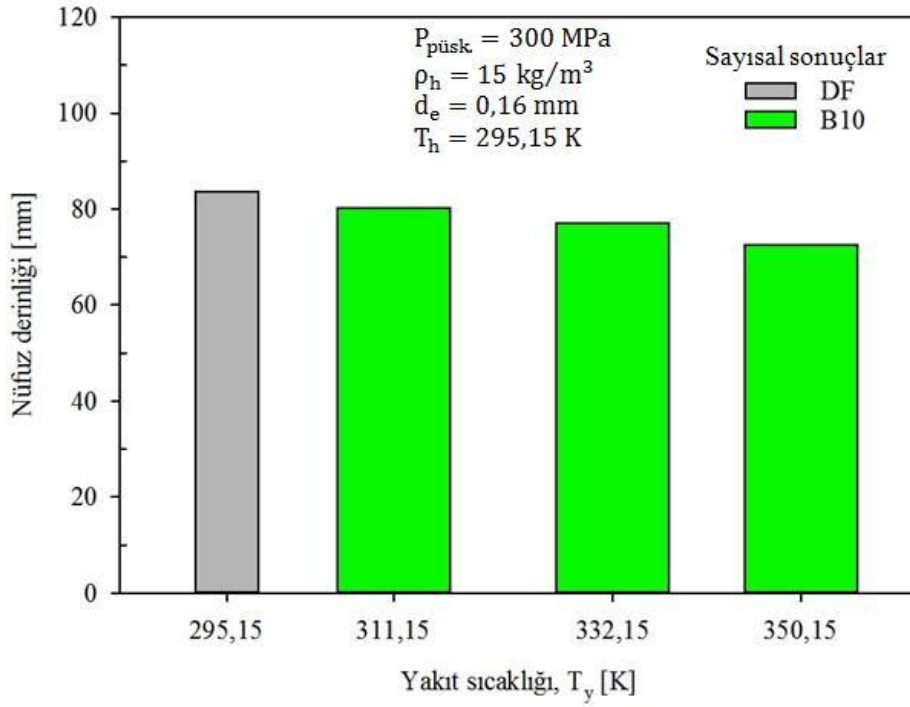
Şekil 4.119. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 200 MPa püskürtme basıncı altında B15 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



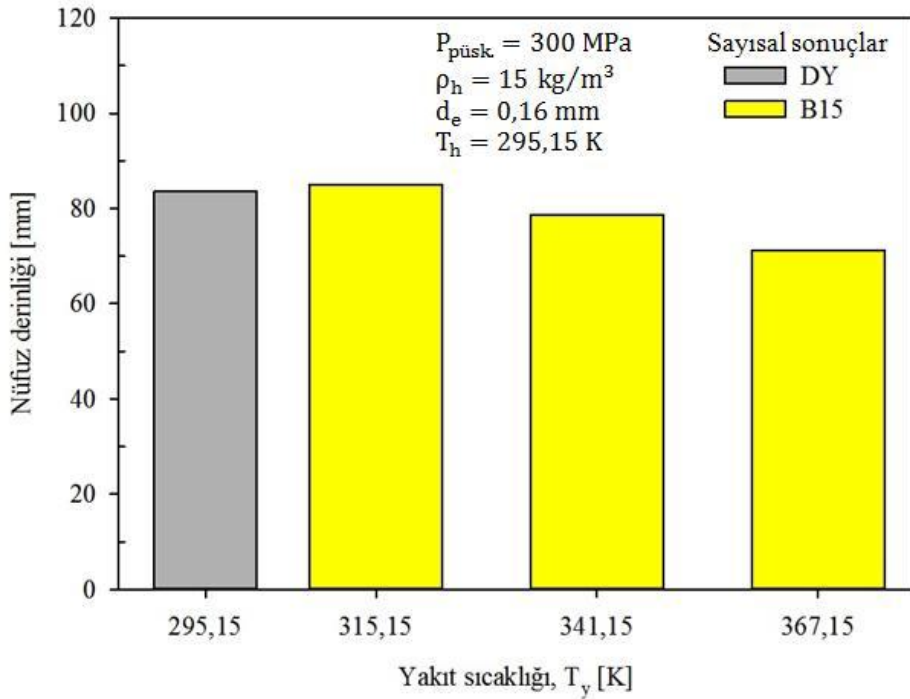
Şekil 4.120. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 200 MPa püskürtme basıncı altında B20 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



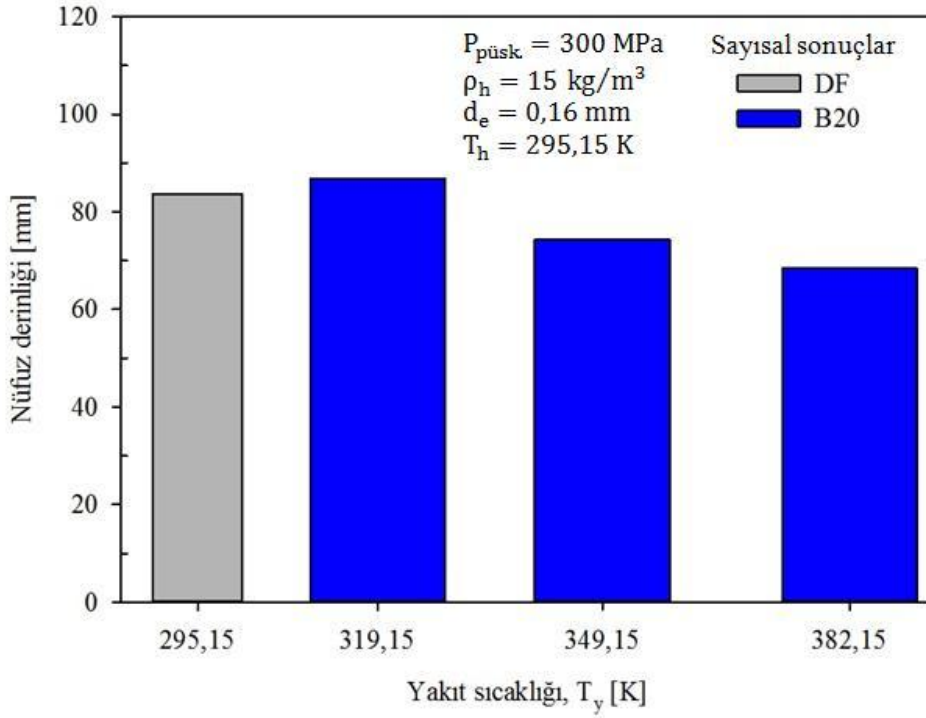
Şekil 4.121. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 300 MPa püskürtme basıncı altında B5 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



Şekil 4.122. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 300 MPa püskürtme basıncı altında B10 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



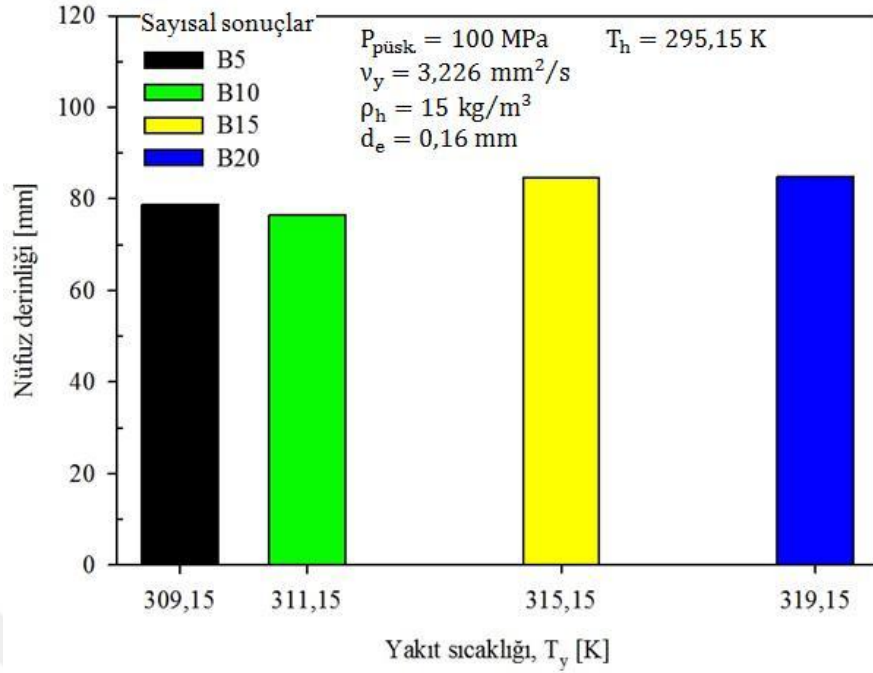
Şekil 4.123. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 300 MPa püskürtme basıncı altında B15 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



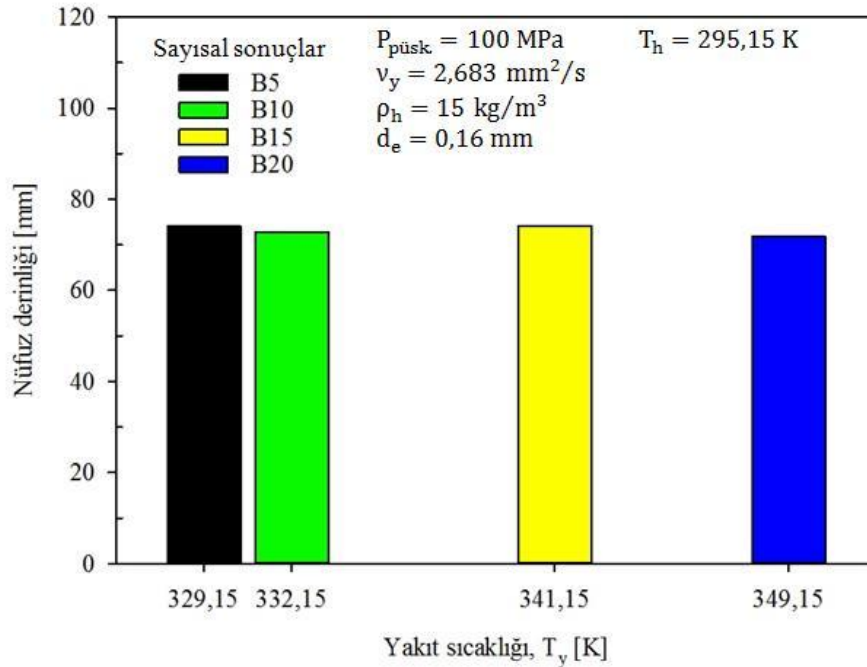
Şekil 4.124. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 300 MPa püskürtme basıncı altında B20 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar

Şekil 4.125–4.133’te, deneysel çalışmadaki [126] parametreler (d_e ve T_h) aynı tutularak farklı püskürtme basınçları (100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa) ve yakıt sıcaklıklarında, aynı kinematik viskozite değerlerine (3,226 mm²/s (Şekil 4.125, 4.128 ve 4.131), 2,683 mm²/s (Şekil 4.126, 4.129 ve 4.132) ve 2,388 mm²/s (Şekil 4.127, 4.130 ve 4.133)) sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının nüfuz derinliklerinin değişimleri, yukarıda belirlenen en uygun parametreler (ağ boyutu, türbülans modeli ve parçalanma modeli) kullanılarak Fluent paket programı yardımıyla, 15 kg/m³ karşı-hava yoğunluğunda sayısal olarak karşılaştırılmıştır. Diğer bir ifade ile farklı sıcaklıklarda aynı viskozite değerlerine sahip olan yakıt karışımlarının farklı püskürtme basınçları altındaki nüfuz derinliklerinin değişimleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Şekil 4.125, 4.128 ve 4.131’de, sabit 3,226 mm²/s kinematik viskozite değeri için, püskürtme basıncından bağımsız olarak, eşit viskoziteyi veren sıcaklıklardaki B20 ve B15 yakıt karışımlarının yoğunluk değerleri, B5 ve B10 yakıt karışımlarının yoğunluk değerlerinden daha fazla olduğu için, B15 ve B20’nin nüfuz derinlikleri daha fazladır. Yani, B15 ve B20, daha yüksek sıcaklıklara ısıtılsalar da, saf biyodizelin yoğunluğu saf dizel yakıtının yoğunluğundan daha yüksek olduğu için, söz konusu karışımların yoğunlukları daha yüksektir. Ayrıca, 100 MPa (Şekil

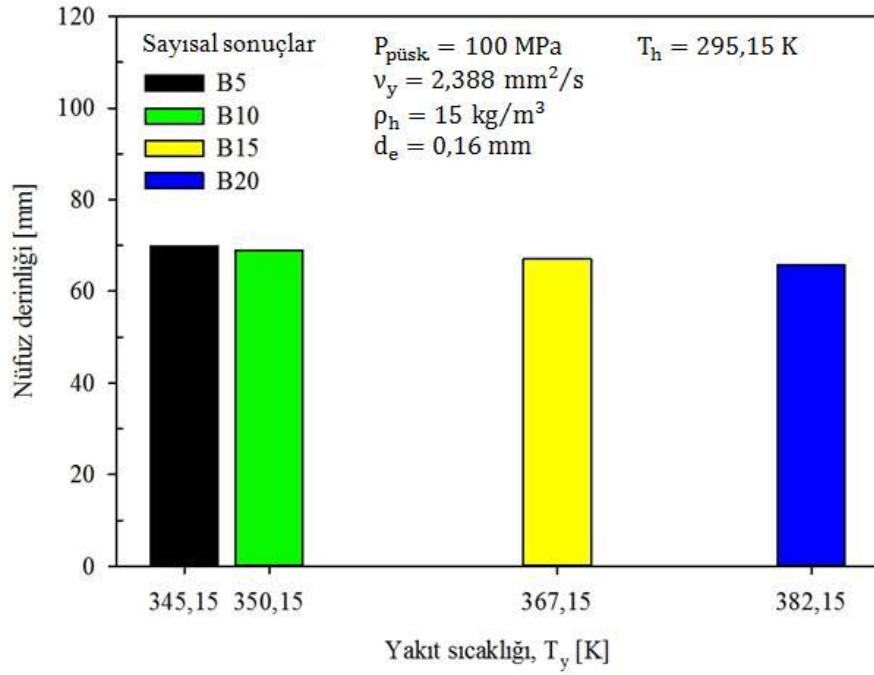
4.125) püskürtme basıncı altında, B20 ve B15 yakıt karışımlarının nüfuz derinliği değerleri birbirlerine çok yakın iken, püskürtme basıncının artışıyla (Şekil 4.128 ve 4.131) nüfuz derinliği değerleri arasındaki fark azda olsa artmıştır. Benzer şekilde, sabit $2,683 \text{ mm}^2/\text{s}$ kinematik viskozite değeri için Şekil 4.126, 4.129 ve 4.132’de görüldüğü gibi, püskürtme basıncından bağımsız olarak, eşit viskoziteyi veren sıcaklıklardaki B5 (329,15 K’de $822,17 \text{ kg/m}^3$) ve B15 (341,15 K’de $822,96 \text{ kg/m}^3$) yakıt karışımlarının yoğunluk değerleri, B10 (332,15 K’de $820,94 \text{ kg/m}^3$) ve B20 (349,15 K’de $820,67 \text{ kg/m}^3$) yakıt karışımlarının yoğunluk değerlerinden daha fazla olduğu için, B5 ve B15’in nüfuz derinlikleri daha fazladır. B5 ve B15 karışım yakıtlarının yoğunluk değerleri birbirlerine yakın olduğundan dolayı, üç püskürtme basıncı için de (Şekil 4.126, 4.129 ve 4.132) nüfuz derinliği değerleri birbirlerine yakındır. Ayrıca, 100 MPa (Şekil 4.126) ve 200 MPa (Şekil 4.129) püskürtme basınçları altında, B10 ve B20’nin nüfuz derinlikleri arasındaki fark çok az olsa da, 300 MPa (Şekil 4.132) püskürtme basıncında bu fark azda olsa artmıştır. Sabit $2,388 \text{ mm}^2/\text{s}$ kinematik viskozite değeri için, püskürtme basıncından bağımsız olarak, eşit viskozite değerini veren sıcaklıklardaki yoğunluk değerleri, dolayısıyla nüfuz derinlikleri en yüksekten en düşüğe doğru B5 (345,15 K’de $814,79 \text{ kg/m}^3$), B10 (350,15 K’de $812,80 \text{ kg/m}^3$), B15 (367,15 K’de $809,46 \text{ kg/m}^3$) ve B20 (382,15 K’de $802,16 \text{ kg/m}^3$) şeklinde sıralanmıştır. 100 MPa (Şekil 4.127) ve 200 MPa (Şekil 4.130) püskürtme basınçları altında, yakıt karışımlarının nüfuz derinliği değerleri arasındaki fark çok az olsa da, 300 MPa (Şekil 4.133) püskürtme basıncında B20 yakıt karışımı için bu fark azda olsa artmıştır.



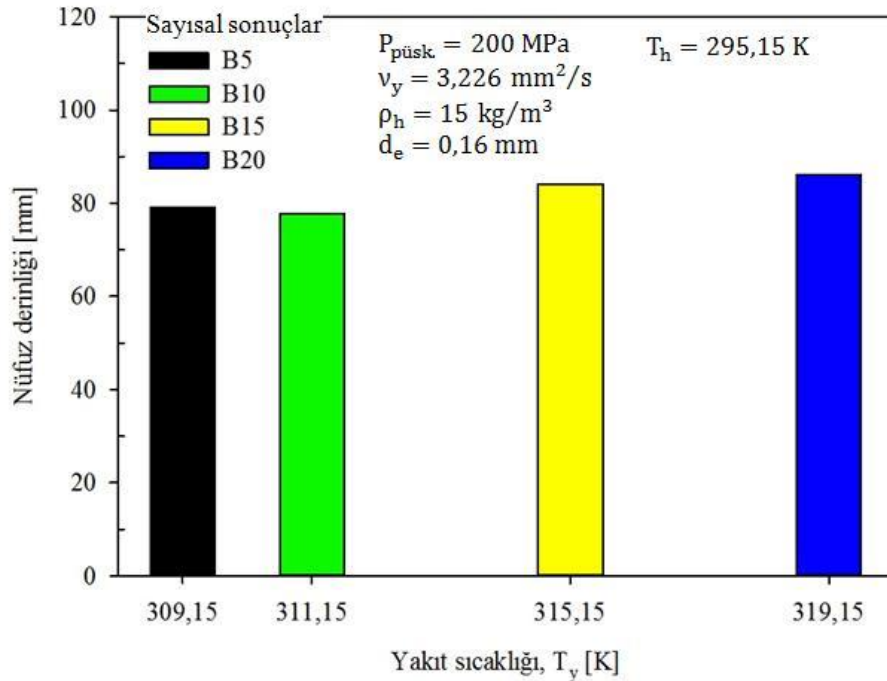
Şekil 4.125. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 100 MPa püskürtme basıncı altında $3,226 \text{ mm}^2/\text{s}$ kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



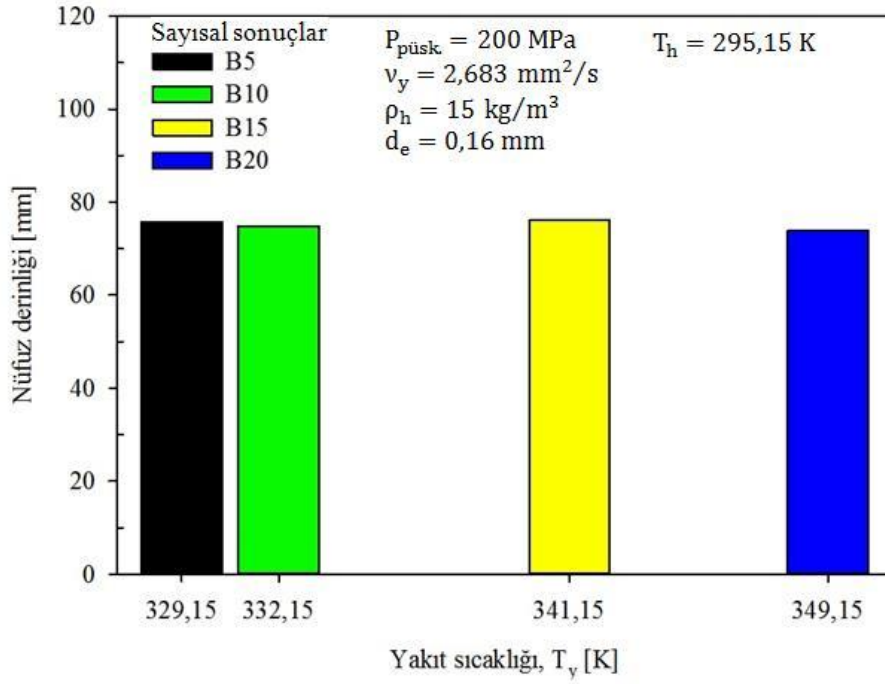
Şekil 4.126. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 100 MPa püskürtme basıncı altında $2,683 \text{ mm}^2/\text{s}$ kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



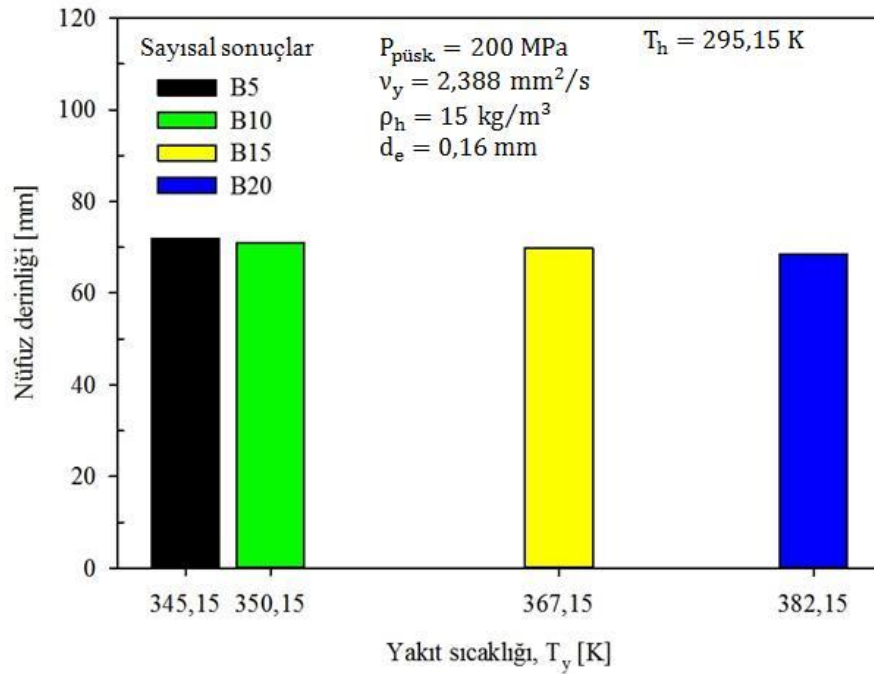
Şekil 4.127. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 100 MPa püskürtme basıncı altında $2,388 \text{ mm}^2/\text{s}$ kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



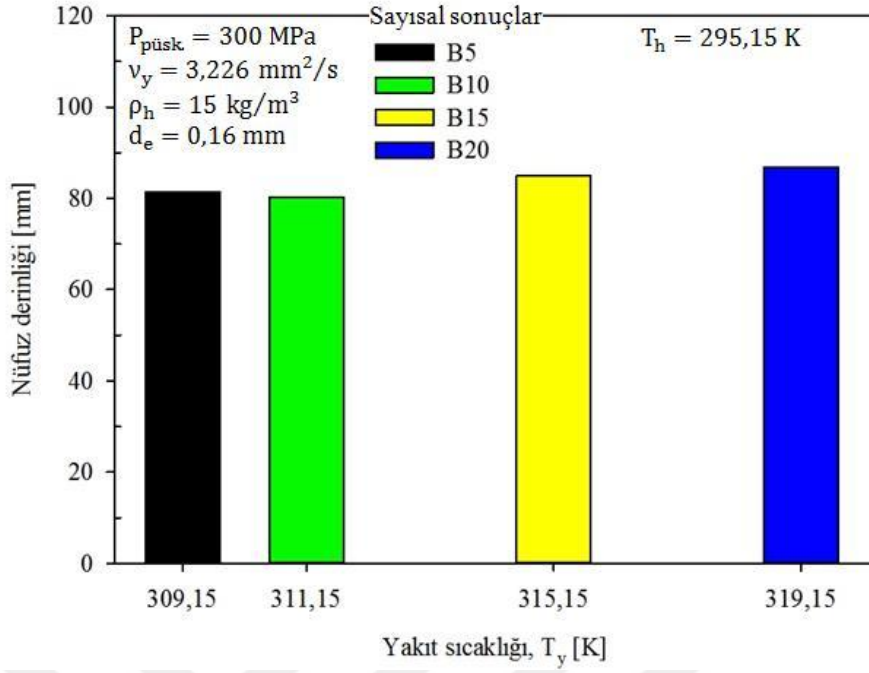
Şekil 4.128. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 200 MPa püskürtme basıncı altında $3,226 \text{ mm}^2/\text{s}$ kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



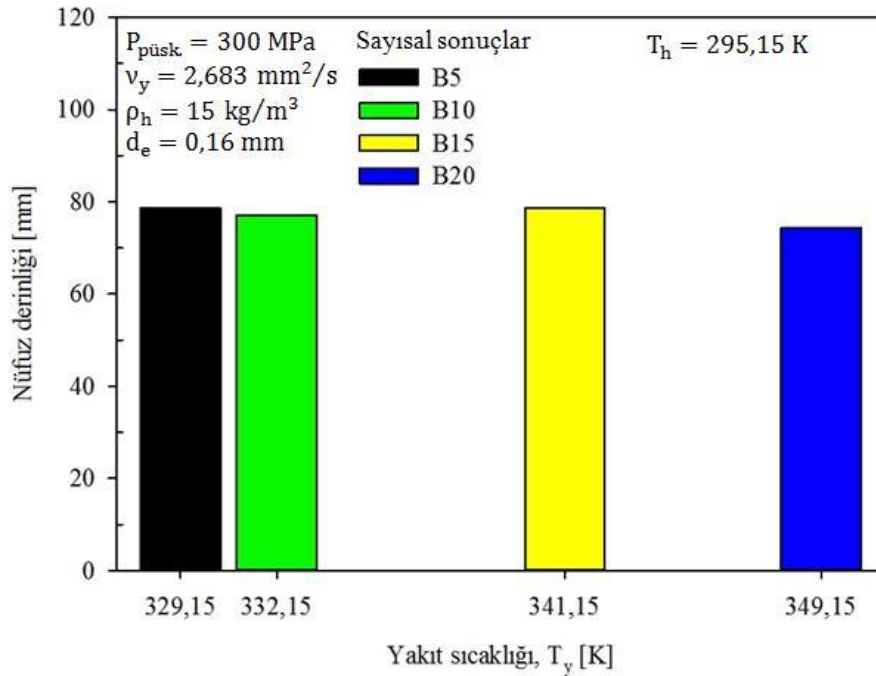
Şekil 4.129. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 200 MPa püskürtme basıncı altında 2,683 mm²/s kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



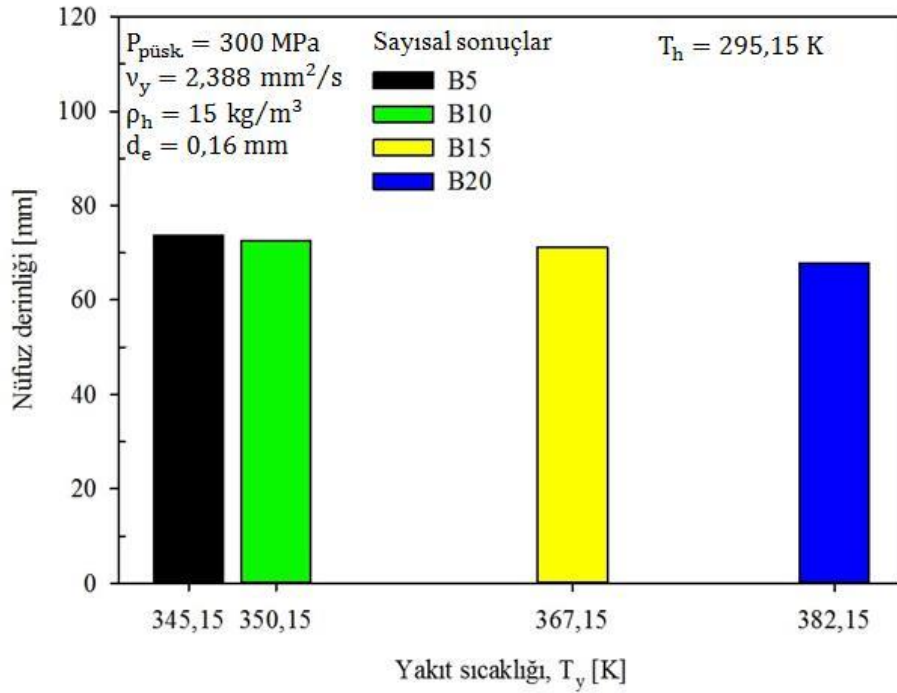
Şekil 4.130. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 200 MPa püskürtme basıncı altında 2,388 mm²/s kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



Şekil 4.131. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 300 MPa püskürtme basıncı altında $3,226 \text{ mm}^2/\text{s}$ kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



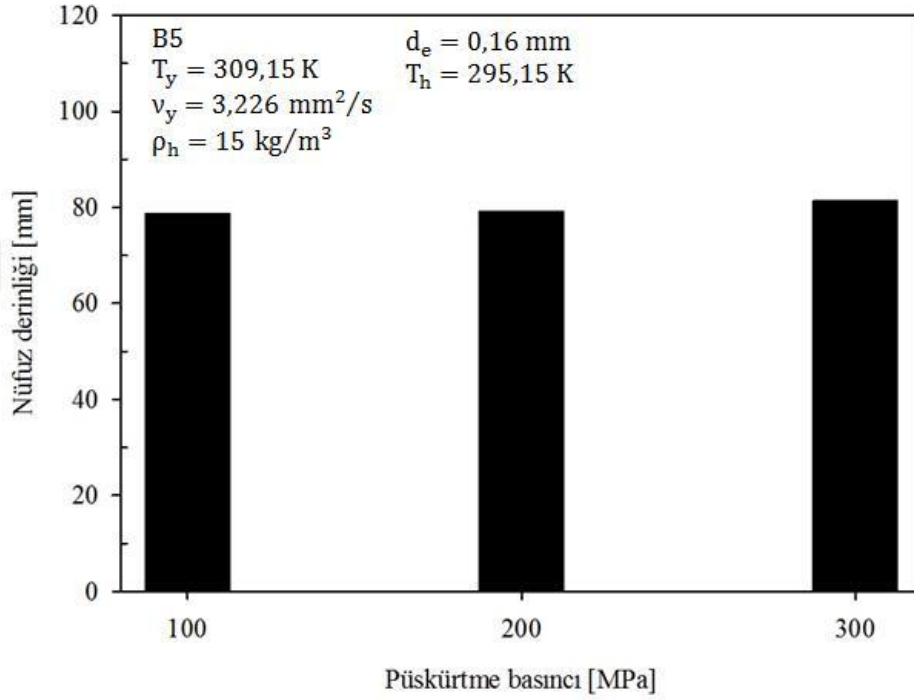
Şekil 4.132. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 300 MPa püskürtme basıncı altında $2,683 \text{ mm}^2/\text{s}$ kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



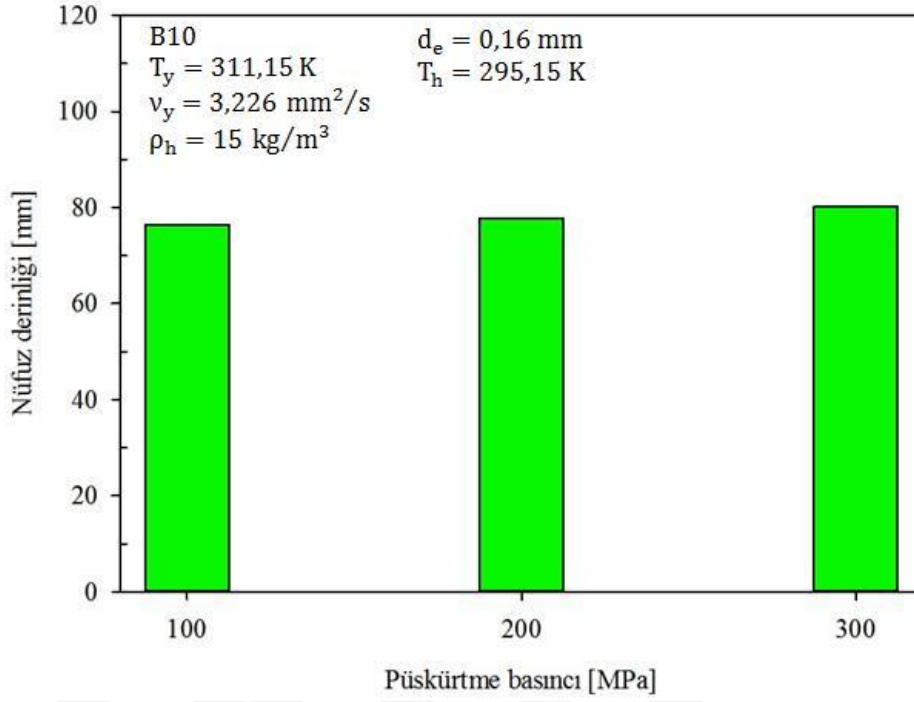
Şekil 4.133. Farklı yakıt sıcaklıkları ve 300 MPa püskürtme basıncı altında $2,388 \text{ mm}^2/\text{s}$ kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının nüfuz derinliklerinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar

Şekil 4.134–4.145’te, deneysel çalışmadaki [126] parametreler (d_e ve T_h) aynı tutularak, satın alınan ticari saf dizel yakıtının 295,15 K, 310,15 K ve 325,15 K’deki kinematik viskozitelerine eşit viskozitelerin elde edildiği sıcaklıklardaki B5 (Şekil 4.134, 4.138 ve 4.142), B10 (Şekil 4.135, 4.139 ve 4.143), B15 (Şekil 4.136, 4.140 ve 4.144) ve B20 (Şekil 4.137, 4.141 ve 4.145) yakıt karışımlarının nüfuz derinliklerinin değişimleri, çeşitli püskürtme basınçları (100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa) altında, yukarıda belirlenen en uygun parametreler (ağ boyutu, türbülans modeli ve parçalanma modeli) kullanılarak Fluent paket programı yardımıyla, 15 kg/m^3 karşı-hava yoğunluğunda sayısal olarak belirlenmiştir. Diğer bir ifade ile farklı sıcaklık ve viskozite değerlerine sahip olan yakıt karışımlarının nüfuz derinlikleri çeşitli püskürtme basınçları altında incelenmiştir. Şekil 4.134–4.137 incelendiğinde, $3,226 \text{ mm}^2/\text{s}$ kinematik viskozite değerine sahip olan farklı sıcaklıklardaki B5 (309,15 K), B10 (311,15 K), B15 (315,15 K) ve B20 (319,15 K) yakıt karışımları için, püskürtme basıncı arttıkça yakıt demetinin enjektörden çıkış hızı ve momentumu arttığından dolayı genellikle nüfuz derinliklerinin arttığı, fakat püskürtme basıncının daha fazla artırılması durumunda (200 MPa’dan 300 MPa’a), yakıt demetinin çok hızlı bir şekilde atomize olmasından dolayı nüfuz derinliklerindeki artışın bir miktar

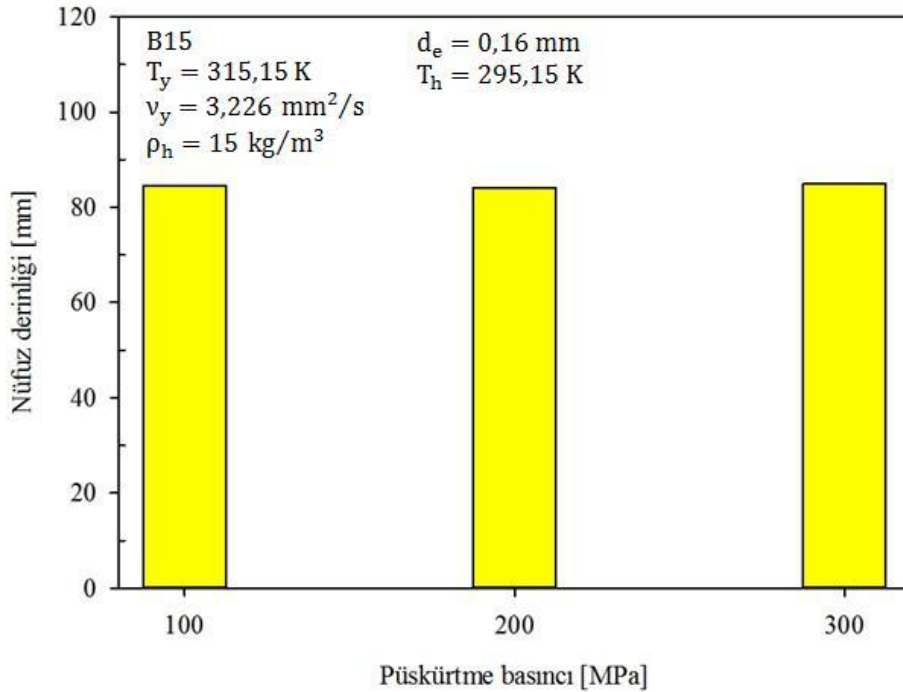
azaldığı görülmüştür. Şekil 4.138–4.141 ve Şekil 4.142–4.145 incelendiğinde benzer durum, sırasıyla 2,683 mm²/s ve 2,388 mm²/s kinematik viskozite değerlerine sahip olan farklı sıcaklıklardaki B5 (329,15 K ve 345,15 K), B10 (332,15 K ve 350,15 K), B15 (341,15 K ve 367,15 K) ve B20 (349,15 K ve 382,15 K) yakıt karışımları için de genellikle gözlemlenmiştir.



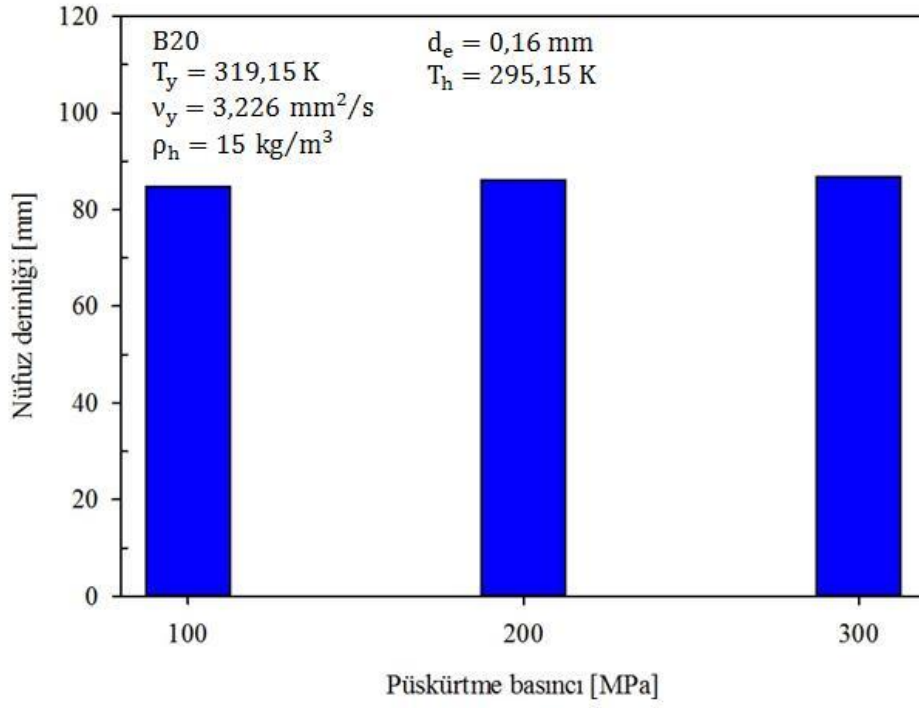
Şekil 4.134. Farklı püskürtme basınçları altında 309,15 K sıcaklıkta 3,226 mm²/s kinematik viskoziteye sahip B5 yakıt karışımının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



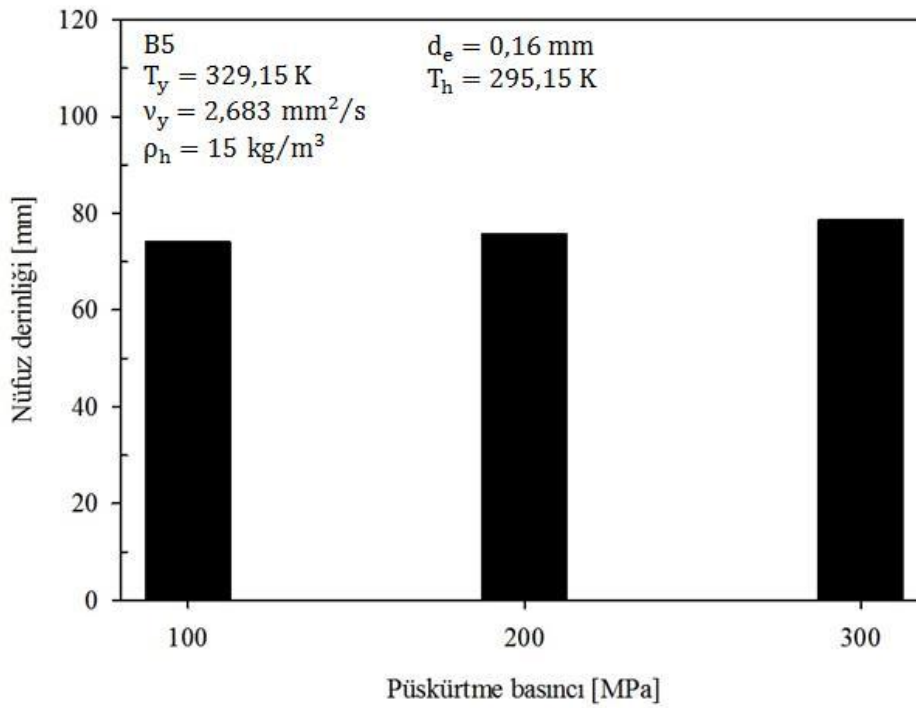
Şekil 4.135. Farklı püskürtme basınçları altında 311,15 K sıcaklıkta 3,226 mm²/s kinematik viskoziteye sahip B10 yakıt karışımının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



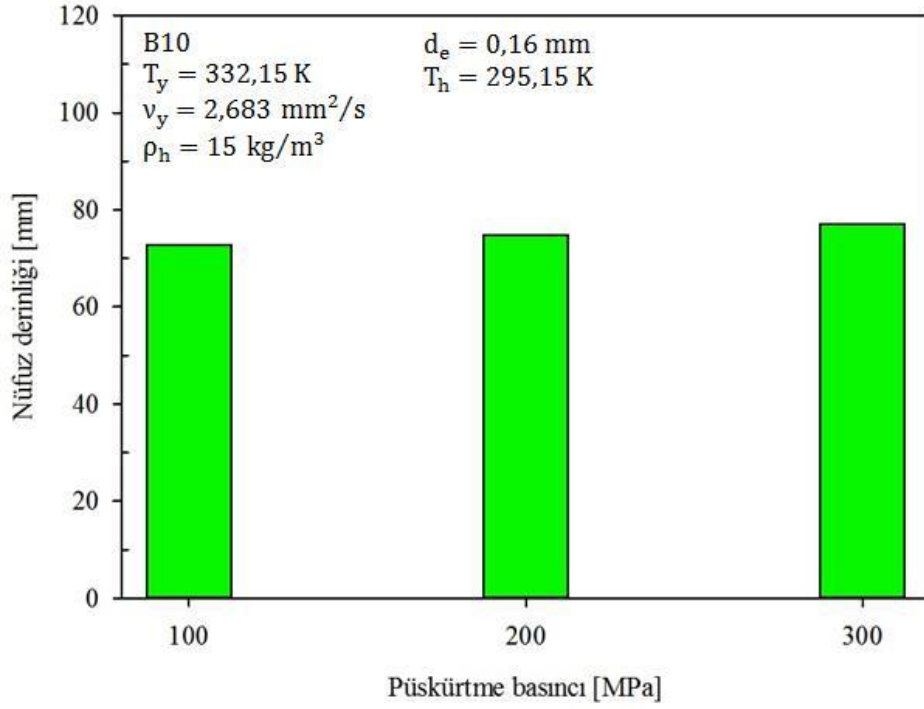
Şekil 4.136. Farklı püskürtme basınçları altında 315,15 K sıcaklıkta 3,226 mm²/s kinematik viskoziteye sahip B15 yakıt karışımının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



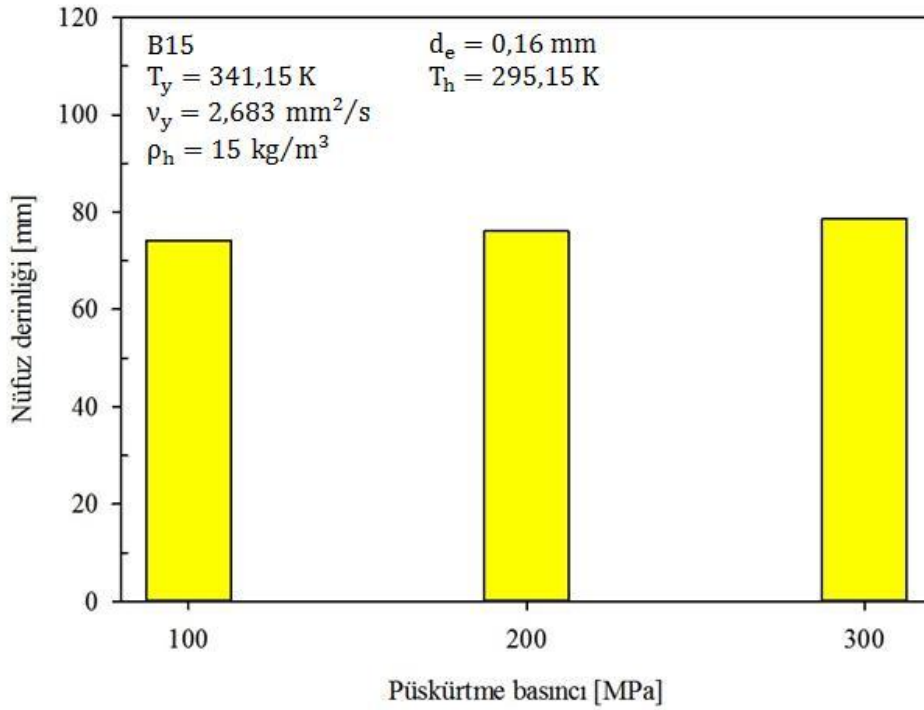
Şekil 4.137. Farklı püskürtme basınçları altında 319,15 K sıcaklıkta 3,226 mm²/s kinematik viskoziteye sahip B20 yakıt karışımının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



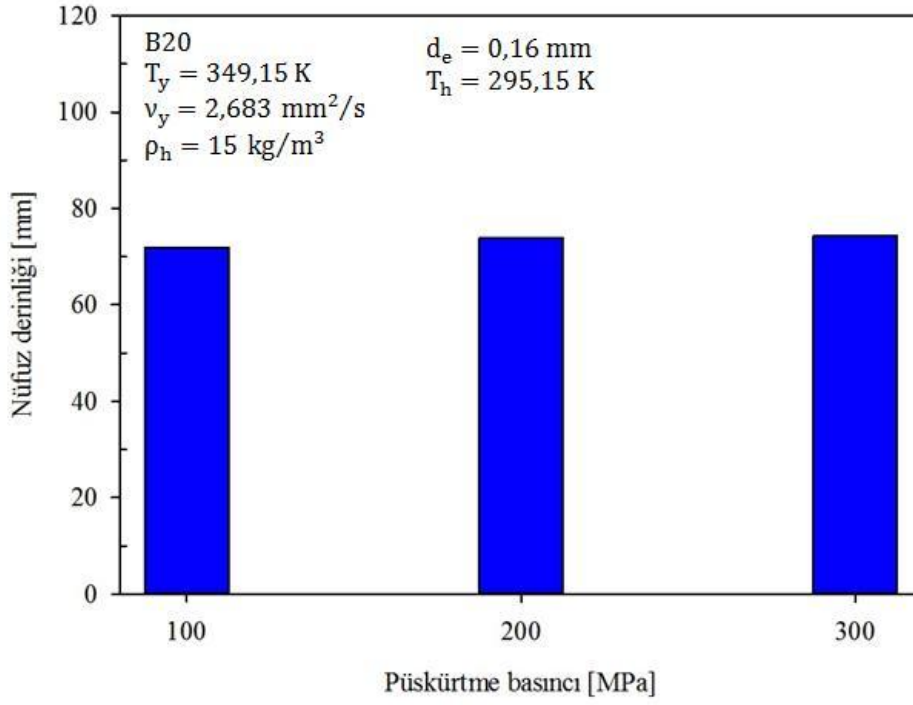
Şekil 4.138. Farklı püskürtme basınçları altında 329,15 K sıcaklıkta 2,683 mm²/s kinematik viskoziteye sahip B5 yakıt karışımının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



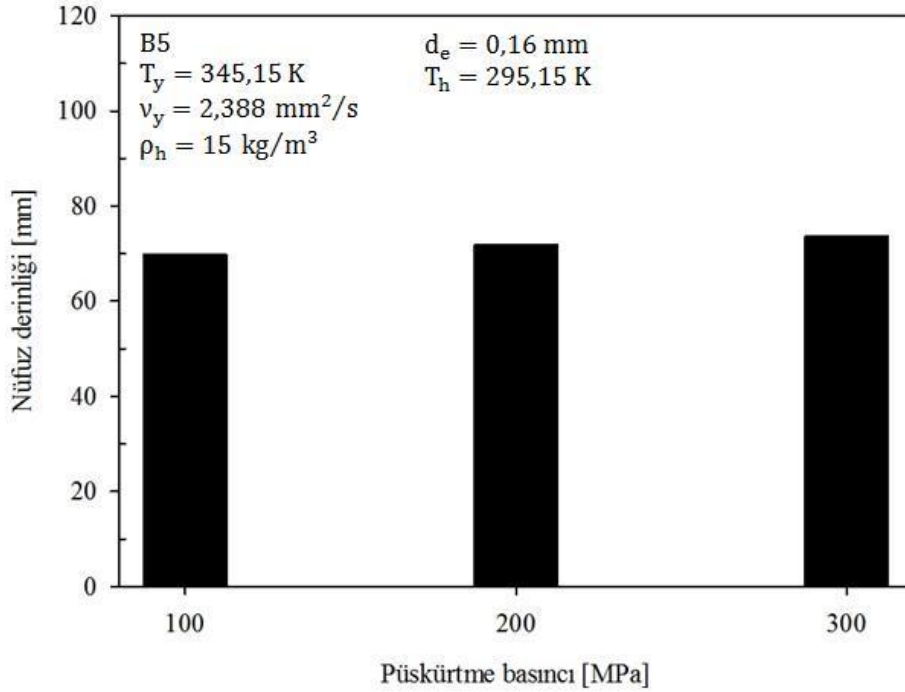
Şekil 4.139. Farklı püskürtme basınçları altında 332,15 K sıcaklıkta 2,683 mm²/s kinematik viskoziteye sahip B10 yakıt karışımının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



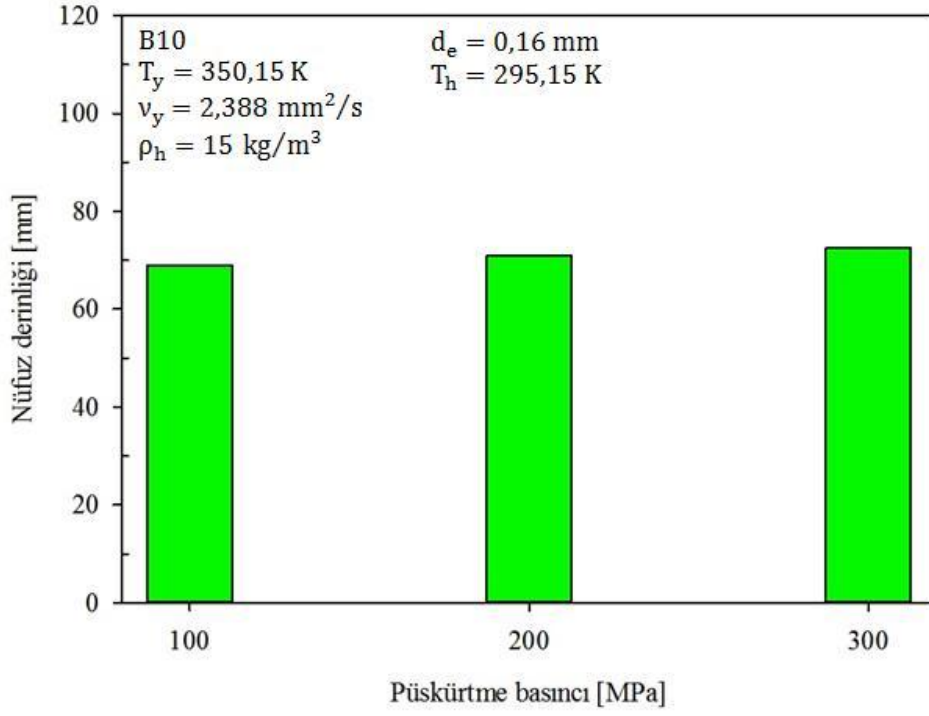
Şekil 4.140. Farklı püskürtme basınçları altında 341,15 K sıcaklıkta 2,683 mm²/s kinematik viskoziteye sahip B15 yakıt karışımının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



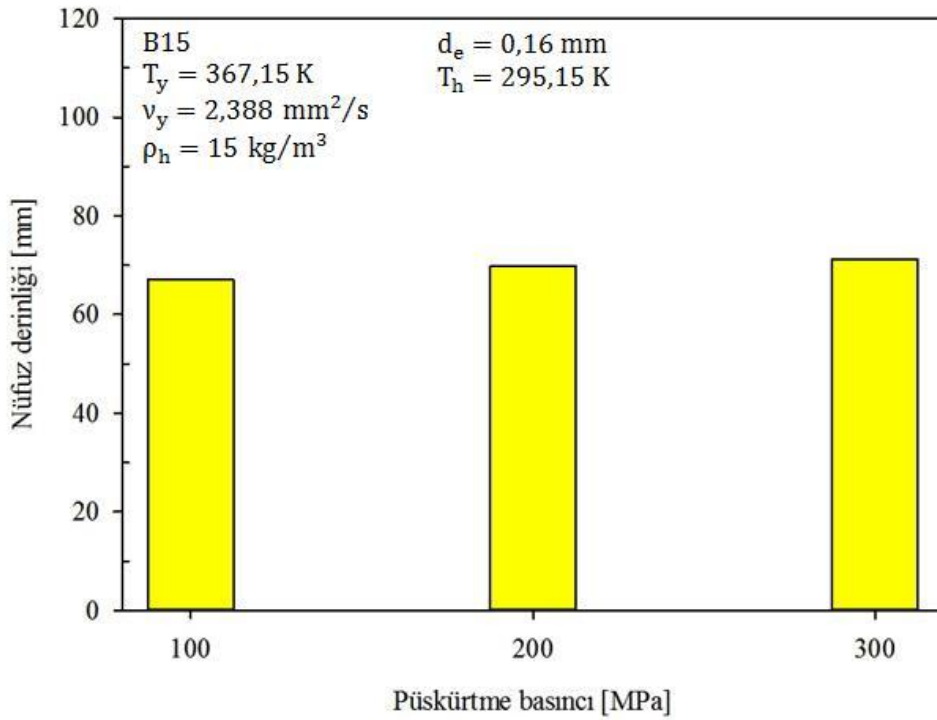
Şekil 4.141. Farklı püskürtme basınçları altında 349,15 K sıcaklıkta 2,683 mm²/s kinematik viskoziteye sahip B20 yakıt karışımının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



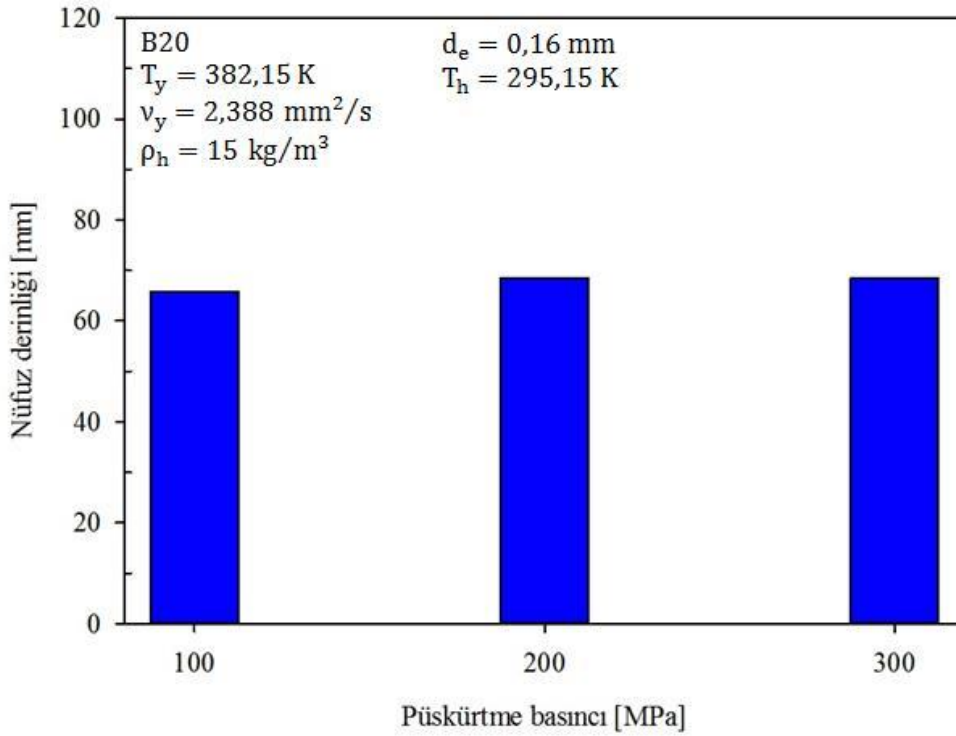
Şekil 4.142. Farklı püskürtme basınçları altında 345,15 K sıcaklıkta 2,388 mm²/s kinematik viskoziteye sahip B5 yakıt karışımının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



Şekil 4.143. Farklı püskürtme basınçları altında 350,15 K sıcaklıkta 2,388 mm²/s kinematik viskoziteye sahip B10 yakıt karışımının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



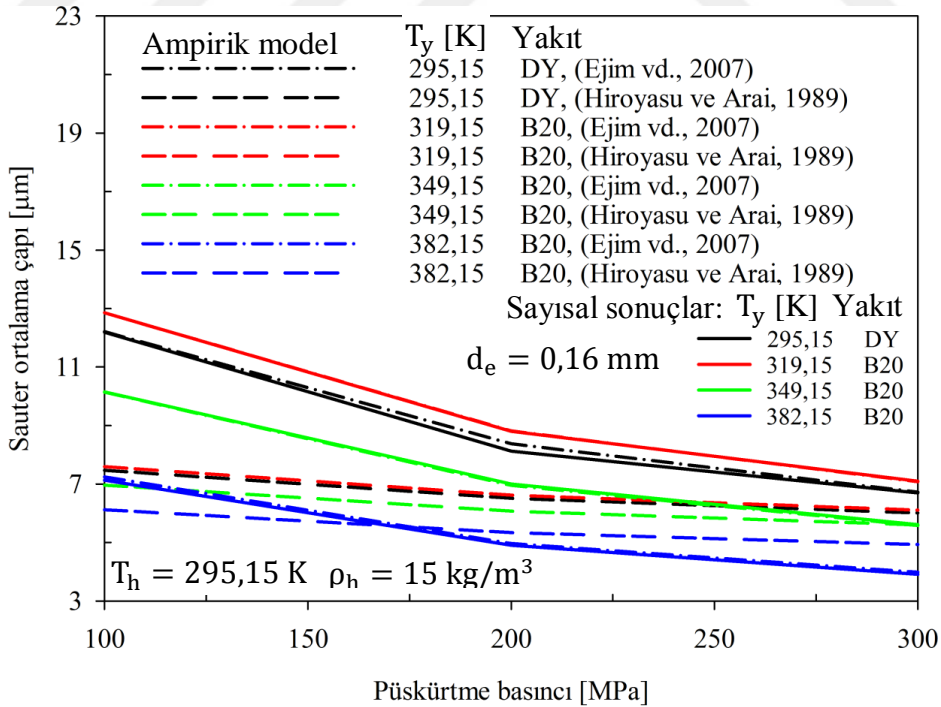
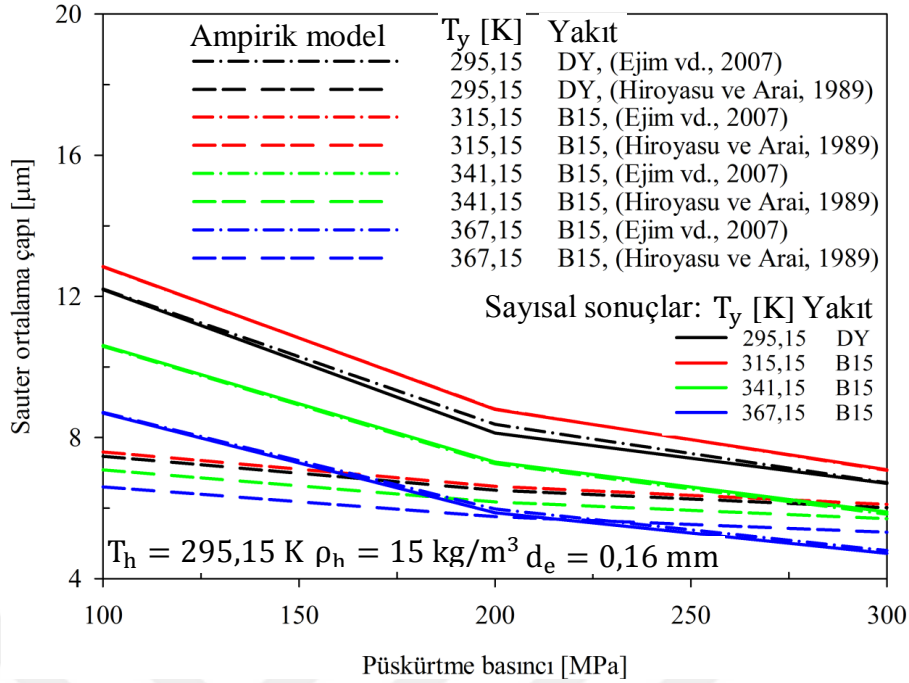
Şekil 4.144. Farklı püskürtme basınçları altında 367,15 K sıcaklıkta 2,388 mm²/s kinematik viskoziteye sahip B15 yakıt karışımının nüfuz derinliğinin değişimine ilişkin sayısal sonuçlar



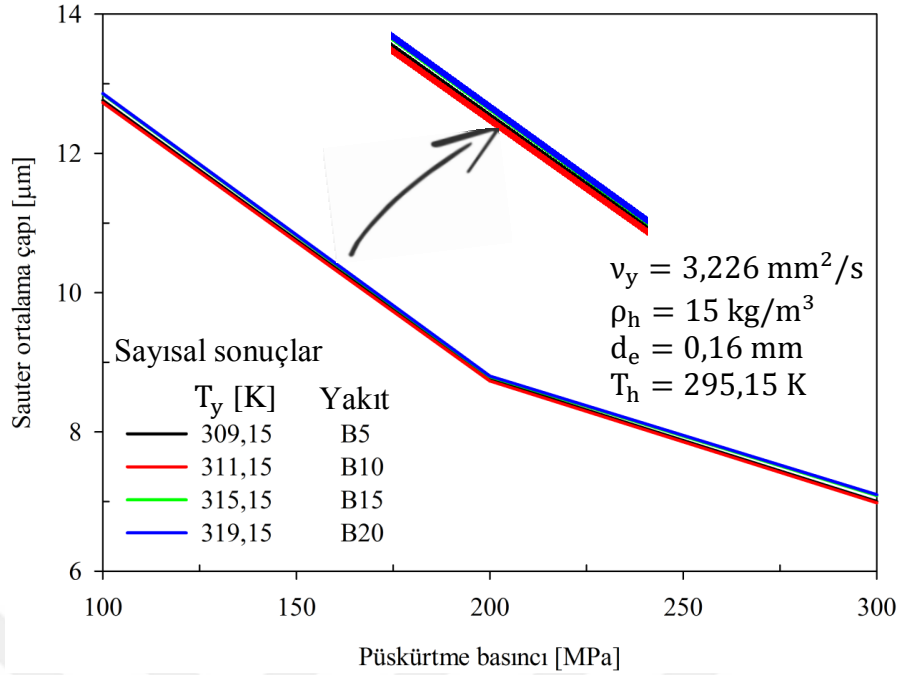
Şekil 4.145. Farklı püskürtme basınçları altında 382,15 K sıcaklıkta 2,388 mm²/s kinematik viskoziteye sahip B20 yakıt karışımının nüfuz derinliğinin ilişkin sayısal sonuçlar

Şekil 4.146–4.149’da, deneysel çalışmadaki [126] parametreler (d_e ve T_h) aynı tutularak, satın alınan ticari saf dizel yakıtının 295,15 K, 310,15 K ve 325,15 K’deki kinematik viskozitelerine (sırasıyla 3,226 mm²/s, 2,683 mm²/s ve 2,388 mm²/s) eşit viskozitelerin elde edildiği sıcaklıklardaki B5 (Şekil 4.146), B10 (Şekil 4.147), B15 (Şekil 4.148) ve B20 (Şekil 4.149) yakıt karışımlarının ve 295,15 K’deki ticari saf dizel yakıtının, yukarıda belirlenen en uygun parametreler (ağ boyutu, türbülans modeli ve parçalanma modeli) kullanılarak Fluent paket programı yardımıyla elde edilen Sauter ortalama çap değerlerinin değişimleri, farklı püskürtme basınçları (100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa) ve 15 kg/m³ karşı-hava yoğunluğunda ampirik modeller ile karşılaştırılmıştır. Diğer bir ifade ile yakıt karışımlarının farklı sıcaklıklardaki Sauter ortalama çap değerleri, 295,15 K sıcaklığındaki saf dizel yakıtınıninkiyile karşılaştırılmıştır. Söz konusu şekiller incelendiğinde, püskürtme basıncından bağımsız olarak karışım yakıtlarının sıcaklıkları artırıldıkça Sauter ortalama çap değerlerinin azaldığı ve 295,15 K’deki saf dizel yakıtının Sauter ortalama çap değerinin ilgili sıcaklıklardaki (295,15 K’deki saf dizel yakıtının 3,226 mm²/s viskozite değerini veren) karışım yakıtlarının ortalama çap değerlerinden (B5, B10,

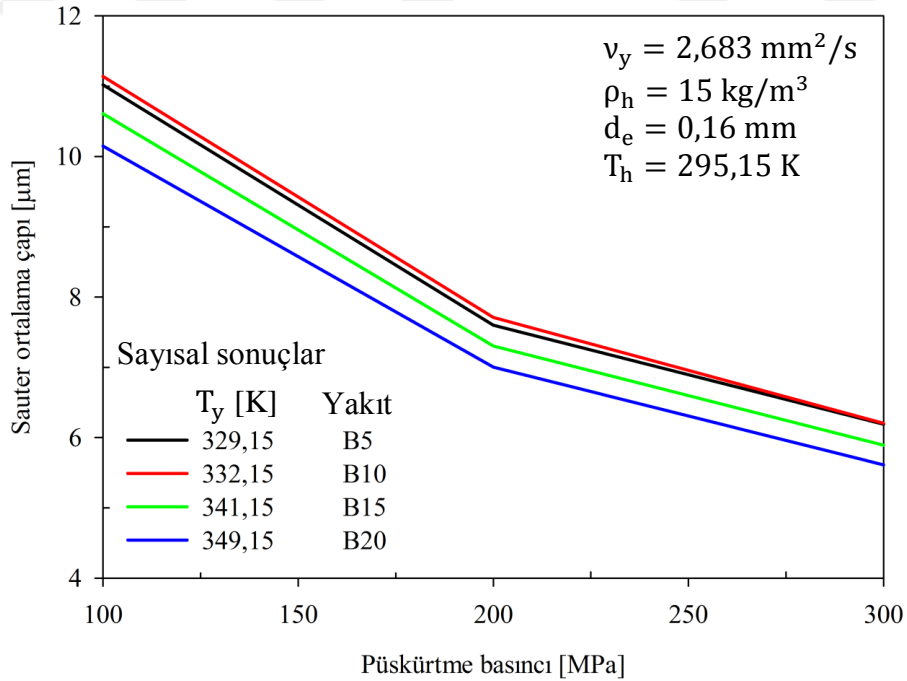
B15 ve B20 için sırasıyla 309,15 K, 311,15 K, 315,15 K ve 319,15 K) daha küçük olduğu görülmüştür. Fakat karışım yakıtlarının diğer sıcaklıklardaki yani daha yüksek sıcaklıklardaki (B5 için 329,15 K ve 345,15 K, B10 için 332,15 K ve 350,15 K, B15 için 341,15 K ve 367,15 K, B20 için 349,15 K ve 382,15 K) ortalama çap değerleri, püskürtme basıncından bağımsız olarak, saf dizel yakıtının ortalama çap değerinden daha küçüktür. Yakıt sıcaklığından bağımsız olarak, karışımların Sauter ortalama çap değerlerinin püskürtme basıncının artışıyla azaldığı görülmüştür. Ayrıca, püskürtme basıncından ve yakıt sıcaklığından bağımsız olarak, Ejim ve arkadaşları [185] tarafından önerilen modelden elde edilen sonuçların, sayısal sonuçları iyi tahmin ettiği belirlenmiştir. Karışım yakıtlarının sıcaklıkları arttıkça yüzey gerilimi, viskozite ve yoğunluk değerleri azaldığı için daha kolay parçalanıp Sauter ortalama çap değerleri azalmıştır. Püskürtme basıncı arttığında, birincil parçalanmaya neden olan yakıt demeti üzerindeki hidrodinamik kararsızlıkların artması ve daha sonra yakıt demetinin enjektörden çıkış hızının artması, damlaların daha küçük damlacıklara parçalanmasına neden olur ki, bu durum Sauter ortalama çap değerlerinin azalmasına neden olmuştur. 295,15 K'deki ticari saf dizel yakıtının Sauter ortalama damlacık çapı karakteristiğinin elde edilebilmesi için Şekil 4.146–4.149'da görüldüğü gibi, püskürtme basıncından bağımsız olarak 309,15 K'de B5, 311,15 K'de B10, 315,15 K'de B15 ve 319,15 K'de B20'nin Sauter ortalama damlacık çapı değerleri 295,15 K'deki ticari saf dizel yakıtının Sauter ortalama damlacık çapı değerlerinden daha fazla olduğu için, ilgili sıcaklıklarda B5, B10, B15 ve B20 kullanıldığında püskürtme basıncı artırılabilir (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki püskürtme basıncına göre), karşı-hava yoğunluğu azaltılabilir (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki karşı-hava yoğunluğuna göre) veya daha küçük delik çapına (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki enjektör delik çapına göre) sahip enjektör kullanılabilir. Ayrıca, diğer sıcaklıklardaki (B5 için 329,15 K ve 345,15 K, B10 için 332,15 K ve 350,15 K, B15 için 341,15 K ve 367,15 K, B20 için 349,15 K ve 382,15 K) söz konusu karışım yakıtlarının ortalama çap değerleri püskürtme basıncından bağımsız olarak ticari saf dizel yakıtınınkinden daha düşük olduğundan dolayı, püskürtme basıncı azaltılmalı (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki püskürtme basıncına göre), karşı-hava yoğunluğu artırılmalı (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki karşı-hava yoğunluğuna göre) veya daha büyük delik çapına sahip enjektör (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki enjektör delik çapına göre) kullanılmalıdır.



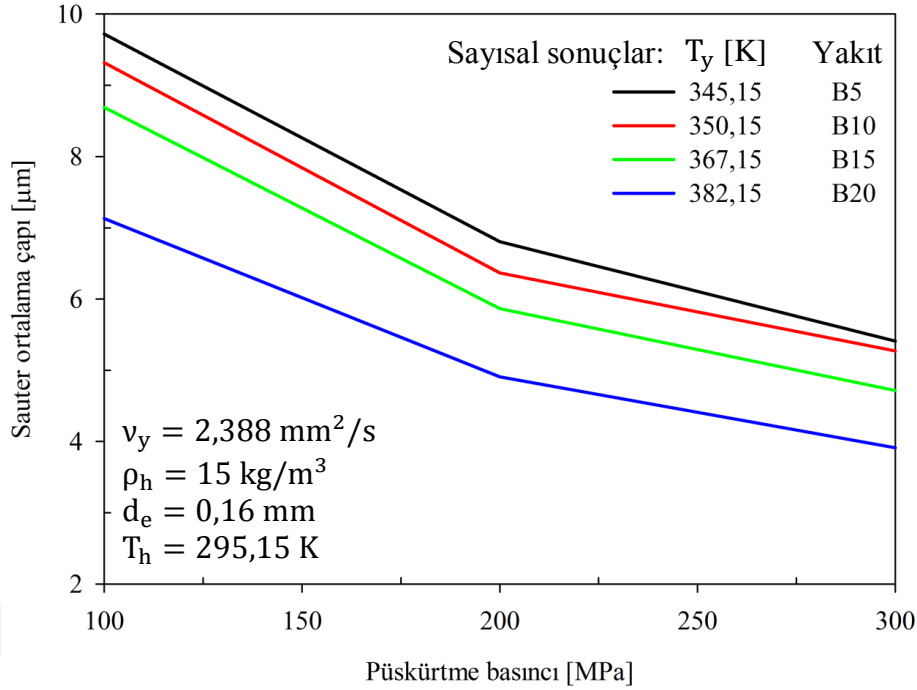
Şekil 4.150–4.152’de, deneysel çalışmadaki [126] parametreler (d_e ve T_h) aynı tutularak, farklı yakıt sıcaklıklarında aynı kinematik viskozite değerlerine ($3,226 \text{ mm}^2/\text{s}$ (Şekil 4.150), $2,683 \text{ mm}^2/\text{s}$ (Şekil 4.151) ve $2,388 \text{ mm}^2/\text{s}$ (Şekil 4.152)) sahip olan B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının farklı püskürtme basınçları (100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa) altındaki Sauter ortalama çap değerlerinin değişimleri, yukarıda belirlenen en uygun parametreler (ağ boyutu, türbülans modeli ve parçalanma modeli) kullanılarak Fluent paket programı yardımıyla $15 \text{ kg}/\text{m}^3$ karşı-hava yoğunluğunda karşılaştırılmıştır. Şekil 4.150 incelendiğinde, $3,226 \text{ mm}^2/\text{s}$ kinematik viskozite değerine sahip olan biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının yoğunluk ve yüzey gerilimi değerleri farklı olsa da, püskürtme basıncından bağımsız olarak, Sauter ortalama çap değerlerinin birbirlerine çok yakın oldukları belirlenmiştir. Bu durum, yakıtın viskozitesinin Sauter ortalama çap değerinin değişimi üzerinde daha etkili olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan, püskürtme basıncından bağımsız olarak, ortalama çap değerleri büyükten küçüğe doğru B20, B15, B5 ve B10 şeklinde sıralanmıştır. Şekil 4.151’e göre, sabit $2,683 \text{ mm}^2/\text{s}$ kinematik viskozite değeri için püskürtme basıncından bağımsız olarak, yakıtların ortalama çap değerleri büyükten küçüğe doğru B10, B5, B15 ve B20 şeklinde sıralanmıştır. Şekil 4.152’ye göre, $2,388 \text{ mm}^2/\text{s}$ kinematik viskozite değerine sahip olan karışım yakıtları için ortalama çap değerleri benzer şekilde püskürtme basıncından bağımsız olarak büyükten küçüğe doğru B5, B10, B15 ve B20 şeklinde sıralanmıştır. Ayrıca, püskürtme basıncının artışı, yakıt demetinin hızının artmasına, dolayısıyla daha küçük damlacıklara parçalanmasına neden olur ki, bu durum Sauter ortalama çap değerlerinin azalmasına neden olur.



Şekil 4.150. Farklı yakıt sıcaklıklarında $3,226 \text{ mm}^2/\text{s}$ kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının Sauter ortalama çaplarının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması



Şekil 4.151. Farklı yakıt sıcaklıklarında $2,683 \text{ mm}^2/\text{s}$ kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının Sauter ortalama çaplarının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması



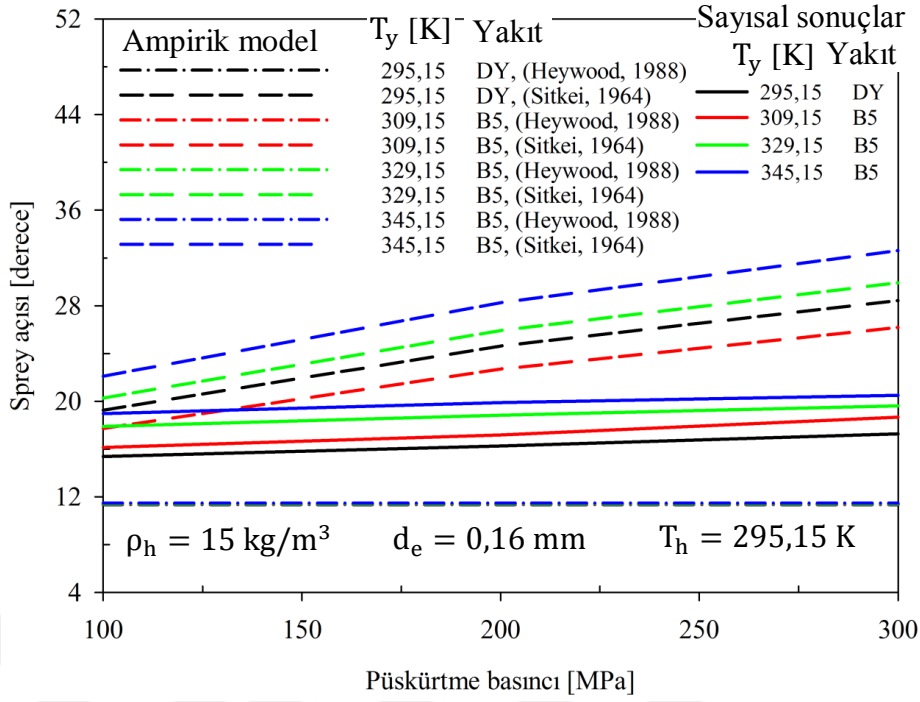
Şekil 4.152. Farklı yakıt sıcaklıklarında $2,388 \text{ mm}^2/\text{s}$ kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının Sauter ortalama çaplarının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması

Şekil 4.153–4.156’da, deneysel çalışmadaki [126] parametreler (d_e ve T_h) aynı tutularak, farklı püskürtme basınçları (100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa) ve yakıt sıcaklıklarında, B5 (Şekil 4.153), B10 (Şekil 4.154), B15 (Şekil 4.155) ve B20 (Şekil 4.156) yakıt karışımlarının, yukarıda belirlenen en uygun parametreler (ağ boyutu, türbülans modeli ve parçalanma modeli) kullanılarak Fluent paket programı yardımıyla elde edilen sprey açısı değerlerinin değişimleri, ampirik modellerle ve 295,15 K sıcaklığındaki ticari saf dizel yakıtının sprey açısı değerleriyle karşılaştırılmıştır. Diğer bir ifade ile yakıt sıcaklığının söz konusu karışımların sprey açısı değerlerine olan etkileri farklı püskürtme basınçları altında incelenmiş ve 295,15 K’deki saf dizel yakıtınınla karşılaştırılmıştır. Söz konusu şekiller incelendiğinde, püskürtme basıncı arttığında, türbülans şiddetinin artması ve titreşim hızının büyümesi nedeniyle yakıt damlacıkları eksenel ve radyal olarak daha geniş bir alana yayıldıklarından dolayı, yakıt sıcaklığından bağımsız olarak, karışım yakıtlarının sprey açısı değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Sitkei [183] tarafından önerilen model, püskürtme basıncından bağımsız olarak, yakıt sıcaklığına göre karışım yakıtlarının sprey açısı değerlerinin değişimlerini, genel olarak karakterize etmiş olsa da, sayısal değer olarak iyi tahmin edememiştir. Ayrıca, püskürtme basıncından

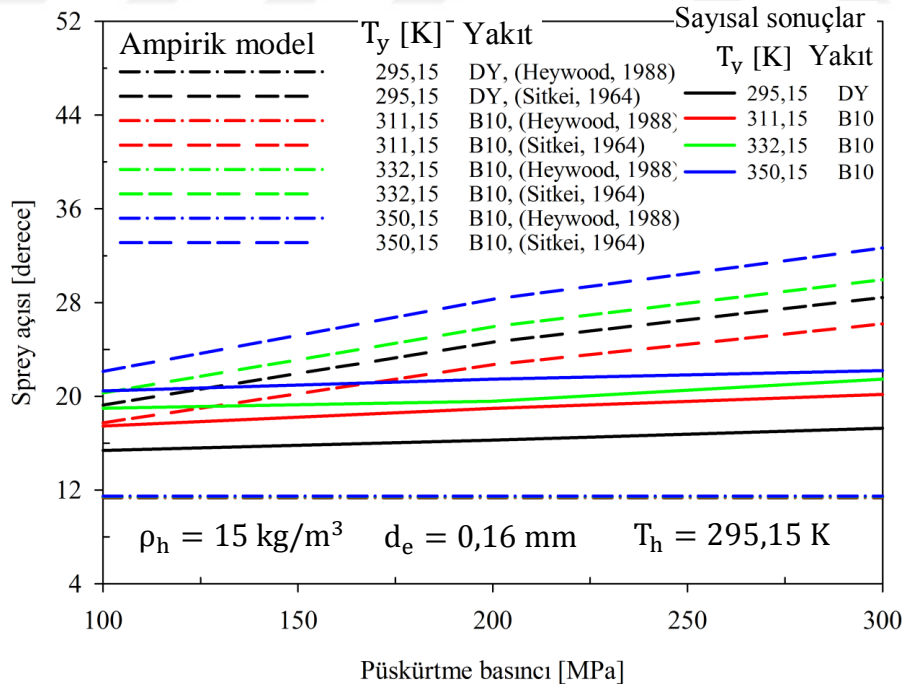
bağımsız olarak, yakıt sıcaklığı arttığında karışım yakıtlarının spray açısı değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Ticari saf dizel yakıtının 295,15 K'deki spray açısı değerleriyle kıyaslandığında, püskürtme basıncından bağımsız olarak, ilgili sıcaklıklardaki (B5, B10, B15 ve B20 için sırasıyla 309,15 K, 311,15 K, 315,15 K ve 319,15 K) B5 ve B10'un spray açısı değerlerinin daha büyük olduğu, B15 ve B20'ninkilerin ise daha küçük olduğu görülebilir. Püskürtme basıncı arttığında, yakıt damlacıklarının enjektörden çıkış hızı arttığından dolayı, karşı-havanın etkisiyle yanma odası içerisinde eksenel ve radyal olarak görece daha geniş bir alana yayılan yakıt demetinin sınırları ve dolayısıyla açısı artar. Karışım yakıtlarının sıcaklıkları arttığında ise, yakıtların yoğunluk, yüzey gerilimi ve viskozite değerleri azalır daha kolay bir şekilde parçalandıklarından dolayı ve eksenel yöndeki momentumları daha fazla azaldığından dolayı, yakıtların spray açısı değerleri artar. Şekil 4.153 ve Şekil 4.154'te görüldüğü gibi, 309,15 K ve 311,15 K'deki B5 ve B10 karışım yakıtlarının yoğunluk değerleri, 295,15 K'deki saf dizel yakıtının yoğunluk değerinden daha az olduklarından dolayı, B5 ve B10'un spray açısı değerleri daha yüksektir. B5 ve B10 karışımlarının sıcaklıkları artırılmaya devam edildiğinde (B5 için 329,15 K ve 345,15 K, B10 için 332,15 K ve 350,15 K), yoğunlukları daha da azaldığından dolayı, belirtilen sıcaklıklardaki spray açısı değerleri daha da artmıştır. Diğer taraftan Şekil 4.155 ve Şekil 4.156'da görüldüğü gibi, 315,15 K ve 319,15 K'deki B15 ve B20 karışım yakıtlarının yoğunluk değerleri, 295,15 K'deki saf dizel yakıtının yoğunluk değerinden daha fazla olduklarından dolayı, B15 ve B20'nin spray açısı değerleri daha küçüktür. Fakat, B15 ve B20 yakıt karışımlarının sıcaklıkları artırıldığında (B15 için 341,15 K ve 367,15 K, B20 için 349,15 K ve 382,15 K), yoğunlukları, saf dizel yakıtının 295,15 K'deki yoğunluk değerinden daha küçük olduklarından dolayı, B15 ve B20'nin spray açısı değerleri artmıştır. 295,15 K'deki ticari saf dizel yakıtının spray açısı karakteristiğinin elde edilebilmesi için, Şekil 4.153–4.156'dan görüldüğü gibi, püskürtme basıncından bağımsız olarak B5 ve B10'un incelenen tüm yakıt sıcaklıklarındaki, B15'in 341,15 K ve 367,15 K'deki, B20'nin ise 349,15 K ve 382,15 K'deki spray açısı değerleri, 295,15 K'deki ticari saf dizel yakıtınıninkinden daha fazla olduğundan, spray açısı değerlerini azaltmak adına püskürtme basıncı azaltılabilir (saf dizel yakıtı kullanıldığında püskürtme basıncına göre), püskürtme basıncından bağımsız olarak karşı-hava yoğunluğu azaltılabilir (saf dizel yakıtı kullanıldığında karşı-hava yoğunluğuna göre) veya daha küçük delik çapına sahip enjektör (saf dizel yakıtı kullanıldığında enjektör delik çapına göre) kullanılabilir. Ayrıca, yine püskürtme basıncından bağımsız olarak B15 ve B20'nin sırasıyla 315,15 K ve

319,15 K'deki sprej açısı değerleri 295,15 K'deki ticari saf dizel yakıtınınkinden daha düşük olduğu için püskürtme basıncı artırılmalı (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki püskürtme basıncına göre), püskürtme basıncından bağımsız olarak karşı-hava yoğunluğu artırılmalı (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki karşı-hava yoğunluğuna göre) veya daha büyük delik çapına sahip enjektör (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki enjektör delik çapına göre) kullanılmalıdır.

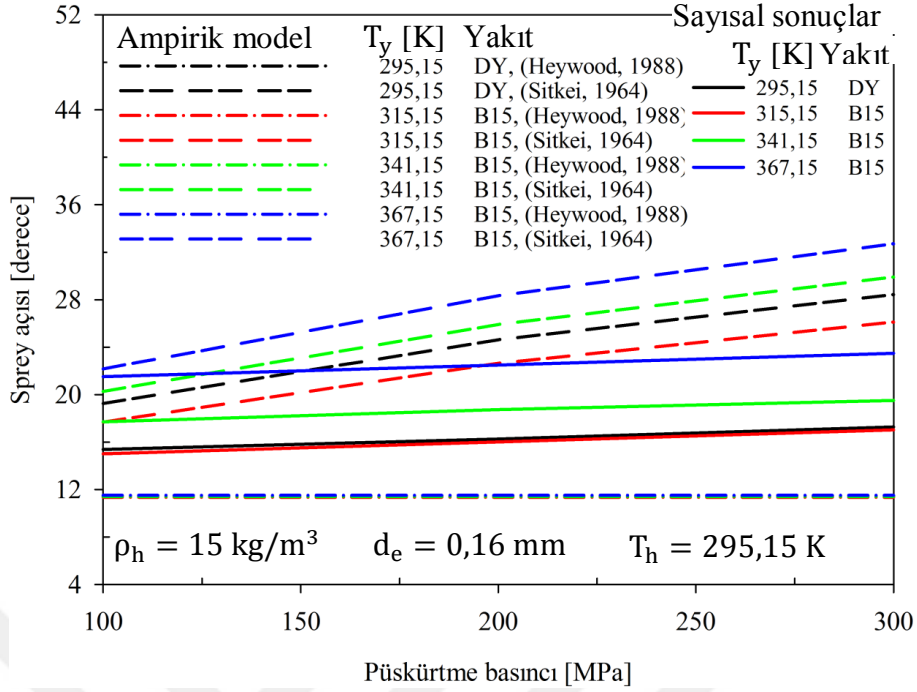
Şekil 4.157–4.159'da, deneysel çalışmadaki [126] parametreler (d_e ve T_h) aynı tutularak, farklı yakıt sıcaklıklarında aynı kinematik viskozite değerlerine ($3,226 \text{ mm}^2/\text{s}$ (Şekil 4.157), $2,683 \text{ mm}^2/\text{s}$ (Şekil 4.158) ve $2,388 \text{ mm}^2/\text{s}$ (Şekil 4.159)) sahip olan B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının farklı püskürtme basınçları (100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa) altındaki sprej açısı değerlerinin değişimleri, yukarıda belirlenen en uygun parametreler (ağ boyutu, türbülans modeli ve parçalanma modeli) kullanılarak Fluent paket programı yardımıyla $15 \text{ kg}/\text{m}^3$ karşı-hava yoğunluğunda karşılaştırılmıştır. Sabit $3,226 \text{ mm}^2/\text{s}$ kinematik viskozite değeri için, ilgili sıcaklıklardaki (B5, B10, B15 ve B20 için sırasıyla 309,15 K, 311,15 K, 315,15 K ve 319,15 K) karışım yakıtlarının açısı değerleri büyükten küçüğe doğru B10, B5, B15 ve B20 şeklinde sıralanmıştır. Yani, yoğunluk ile sprej açısı ters orantılıdır. Benzer şekilde, sabit $2,683 \text{ mm}^2/\text{s}$ kinematik viskozite değeri için, ilgili sıcaklıklardaki (B5, B10, B15 ve B20 için sırasıyla 329,15 K, 332,15 K, 341,15 K ve 349,15 K) karışım yakıtlarının sprej açısı değerleri büyükten küçüğe doğru B20, B10, B5 ve B15 şeklinde sıralanmıştır. Son olarak, $2,388 \text{ mm}^2/\text{s}$ kinematik viskozite değerinin elde edildiği 345,15 K, 350,15 K, 367,15 K ve 382,15 K sıcaklıklarındaki sırasıyla B5, B10, B15 ve B20 karışım yakıtlarının sprej açısı değerleri büyükten küçüğe doğru B20, B15, B10 ve B5 şeklinde sıralanmıştır.



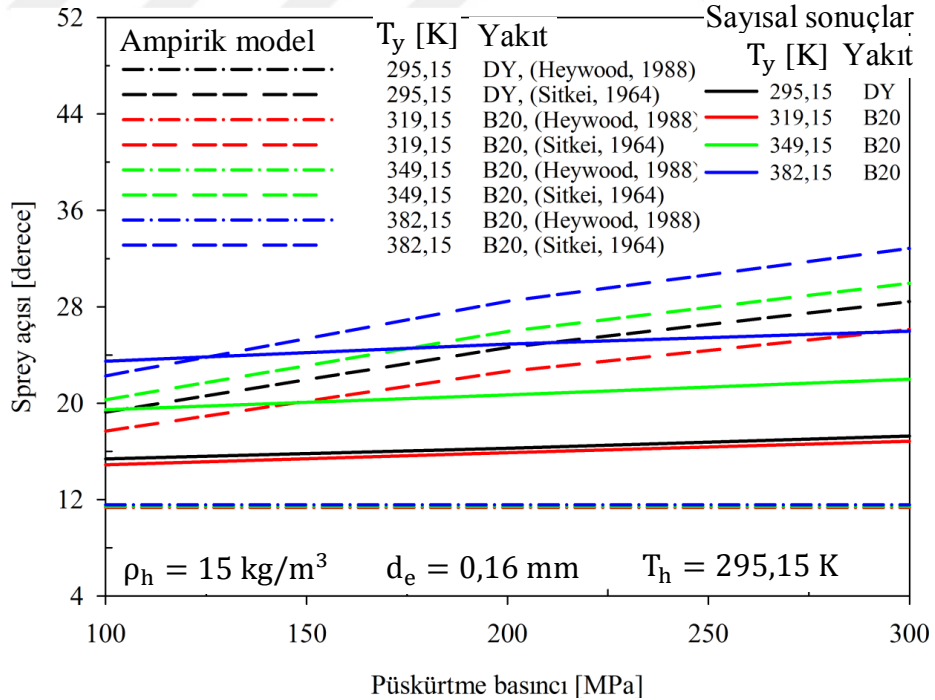
Şekil 4.153. Farklı yakıt sıcaklıklarındaki B5 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının sprey açısı değerlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması



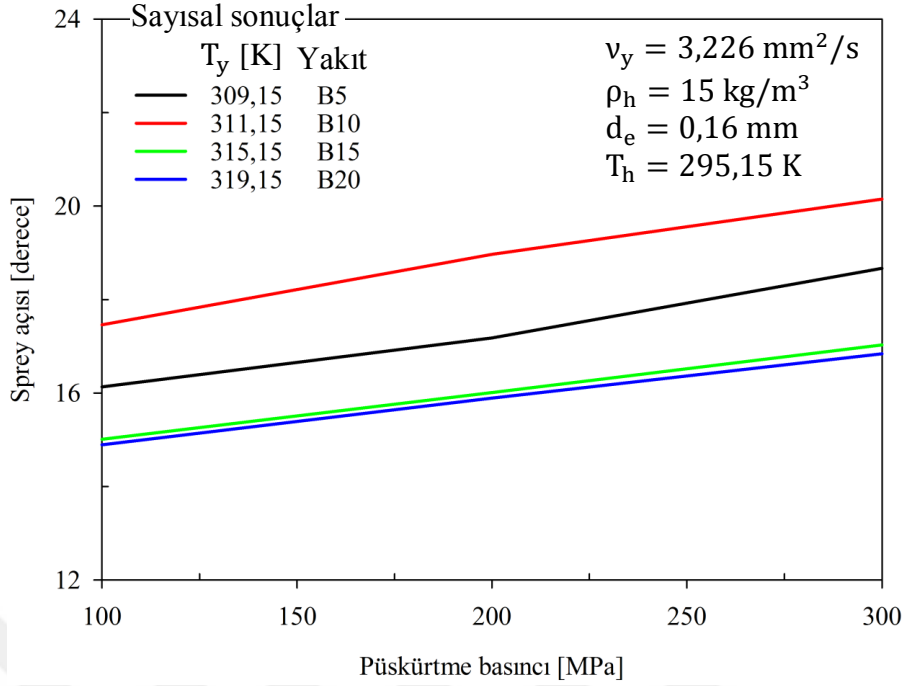
Şekil 4.154. Farklı yakıt sıcaklıklarındaki B10 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının sprey açısı değerlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması



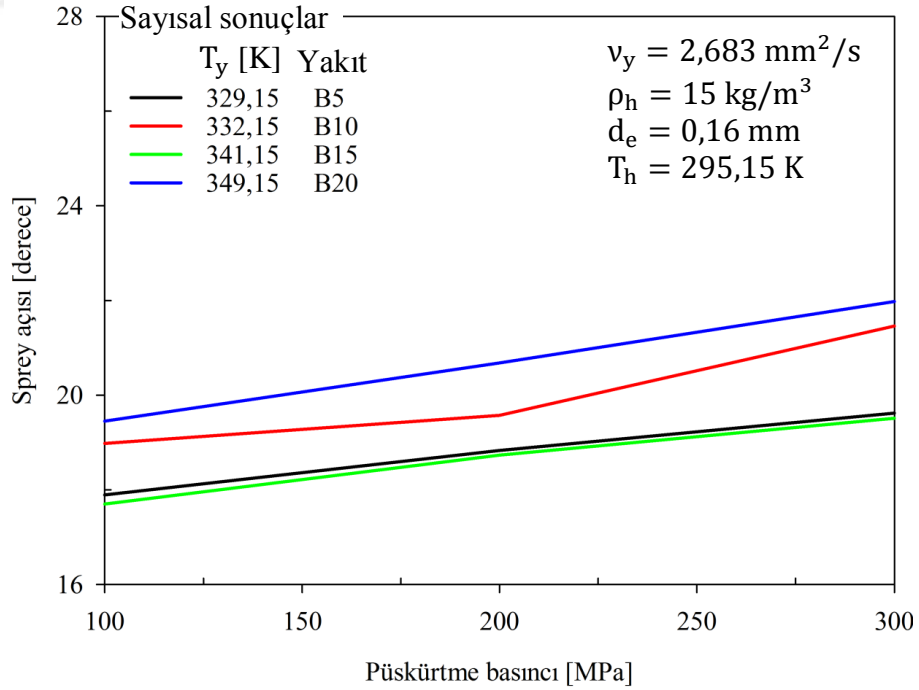
Şekil 4.155. Farklı yakıt sıcaklıklarındaki B15 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının spray açısı değerlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması



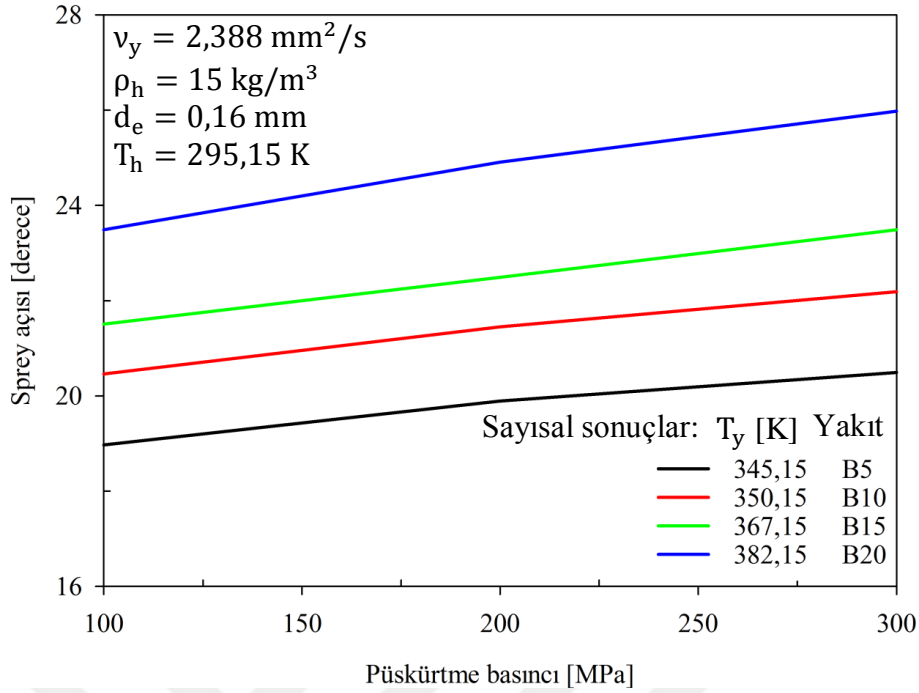
Şekil 4.156. Farklı yakıt sıcaklıklarındaki B20 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının spray açısı değerlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması



Şekil 4.157. Farklı yakıt sıcaklıklarında $3,226 \text{ mm}^2/\text{s}$ kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının sprej açılarının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması



Şekil 4.158. Farklı yakıt sıcaklıklarında $2,683 \text{ mm}^2/\text{s}$ kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının sprej açılarının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması

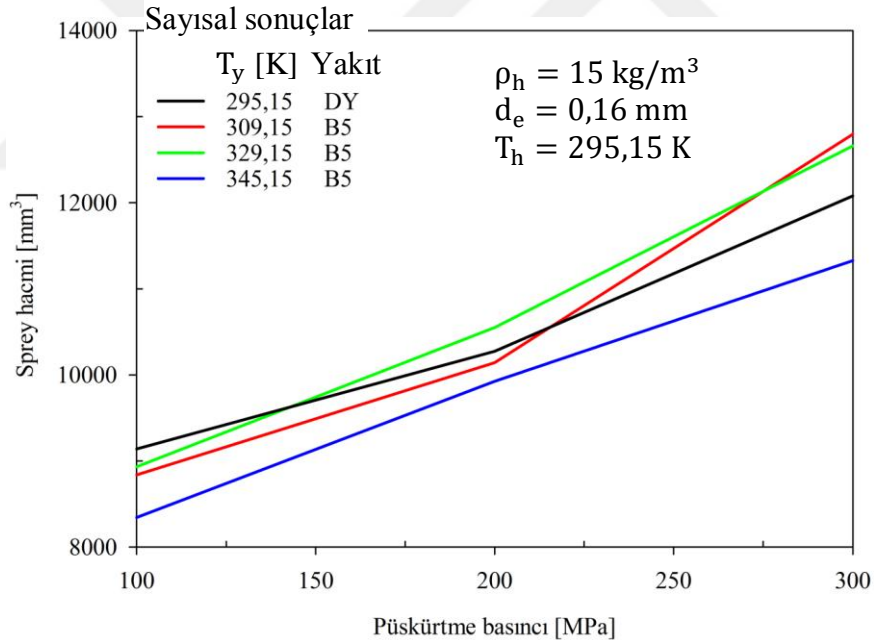


Şekil 4.159. Farklı yakıt sıcaklıklarında $2,388 \text{ mm}^2/\text{s}$ kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının sprej açılarının püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması

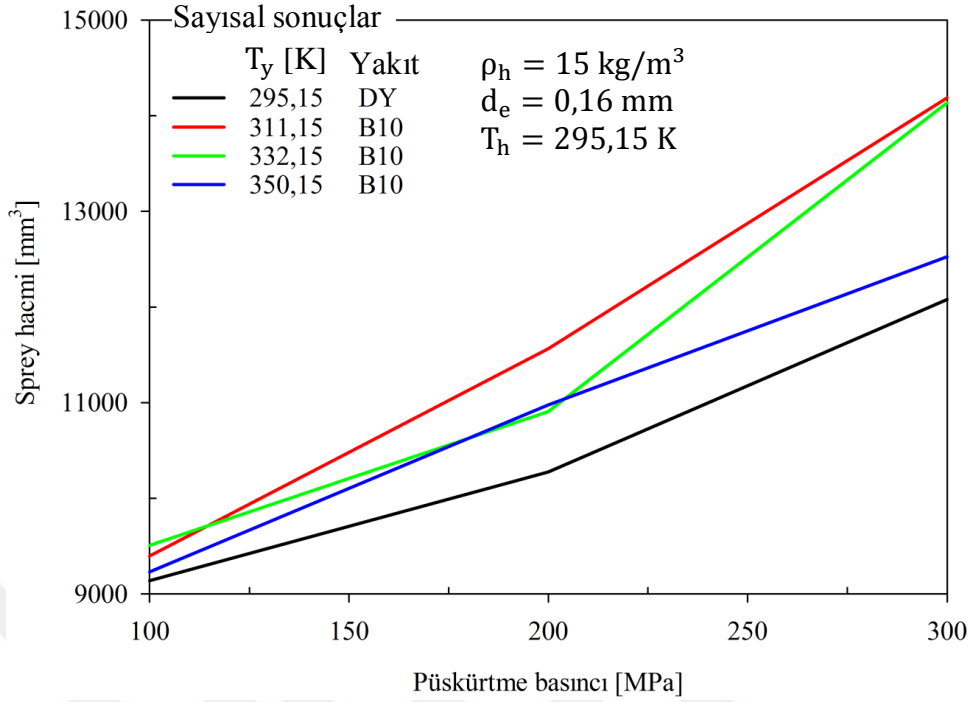
Şekil 4.160–4.163'te, deneysel çalışmadaki [126] parametreler (d_e ve T_h) aynı tutularak farklı püskürtme basınçları (100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa) ve yakıt sıcaklıklarında, B5 (Şekil 4.160), B10 (Şekil 4.161), B15 (Şekil 4.162) ve B20 (Şekil 4.163) yakıt karışımlarının, yukarıda belirlenen en uygun parametreler (ağ boyutu, türbülans modeli ve parçalanma modeli) ve Fluent paket programı yardımıyla elde edilen nüfuz derinliği ile sprej açısı değerlerini kullanarak (3.114) numaralı denklemden hesaplanan sprej hacmi değerleri 15 kg/m^3 karşı-hava yoğunluğunda sayısal olarak belirlenmiş ve $295,15 \text{ K}$ sıcaklığındaki ticari saf dizel yakıtının sprej hacmi değerleriyle karşılaştırılmıştır. Diğer bir ifade ile yakıt sıcaklığının söz konusu karışımların sprej hacimlerine olan etkileri farklı püskürtme basınçları altında incelenmiş ve $295,15 \text{ K}$ 'deki saf dizel yakıtınınla karşılaştırılmıştır. Söz konusu şekillerden, püskürtme basıncı arttığında nüfuz derinliği ve sprej açısı arttığından dolayı, yakıt sıcaklığından bağımsız bir şekilde, genel olarak yakıt karışımlarının sprej hacimlerinin arttığı görülmüştür. Sadece, $382,15 \text{ K}$ sıcaklığındaki B20 yakıt karışımının 200 MPa'daki sprej hacmi değeri 300 MPa'daki sprej hacmi değerinden (Şekil 4.163) azda olsa fazladır. Daha önceden de bahsedildiği gibi, yakıtın yoğunluğuyla sprej açısı ters orantılıdır. Yakıt sıcaklığı arttığında

yoğunluk değeri azaldığı için spray açısı artarken, nüfuz derinliği değeri azalır. Spray hacmi değeri, spray açısına ve nüfuz derinliğine bağlı olduğundan dolayı, yakıt sıcaklığı arttığında (veya azaldığında) spray hacminin kesin olarak artacağı (veya azalacağı) hakkında kesin bir yorum yapılamaz. Diğer bir ifade ile spray hacmindeki değişim, spray açısının mı yoksa nüfuz derinliğinin mi daha baskın olduğuna bağlıdır. Örneğin, Şekil 4.160'ta, 100 MPa ve 200 MPa püskürtme basınçlarında, B5 yakıt karışımının sıcaklığı 309,15 K'den 329,15 K'e artırıldığında, spray açısının artışı daha baskın hale geldiğinden dolayı spray hacmi değerleri artarken, sıcaklığın 345,15 K'e artırılması durumunda nüfuz derinliğindeki azalmanın ön plana çıkmasıyla spray hacmi değerleri azalmıştır. 300 MPa püskürtme basıncında ise, B5 yakıt karışımının sıcaklığı arttıkça nüfuz derinliğindeki azalmayla birlikte spray hacmi değerleri de azalmıştır. 295,15 K sıcaklığındaki saf dizel yakıtıyla eşit viskoziteye ($3,226 \text{ mm}^2/\text{s}$) sahip olan 309,15 K'deki B5 yakıt karışımının spray hacimleri kıyaslandığında, 100 MPa ve 200 MPa püskürtme basınçlarında nüfuz derinliği daha fazla olan saf dizel yakıtının spray hacmi değerlerinin daha fazla olduğu, 300 MPa püskürtme basıncında ise B5'in spray hacmi değerinin daha fazla olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.161 incelendiğinde, 100 MPa püskürtme basıncında, yakıt sıcaklığı 311,15 K'den 332,15 K'e artırıldığında B10 yakıt karışımının spray açısındaki artış nedeniyle spray hacminin arttığı, fakat yakıt sıcaklığının daha fazla artırılmasıyla 350,15 K'deki spray hacmi değerinin nüfuz derinliğindeki azalma nedeniyle azaldığı belirlenmiştir. 200 MPa püskürtme basıncında ise, 332,15 K ile 350,15 K'deki spray hacmi değerleri birbirlerine çok yakın iken, 311,15 K'de nüfuz derinliğindeki artış nedeniyle spray hacmi değeri en yüksek değerini almıştır. Şekil 4.162 incelendiğinde, 100 MPa püskürtme basıncında yakıt sıcaklığı 315,15 K'den 341,15 K'e artırıldığında nüfuz derinliğindeki azalma nedeniyle B15 yakıt karışımının spray hacmi değerinin azaldığı, fakat yakıt sıcaklığı 367,15 K'e artırıldığında spray açısındaki artışın daha baskın hale gelmesiyle B15'in spray hacmi değerinin arttığı belirlenmiştir. Şekil 4.163'te görüldüğü gibi, 100 MPa ve 200 MPa püskürtme basınçlarında, yakıt sıcaklığı arttıkça spray açısı arttığı için B20 yakıt karışımının spray hacmi değerleri artmıştır. 300 MPa püskürtme basıncında ise, 319,15 K ve 382,15 K'deki spray hacmi değerleri birbirlerine yakın iken, 349,15 K'deki spray hacmi değeri nüfuz derinliğindeki azalma nedeniyle azalmıştır. 295,15 K'deki ticari saf dizel yakıtının spray hacmi karakteristiğinin elde edilebilmesi için, Şekil 4.160–4.163'ten görüldüğü gibi, püskürtme basıncından bağımsız olarak B10 ve B20'nin incelenen tüm yakıt sıcaklıklarındaki, B15'in 315,15 K ve 367,15 K'deki, bunlarla

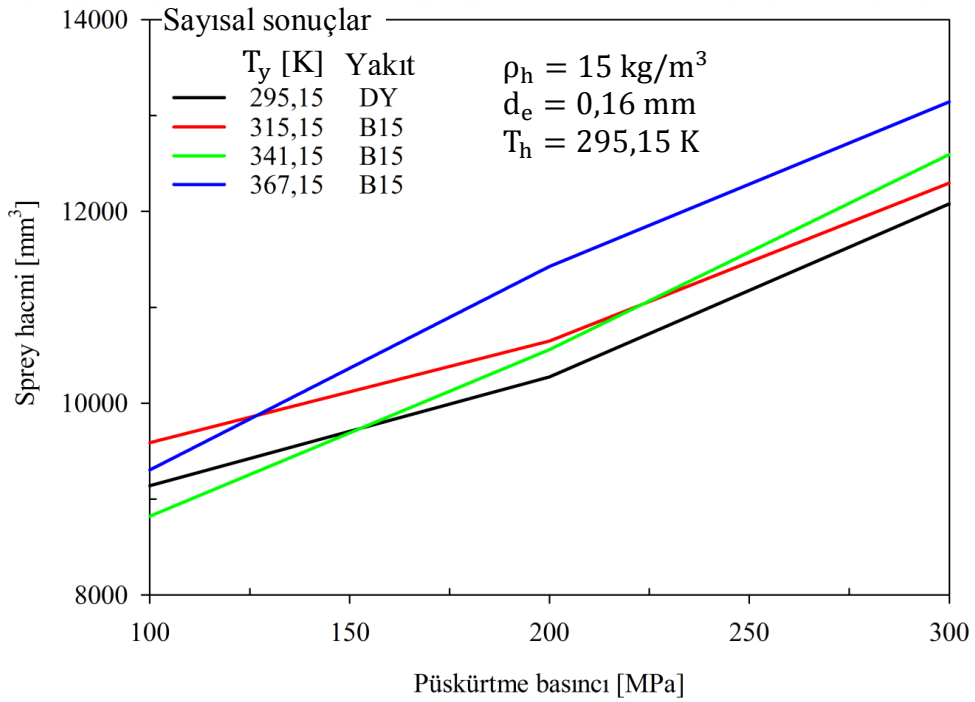
birlikte 200 MPa ve 300 MPa püskürtme basınçlarında B15'in 341,15 K'deki, 200 MPa ve 300 MPa püskürtme basınçlarında B5'in 329,15 K'deki ve 300 MPa püskürtme basıncında B5'in 309,15 K'deki sprej hacmi değerleri, 295,15 K'deki ticari saf dizel yakıtınınkinden daha fazla olduğundan dolayı, sprej hacmi değerlerini azaltmak adına püskürtme basıncı azaltılabilir (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki püskürtme basıncına göre) veya daha küçük delik çapına sahip enjektör (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki enjektör delik çapına göre) kullanılabilir. Ayrıca, 100 MPa püskürtme basıncında B15 ve B5'in sırasıyla 341,15 K ve 329,15 K'deki, 100 MPa ve 200 MPa püskürtme basınçlarında B5'in 309,15 K'deki ve püskürtme basınçlarından bağımsız olarak B5'in 345,15 K'deki sprej hacmi değerleri, 295,15 K'deki ticari saf dizel yakıtınınkinden daha az olduğundan dolayı, sprej hacmi değerlerini artırmak için püskürtme basıncı artırılabilir (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki püskürtme basıncına göre) veya daha büyük delik çapına sahip enjektör (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki enjektör delik çapına göre) kullanılabilir.



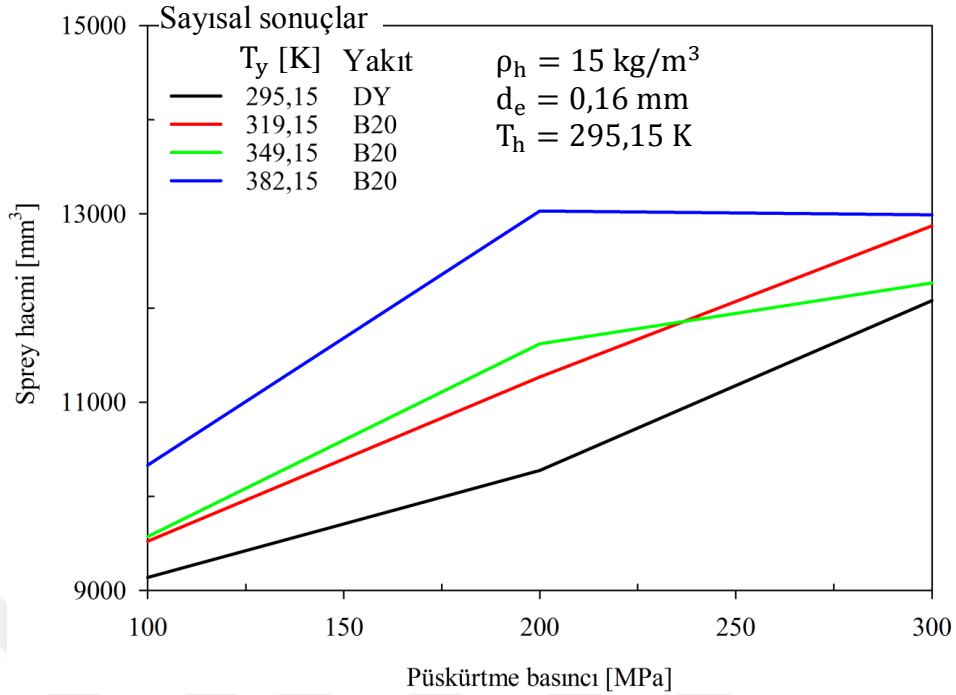
Şekil 4.160. Farklı yakıt sıcaklıklarındaki B5 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının sprej hacmi değerlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması



Şekil 4.161. Farklı yakıt sıcaklıklarındaki B10 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının sprej hacmi değerlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması



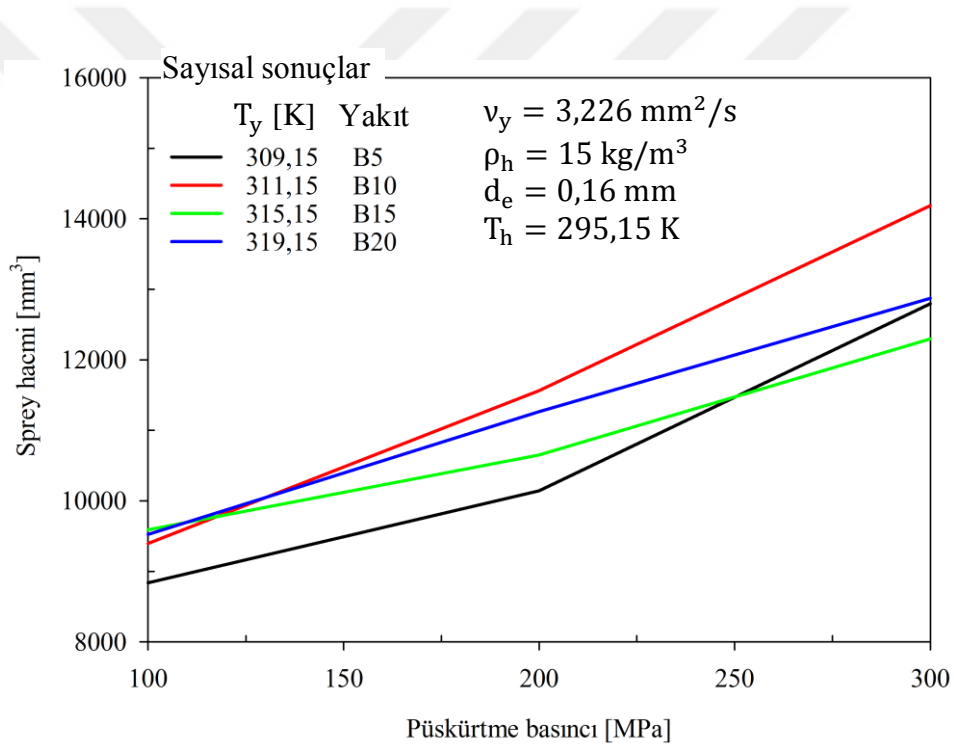
Şekil 4.162. Farklı yakıt sıcaklıklarındaki B15 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının sprej hacmi değerlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması



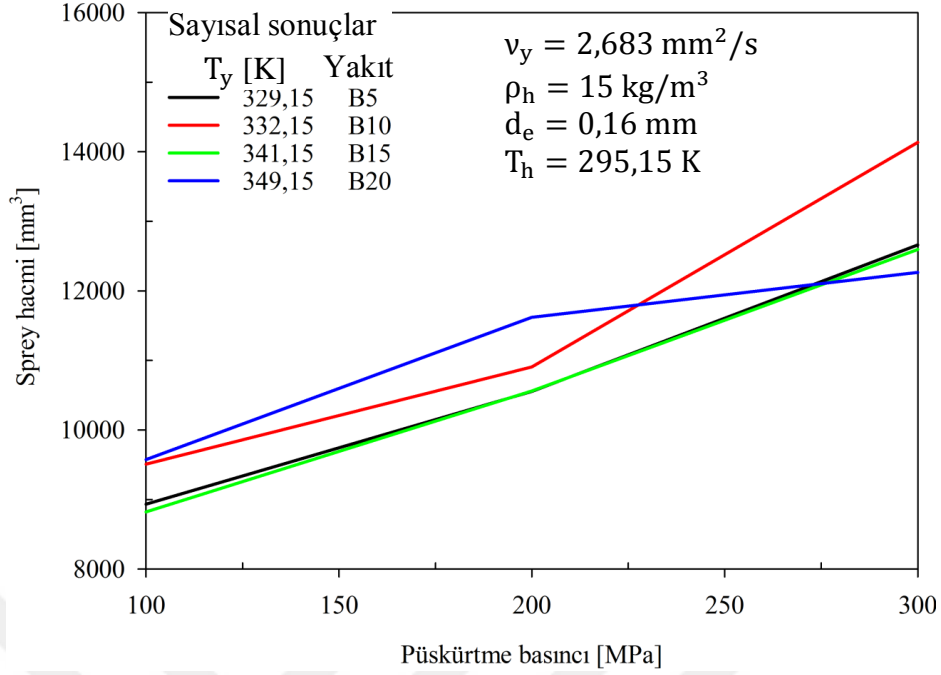
Şekil 4.163. Farklı yakıt sıcaklıklarındaki B20 yakıt karışımının ve 295,15 K sıcaklıktaki ticari saf dizel yakıtının spray hacmi değerlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların ampirik modeller ile karşılaştırılması

Şekil 4.164–4.166’da, deneysel çalışmadaki [126] parametreler (d_e ve T_h) aynı tutularak, farklı püskürtme basınçları (100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa) ve yakıt sıcaklıklarında, aynı kinematik viskozite değerlerine (3,226 mm²/s (Şekil 4.164), 2,683 mm²/s (Şekil 4.165) ve 2,388 mm²/s (Şekil 4.166)) sahip olan B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının, yukarıda belirlenen en uygun parametreler (ağ boyutu, türbülans modeli ve parçalanma modeli) ve Fluent paket programı yardımıyla elde edilen nüfuz derinliği ile spray açısı değerlerini kullanarak (3.114) numaralı denklemden hesaplanan spray hacmi değerleri 15 kg/m³ karşı-hava yoğunluğunda sayısal olarak karşılaştırılmıştır. Diğer bir ifade ile farklı sıcaklıklarda aynı viskozite değerlerine (3,226 mm²/s, 2,683 mm²/s ve 2,388 mm²/s) sahip olan yakıt karışımlarının farklı püskürtme basınçları altındaki spray hacimlerinin değişimleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Şekil 4.164’e göre, sabit 3,226 mm²/s kinematik viskozite değeri için 100 MPa püskürtme basıncında B15 ile B20 yakıt karışımlarının spray açısı değerleri farklı olsa da, nüfuz derinliği değerleri birbirlerine çok yakın olduklarından dolayı spray hacmi değerleri de birbirlerine çok yakındır. Ayrıca B15 ile B20 yakıt karışımlarının nüfuz derinliği değerleri B5 ile B10’un nüfuz derinliği değerlerinden daha fazla olduğundan dolayı spray hacimleri de B5 ile B10’un spray hacmi

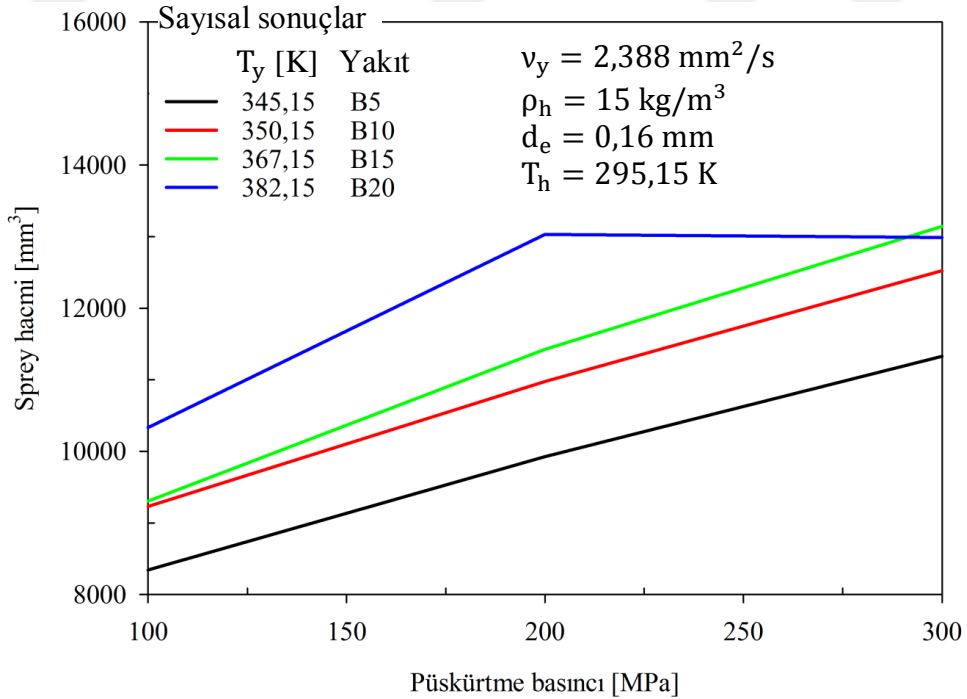
değerlerinden daha fazladır. B10 yakıt karışımının nüfuz derinliği değeri B5'inkinden daha küçük olsa da, yoğunluğu daha düşük olduğu için sprej açısı değeri daha büyük olduğundan dolayı B10'un sprej hacmi değeri B5'inkinden daha fazladır. Şekil 4.165'e göre, sabit $2,683 \text{ mm}^2/\text{s}$ kinematik viskozite değeri için, tüm püskürtme basınçlarında, B5 ile B15 yakıt karışımlarının sprej açısı ve nüfuz derinliği değerleri birbirlerine çok yakın olduklarından dolayı sprej hacmi değerleri de birbirlerine çok yakındır. Şekil 4.166'ya göre, sabit $2,388 \text{ mm}^2/\text{s}$ kinematik viskozite değeri için, 100 MPa ve 200 MPa püskürtme basınçlarında, sprej açısındaki değişime benzer bir şekilde (Şekil 4.159), en yüksekten en düşüğe doğru sprej hacimleri B20, B15, B10 ve B5 şeklinde sıralanmıştır. Bu durum, sprej hacminin değişiminde sprej açısının daha etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.164. Farklı yakıt sıcaklıklarında $3,226 \text{ mm}^2/\text{s}$ kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının sprej hacimlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması



Şekil 4.165. Farklı yakıt sıcaklıklarında $2,683 \text{ mm}^2/\text{s}$ kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının sprej hacimlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması



Şekil 4.166. Farklı yakıt sıcaklıklarında $2,388 \text{ mm}^2/\text{s}$ kinematik viskoziteye sahip B5, B10, B15 ve B20 yakıt karışımlarının sprej hacimlerinin püskürtme basıncıyla değişimine ilişkin elde edilen sayısal sonuçların karşılaştırılması

5. SONUÇLAR

Deneysel ve sayısal çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Tablo 4.1–4.8’de verilen bütün değerler incelendiğinde, 8:1 alkol/yağ mol oranı, % 1 katalizör oranı, 55 °C reaksiyon sıcaklığı ve 53 dakika reaksiyon süresinin optimum değerler olduğu belirlenmiştir.
2. Tablo 4.9’da görüldüğü gibi, optimum atık kızartma yağı biyodizelinin setan indeksi 56 (ASTM D 4737), üst ısıl değeri 39,790 kJ/kg (DIN 51900-2), parlama noktası sıcaklığı 180 °C (TS EN ISO 3679), soğukta filtre tıkanma noktası sıcaklığı -11 °C (TS EN 116), akma noktası sıcaklığı -6 °C (TS 1233 ISO 3016), toplam kirlilik değeri 17,8 mg/kg (TS EN 12662), kütleli karbon kalıntısı değeri % 0,22 (TS EN ISO 10370), 110 °C’deki oksidasyon kararlılığı 9 saat (TS EN 14112), kütleli mono, di ve trigliserit içerikleri sırasıyla % 0,38, % 0,12, % 0,09 (TS EN 14105), asit sayısı 0,41 mg KOH/g (TS EN 14104), kütleli çoklu doymamış metil ester içeriği % 0,20 (TS EN 15779), bakır şerit korozyonu değeri 1A (TS 2741), kütleli metanol içeriği % 0,03 (TS EN 14110), su içeriği % 401,4 (TS 6147), kütleli sülfatlanmış kül içeriği % 0,007 (TS ISO 3987), kükürt içeriği 3 mg/kg daha az (TS EN ISO 20846) ve iyot sayısı 101,2 g I₂/100 g (TS EN 14111) olarak K.T.Ü Prof. Dr. Saadettin GÜNER Yakıt Uygulama ve Araştırma Merkezi’nde ölçtürülmüştür. Üretilen bu biyodizelin EN 14214 standartlarına uygun olduğu görülmüştür.
3. Küçük ölçekli üretim yapılması nedeniyle maliyetlerin artması sonucu, üretilen biyodizelin, ticari saf dizel yakıtına göre fiyatının daha pahalı olduğu belirlenmiştir. Büyük ölçekli seri üretimde maliyetlerin azalacağı açıktır. Ülkemizin tarımsal potansiyeli dikkate alındığında (özellikle metil alkol üretiminde), dünyada petrol fiyatlarının sürekli artış göstermesi ve petrolün çok da uzak olmayan bir gelecekte tükenmesi nedeniyle, atık kızartma yağı biyodizelinin dizel motorlar için dizel yakıtına alternatif olması kaçınılmazdır. Ayrıca, atık kızartma yağının, biyodizel üretimi için toplanmasıyla çevre kirliliğinin önüne de geçilmiş olunacaktır.
4. Şekil 4.56–4.59’a göre, Wang ve arkadaşları tarafından 2010’da gerçekleştirilen deneysel çalışmadaki [126] saf dizel yakıtının ve atık kızartma yağı biyodizelinin yakıt demeti karakteristiklerinin değerlerine ve değişim eğilimlerine en yakın

sonuçlar, sayısal çalışmada 1 mm ağ boyutu, standart $k - \epsilon$ türbülans modeli ve KH-RT parçalanma modeli kullanıldığında elde edilmiştir.

5. Püskürtme basıncından bağımsız olarak, karşı-hava yoğunluğu arttığında ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin nüfuz derinliği değerlerinin azaldığı, ayrıca yine püskürtme basıncından bağımsız olarak her iki karşı-hava yoğunluğuunda da genel olarak, üretilen saf biyodizelin nüfuz derinliği değerlerinin ticari saf dizel yakıtına göre daha fazla olduğu belirlenmiştir.
6. Püskürtme basıncının artışıyla yakıt demetinin momentumu arttığından dolayı, ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin nüfuz derinliklerinin arttığı belirlenmiştir. Fakat püskürtme basıncının daha fazla artırılması (200 MPa'dan 300 MPa'a) nüfuz derinliğini çok fazla arttırmamıştır.
7. Püskürtme basıncının artışıyla birlikte, ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin Sauter ortalama çap değerlerinin azaldığı, karşı-hava yoğunluğu arttığında ise Sauter ortalama çap değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Aynı püskürtme basıncı veya karşı-hava yoğunluğu için, ticari saf dizel yakıtının Sauter ortalama çap değerlerinin üretilen saf biyodizelininkinden daha küçük olduğu belirlenmiştir.
8. Hem üretilen saf biyodizel hem de ticari saf dizel yakıtı için, püskürtme basıncı veya karşı-ortam yoğunluğu arttığında sprej açısı değerleri artmıştır. Fakat püskürtme basıncıyla olan artışın daha az, karşı-ortam yoğunluğuyla olan ki artışın ise çok daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Aynı püskürtme basıncı veya karşı-hava yoğunluğu için, saf biyodizelin sprej açısı değerlerinin ticari saf dizel yakıtınıninkinden daha küçük olduğu belirlenmiştir.
9. Püskürtme basıncının artışıyla birlikte, hem nüfuz derinliği hem de sprej açısı değerleri arttığından dolayı, karşı-hava yoğunluğuundan bağımsız olarak ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin sprej hacmi değerleri genelde artmıştır.
10. Püskürtme basıncından bağımsız olarak enjektör delik çapı arttığında, ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin nüfuz derinliklerinin arttığı grlmştir. Enjektör delik çapındaki birim artış başına söz konusu yakıtların nüfuz derinliklerindeki artışın 15 kg/m^3 karşı-hava yoğunluğuunda genel olarak daha fazla olduğu belirlenmiştir.
11. Her iki karşı-hava yoğunluğuunda da, yakıt türünden bağımsız olarak, orta büyüklükteki enjektör delik çaplarına karşılık gelen (0,16 mm ve 0,32 mm) değerler

için nüfuz derinliğindeki artışın, daha düşük (0,08 mm) ve yüksek (0,64 mm) enjektör delik çaplarındaki artışa göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

12. Her iki karşı-hava yoğunluğu için de, enjektör delik çapı arttığında, ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin Sauter ortalama çap değerlerinin arttığı görülmüştür.
13. Her iki karşı-hava yoğunluğu için de, enjektör delik çapı arttıkça, ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin sprej açısı değerlerinin arttığı görülmüştür.
14. Her iki karşı-hava yoğunluğu için de, enjektör delik çapı değeri arttığında, ticari saf dizel yakıtının ve üretilen saf biyodizelin nüfuz derinlikleri ve sprej açıları arttığından dolayı sprej hacmi değerleri de artmıştır.
15. Ticari saf dizel yakıtının 22 °C, 37 °C ve 52 °C'deki kinematik viskozite değerlerine eşit viskozite değerlerinin elde edildiği sıcaklık değerleri B5, B10, B15 ve B20 için sırasıyla 309,15 K, 311,15 K, 315,15 K, 319,15 K; 329,15 K, 332,15 K, 341,15 K, 349,15 K; ve 345,15 K, 350,15 K, 367,15 K, 382,15 K olarak hesaplanmıştır.
16. B5 ve B10'un ilgili tüm sıcaklıklardaki (eşit viskozitenin elde edildiği, diğer bir ifade ile B5 için 309,15 K, 329,15 K, 345,15 K ve B10 için 311,15 K, 332,15 K, 350,15 K) nüfuz derinliği değerleri, 22 °C'deki ticari saf dizel yakıtınıninkine göre daha azdır. B15 ve B20'nin ilgili sıcaklıklardaki (B15 için 315,15 K, B20 için 319,15 K) nüfuz derinliği değerleri ise 22 °C'deki ticari saf dizel yakıtınıninkinden daha fazladır.
17. Püskürtme basıncından bağımsız olarak, yakıt karışımlarının sıcaklıkları arttıkça nüfuz derinlikleri azalmıştır.
18. Sabit 3,226 mm²/s kinematik viskozite değerine sahip olan farklı sıcaklıklardaki yakıt karışımları incelendiğinde, B15 ve B20'nin nüfuz derinliklerinin B5 ve B10'a göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Sabit 2,683 mm²/s kinematik viskozite değeri için eşit viskoziteyi veren sıcaklıklardaki B5 (329,15 K'de) ve B15 (341,15 K'de) yakıt karışımlarının nüfuz derinliklerinin B20 ve B10'a göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. B5 ve B15 karışım yakıtlarının yoğunluk değerleri birbirlerine yakın olduğundan dolayı üç püskürtme basıncı için de nüfuz derinliği değerleri birbirlerine yakındır. Sabit 2,388 mm²/s kinematik viskozite değeri için ise eşit viskozite değerini veren sıcaklıklardaki nüfuz derinlikleri en yüksekte en düşüğe doğru B5 (345,15 K'de), B10 (350,15 K'de), B15 (367,15 K'de) ve B20 (382,15 K'de) için sıralanmıştır.

19. Karışım yakıtlarının sıcaklıkları artırıldıkça püskürtme basıncından bağımsız olarak Sauter ortalama çap değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. 295,15 K'deki saf dizel yakıtının Sauter ortalama çap değerinin ilgili sıcaklıklardaki ($3,226 \text{ mm}^2/\text{s}$ viskozite değerini veren) karışım yakıtlarıninkilerden daha küçük olduğu görülmüştür.
20. Püskürtme basıncından bağımsız olarak, yakıt sıcaklığı arttığında karışım yakıtlarının sprej açısı değerlerinin arttığı belirlenmiştir.
21. Ticari saf dizel yakıtının 295,15 K'deki sprej açısı değerleriyle kıyaslandığında, püskürtme basıncından bağımsız olarak, ilgili sıcaklıklardaki (B5, B10, B15 ve B20 için sırasıyla 309,15 K, 311,15 K, 315,15 K ve 319,15 K) B5 ve B10'un sprej açısı değerlerinin daha büyük, B15 ve B20'nin sprej açısı değerlerinin ise daha küçük olduğu belirlenmiştir.
22. Yakıt sıcaklığından bağımsız olarak püskürtme basıncı arttığında, genel olarak yakıt karışımlarının sprej hacimlerinin arttığı belirlenmiştir.
23. 295,15 K'deki ticari saf dizel yakıtının nüfuz derinliği karakteristiğinin elde edilebilmesi için, B5 ve B10 karışımları ilgili sıcaklıklarda (B5 için 309,15 K, 329,15 K ve 345,15 K, B10 için 311,15 K, 332,15 K ve 350,15 K) kullanıldığında püskürtme basıncı artırılabilir (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki püskürtme basıncına göre), püskürtme basıncından bağımsız olarak karşı-hava yoğunluğu (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki karşı-hava yoğunluğuna göre) (sıkıştırma oranı değiştirilerek) azaltılabilir veya daha büyük çapa sahip enjektör (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki enjektör delik çapına göre) kullanılabilir. 315,15 K'de B15 ve 319,15 K'de B20 kullanıldığında ise püskürtme basıncı azaltılabilir (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki püskürtme basıncına göre), püskürtme basıncından bağımsız olarak karşı-hava yoğunluğu (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki karşı-hava yoğunluğuna göre) (sıkıştırma oranı değiştirilerek) artırılabilir veya daha küçük çapa sahip enjektör (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki enjektör delik çapına göre) kullanılabilir. Diğer sıcaklıklardaki (B15 için 341,15 K ve 367,15 K, B20 için 349,15 K ve 382,15 K) B15 ve B20 karışımları için ise nüfuz derinliğini artırmak adına püskürtme basıncı artırılabilir (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki püskürtme basıncına göre), püskürtme basıncından bağımsız olarak karşı-hava yoğunluğu (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki karşı-hava yoğunluğuna göre) azaltılabilir veya daha büyük çapa sahip enjektör (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki enjektör delik çapına göre) kullanılabilir.

24. 295,15 K'deki ticari saf dizel yakıtının Sauter ortalama damlacık çapı karakteristiğinin elde edilebilmesi için, 309,15 K'de B5, 311,15 K'de B10, 315,15 K'de B15 ve 319,15 K'de B20 kullanıldığında püskürtme basıncı artırılabilir (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki püskürtme basıncına göre), püskürtme basıncından bağımsız olarak karşı-hava yoğunluğu (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki karşı-hava yoğunluğuna göre) azaltılabilir veya daha küçük delik çapına sahip (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki enjektör delik çapına göre) enjektör kullanılabilir. Diğer sıcaklıklarda (B5 için 329,15 K ve 345,15 K, B10 için 332,15 K ve 350,15 K, B15 için 341,15 K ve 367,15 K, B20 için 349,15 K ve 382,15 K) söz konusu B5, B10, B15 ve B20 karışım yakıtları kullanıldığında ise püskürtme basıncı azaltılmalı (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki püskürtme basıncına göre), püskürtme basıncından bağımsız olarak karşı-hava yoğunluğu artırılmalı (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki karşı-hava yoğunluğuna göre) veya daha büyük delik çapına sahip enjektör (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki enjektör delik çapına göre) kullanılmalıdır.
25. 295,15 K'deki ticari saf dizel yakıtının sprey açısı karakteristiğinin elde edilebilmesi için, B5, B10, 341,15 K'de ve 367,15 K'de B15, 349,15 K'de ve 382,15 K'de B20 karışım yakıtları kullanıldığında püskürtme basıncı azaltılabilir (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki püskürtme basıncına göre), püskürtme basıncından bağımsız olarak karşı-hava yoğunluğu azaltılabilir (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki karşı-hava yoğunluğuna göre) veya daha küçük delik çapına sahip enjektör kullanılabilir (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki enjektör delik çapına göre). Ayrıca, 315,15 K'de B15 ve 319,15 K'de B20 kullanıldığında ise püskürtme basıncı artırılmalı (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki püskürtme basıncına göre), püskürtme basıncından bağımsız olarak karşı-hava yoğunluğu artırılmalı (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki karşı-hava yoğunluğuna göre) veya daha büyük delik çapına sahip enjektör (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki enjektör delik çapına göre) kullanılmalıdır.
26. Yakıtların sprey hacimlerindeki değişimler, nüfuz derinliği ve sprey açısındaki değişimlere bağlıdır. 295,15 K'deki ticari saf dizel yakıtının sprey hacmi karakteristiğinin elde edilebilmesi için, püskürtme basıncından bağımsız olarak B10 ve B20'nin incelenen tüm yakıt sıcaklıklarındaki, B15'in 315,15 K'deki ve 367,15 K'deki, bunlarla birlikte 200 MPa ve 300 MPa püskürtme basınçlarında B15'in 341,15 K'deki, 200 MPa ve 300 MPa püskürtme basınçlarında B5'in 329,15 K'deki ve 300 MPa püskürtme basıncında B5'in 309,15 K'deki sprey hacmi değerlerini

azaltmak adına püskürtme basıncı azaltılabilir (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki püskürtme basıncına göre) veya daha küçük delik çapına sahip enjektör (saf dizel yakıtı kullanıldığındaki enjektör delik çapına göre) kullanılabilir. Ayrıca, 100 MPa püskürtme basıncında B15'in ve B5'in sırasıyla 341,15 K'deki ve 329,15 K'deki, 100 MPa ve 200 MPa püskürtme basınçlarında B5'in 309,15 K'deki ve püskürtme basınçlarından bağımsız olarak B5'in 345,15 K'deki sprej hacmi değerlerini artırmak için püskürtme basıncı artırılabilir veya daha büyük delik çapına sahip enjektör kullanılabilir.



6. ÖNERİLER

Gerçekleştirilen deneysel ve sayısal çalışmaların sonucunda, ileride yapılması düşünülen çalışmalar için aşağıdaki öneriler yapılmıştır:

1. Farklı yağ (özellikle hayvansal), katalizör ve alkollerin kullanımında Taguchi, cevap yüzeyi (RSM) veya yapay sinir ağları gibi yöntemlerle ester verimi ve/veya herhangi bir yakıt özelliği (setan sayısı, ısıl değer, vb.) çıkış parametresi olarak referans alınıp, transesterifikasyon reaksiyonu optimize edilebilir.
2. Yakıt demetinin modellenmesinde farklı türbülans modelleri (RNG, vb.) veya parçalanma modelleri (Taylor analogy breakup, vb.) kullanılabilir. Bu modellerin, deneysel çalışmalardan elde edilen verileri doğrulama noktasındaki etkinlikleri karşılaştırılabilir. Deneysel çalışmalar ile kıyaslanarak farklı parçalanma modelleriyle ilgili bilgisayar programları geliştirilebilir.
3. Özellikle günümüz dizel motorlarda kullanılan yüksek püskürtme basınçlarına uygun olarak nüfuz derinliği, sprej açısı ve sprej hacmi gibi yakıt demeti karakteristikleri için ampirik, analitik veya regresyon modelleri geliştirilebilir.
4. Sunulan tezde verilen biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının ilgili şartlar altındaki yakıt demeti özellikleri yüksek hızlı kameralar ve ortak hattan püskürtme donanımı kullanılarak deneysel olarak incelenmelidir. Böylece sunulan tezde kullanılan sayısal model daha da geliştirilebilir.
5. Yakıt demeti özelliklerinin incelenmesinden elde edilen sonuçlar dikkate alınarak, sunulan tezde belirtilen biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının (B5, B10, B15 ve B20) motor performansı ve eksoz emisyonlarına olan etkileri sayısal ve/veya deneysel olarak incelenebilir.
6. Teorik çevrim çalışmaları için sunulan tez çalışmasında üretilen biyodizelin kimyasal kinetik mekanizması geliştirilebilir.

7. KAYNAKLAR

1. 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.
2. Gülüm, M., Çeşitli Üretim Parametrelerinin Mısır ve Fındık Yağından Üretilen Biyodizellerin Önemli Yakıt Özelliklerine Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2014.
3. Taraus, S., Temur, H. ve Yartasi, A., Alkali-Catalyzed Biodiesel Production From Mixtures Of Sunflower Oil And Beef Tallow, Energy & Fuels, 23 (2009) 4112-4115.
4. Durgun, O., İçten Yanmalı Motorlar Temel İlkeler, Birinci Basım, TMMOB Gemi Mühendisleri Odası, Trabzon, Mart 2018, ISBN: 978-605-01-1176-7.
5. Fedai, Ö., Transesterifikasyon ile Kanola Yağı Metil Esteri Sentezinin Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006.
6. Pulkrabek, W., W., Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine, First Edition, Prentice Hall, New Jersey, 1997.
7. 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.
8. Safgönül, B., Ergeneman, M., Arslan, E. ve Soruşbay, C., İçten Yanmalı Motorlar, İkinci Basım, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2008, ISBN: 978-975-511-119-6.
9. Kumar, N., Bansal, S. ve Pali, H., S., Blending of Higher Alcohols with Vegetable Oil Based Fuels for Use in Compression Ignition Engine, SAE Technical Paper, 2015-01-0958.
10. Bailey, B., Eberhardt, J. ve Goguen, S., Diethyl Ether (DEE) as a Renewable Diesel Fuel, SAE Technical Paper, (1997) 972-978.
11. Lapuerta, M., Rodríguez-Fernández, J., Fernández-Rodríguez, D. ve Patiño-Camino, R., Modeling Viscosity of Butanol and Ethanol Blends with Diesel and Biodiesel Fuels, Fuel, 199 (2017) 332-338.
12. De Menezes, E., W., Da Silva, R., Cataluña, R. ve Ortega, R., J., C., Effect of Ethers and Ether/Ethanol Additives on the Physicochemical Properties of Diesel Fuel and on Engine Tests, Fuel, 85,5-6 (2006) 815-822.
13. Huang, Z., H., Jiang, D., M., Zeng, K., Liu, B. ve Yang, Z., L., Combustion Characteristics and Heat Release Analysis of a Direct Injection Compression Ignition

Engine Fuelled with Diesel-Dimethyl Carbonate Blends, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 217,7 (2003) 595-605.

14. Moser, B., R., Camelina (Camelina Sativa L.) Oil as a Biofuels Feedstock: Golden Opportunity or False Hope? Lipid Technology, 22,12 (2010) 270-273.
15. Ögüt, H. ve Oğuz, H., Biyodizel Üçüncü Milenyum Yakıtı, İkinci Baskı, Nobel Yayın Dağıtım, İstanbul, 2006.
16. Deniz, Ç., Biyodizel Dizel Karışımlarının Bazı Fiziksel Özelliklerinin Biyodizel Oranı İle Değişimi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2013.
17. Arslan, M., Laboratuvar Ölçekli Biyodizel Üretim Tesisinin Projelendirilerek İmal Edilmesi ve Yabani Zeytinden (Oleaoleaster) Üretilecek Biyodizelin Yakıt Özelliklerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2015.
18. Esteban, B., Riba, J., R., Baquero, G., Rius, A. ve Puig, R., Temperature Dependence of Density and Viscosity of Vegetable Oils, Biomass and Bioenergy, 42 (2012) 164-171.
19. Uzun, G., Yağ Asidi Katkılı Kolza Yağından Biyodizel Üretimi ve Üretilen Biyodizellerin Karakteristik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2018.
20. Türker, H., T., Bazı Bitkisel Yağlardan Biyodizel Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2006.
21. Şeker, S., Biyodizel Üretimi ve Katkı Maddelerinin Yakıt Özellikleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007.
22. 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.
23. Ateş, K., Melastan Etil Alkol Eldesi ve Biyodizel Üretiminde Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2007.
24. Aydoğan, B., Biyodizel Kullanılan Dizel Motorlarda NOx Emisyonlarının ve NOx Emisyonları Azaltma Yöntemlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 2008.
25. Jain, S. ve Sharma, M., P., Prospects of Biodiesel from Jatropha in India: A Review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14,2 (2010) 763-771.

26. Rakopoulos, C., D., Antonopoulos, K., A., Rakopoulos, D., C., Hountalas, D., T. ve Giakoumis, E., G., Comparative Performance and Emissions Study of a Direct Injection Diesel Engine Using Blends of Diesel Fuel with Vegetable Oils or Bio-Diesels of Various Origins, Energy Conversion and Management, 47,18-19 (2006) 3272-3287.
27. Gürü, M., Artukoğlu, B., D., Keskin, A. ve Koca, A., Biodiesel Production From Waste Animal Fat And Improvement of Its Characteristics By Synthesized Nickel And Magnesium Additive, Energy Conversion and Management, 50,3 (2009) 498-502.
28. Demir, M., Mikroalglerden Biyodizel Eldesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2015.
29. 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.
30. Giordani, D., S., Siqueira, A., F., Silva, M., L., C., P., Oliveira, P., C. ve De Castro, H., F., Identification of the Biodiesel Source Using an Electronic Nose, Energy & Fuels, 22,4 (2008) 2743-2747.
31. Zhu, L., Zhang, W., Liu, W. ve Huang, Z., Experimental Study on Particulate and NO_x emissions of a diesel engine fueled with ultra low sulfur diesel, RME-diesel blends and PME-diesel blends, Science of the Total Environment, 408,5 (2010) 1050-1058.
32. Çelikten, İ., Koca, A. ve Arslan, M., A., Comparison of Performance and Emissions of Diesel Fuel, Rapeseed and Soybean Oil Methyl Esters Injected at Different Pressures, Renewable Energy, 35,4 (2010) 814-820.
33. Varatharajan, K. ve Cheralathan, M., Influence of Fuel Properties and Composition on NO_x Emissions from Biodiesel Powered Diesel Engines: A Review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16,6 (2012) 3702-3710.
34. Leung, D., Y., C. ve Guo, Y., Transesterification of Neat and Used Frying Oil: Optimization for Biodiesel Production, Fuel Processing Technology, 87,10 (2006) 883-890.
35. Oğuz, H., Ögüt, H. ve Eryılmaz, T., Investigation of Biodiesel Production, Quality And Performance in Turkey, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, (2007) 1529-1535.
36. <http://www.yegm.gov.tr/yenilenebilir/biyokutle.aspx>, Yenilenebilir enerji sorgulama, 13 Aralık 2018.
37. Yaşar, A. ve Ali, A., A., Investigation Of Effects Of Diesel And Biodiesel Fuels On Energy And Exergy Analysis in Diesel Engines, Çukurova University Journal Of The Faculty of Engineering And Architecture, 31,1 (2016) 159-174.

38. Köse, H., Cynara Cardunculus'dan Biyoyakıt Üretimi ve Üretilen Yakıtın Farklı Karışımlarının Motor Performansına Etkisinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2018.
39. <http://lisans.epdk.org.tr/epvys-web/faces/pages/lisans/petrolIsleme/petrolIsleme.xhtml>, İşletme sorgulama, 1 Aralık 2018.
40. <http://www.resmigazete.gov.tr/main.aspx?home=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2003/12/20031220.htm&main=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2003/12/20031220.htm>, Biyodizel ile ilgili yasal düzenlemeler, 16 Kasım 2018.
41. <http://www.resmigazete.gov.tr/main.aspx?home=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2004/06/20040617.htm&main=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2004/06/20040617.htm>, Biyodizel ile ilgili yasal düzenlemeler, 16 Kasım 2018.
42. <http://www.resmigazete.gov.tr/main.aspx?home=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2004/09/20040910.htm/20040910.htm&main=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2004/09/20040910.htm>, Biyodizel ile ilgili yasal düzenlemeler, 16 Kasım 2018.
43. <http://www.resmigazete.gov.tr/main.aspx?home=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2005/07/20050725-3.htm/20050725.htm&main=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2005/07/20050725-3.htm>, Biyodizel ile ilgili yasal düzenlemeler, 16 Kasım 2018.
44. <http://www.resmigazete.gov.tr/main.aspx?home=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2006/03/20060316-9.htm/20060316.htm&main=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2006/03/20060316-9.htm>, Biyodizel ile ilgili yasal düzenlemeler, 16 Kasım 2018.
45. <http://www.resmigazete.gov.tr/main.aspx?home=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2006/04/20060408-1.htm/20060408.htm&main=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2006/04/20060408-1.htm>, Biyodizel ile ilgili yasal düzenlemeler, 16 Kasım 2018.
46. <http://www.resmigazete.gov.tr/main.aspx?home=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2006/12/20061208.htm&main=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2006/12/20061208.htm>, Biyodizel ile ilgili yasal düzenlemeler, 16 Kasım 2018.
47. <http://www.resmigazete.gov.tr/main.aspx?home=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2006/12/20061226-6.htm/20061226.htm&main=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2006/12/20061226-6.htm>, Biyodizel ile ilgili yasal düzenlemeler, 16 Kasım 2018.
48. <http://www.resmigazete.gov.tr/main.aspx?home=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2007/04/20070425-3.htm/20070425.htm&main=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2007/04/20070425-3.htm>, Biyodizel ile ilgili yasal düzenlemeler, 16 Kasım 2018.

49. <http://www.resmigazete.gov.tr/main.aspx?home=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2007/10/20071021-4.htm/20071021.htm&main=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2007/10/20071021-4.htm>, Biyodizel ile ilgili yasal düzenlemeler, 16 Kasım 2018.
50. <http://www.resmigazete.gov.tr/main.aspx?home=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2007/11/20071102-4.htm/20071102.htm&main=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2007/11/20071102-4.htm>, Biyodizel ile ilgili yasal düzenlemeler, 16 Kasım 2018.
51. <http://www.resmigazete.gov.tr/main.aspx?home=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2009/07/20090715-4.htm/20090715.htm&main=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2009/07/20090715-4.htm>, Biyodizel ile ilgili yasal düzenlemeler, 16 Kasım 2018.
52. <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2009/11/20091121-7.htm>, Biyodizel ile ilgili yasal düzenlemeler, 16 Kasım 2018.
53. <http://www.resmigazete.gov.tr/main.aspx?home=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2009/12/20091231-3.htm/20091231.htm&main=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2009/12/20091231-3.htm>, Biyodizel ile ilgili yasal düzenlemeler, 16 Kasım 2018.
54. <http://www.resmigazete.gov.tr/main.aspx?home=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2011/09/20110927.htm&main=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2011/09/20110927.htm>, Biyodizel ile ilgili yasal düzenlemeler, 16 Kasım 2018.
55. <http://www.resmigazete.gov.tr/main.aspx?home=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2013/07/20130719-18.htm/20130719.htm&main=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2013/07/20130719-18.htm>, Biyodizel ile ilgili yasal düzenlemeler, 16 Kasım 2018.
56. <http://www.resmigazete.gov.tr/main.aspx?home=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2013/12/20131231-13.htm/20131231.htm&main=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2013/12/20131231-13.htm>, Biyodizel ile ilgili yasal düzenlemeler, 16 Kasım 2018.
57. <http://www.resmigazete.gov.tr/main.aspx?home=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2015/05/20150523-8.htm/20150523.htm&main=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2015/05/20150523-8.htm>, Biyodizel ile ilgili yasal düzenlemeler, 16 Kasım 2018.
58. <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2017/06/20170616-8.htm>, Biyodizel ile ilgili yasal düzenlemeler, 16 Kasım 2018.
59. Yücel, Y., Demir, C., Dizge, N. ve Keskinler, B., Methods For Lipase Immobilization And Their Use For Biodiesel Production From Vegetable Oil, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, (2014) 1203-1211.

60. Chavanne, G., Procedure for the Transformation of Vegetable Oils for Their Uses as Fuels, Belgian Patent, 422-877, 1937.
61. Yasar, B., Evaluation of Biodiesel Production and Utilization of Biodiesel as an Alternative Source of Energy from the Point of View of Turkish Agriculture and EU Adaptation Process, PhD Thesis, Cukurova University, Institute of Natural Sciences, Adana, 2009.
62. <https://www.bbc.com/turkce/haberler-dunya-42354544>, Kanalizasyonda biriken yağlardan biyodizel üretiliyor, 24 Kasım 2018.
63. <http://www.eia.gov/biofuels/biodiesel/production>, Independent Statistics & Analysis, U.S. Energy Information Administration, Monthly biodiesel production report, 21 Ekim 2017.
64. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32003L0030&qid=1495279487684&from=en>, Official Journal of European Union Directive 2003/30/ec of the European Parliament and of the Council of 8 May 2003 on the Promotion of the Use of Biofuels or Other Renewable Fuels for Transport, Biodiesel production, 13 Nisan 2017.
65. Ölçüm, T., Biyodizel Teknolojisi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
66. Freedman, B., Pryde, E., H. ve Mounts, T., L., Biodiesel Production from Oils and Fats with High Free Fatty Acids, J. Am. Oil. Chem. Soc., 61 (1984) 1638-1643.
67. Canakci, M. ve Van Gerpen, J., Biodiesel Production via Acid Catalysis, Transactions of the ASAE, 42,5 (1999) 1203-1210.
68. 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.
69. Chhetri, A., B., Watts, K., C. ve Islam, M., R., Waste Cooking Oil as an Alternate Feedstock for Biodiesel Production, Energies, 1,1 (2008) 3-18.
70. Phan, A., N. ve Phan, T., M., Biodiesel Production from Waste Cooking Oils, Fuel, 87,17-18 (2008) 3490-3496.
71. Sivaramakrishnan, K., Determination of Higher Heating Value of Biodiesels, International Journal of Engineering Science and Technology, 3,11 (2011) 7981-7987.
72. 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.

73. 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.
74. Gülüm, M., Bilgin, A. ve Çakmak A., Comparison of Optimum Reaction Parameters of Corn Oil Biodiesels Produced by Using Sodium Hydroxide (NaOH) and Potassium Hydroxide (KOH), Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 30,3 (2015) 503-511.
75. Amini, Z., Ong, H., C., Harrison, M., D., Kusumo, F., Mazaheri, H. ve Ilham, Z., Biodiesel Production by Lipase-Catalyzed Transesterification of Ocimum Basilicum L. (Sweet Basil) Seed Oil, Energy Conversion and Management, 132 (2017) 82-90.
76. Dharma, S., Masjuki, H., H., Ong, H., C., Sebayang, A., H., Silitonga, A., S., Kusumo, F. ve Mahlia, T., M., I., Optimization of Biodiesel Production Process for Mixed Jatropha Curcas-Ceiba Pentandra Biodiesel Using Response Surface Methodology, Energy Conversion and Management, 115 (2016) 178-190.
77. Calero, J., Luna, D., Sancho, E., D., Luna, C., Bautista, F., M., Romeo, A., A., Pasadillo, A. ve Verdugo, C., Development of a New Biodiesel that Integrates Glycerol, by Using CaO as Heterogeneous Catalyst, in the Partial Methanolysis of Sunflower Oil, Fuel, 112 (2014) 94-102.
78. Mustafa, T., Soomro, S., A., Najam, M., N., Amin, A., M. ve Ahmad, I., Production of Biodiesel Through Catalytic Transesterification of Jatropha Oil, Journal of Applied and Emerging Sciences, 6,1 (2016) 9-13.
79. Kerschbaum, S. ve Rinke, G., Measurement of the Temperature Dependent Viscosity of Biodiesel Fuels, Fuel, 83,3 (2004) 287-291.
80. Gülüm, M. ve Bilgin, A., Density, Flash Point and Heating Value Variations of Corn Oil Biodiesel-Diesel Fuel Blends, Fuel Processing Technology, 134 (2015) 456-464.
81. Hajra, B., Kumar, M., Pathak, A., K. ve Guria, C., Surface Tension and Rheological Behavior of Sal Oil Methyl Ester Biodiesel and Its Blend with Petrodiesel Fuel, Fuel, 166 (2016) 130-142.
82. Macleod, D., B., On a Relation Between Surface Tension and Density, Trans. Faraday Soc., 19 (1923) 38-41.
83. Sugden, S., The Variation of Surface Tension with Temperature and Some Related Functions, J. Chem. Soc. Trans., 32 (1924) 32-41.
84. Sastri, S., R., S. ve Rao, K., K., A New Group Contribution Method for Predicting Viscosity of Organic Liquids, Chem. Eng. J., 50 (1992) 9-25.
85. Brock, J., R. ve Bird, R., B., Surface Tension and the Principle of Corresponding States, AIChE Journal, 1 (1955) 174-177.

86. Escobedo, J. ve Mansoori, G., A., Surface Tension Prediction for Pure Fluids, AICHE Journal, 42 (1996) 1425-1433.
87. Curl, R., F., J. ve Pitzer, K., S., Volumetric and Thermodynamic Properties of Fluids-Enthalpy, Free Energy, and Entropy, Ind. Eng. Chem., 50 (1958) 265-274.
88. Gülüm, M. ve Bilgin, M., Two-term Power Models for Estimating Kinematic Viscosities of Different Biodiesel-Diesel Fuel Blends, Fuel Processing Technology, 149 (2016) 121-130.
89. Alptekin, E. ve Canakci, M., Determination of the Density and the Viscosities of Biodiesel-Diesel Fuel Blends, Renewable Energy, 33,12 (2008) 2623-2630.
90. Andrade, E., D., C., A Theory of the Viscosity of Liquids, Phil. Mag., 17 (1934) 497-511.
91. Fasina, O., O., Hallman, H., Craig, S., M. ve Clements, C., Predicting Temperature Dependence Viscosity of Vegetable Oils from Fatty Acid Composition, JAOCS, 83,10 (2006) 899-903.
92. Knothe, G. ve Steidley, K., R., Kinematic Viscosity of Biodiesel Components (Fatty Acid Alkyl Esters) and Related Compounds at Low Temperatures, Fuel, 86,16 (2007) 2560-2567.
93. Yuan, W., Hansen, A., C., Zhang, Q. ve Tan, Z., Temperature-Dependent Kinematic Viscosity of Selected Biodiesel Fuels and Blends with Diesel Fuel, JAOCS, 82,3 (2005) 195-199.
94. Gülüm, M. ve Bilgin, A., Measurements and Empirical Correlations in Predicting Biodiesel-Diesel Blends' Viscosity and Density, Fuel, 199 (2017) 567-577.
95. Verduzco, L., F., R., Flores, B., E., G., Rodriguez, J., E., R. ve Jacob, A., D., R., J., Prediction of the Density and Viscosity in Biodiesel Blends at Various Temperatures, Fuel, 90 (2011) 1751-1761.
96. Ivanis, G., R., Radovic, I., R., Veljkovic, V., B. ve Kijevcanin, M., L., Thermodynamic Properties of Biodiesel and Petro-Diesel Blends at High Pressures and Temperatures. Experimental and Modeling, Fuel, 184 (2016) 277-288.
97. Grunberg, L. ve Nissan, A., H., Mixture Law for Viscosity, Nature, 164 (1949) 799-800.
98. McAllister, R., A., The Viscosity of Liquid Mixtures, AICHE Journal, 6 (1960) 427-431.
99. Kanaveli, I., P., Atzemi, M. ve Lois, E., Predicting the Viscosity of Diesel/Biodiesel Blends, Fuel, 199 (2017) 248-263.

100. Centeno, G., Sánchez-Reyna, G., Ancheyta, J., Muñoz, J., A., D. ve Cardona, N., Testing Various Mixing Rules for Calculation of Viscosity of Petroleum Blends, Fuel, 90 (2011) 3561-3570.
101. Barrufet, M., A. ve Setiadarma, A. Reliable Heavy Oil-Solvent Viscosity Mixing Rules for Viscosities up to 450 K, Oil-Solvent Viscosity Ratios up to 4x10, and any Solvent Proportion, Fluid Phase Equilib., 213 (2003) 65-79.
102. Gülüm, M. ve Bilgin, A., A Comprehensive Study on Measurement and Prediction of Viscosity of Biodiesel-Diesel-Alcohol Ternary Blends, Energy, 148 (2018) 341-361.
103. Kendall, J. ve Monroe, K., P., The Viscosity of Liquids. II. The Viscosity-Composition Curve for Ideal Liquid Mixtures, J. Am. Chem., 9 (1917) 1787-1802.
104. Vogel, H., The Law of the Relation Between the Viscosity of Liquids and Temperature, Phys. Z., 22 (1921) 645-646.
105. Barabás, I. ve Todorut, I., A., Predicting the Temperature Dependent Viscosity of Biodiesel-Diesel-Bioethanol Blends, Energy & Fuels, 25 (2011) 5767-5774.
106. Gülüm, M., Onay, F. ve Bilgin, A., Comparison of Viscosity Prediction Capabilities of Regression Models and Artificial Neural Networks, Energy, 161 (2018) 361-369.
107. Bingham, E., C., Viscosity and Fluidity, American Chemical Journal, 35,3 (1906) 195-217.
108. Geacai, S., Iulian, O. ve Nita, I., Measurement, Correlation and Prediction of Biodiesel Blends Viscosity, Fuel, 143 (2015) 268-274.
109. Lefebvre, A., H., Wang, X., F. ve Martin, C., A., Spray Characteristics of Aerated-Liquid Pressure Atomizers, Journal of Propulsion and Power, 4,4 (1988) 293-298.
110. Grimaldi, C. ve Postriotti, L., Experimental Comparison Between Conventional and Bio-Derived Fuels Sprays from A Common Rail Injection System, SAE Transactions, 109 (2000) 1501-1513.
111. Park, S., W., Bang, S., H., Lee, K., H., Lee, C., S. ve Lee, J., H., Atomization Characteristics of Common-Rail Diesel Injector with Multi-Hole, SAE Technical Paper, 2003-01-1833 (2003).
112. Waidmann, W., Boemer, A. ve Braun, M., Adjustment and Verification of Model Parameters for Diesel Injection CFD Simulation, SAE Technical Paper, 2006-01-0241 (2006).
113. Desantes, J., M., Payri, R., Salvador, F., J. ve Gil, A., Development and Validation of a Theoretical Model for Diesel Spray Penetration, Fuel, 85,7 (2006) 910-917.
114. Ahmed, M., Ejim, C., Fleck, B. ve Amirfazli, A., Effect of Biodiesel Fuel Properties and Its Blends on Atomization, SAE Technical Paper, 2006-01-0893 (2006).

115. Qi, Y., L., Xu, B., Y. ve Cai, S., L., An Application of Digital Image Processing Techniques to the Characterization of Liquid Petroleum Gas (LPG) Spray, Measurement Science and Technology, 17,12 (2006) 3229-3236.
116. Wu, Z., Zhu, Z. ve Huang, Z., An Experimental Study on the Spray Structure of Oxygenated Fuel Using Laser-Based Visualization and Particle Image Velocimetry, Fuel, 85,10 (2006) 1458-1464.
117. Gao, J., Jiang, D. ve Huang, Z., Spray Properties of Alternative Fuels: A Comparative Analysis of Ethanol-Gasoline Blends and Gasoline, Fuel, 86,10 (2007) 1645-1650.
118. Suh, H., K., Park, S., W. ve Lee, C., S., Effect of Piezo-Driven Injection System on the Macroscopic and Microscopic Atomization Characteristics of Diesel Fuel Spray, Fuel, 86,17 (2007) 2833-2845.
119. Kim, H., J., Suh, H., K., Park, S., H. ve Lee, C., S., An Experimental and Numerical Investigation of Atomization Characteristics of Biodiesel, Dimethyl Ether, and Biodiesel-Ethanol Blended Fuel, Energy & Fuels, 22,3 (2008) 2091-2098.
120. He, C., Ge, Y., Tan, J. ve Han, X., Spray Properties of Alternative Fuels: A Comparative Analysis of Biodiesel and Diesel, International Journal of Energy Research, 32,14 (2008) 1329-1338.
121. Bo, L., Yunqing, L. ve Defu, W., Spray Impingement Characterization of a Swirl Type Injector for a Gasoline Direct Injection Engines, International Technology and Innovation Conference, (2009) 1-6.
122. Park, S., H., Kim, H., J., Suh, H., K. ve Lee, C., S., Experimental and Numerical Analysis of Spray-Atomization Characteristics of Biodiesel Fuel in Various Fuel and Ambient Temperature Conditions, International Journal of Heat and Fluid Flow, 30,5 (2009) 960-970.
123. Gao, Y., Deng, J., Li, C., Dang, F., Liao, Z., Wu, Z. ve Li, L., Experimental Study of the Spray Characteristics of Biodiesel Based on Inedible Oil, Biotechnology Advances, 27,5 (2009) 616-624.
124. Park, S., H., Suh, H., K. ve Lee, C., S., Nozzle Flow and Atomization Characteristics of Ethanol Blended Biodiesel Fuel, Renewable Energy, 35,1 (2010) 144-150.
125. Kim, H., J., Park, S., H. ve Lee, C., S., A Study on the Macroscopic Spray Behavior and Atomization Characteristics of Biodiesel and Dimethyl Ether Sprays Under Increased Ambient Pressure, Fuel Processing Technology, 91,3 (2010) 354-363.
126. Wang, X., Huang, Z., Kuti, O., A., Zhang, W. ve Nishida, K., Experimental and Analytical Study on Biodiesel and Diesel Spray Characteristics Under Ultra-High Injection Pressure, International Journal of Heat and Fluid Flow, 31,4 (2010) 659-666.

127. Ing, N., L., Jaafar, M., N., M., Ishak, M., S., A. ve Arizal, M., A., A., Spray Characteristic of Palm Biofuel Blends, International Journal of Mechanical and Materials Engineering (IJMME), 5,2 (2010) 214-221.
128. Chaudhry, I., A., Mirza, M., R. ve Rashid, M., J., Simulation of Oblique Evaporating Diesel Sprays, and Comparison with Empirical Correlations and Simulated Straight Sprays, Pak. J. Engg. & Appl. Sci., 7 (2010) 30-37.
129. Chaudhry, I., A., Mirza, M., R. ve Rashid, M., J., Simulation of Non-Evaporating Diesel Sprays and Comparison with Empirical Correlation, Pak. J. Engg. & Appl. Sci., 7 (2010) 1-11.
130. Kim, H., J., Park, S., H., Chon, M., S. ve Lee, C., S., A Comparison of Effects of Ambient Pressure on the Atomization Performance of Soybean Oil Methyl Ester and Dimethyl Ether Sprays, Oil & Gas Science and Technology, 65,6 (2010) 883-892.
131. Park, S., H., Kim, H., J. ve Lee, C., S., Macroscopic Spray Characteristics and Breakup Performance of Dimethyl Ether (DME) Fuel at High Fuel Temperatures and Ambient Conditions, Fuel, 89,10 (2010) 3001-3011.
132. Park, S., H., Kim, H., J. ve Lee, C., S., Comparison of Experimental and Predicted Atomization Characteristics of High-Pressure Diesel Spray under Various Fuel and Ambient Temperature, Journal of Mechanical Science and Technology, 24,7 (2010) 1491-1499.
133. Lin, Y., S. ve Lin, H., P., Study on the Spray Characteristics of Methyl Esters from Waste Cooking Oil at Elevated Temperature, Renewable Energy, 35,9 (2010) 1900-1907.
134. Fukuda, K., Ghasemi, A., Barron, R. ve Balachandar, R., An Open Cycle Simulation of DI Diesel Engine Flow Field Effect on Spray Processes, SAE Technical Paper, 2012-01-0696, (2012) 1-13.
135. Ghasemi, A., Fukuda, K., Balachandar, R. ve Barron, R., Numerical Investigation of Spray Characteristics of Diesel Alternative Fuels, SAE Technical Paper, 2012-01-1265, (2012) 1-11.
136. Chen, P., C., Wang, W., C., Roberts, W., L. ve Fang, T., Spray and Atomization of Diesel Fuel and Its Alternatives from a Single-Hole Injector Using a Common Rail Fuel Injection System, Fuel, 103 (2013) 850-861.
137. Kumar, G. ve Kumar, A., Engine Performance Characteristics of Diesel Engine Using Mahua Biodiesel as Fuel, International Journal of Current Engineering and Technology, 3,2 (2013) 424-427.
138. Khalid, A., Jaat, C., Zaman, I., Manshoor, B. ve Ali, M., Effect of Preheated Fuel on Mixture Formation of Biodiesel Spray, Applied Mechanics and Materials, 393 (2013) 493-498.

139. Cipolat, D. ve Valentim, D., Comparison of Theoretical and Experimental Diesel and DME Injection Spray Characteristics, Fuel Processing Technology, 107 (2013) 36-43.
140. Mohan, B., Yang, W., Tay, K., L. ve Yu, W., Macroscopic Spray Characterization under High Ambient Density Conditions, Experimental Thermal and Fluid Science, 59 (2014) 109-117.
141. Eagle, W., E., Morris, S., B. ve Wooldridge, M., S., High-Speed Imaging of Transient Diesel Spray Behavior During High Pressure Injection of a Multi-Hole Fuel Injector, Fuel, 116 (2014) 299-309.
142. Zhao, G., Ma, G., Liao, R. ve Wang, J., Experimental Study of the Spray Characteristics of n-Butanol/Diesel Blends, Advanced Materials Research, 960 (2014) 1394-1399.
143. Guan, L., Tang, C., Yang, K., Mo, J. ve Huang, Z., Effect of Di-n-Butyl Ether Blending with Soybean-Biodiesel on Spray and Atomization Characteristics in a Common-Rail Fuel Injection System, Fuel, 140 (2015) 116-125.
144. Xie, H., Song, L., Xie, Y., Pi, D., Shao, C. ve Lin, Q., An Experimental Study on the Macroscopic Spray Characteristics of Biodiesel and Diesel in a Constant Volume Chamber, Energies, 8,6 (2015) 5952-5972.
145. Feng, Z., Zhan, C., Tang, C., Yang, K. ve Huang, Z., Experimental Investigation on Spray and Atomization Characteristics of Diesel/Gasoline/Ethanol Blends in High Pressure Common Rail Injection System, Energy, 112 (2016) 549-561.
146. Mo, J., Tang, C., Li, J., Guan, L. ve Huang, Z., Experimental Investigation on the Effect of n-Butanol Blending on Spray Characteristics of Soybean Biodiesel in a Common-Rail Fuel Injection System, Fuel, 182 (2016) 391-401.
147. Fu, W., Song, L., Yi, B., Liu, T. ve Lin, Q., Experimental and Theoretical Analysis of the Spray Characteristics of a High-Pressure Common-Rail Injection System Fueled with Neat Biodiesel, Ethanol-Biodiesel Blends, and Neat Diesel Fuel, Journal of Energy Engineering, 143,6 (2017) 1-11.
148. Mohan, B., Yang, W., Yu, W. ve Tay, K., L., Numerical Analysis of Spray Characteristics of Dimethyl Ether and Diethyl Ether Fuel, Applied Energy, 182 (2017) 1403-1410.
149. Jing, D., Zhang, F., Li, Y., Xu, H. ve Shuai, S., Experimental Investigation on the Macroscopic and Microscopic Spray Characteristics of Dieseline Fuel, Fuel, 199 (2017) 478-487.
150. Yi, B., Lin, Q., Song, L., Fu, W., Li, F. ve Liu, T., Spray Characteristics of n-Butanol in a High-Pressure Common-Rail Injection System, J. Energy Eng., 143,5 (2017) 1-7.

151. Zhan, C., Feng, Z., Ma, W., Zhang, M., Tang, C. ve Huang, Z., Experimental Investigation on Effect of Ethanol and Di-Ethyl Ether Addition on the Spray Characteristics of Diesel/Biodiesel Blends under High Injection Pressure, Fuel, 218 (2018) 1-11.
152. <http://www.chemspider.com/Chemical-Structure.29033.html>, Sodyum metoksitin özellikleri, 11 Kasım 2018.
153. https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Potassium_methoxide, Potasyum metoksitin özellikleri, 11 Kasım 2018.
154. Kaya, C., Hamamci, C., Baysal, A., Akba, O., Erdoğan, S. ve Saydut, A., Methyl Ester of Peanut (*Arachis Hypogea* L.) Seed Oil as a Potential Feedstock for Biodiesel Production, Renewable Energy, 34,5 (2009) 1257-1260.
155. Encinar, J., M., González, J., F. ve Rodríguez, R., A., Ethanolysis of Used Frying Oil. Biodiesel Preparation and Characterization, Fuel Processing Technology, 88,5 (2007) 513-522.
156. Singh, A., He, B., Thompson, J. ve Van Garpen, J., Process Optimization of Biodiesel Production Using Alkaline Catalyst, Applied Engineering in Agriculture, 22,4 (2006) 597-600.
157. Dorado, P., M., Ballesteros, E., López, F., J. ve Mittelbach, M., Optimization of Alkali-Catalyzed Transesterification of Brassica Carinata Oil for Biodiesel Production, Energy & Fuels, 18,1 (2004) 77-83.
158. Bilgin, A., Gülüm, M., Koyuncuoglu, İ., Nac, E. ve Çakmak A., Determination of Transesterification Reaction Parameters Giving the Lowest Viscosity Waste Cooking Oil Biodiesel, Procedia-Social and Behavioral Sciences, 195 (2015) 2492-2500.
159. Barontini, F., Simone, M., Triana, F., Mancini, A., Ragolini, G. ve Nicolella, C., Pilot-Scale Biofuel Production from Sunflower Crops in Central Italy, Renewable Energy, 83 (2015) 954-962.
160. <https://www.fpharm.uniba.sk/fileadmin/faf/Pracoviska-subory/KFCHL/ENG/lectures/Physics/1.Density-pycnometer.pdf>, Piknometreyle yoğunluk ölçümü, 22 Kasım 2018.
161. <http://kim.muhendislik.omu.edu.tr/en/belgeler/laboratory%20manuals/Yuzey%20Geriliminin%20Belirlenmesi.pdf>, Yüzey geriliminin belirlenmesi, 29 Aralık 2018.
162. Çengel, Y., A. ve Cimbala, J., M., Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları, Editör Engin, T., Birinci Baskı, Güven Kitabevi, İzmir, 2008.
163. https://www.engineeringtoolbox.com/water-surface-tension-d_597.html, Surface tension of water, 27 Aralık 2018.

164. Holman, J., P., Experimental Methods for Engineers, 7 th Edition, McGraw-Hill, New York, 2001.
165. White, F., M., Akışkanlar Mekanığı, Editörler Kırkköprü, K. ve Ayder, E., Dördüncü Baskı, Literatür Yayıncılık, İstanbul, 2004.
166. Çuhadaroğlu, B., Akışkanlar Mekanığı Ders Notları, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon-(Basılmamış).
167. Çuhadaroğlu, B., Sınır Tabaka Teorisi Ders Notları, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon-(Basılmamış).
168. Incropera, F., P. ve DeWitt, D., P., Isı ve Kütleye Geçişinin Temelleri, Editör Derbentli, T., Dördüncü Baskı, Literatür Yayıncılık, İstanbul, 2000.
169. Baumgarten, C., Mixture Formation in Internal Combustion Engines, First Edition, Springer, Germany, 2006.
170. Çuhadaroğlu, B., Türbülans Modelleme Ders Notları, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon-(Basılmamış).
171. Tennekes, H. ve Lumley, J., L., A First Course in Turbulence, First Edition, The MIT Press, London, 1972.
172. Wilcox, D., C., Turbulence Modeling for CFD, First Edition, DCW Industries, California, 1993.
173. Chen, C. ve Jaw, S., Fundamentals of Turbulence Modeling, First Edition, Taylor & Francis, Washington, 1998.
174. Versteeg, H., K. ve Malalasekera, W., An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method, First Edition, Longman Scientific & Technical, England, 1995.
175. Bilgin, A., Pistonlu Motorların Silindirleri İçerisindeki Gaz Akışlarının Emme Stroku Boyunca Sayısal Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1994.
176. Safgönül, B., Pistonlu Motorlar (İçten Yanmalı), İ.T.Ü Makina Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul, 1989.
177. Ghasemi, A., Numerical Simulation of Ultra-High Injection Diesel and Biodiesel Fuel Sprays, PhD Thesis, University of Windsor, Canada, 2012.
178. Reitz, R., D., Atomization and Other Breakup Regimes of a Liquid Jet, PhD Thesis, Princeton University, United State, 1978.

179. Bulut, E., Direkt Püskürtmeli Motorlarda Püskürtme Karakteristiklerinin Nümerik İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2016.
180. Hwang, S., S., Liu, Z. ve Reitz, R., D., Breakup Mechanisms and Drag Coefficients of High-Speed Vaporizing Liquid Drops, Atomization and Sprays, 6 (1996) 353-376.
181. Chan, M., Das, S. ve Reitz, R., D., Modeling Multiple Injection and EGR Effects on Diesel Engine Emissions, SAE (1997) 972864.
182. Corral-Gómez, L., Rubio-Gómez, G., Martínez-Martínez, S. ve Sánchez-Cruz, F., A., Effect of Diesel-Biodiesel-Ethanol Blends on the Spray Macroscopic Parameters in a Common-Rail Diesel Injection System, Fuel, 241 (2019) 876-883.
183. Sitkei, G., Kraftstoffaufbereitung und Verbrennung bei Dieselmotoren, First Edition, Springer Verlag, Germany, 1964.
184. Ofner, B., Dieselmotorische Kraftstoffzerstäubung und Gemischbildung mit Common-Rail Einspritzsystemen, Doktor-Ingenieurs, Technische Universität München, München 2001.
185. Ejim, C., E., Fleck, B., A. ve Amirfazli, A., Analytical Study for Atomization of Biodiesels and Their Blends in a Typical Injector: Surface Tension and Viscosity Effects, Fuel, 86,10 (2007) 1534-1544.
186. Delacourt, E., Desmet, B. ve Besson, B., Characterisation of Very High Pressure Diesel Sprays Using Digital Imaging Techniques, Fuel 84,7 (2005) 859-867.
187. Rabu, R., A., Janajreh, I. ve Honnery, D., Transesterification of Waste Cooking Oil: Process Optimization and Conversion Rate Evaluation, Energy Conversion and Management, 65 (2013) 764-769.
188. Karagöz, İ., Sayısal Analiz ve Mühendislik Uygulamaları, Nobel Yayınevi, 4. Basım, Ankara, 2014.
189. Çuhadaroğlu, B., Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Ders Notları, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon-(Basılmamış).
190. Tu, J., Yeoh, G., H. ve Liu C., Computational Fluid Dynamics, Elsevier, First Edition, Oxford, 2008.
191. <https://www.labor.com.tr/urun/metanol-extra-pure-2-5-lt-1>, Methanol fiyatı, 21 Mart 2019.
192. <https://www.enerjiportali.com/elektrik-fiyatlari-8/>, Elektrik fiyatı, 21 Ağustos 2020.
193. <http://www.tppd.com.tr/tr/akaryakit-fiyatlari?id=61>, Trabzon ili için motorin fiyatı, 21 Ağustos 2020.

194. Kuti, O., Zhu, J., Nishida, K., Wang, X. ve Huang, Z., Characterization of Spray and Combustion Processes of Biodiesel Fuel Injected by Diesel Engine Common Rail System, Fuel, 104 (2013) 838-846.
195. Wang, X., Huang, Z., Zhang, W., Kuti, O. ve Nishida, K., Effects of Ultra-High Injection Pressure and Micro-Hole Nozzle on Flame Structure and Soot Formation of Impinging Diesel Spray, Applied Energy, 88 (2011) 1620-1628.
196. Hiraya, K., Hotta, I., Takahashi, E., Tsuchida, H. ve Urushihara, T., A Study of a DISI Engine with a Centrally Located High-Pressure Fuel Injector, SAE Transactions, 113 (2004) 1459-1466.
197. Bolla, M., Srna, A., Wright, Y., Rotz, B., Herrmann, K. ve Boulouchos, K., Influence of Injector Diameter (0.2-1.2 mm Range) on Diesel Spray Combustion: Measurements and CFD Simulations, SAE, 2014-01-1419.
198. Ryu, J., Kim, H. ve Lee, K., A Study on the Spray Structure and Evaporation Characteristic of Common Rail Type High Pressure Injector in Homogeneous Charge Compression Ignition Engine, Fuel, 84 (2005) 2341-2350.
199. Nishida, K., Zhang, W. ve Manabe, T., Effects of Micro-Hole and Ultra-High Injection Pressure on Mixture Properties of D.I. Diesel Spray, SAE, 2007-01-1890.
200. Kim, B., Yoon, W., Ryu, S. ve Ha, J., Effect of the Injector Nozzle Hole Diameter and Number on the Spray Characteristics and the Combustion Performance in Medium-Speed Diesel Marine Engines, SAE, 2005-01-3853.

8. EKLER

Ek Tablo 1. Metanol ve sodyum metoksit kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizellerine ait yoğunluk, dinamik viskozite ve kinematik viskozite değerlerinin boyutsuz yüzde belirsizlikleri

Biyodizel numunesi	$\tilde{w}_{\rho_{\text{biyodizel}}}$ [±%]	$\tilde{w}_{\mu_{\text{biyodizel}}}$ [±%]	$\tilde{w}_{\nu_{\text{biyodizel}}}$ [±%]
1	0,03180	0,02132	0,03829
2	0,03175	0,02134	0,03826
3	0,03178	0,02133	0,03828
4	0,03208	0,02125	0,03848
5	0,03203	0,02126	0,03845
6	0,03205	0,02126	0,03846
7	0,03210	0,02124	0,03849
8	0,03216	0,02121	0,03852
9	0,03216	0,02121	0,03853
10	0,03183	0,02130	0,03830
11	0,03185	0,02129	0,03831
12	0,03174	0,02134	0,03825
13	0,03213	0,02122	0,03850
14	0,03213	0,02123	0,03851
15	0,03214	0,02122	0,03851
16	0,03216	0,02120	0,03852
17	0,03217	0,02121	0,03853
18	0,03217	0,02121	0,03853
19	0,03215	0,02119	0,03851
20	0,03156	0,02144	0,03815
21	0,03103	0,02170	0,03786
22	0,03208	0,02126	0,03849
23	0,03212	0,02125	0,03851
24	0,03212	0,02125	0,03851
25	0,03213	0,02124	0,03851
26	0,03213	0,02125	0,03852
27	0,03211	0,02125	0,03850
28	0,03191	0,02129	0,03836
29	0,03191	0,02128	0,03835
30	0,03188	0,02130	0,03834
31	0,03212	0,02123	0,03850
32	0,03212	0,02124	0,03851
33	0,03211	0,02124	0,03850
34	0,03213	0,02122	0,03850
35	0,03212	0,02124	0,03851
36	0,03213	0,02123	0,03851
37	0,03193	0,02128	0,03837

Ek Tablo 1'in devamı

38	0,03189	0,02129	0,03835
39	0,03168	0,02140	0,03823
40	0,03194	0,02132	0,03840
41	0,03194	0,02132	0,03840
42	0,03194	0,02133	0,03840
43	0,03193	0,02132	0,03839
44	0,03194	0,02132	0,03840
45	0,03196	0,02132	0,03842
46	0,03172	0,02137	0,03825
47	0,03175	0,02135	0,03826
48	0,03181	0,02133	0,03830
49	0,03180	0,02136	0,03831
50	0,03193	0,02132	0,03839
51	0,03194	0,02131	0,03840
52	0,03194	0,02130	0,03839
53	0,03193	0,02132	0,03839
54	0,03194	0,02131	0,03839
55	0,03148	0,02146	0,03810
56	0,03163	0,02139	0,03818
57	0,03162	0,02139	0,03818
58	0,03187	0,02134	0,03836
59	0,03187	0,02133	0,03835
60	0,03187	0,02134	0,03835
61	0,03191	0,02131	0,03837
62	0,03190	0,02132	0,03837
63	0,03192	0,02131	0,03838
64	0,03168	0,02139	0,03823
65	0,03168	0,02140	0,03823
66	0,03189	0,02129	0,03835
67	0,03171	0,02142	0,03826
68	0,03190	0,02134	0,03838
69	0,03190	0,02134	0,03838
70	0,03192	0,02132	0,03838
71	0,03192	0,02133	0,03839
72	0,03193	0,02132	0,03840
73	0,03172	0,02137	0,03825
74	0,03176	0,02136	0,03827
75	0,03202	0,02124	0,03843
76	0,03220	0,02121	0,03856
77	0,03219	0,02122	0,03856
78	0,03218	0,02121	0,03855
79	0,03218	0,02121	0,03854
80	0,03219	0,02122	0,03855
81	0,03218	0,02122	0,03854

Ek Tablo 2. Metanol ve potasyum metoksit kullanılarak üretilen atık kızartma yağı biyodizellerine ait yoğunluk, dinamik viskozite ve kinematik viskozite değerlerinin boyutsuz yüzde belirsizlikleri

Biyodizel numunesi	$\tilde{w}_{\rho_{\text{biyodizel}}}$ [±%]	$\tilde{w}_{\mu_{\text{biyodizel}}}$ [±%]	$\tilde{w}_{\nu_{\text{biyodizel}}}$ [±%]
1	0,03172	0,02144	0,03828
2	0,03172	0,02145	0,03829
3	0,03145	0,02156	0,03814
4	0,03158	0,02151	0,03821
5	0,03166	0,02147	0,03825
6	0,03153	0,02153	0,03818
7	0,03159	0,02150	0,03821
8	0,03165	0,02148	0,03825
9	0,03146	0,02156	0,03814
10	0,03157	0,02151	0,03821
11	0,03159	0,02150	0,03822
12	0,03164	0,02149	0,03824
13	0,03159	0,02150	0,03822
14	0,03216	0,02126	0,03855
15	0,03164	0,02148	0,03825
16	0,03164	0,02148	0,03824
17	0,03157	0,02151	0,03820
18	0,03155	0,02152	0,03819
19	0,03162	0,02149	0,03823
20	0,03162	0,02149	0,03823
21	0,03156	0,02152	0,03820
22	0,03190	0,02137	0,03840
23	0,03156	0,02151	0,03820
24	0,03186	0,02139	0,03837
25	0,03148	0,02155	0,03815
26	0,03200	0,02133	0,03846
27	0,03162	0,02149	0,03824
28	0,03156	0,02152	0,03820
29	0,03154	0,02153	0,03819
30	0,03193	0,02136	0,03841
31	0,03159	0,02151	0,03821
32	0,03157	0,02152	0,03820
33	0,03146	0,02156	0,03814
34	0,03147	0,02156	0,03815
35	0,03164	0,02148	0,03825
36	0,03158	0,02151	0,03821
37	0,03167	0,02147	0,03826
38	0,03161	0,02150	0,03823
39	0,03150	0,02155	0,03816
40	0,03153	0,02153	0,03818
41	0,03214	0,02127	0,03854

Ek Tablo 2'nin devamı

Biyodizel numunesi	$\tilde{W}_{p_{\text{biyodizel}}}$ [±%]	$\tilde{W}_{\mu_{\text{biyodizel}}}$ [±%]	$\tilde{W}_{v_{\text{biyodizel}}}$ [±%]
42	0,03197	0,02134	0,03844
43	0,03157	0,02152	0,03820
44	0,03184	0,02140	0,03836
45	0,03147	0,02155	0,03814
46	0,03157	0,02151	0,03820
47	0,03201	0,02132	0,03846
48	0,03150	0,02155	0,03816
49	0,03162	0,02150	0,03823
50	0,03152	0,02153	0,03818
51	0,03210	0,02128	0,03852
52	0,03152	0,02154	0,03817
53	0,03157	0,02151	0,03820
54	0,03176	0,02141	0,03830
55	0,03153	0,02151	0,03817
56	0,03181	0,02139	0,03833
57	0,03176	0,02142	0,03831
58	0,03167	0,02146	0,03826
59	0,03160	0,02149	0,03821
60	0,03155	0,02151	0,03818
61	0,03181	0,02140	0,03834
62	0,03190	0,02135	0,03839
63	0,03167	0,02146	0,03825
64	0,03149	0,02154	0,03815
65	0,03207	0,02127	0,03849
66	0,03200	0,02132	0,03845
67	0,03192	0,02135	0,03840
68	0,03197	0,02133	0,03843
69	0,03181	0,02140	0,03833
70	0,03174	0,02143	0,03829
71	0,03167	0,02146	0,03825
72	0,03205	0,02129	0,03847
73	0,03212	0,02126	0,03852
74	0,03172	0,02142	0,03828
75	0,03160	0,02148	0,03821
76	0,03202	0,02131	0,03846
77	0,03172	0,02143	0,03828
78	0,03159	0,02149	0,03821
79	0,03202	0,02131	0,03846
80	0,03171	0,02143	0,03827
81	0,03179	0,02142	0,03833

Ek Tablo 3. Ticari saf dizel yakıtının ve biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının farklı sıcaklıklardaki yoğunluk, dinamik viskozite, kinematik viskozite ve yüzey gerilimi değerlerinin boyutsuz yüzde belirsizlikleri

Sıcaklık T [°C]	$\tilde{W}_{\rho_{DY}}$ [±%]	$\tilde{W}_{\rho_{B5}}$ [±%]	$\tilde{W}_{\rho_{B10}}$ [±%]	$\tilde{W}_{\rho_{B15}}$ [±%]	$\tilde{W}_{\rho_{B20}}$ [±%]
5	0,03389	0,03388	0,03386	0,03362	0,03356
10	0,03388	0,03387	0,03385	0,03361	0,03355
15	0,03389	0,03388	0,03386	0,03362	0,03356
20	0,03389	0,03387	0,03385	0,03361	0,03355
30	0,03389	0,03387	0,03386	0,03362	0,03355
40	0,03390	0,03388	0,03386	0,03362	0,03356
50	0,03389	0,03387	0,03385	0,03361	0,03355
60	0,03388	0,03387	0,03385	0,03361	0,03355
70	0,03389	0,03387	0,03385	0,03361	0,03355
80	0,03389	0,03387	0,03386	0,03361	0,03355
90	0,03390	0,03388	0,03386	0,03362	0,03356

Ek Tablo 3'ün devamı

Sıcaklık T [°C]	$\tilde{W}_{\mu_{DY}}$ [±%]	$\tilde{W}_{\mu_{B5}}$ [±%]	$\tilde{W}_{\mu_{B10}}$ [±%]	$\tilde{W}_{\mu_{B15}}$ [±%]	$\tilde{W}_{\mu_{B20}}$ [±%]
5	0,02079	0,02078	0,02077	0,02086	0,02088
10	0,02080	0,02077	0,02077	0,02086	0,02087
15	0,02082	0,02078	0,02078	0,02086	0,02088
20	0,02083	0,02077	0,02077	0,02085	0,02086
30	0,02081	0,02073	0,02073	0,02080	0,02082
40	0,02075	0,02067	0,02066	0,02073	0,02075
50	0,02067	0,02059	0,02059	0,02064	0,02064
60	0,02056	0,02049	0,02047	0,02052	0,02052
70	0,02044	0,02036	0,02034	0,02037	0,02036
80	0,02033	0,02023	0,02022	0,02023	0,02022
90	0,02019	0,02009	0,02007	0,02007	0,02005

Ek Tablo 3'ün devamı

Sıcaklık T [°C]	$\tilde{W}_{v_{DY}}$ [±%]	$\tilde{W}_{v_{B5}}$ [±%]	$\tilde{W}_{v_{B10}}$ [±%]	$\tilde{W}_{v_{B15}}$ [±%]	$\tilde{W}_{v_{B20}}$ [±%]
5	0,03976	0,03974	0,03973	0,03956	0,03952
10	0,03976	0,03973	0,03972	0,03956	0,03951
15	0,03978	0,03974	0,03973	0,03957	0,03952
20	0,03978	0,03973	0,03972	0,03955	0,03951
30	0,03977	0,03971	0,03970	0,03953	0,03949
40	0,03974	0,03969	0,03967	0,03950	0,03946
50	0,03969	0,03964	0,03962	0,03944	0,03939
60	0,03964	0,03958	0,03956	0,03938	0,03932
70	0,03958	0,03952	0,03949	0,03930	0,03925
80	0,03952	0,03945	0,03944	0,03923	0,03917
90	0,03945	0,03939	0,03937	0,03916	0,03909

Ek Tablo 3'ün devamı

$\tilde{W}_{\sigma_{DY}}$ [±%]	$\tilde{W}_{\sigma_{B5}}$ [±%]			$\tilde{W}_{\sigma_{B10}}$ [±%]		
295,15 K	309,15 K	329,15 K	345,15 K	311,15 K	332,15 K	350,15 K
0,7463	0,8063	0,8958	0,9941	0,8123	0,8766	1,0494

Ek Tablo 3'ün devamı

$\tilde{W}_{\sigma_{B15}}$ [±%]			$\tilde{W}_{\sigma_{B20}}$ [±%]	
315,15 K	341,15 K	367,15 K	319,15 K	349,15 K
0,8028	0,9186	1,2007	0,8102	1,0214

ÖZGEÇMİŞ

Mert GÜLÜM, 26.08.1989 tarihinde Rize'nin Pazar ilçesinde dünyaya geldi. İlk ve ortaokulu Artvin Arhavi Mehmet Nazif Günel İlköğretim Okulu'nda bitirdi. Lise öğrenimini 2006 yılında Samsun Özel Meralcan Fen Lisesi'nde okul birincisi olarak tamamladı. 2010 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden bölüm ikincisi olarak, 3.30 ortalama ile mezun oldu. Aynı yıl KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans çalışmalarına başladı. Şubat 2012'de KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'ne Araştırma Görevlisi olarak atandı. Temmuz 2014'te Yüksek Mühendis unvanını aldı ve doktora çalışmalarına başladı.

Mert GÜLÜM'ün SCI indekslerinde taranan 16 ve diğer indekslerde (DOAJ ve ProQuest) taranan 6 olmak üzere toplam yayımlanmış 22 makalesi, uluslararası 27 ve ulusal 1 olmak üzere toplam 28 bildirisi, uluslararası kitap evlerinde basılmış 7 kitapta bölümü bulunmaktadır. Web of Science h-indeksi 10'dur. Google Scholar veri tabanı için h-indeksi ve i10-indeksi sırasıyla 10 ve 11'dir. 27 uluslararası sempozyum için bilim/düzenleme kurulu üyeliği bulunmaktadır. Bu zamana kadar, çalışmalarına 239/502/318 (Web of Science/Google Scholar/Scopus) atıf yapılmıştır. 21 farklı uluslararası dergiye hakemlik yapmıştır. 3 Kasım 2019 tarihli YÖKDİL sınavı için 82.5 İngilizce puanı bulunmaktadır.