



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**BIYODİZEL ÜRETİMİNDE YAĞ ASİDİ
BİLEŞENLERİNİN YAKIT ÖZELLİKLERİNE
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Merve ÇELİK TOLU

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Haziran-2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Merve ÇELİK TOLU

13.06.2023

ÖZET

DOKTORA TEZİ

BİYODİZEL ÜRETİMİNDE YAĞ ASİDİ BİLEŞENLERİNİN YAKIT ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Merve ÇELİK TOLU

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hidayet OĞUZ

2023, 125 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Hidayet OĞUZ
Prof. Dr. Fikret AKINERDEM
Prof. Dr. Ali KAHRAMAN
Prof. Dr. Murat CİNİVİZ
Dr. Öğr. Ü. Özlem ERDAŞ ÇİÇEK

Yağ asidi ve metil esterlerinin yapı, miktar, çeşit ve fiziksel özellik ilişkileri hakkında detaylı bilgiye sahip olunmasının dizel motorun çalışma performansı ve motorun çalıştığı iklim koşullarında talebe karşılık verebilecek nitelikteki biyodizel yakıtının üretilmesinde son derece önemli olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada yağ asidi profilinin farklılığı göz önünde bulundurularak on adet bitkisel yağ belirlenmiş ve bu yağlardan biyodizel üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen biyodizellere ait yakıt özellikleri laboratuvar ortamında ilgili cihazlar ile analiz edilmiş TS EN 14214 standartları ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Yağ asidi profilinin etkisinin araştırılması amacıyla kullanılan tüm yağ numuneleri için gaz kromatografisi analizi gerçekleştirilmiştir. İlişkiyi verecek bir model geliştirilmesi amacıyla makine öğrenmesi yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca makine öğrenimi verilerden öğrenme mantığı ile çalıştığından ideal bir veri seti oluşturulabilmesi amacıyla öznitelik seçimi analizi gerçekleştirilmiştir. Özniteliklerin yani yağ asitlerinin seçimi için filtre yöntemleri ve sarmalayıcı yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemler çeşitli regresyon yöntemlerine uygulanarak setan sayısı ve CFPP ile yağ asitleri arasında bir ilişki olduğu doğrulanmıştır. Üç filtre yöntemi ile de palmitoleik asit ile setan sayısı arasındaki korelasyonun çok düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Setan sayısını tahmin etmede en etkin üç yağ asidi sırasıyla linoleik, linolenik ve oleik asit, CFPP tahmininde etkin olanlar ise palmitik, stearik ve erusik asit olarak belirlenmiştir. Ayrıca oleik, linoleik ve linolenik asitin de negatif yönde etkili yağ asitleri olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Viskozite, akma ve bulutlanma noktalarının ise modellemeye uygun olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Biyodizel, gaz kromatografisi, makine öğrenmesi, öznitelik seçimi, regresyon, yağ asidi.

ABSTRACT

Ph.D THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF FATTY ACID COMPONENTS ON FUEL PROPERTIES IN BIODIESEL PRODUCTION

Merve ÇELİK TOLU

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Prof. Dr. Hidayet OĞUZ

2023, 125 Pages

Jury

Prof. Dr. Hidayet OĞUZ
Prof. Dr. Fikret AKINERDEM
Prof. Dr. Ali KAHRAMAN
Prof. Dr. Murat CİNİVİZ
Dr. Öğr. Ü. Özlem ERDAŞ ÇİÇEK

It is known that having detailed information about the structure, quantity, variety, and physical properties relationships of fatty acids and methyl esters is crucial for the production of biodiesel fuel that can meet the demand and perform well in diesel engines under different climatic conditions. In this study, ten vegetable oils were selected considering the differences in fatty acid profiles, and biodiesel production was carried out from these oils. The fuel properties of the produced biodiesels were analyzed in the laboratory using relevant equipment, and compatible results were obtained according to the TS EN 14214 standards. Gas chromatography analysis was conducted for all oil samples used to investigate the effect of fatty acid profiles. Machine learning methods were used to develop a model that could provide the relationship. Additionally, feature selection analysis was performed to create an ideal dataset since machine learning works based on the logic of learning from the data. Filter methods and wrapper methods were employed for the selection of features, which are the fatty acids. By applying these methods to various regression techniques, it was confirmed that there is a relationship between the cetane number and CFPP (Cold Filter Plugging Point) with the fatty acids. It was found that the correlation between palmitoleic acid and cetane number was very low for all three filter methods. The three most effective fatty acids for cetane number prediction were determined to be linoleic acid, linolenic acid, and oleic acid, while the effective ones for CFPP prediction were identified as palmitic acid, stearic acid, and erucic acid. Furthermore, it was concluded that oleic acid, linoleic acid, and linolenic acid have a negative effect. It was also determined that viscosity, pour point, and cloud point were not suitable for modeling.

Keywords: Biodiesel, fatty acid, feature selection, gas chromatography, machine learning, regression.

ÖNSÖZ

Doktora eğitimim boyunca tecrübesi ve bilgisiyle beni yetiştiren danışman hocam Prof. Dr. Hidayet OĞUZ'a, tez izleme komitemde yer alan ve değerli fikirleriyle katkı sağlayan Prof. Dr. Ali KAHRAMAN ve Prof. Dr. Murat CİNİVİZ hocalarıma, doktora çalışmalarımın son zamanlarında tanıdığım, tezime önemli katkı sağlayan ve üzerimde çok büyük emeği olan canım hocam Dr. Öğr. Ü. Özlem ERDAŞ ÇİÇEK'e, çalışmalarım boyunca desteğini esirgemeyen, malzeme ve laboratuvar temininin yanında değerli tecrübelerini hiçbir karşılık gözetmeden benimle paylaşan hocalarım Prof. Dr. Fikret AKINERDEM, Doç. Dr. Fatma Nur ARSLAN, Doç. Dr. Gamze KARANFİL KAÇMAZ, Dr. Öğr. Ü. Seda ŞAHİN ve Arş. Gör. Dr. Semih YURTDAŞ'a, ve ismini saymadığım tüm hocalarıma ve arkadaşlarıma en kalbi teşekkürlerimi sunarım.

Bu mesleği seçmemde bana rol model olan canım abim Prof. Dr. İsmail ÇELİK'e ve bana annem kadar yakın canım ablam Öğr. Gör. Ayşegül HAMAMCI'ya ve her zaman karşılıksız sevgileri, destekleri ve dualarıyla beni bu yaşıma getiren ayrıca doktora sürecimde oğlumu büyüten canım annem Nurhan ÇELİK ve canım babam Metin ÇELİK'e canı gönülden teşekkür ederim.

Her anımda benimle olan, sevgisi ve desteğiyle hayatımı güzelleştiren canım eşim Arş. Gör. Muhammed Emin TOLU'ya ve bana hayatımın en güzel duygularını yaşatan biricğim, canım oğlum Ahmet Hamza'ma sonsuz sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Merve ÇELİK TOLU
KONYA-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
TABLolar LİSTESİ	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Türkiye’de Biyodizel Üretim Potansiyeli	5
1.2. Bitkisel Yağ Kimyası	5
1.2.1. Doymuş yağ asitleri	8
1.2.2. Doymamış yağ asitleri	9
1.3. Bitkisel Yağlarda Viskoziteyi Azaltma Teknikleri	10
1.3.1. Seyreltme yöntemi	10
1.3.2. Mikroemülsiyon	11
1.3.3. Piroliz	11
1.3.4. Süperkritik Yöntem.....	11
1.3.5. Transesterifikasyon	12
1.4. Biyodizel Üretim Basamakları	12
1.4.1. Ön İşlemler.....	13
1.4.2. Reaksiyon.....	13
1.4.3. Ayırma ve Yıkama	16
1.5. Biyodizel Yakıt Özellikleri	17
1.5.1. Yoğunluk.....	18
1.5.2. Kinematik viskozite	19
1.5.3. Setan sayısı.....	19
1.5.4. Isıl değer.....	21
1.5.5. Parlama noktası	21
1.5.6. Soğukta akış özellikleri	22
1.5.7. Su içeriği	24
1.6. Biyodizel Standartları	24
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	27

3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	38
3.1. Kullanılan Kimyasallar ve Ekipmanlar.....	38
3.2. Biyodizel Üretimi.....	40
3.2.1. Aspir yağından biyodizel üretimi.....	41
3.2.2. Kanola yağından biyodizel üretimi.....	42
3.2.3. Ayçiçek yağından biyodizel üretimi.....	44
3.2.4. Mısır yağından biyodizel üretimi.....	45
3.2.5. Yerfıstığı yağından biyodizel üretimi.....	46
3.2.6. Pamuk yağından biyodizel üretimi.....	47
3.2.7. Fındık yağından biyodizel üretimi.....	48
3.2.8. Ceviz yağından biyodizel üretimi.....	49
3.2.9. Haşhaş yağından biyodizel üretimi.....	50
3.2.10. Kenevir yağından biyodizel üretimi.....	51
3.3. Yakıt Analizleri.....	52
3.3.1. Yoğunluk ölçümü.....	52
3.3.2. Kinematik viskozite ölçümü.....	52
3.3.3. Setan sayısı ölçümü.....	53
3.3.4. Kalori değeri ölçümü.....	54
3.3.5. Bulutlanma ve akma noktası ölçümü.....	54
3.3.6. Soğuk filtre tıkanma noktası ölçümü.....	55
3.3.7. Parlama noktası ölçümü.....	56
3.3.8. Bakır şerit korozyon testi.....	56
3.3.9. Su içeriği ölçüm cihazı.....	57
3.3.10. Renk testi.....	58
3.4. Yağ Asidi Analizleri.....	58
3.5. Yağ Asitlerinin Yakıt Özelliklerine Etkisinin Makine Öğrenmesi ile Analizi ...	60
3.5.1. Öznitelik seçimi yöntemleri.....	62
3.5.2. Regresyon algoritmaları.....	66
3.5.3. Performans ölçümü.....	74
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	77
4.1. Yakıt Analizi Sonuçları.....	77
4.2. Bitkisel Yağ Numunelerinin Kromatografi Analizlerine Ait Sonuçlar.....	82
4.3. Regresyon Analizi Sonuçları.....	95
4.3.1. Modelleme sonuçları.....	95
4.3.2. Gerçek deney verisi sonuçları.....	108
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	115
5.1. Sonuçlar.....	115
5.2. Öneriler.....	116
6. KAYNAKLAR.....	118

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

CH ₂	Metilen
C ₃ H ₈ O ₃	Gliserin
CH ₃ OH	Metanol
C ₂ H ₅ OH	Etanol
C ₃ H ₇ OH	İzopropil Alkol
C ₄ H ₉ OH	Bütil Alkol
C ₆ H ₁₄	n-hekzan
CO ₂	Karbondioksit
COOH	Karboksilik Asit
KOH	Potasyum Hidroksit
NaOH	Sodyum hidroksit
N	Normal
NO _x	Azot Oksit

Kısaltmalar

ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
BTU	İngiliz Isı Birimi
CFPP	Soğuk Filtre Tıkanma Noktası
DIN	Alman Standardizasyon Enstitüsü
DPT	Devlet Planlama Teşkilatı
DVM	Destek Vektör Makineleri
DVR	Destek Vektör Regresyonu
EN	Avrupa Normu
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
FFA	Serbest Yağ Asidi
GA	Genetik Algoritma
GC-FID	Gaz Kromatografi Alev İyonlaşmalı Dedektör
GC-NS	Gaz Kromatografi Kütle Spektrometresi
HGAPSO	GA ve PSO'nun Hibriti
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
ISO	Uluslararası Standardizasyon Örgütü
IUPAC	Uluslararası Saf ve Uygulamalı Kimya Birliği
KA	Karar Ağaçları
kPa	Kilo Paskal
LSSVM	En Küçük Kareler Destek Vektör Makinesi
ML	Makine Öğrenmesi
MPa	Mega Paskal
MSE	Ortalama Kare Hatası
MUFA	Tekli Doymamış Yağ Asidi

PE	Yüzde Hata
PLSR	Kısmi En Küçük Kareler Regresyonu
Ppm	Milyon Başına Parça
PSO	Parçacık Sürüsü Optimizasyonu
PUFA	Çoklu Doymamış Yağ Asidi
R ²	Belirlilik Katsayısı
RBF	Radyal Tabanlı Fonksiyon
RCMSI	İnternet Üzerinden Uzaktan Kalibrasyon Ve Bakım Servisi
RFE	Özyinelemeli Özellik Eleme
RMSE	Kök Ortalama Kare Hatası
RO	Rassal Orman
Rpm	Dakikadaki Devir Sayısı
SBE	Sıralı Geri Yönde Seçim
SFA	Doymuş Yağ Asidi
SFS	Sıralı İleri Yönde Seçim
STD	Standart Sapma
SVC	Destek Vektör Sınıflandırıcısı
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
TUİK	Türkiye İstatistik Kurumu
XGB	Ekstrem Gradyan Yükseltme
YA	Yağ Asidi
YAME	Yağ Asidi Metil Esteri
YSA	Yapay Sinir Ağları

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Literatürdeki bilinen bazı yağ asitlerine ait yapı ve moleköl formülleri	7
Tablo 1.2. EN14214 ve ASTM D6751 standartlarının test metodu ve limitleri.....	26
Tablo 2.1. Saf Haldeki YAME'lere ait Setan Sayıları.....	34
Tablo 3.1. Biyodizel üretiminde ve yağ asidi kompozisyonu analizinde kullanılan materyaller	39
Tablo 3.2. Biyodizel üretimi ve yakıt analizinde kullanılan ekipmanlar.....	40
Tablo 3.3. Yağ asidi kompozisyonu analizi için Uygulanan GC–FID Analiz Yöntem Parametreleri.....	59
Tablo 3.4. Sıralı ileri yönde seçim algoritması	65
Tablo 3.5. Sıralı geri yönde seçim algoritması	66
Tablo 4.1. Bitkisel yağlar ve biyodizellere ait analiz sonuçları.....	78
Tablo 4.2. Bitkisel yağ numunelerine ait GC–FID yağ asit profili analiz sonuçları (%) [g yağ asidi/100 g toplam yağ asidi]	83
Tablo 4.3. Setan sayısı tahmininde kullanılan verinin ilk beş satırı	95
Tablo 4.4. F-skor, pearson katsayısı ve karşılıklı bilgi yöntemleri tarafından en değerli ve en değersiz seçilen öznitelikler	98
Tablo 4.5. F-Skor, pearson katsayısı ve karşılıklı bilgi öznitelik seçim yöntemleri kullanıldığında regresyon modellerinin elde ettiği en iyi sonuçlar.....	99
Tablo 4.6. Özyinelemeli öznitelik eleme yöntemi kullanıldığında regresyon modellerinin elde ettiği en iyi sonuçlar.....	102
Tablo 4.7. Sıralı İleri Öznitelik Seçimi yöntemi kullanıldığında regresyon modellerinin elde ettiği en iyi sonuçlar	104
Tablo 4.8. Sıralı geri öznitelik seçimi yöntemi kullanıldığında regresyon modellerinin elde ettiği en iyi sonuçlar	107
Tablo 4.9. Doğrusal çekirdekli DVM Doğrusal'dan elde edilen katsayılarla göre yağ asitlerinin yakıt özelliklerini belirlemedeki baskınlık derecesi	112
Tablo 4.10. Doyma derecesine göre yağ asitleri ile yakıt özellikleri arasındaki ilişki..	112

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Biyodizel üretiminde uygulanan ön işlemler	13
Şekil 1.2. Transesterifikasyon reaksiyonu basamakları	13
Şekil 1.3. Transesterifikasyon reaksiyonu	14
Şekil 1.4. Sabunlaşma reaksiyonu	14
Şekil 1.5. Transesterifikasyon reaksiyonunun şematik gösterimi (YA: Yağ Asidi, G: Gliserin, A: Alkol, K:Katalizör)	14
Şekil 1.6. Transesterifikasyon reaksiyonu ürünleri ayırma işlemleri	17
Şekil 2.1. EN 14214 standartlarına göre hazırlanmış YAME diyagramı	33
Şekil 3.1. Biyodizel üretiminde kullanılan bitkisel yağlar.....	39
Şekil 3.2. Üretimi gerçekleştirilen on farklı biyodizel.....	40
Şekil 3.3. Aspir yağına alkol ve katalizör ilave edilmesi ve reaksiyonun başlangıcı	41
Şekil 3.4. Reaksiyon sonrası gliserinin ayrılması	41
Şekil 3.5. Yıkama işlemi ve suyun uzaklaştırılması	42
Şekil 3.6. Aspir yağından elde edilen biyodizel	42
Şekil 3.7. Kanola yağından biyodizel üretim basamakları Ayçiçek yağından biyodizel üretim basamakları (a) reaksiyon başlangıcı (b) gliserinin ayrılması (c) yıkama ve suyun uzaklaştırılması (d) biyodizel.....	43
Şekil 3.8. Ayçiçek yağından biyodizel üretim basamakları (a) reaksiyon başlangıcı (b) gliserinin ayrılması (c) yıkama ve suyun uzaklaştırılması (d) biyodizel	44
Şekil 3.9. Mısır yağından biyodizel üretim basamakları (a) reaksiyon başlangıcı (b) gliserinin ayrılması (c) yıkama ve suyun uzaklaştırılması (d) biyodizel	45
Şekil 3.10. Yerfıstığı yağından biyodizel üretim basamakları (a) reaksiyon başlangıcı (b) gliserinin ayrılması (c) yıkama ve suyun uzaklaştırılması (d) biyodizel	46
Şekil 3.11. Pamuk yağından biyodizel üretim basamakları (a) reaksiyon başlangıcı (b) gliserinin ayrılması (c) yıkama ve suyun uzaklaştırılması (d) biyodizel	47
Şekil 3.12. Fındık yağından biyodizel üretim basamakları (a) reaksiyon başlangıcı (b) gliserinin ayrılması (c) yıkama ve suyun uzaklaştırılması (d) biyodizel	48
Şekil 3.13. Ceviz yağından biyodizel üretim basamakları (a) reaksiyon başlangıcı (b) gliserinin ayrılması (c) yıkama ve suyun uzaklaştırılması (d) biyodizel	49

Şekil 3.14. Haşhaş yağından biyodizel üretim basamakları (a) reaksiyon başlangıcı (b) gliserinin ayrılması (c) yıkama ve suyun uzaklaştırılması (d) biyodizel	50
Şekil 3.15. Kenevir yağından biyodizel üretim basamakları (a) reaksiyon başlangıcı (b) gliserinin ayrılması (c) yıkama ve suyun uzaklaştırılması (d) biyodizel	51
Şekil 3.16. Yoğunluk ölçüm cihazı.....	52
Şekil 3.17. Kinematik viskozite ölçüm cihazı	53
Şekil 3.18. Setan sayısı ölçüm cihazı.....	53
Şekil 3.19. Kalori değeri ölçüm cihazı	54
Şekil 3.20. Bulutlanma ve akma noktaları ölçüm cihazı	55
Şekil 3.21. Soğuk filtre tıkanma noktası ölçüm cihazı	56
Şekil 3.22. Parlama noktası ölçüm cihazı	56
Şekil 3.23. Bakır çubuk korozyon test cihazı	57
Şekil 3.24. Su içeriği ölçüm cihazı	58
Şekil 3.25. Renk ölçüm cihazı	58
Şekil 3.26. Gaz kromatografisi için hazırlanmış numuneler	59
Şekil 3.27. Bu çalışmaya ait makine öğrenmesi akış diyagramı	62
Şekil 3.28. Öznitelik seçimi akış diyagramı	62
Şekil 3.29. Filtre yöntemleri akış diyagramı.....	63
Şekil 3.30. Sarmalayıcı yöntemler akış diyagramı	65
Şekil 3.31. Doğrusal sınıflandırma	69
Şekil 3.32. ϵ -tüp, gürültülü veriler için değişkenler, ξ , ξ^* ve kayıp fonksiyonu	71
Şekil 3.33. Karar ağacı algoritması.....	72
Şekil 3.34. Rassal orman algoritması.....	73
Şekil 3.35. 5'li çapraz geçişleme geçişleme yöntemi	75
Şekil 4.1. Kanola yağı numunesine ait yağ asit kompozisyonu analiz kromatogramı ...	85
Şekil 4.2. Ayçiçek yağı numunesine ait yağ asit kompozisyonu analiz kromatogramı..	86
Şekil 4.3. Mısır yağı numunesine ait yağ asit kompozisyonu analiz kromatogramı	87
Şekil 4.4. Aspir yağı numunesine ait yağ asit kompozisyonu analiz kromatogramı	88
Şekil 4.5. Yerfıstığı yağı numunesine ait yağ asit kompozisyonu analiz kromatogramı	89
Şekil 4.6. Pamuk yağı numunesine ait yağ asit kompozisyonu analiz kromatogramı	90
Şekil 4.7. Fındık yağı numunesine ait yağ asit kompozisyonu analiz kromatogramı	91
Şekil 4.8. Ceviz yağı numunesine ait yağ asit kompozisyonu analiz kromatogramı.....	92
Şekil 4.9. Haşhaş yağı numunesine ait yağ asit kompozisyonu analiz kromatogramı ...	93
Şekil 4.10. Kenevir yağı numunesine ait yağ asit kompozisyonu analiz kromatogramı	94

Şekil 4.11. F-skor, pearson katsayısı ve karşılıklı bilgi yöntemleri tarafından elde edilen skorlar ve bu yöntemler ile kurulan regresyon modellerinin performansları	98
Şekil 4.12. Regresyon modellerinin özyinelemeli öznitelik eleme yöntemi kullanıldığında elde ettiği performans	101
Şekil 4.13. Özyinelemeli öznitelik eleme yöntemi kullanıldığında regresyon modellerinin öznitelikleri seçme sayıları	101
Şekil 4.14. Regresyon modellerinin sıralı ileri öznitelik seçimi yöntemi kullanıldığında elde ettiği performans	103
Şekil 4.15. Sıralı ileri öznitelik seçimi yöntemi kullanıldığında regresyon modellerinin öznitelikleri seçme sayıları	104
Şekil 4.16. Regresyon modellerinin sıralı geri öznitelik seçimi yöntemi kullanıldığında elde ettiği performans	106
Şekil 4.17. Sıralı geri öznitelik seçimi yöntemi kullanıldığında regresyon modellerinin öznitelikleri seçme sayıları	106
Şekil 4.18. Setan sayısı için deney verisi sonuçları	108
Şekil 4.19. Viskozite için deney sonuçları.....	109
Şekil 4.20. CFPP için deney sonuçları.....	109
Şekil 4.21. Bulutlanma noktası için deney sonuçları.....	110
Şekil 4.22. Akma noktası için deney sonuçları.....	111

1. GİRİŞ

Enerji canlıların varoluşu için en temel ihtiyaçtır. Özellikle sanayi devriminden bu yana ekonomik, endüstriyel ve teknolojik gelişmelerin hızla artması, artan nüfus ve yaşam standartlarının hep daha konforlu hale getirilmesi çabası dünya çapında enerji tüketimini ciddi derecede artırmıştır. Nüfus artış hızı ile kıyaslandığında enerji tüketimindeki artış daha fazladır (Anwar, 2021; Yılbaşı, 2022). Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), 2050 yılına kadar küresel enerji tüketiminde yaklaşık %53'lük bir artış olacağını tahmin etmektedir. Bu enerji ihtiyacı düşünüldüğünde sürdürülebilir ve tutarlı enerji arzı, gelişmişlik düzeyine bakılmaksızın, herhangi bir ülkenin ekonomisinin ve gelişiminin belkemiği olarak kabul edilebilir (Anwar, 2021).

Dünya çapında tüketilen enerjinin oldukça büyük bir kısmı petrol, kömür, doğalgaz gibi fosil kökenli kaynaklardan sağlanmaktadır (Parvez vd., 2021; John vd., 2020). Fosil yakıtların kullanımıyla ilgili iki önemli sorundan biri dünyanın enerji üretiminin sürdürülebilirliğini tehdit ediyor olmasıdır. Bunun sebebi fosil kökenli kaynakların tekrar meydana gelmesinin çok uzun zaman alması ve tüketim hızının oluşma hızından kat kat fazla olmasıdır yani tükenen bir kaynak olmasıdır. Bir diğer ana problem ise bu kaynakların çevreye verdiği zarardır (Parvez vd., 2021). Önemli miktarda sera gazı emisyonu ısıyı hapsederek iklim değişikliğine neden olmakta ve duman ve hava kirliliğine bağlı solunum yolu rahatsızlıklarına zemin hazırlamaktadır. Hiçbir önlem alınmadığı takdirde fosil yakıtlardan kaynaklanan sera gazı emisyonlarının 2030 yılına kadar %39 oranında artacağı beklenmektedir (Anwar, 2021). Hava, su ve toprakta meydana gelen kirlilikler, atık bertarafı işlemlerinin gerekliliği, ormanların tahrip olması ve ozon tabakasının zarar görmesi fosil kaynaklı enerji kullanan endüstrinin büyümesi ile ortaya çıkan problemlerin bir başka ifade şeklidir (John vd., 2020).

Ülkeler gelişmeye devam ettikçe nakliye, toplu taşıma ve kişisel araç kullanımları da artmaktadır. Taşımacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılan içten yanmalı motorların çoğu petrodizel kullanan sıkıştırma ateşlemeli motorlardır. Buna bağlı olarak gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde petrole dayalı enerji talebi her geçen gün artmaktadır (Yılbaşı vd., 2021; Suvarna vd., 2022). 2010 yılından 2040 yılına kadar küresel petrol ve sıvı yakıt tüketiminin %63'üne tekabül eden yaklaşık 36 Katrilyon BTU yakıtın ulaştırma sektöründe tüketileceği tahmin edilmektedir (Anwar, 2021).

Çevre kirliliğine rağmen dünya çapında gelişmiş ülkelerin fosil yakıt kullanımı ile alakalı ciddi sınırlamalar getirmediği görülmektedir (Anwar, 2021). Fosil yakıt kullanımının bu derece yaygın olması ve enerji arzına birkaç Orta Doğu ülkesinin hakim olması nedeniyle fosil yakıtların fiyatı da artmaya devam etmektedir (John vd., 2020; Bhatia vd., 2021). Önümüzdeki 50 yıl içinde dünyanın petrolünün bitmesi beklenmektedir. İthal fosil yakıtlara bağımlılık, herhangi bir ülkenin enerji güvenliği ve ekonomik istikrarı için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır (Bhatia vd., 2021). Bu durum da son zamanlarda yaşanan küresel enerji krizinin temel nedenidir.

Türkiye'nin enerji durumu incelendiğinde, Türkiye'nin toplam enerjide %70 dış finansal kaynaklara, %90 petrole bağımlı olduğu görülmektedir. Bu olumsuz durum, yerel kaynakların teşvik edilmesinin hızlandırılması ve enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi ihtiyacını doğurmaktadır (Oğuz vd., 2019). Fosil kaynakların kullanımının ekonomi, çevre ve insan sağlığı üzerinde ciddi derecede olumsuz etkiler göstermesi sonucunda araştırmacılar temiz, güvenilir, ekonomik, depolanması ve taşınması kolay, rekabetçi ve en önemlisi sürdürülebilir enerji elde etmek için yenilenebilir enerji kaynakları konusunda yoğun çalışmalara başlamışlardır (Hoekman vd., 2012; Bhatia vd., 2021; Viswanathan vd., 2021).

Güneş, rüzgar, hidroelektrik ve nükleer enerji gibi temiz enerji kaynaklarıyla birlikte biyokütleden türetilen biyoenerji fosil yakıtlara iyi bir alternatiftir (Bhatia vd., 2021). Burada amaç yalnızca fosil yakıtların kullanımını sınırlamak değil aynı zamanda egzoz emisyonlarından kaynaklanan kirliliğin olumsuz etkilerini de en aza indirmektir (Anwar, 2021). Biyokütle; biyogaz, biyodizel, biyoetanol ve biyo-hidrojen gibi bir dizi değerli biyoenerji ürünü için hammadde olarak kullanılabilir (Yaşar, 2020; Parvez vd., 2021). Biyokütle düzenli olarak büyük miktarlarda üretilir ve genellikle bir atık üründür ve bu nedenle ucuzdur. Tarıma ve ormana dayalı çeşitli biyokütle kaynaklarının kullanımı, mevcut akaryakıt dağıtım altyapısı ile uyumluluk, karbon nötr kaynak olması, daha iyi egzoz emisyon profiline sahip olma, yenilenebilirlik, sürdürülebilirlik gibi önemli özellikleri sayesinde tüm dünyada geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Bu özelliklerin her birinin biyokütleyle sağladığı olumlu etkiler sonucu biyokütle ve biyoyakıt talebinin 2035 yılına kadar üç katına çıkması beklenmektedir (Matzenberger vd., 2015; Yaşar, 2020; Parvez vd., 2021). Avantajları göz önüne alındığında dizel motorlar için alternatif yakıt olarak biyodizel ön plana çıkmaktadır (Oğuz ve Çelik Tolu, 2018; Yılbaş, 2022).

ASTM standartlarına göre biyodizel bitkisel veya hayvansal yağlardan elde edilen uzun zincirli yağ asitlerinin mono alkil esterlerinden meydana gelen dizel motorlar için alternatif bir yakıt olarak tanımlanmaktadır (Hoekman vd., 2012; Oğuz ve Çelik Tolu, 2018; Suvarna vd., 2022). Biyodizel doğrudan veya kullanım şartlarına göre ufak modifikasyonlar yapılarak dizel motorlarda kullanılabilen bir yakıttır. Biyodizel petrol dizel yakıtı ile her oranda karıştırılabildiğinden dizel motorlarda mevcut yakıtın yerini alma potansiyeline sahiptir. (Kahraman vd., 2013; Folayan vd., 2019). Biyodizel üretimi için yenilenebilir hammadde kaynaklarının seçimi ülkelere veya bölgelere göre farklılık göstermektedir. Yenilebilir ve yenilemez yağlar, alg ve atık yağlar, biyodizel üretimi için önemli hammaddelerdir. Yerel şartlar ve maliyet hammadde seçiminde etkin rol oynamaktadır (Verma ve Sharma, 2016; Anwar, 2021). Hangi hammaddeden üretilirse üretilsin biyodizel yakıtlar biyolojik olarak parçalanabilir olmaları ve düşük kükürt içerikleri sebebiyle toksik değildir (Anwar, 2021; Yılbaşı, 2022). Biyolojik ayrışabilirlik test sonuçlarına göre 28 günde petrol dizel yakıtının %30'u parçalanırken biyodizelin %95-98 oranında ayrıştığı gözlenmiştir. Dizel yakıttan farklı olarak parlama noktası ve yanma sıcaklığı yüksek olduğundan nakliye ve depolama esnasında avantaj sağlamaktadır. Avrupa Birliği normlarında yer alan "Tehlikeli Madde" sınıfında yer almamaktadır (Öğüt ve Oğuz, 2006). Yağlayıcılığı iyidir. Motor performansını olumsuz etkileyen aromatik hidrokarbonlar (toluen, benzen, ksilen) içermemesi ve bileşiminde %10-11 oranında oksijen içermesi sayesinde yanma kalitesini artırmaktadır (Yılbaşı, 2022). Dolayısıyla yanmamış hidrokarbonlar, sülfatlar ve partikül madde emisyonlarını da azaltmayı sağlamaktadır. Biyodizelin yanması sonucu açığa çıkan CO₂ fotosentez ile bir döngü halinde tekrar kullanıldığından atmosferde birikmeyi önlemektedir. Bu durum da sera gazı emisyonunun azaltılmasında etkin rol oynamaktadır (Folayan vd., 2019). Biyodizelin petrol dizeli üzerindeki bu avantajları biyodizelin dünya çapında popülerliğini artırmaktadır. Bu durum 2019 yılında dünya çapında üretilen biyodizelin 2010 yılındaki üretimin iki katı olan 41 milyar litreye ulaşması ile kanıtlanmaktadır (Suvarna vd., 2022). Biyodizelin dünya çapında birçok ülkede başarılı bir şekilde tanıtılması ve ticarileştirilmesi amacıyla, yüksek ürün kalitesi ve kullanıcı güvenini sağlamak için standartlar geliştirilmiştir. Bazı biyodizel standartları, ASTM D6751 (ASTM: American Society for Testing and Materials) ve Avrupa standardı EN 14214'tür (Knothe ve Steidley, 2005-b).

Biyodizelin sağladığı avantajların yanında dezavantajlarından da bahsetmek gerekir. En büyük dezavantajı yüksek maliyetidir (Yılbaşı, 2022). Araştırmacılar

biyodizel hammaddelerini yenilebilir ve yenilemez olmalarına göre birinci nesil ve ikinci nesil hammaddeler olarak sınıflandırmaktadır. Birinci dünya ülkelerinde gıda kaynağı olarak kullanılan hammaddelerin yakıt üretiminde kullanılması ciddi bir sorun olarak görülmemekte ve bu kaynaklardan üretim popüler kabul edilmektedir. Ayçiçek yağı, mısır yağı, zeytinyağı, soya fasulyesi, hurma yağı, yerfıstığı yağı, hindistan cevizi yağı ve kanola yağı yaygın olarak kullanılan bazı hammaddelerdir. Her ne kadar bazı ülkelerde bu kaynakların yakıt üretiminde kullanılması sorun olarak görülme de yıllar içinde yaşanabilecek gıda kıtlığının önüne geçmek amacıyla ikinci nesil hammadde kaynaklarından biyodizel üretimi üzerine çalışmalar da önemlidir (Anwar, 2021).

Standartlarda yer alan bazı özelliklerin izleri, biyodizel içeren yağ esterlerinin yapısına kadar izlenebilir. Bir sıvı veya katı yağın transesterifikasyon reaksiyonu, yağ asidi profillerinde ana sıvı veya katı yağınkine karşılık gelen bir biyodizel yakıtın üretilmesi ile sonuçlandığından, biyodizel, yakıtın özelliklerine katkıda bulunan her bir ester bileşeni ile yağ esterlerinin bir karışımıdır (Knothe ve Steidley, 2005-b). Dolayısıyla biyodizelin üretiminde tercih edilen yöntemlerin farklılığı, reaksiyon şartları, kullanılan hammaddeler ve bu hammaddelerin içerikleri biyodizel verimini ve kalitesini etkileyen parametrelerdir. Yağ asidinin doymuşluk derecesi ve zincir uzunluğu verimi etkiler ve biyodizelin kalitesini belirler (Knothe ve Steidley, 2005-b; Verma ve Sharma, 2016).

Bu çalışmanın amacı biyodizel üretiminde hammadde olarak kullanılan yağın yağ asidi içeriğinin ve bileşiminin yakıt özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesidir. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'nun (EPDK) yayımlanmış olduğu "Motorin Türlerine Biyodizel Harmanlanması Hakkında Tebliğ" in 5. Maddesinde yerli tarım ürünlerinden ve/veya bitkisel atık yağlardan üretilmiş biyodizelin belirlenen oranda motorine harmanlanması hususundan bahsedilmektedir (Anonymous, 2017). Bu sebeple çalışmada ülkemiz iklim koşullarında yetiştirilebilen bitkilerden elde edilen on farklı bitkisel yağ kullanılmıştır. Bu yağlar yağ asidi profilinin çeşitliliği temel alınarak belirlenmiştir. Kanola, ayçiçek, mısır, aspir, yerfıstığı, pamuk, fındık, ceviz, haşhaş ve kenevir tohumlarından elde edilen yağlardan transesterifikasyon metodu ile biyodizel üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretim sonunda elde edilen yakıtların yakıt özellikleri analiz edilmiştir. Her bir yağın içerdiği yağ asidi türü ve bu yağ asitlerinin oranı farklı olduğundan standartlara uygun biyodizel üretiminde kullanılan hammaddenin yağ asidi içeriği gaz kromatografisi ile analiz edilmiştir. Elde edilen veriler uygun makine öğrenmesi yöntemleriyle analiz edilmiştir. Yağ asidi profili ile bazı yakıt özellikleri

arasında ilişki tespit edilmiş olup detaylar araştırma bulguları başlığı altında verilmektedir.

Yağ asitlerini biyodizel için hammadde olarak kullanacağımız yağın kimliğini belirlemede yapbozun birer parçası olarak düşünürsek her bir parçanın ne kadar önemli olduğu görülmektedir. Elde edilen model ile yakıt özellikleri üzerinde baskın rol oynayan yağ asidinin türü tespit edilmiştir. Bu sayede etkisi bilinen bir yağ asidinin hammadde içerisinde varlığının tespit edilmesi ile yakıtın kullanılacağı şartlara uygun olup olmadığına kolayca karar verilebilecektir. Ayrıca limit değerleri sağlayacak özelliklere sahip birden fazla biyodizel hammaddesi ile harmanlama yapılabilecektir. Bu çalışmanın malzemen, enerjiden, zamandan ve emekten tasarruf sağlayacağı için verimliliğin önemini kavradığımız şu günlerde bilime önemli katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

1.1. Türkiye’de Biyodizel Üretim Potansiyeli

Ülkemiz petrol tüketiminde dışa bağımlı bir ülkedir ve 2022 yılı ham petrol ithalatı 33.4 milyon ton civarındadır (Anonymous, 2022). Genel olarak enerji ithalatı değerlendirildiğinde ise ülkemizin tükettiği enerjinin dörtte üçünü dış kaynaklardan temin ettiği görülmektedir (Yaşar vd., 2016). Son yıllarda alternatif enerji kaynakları üzerine yapılan çalışmalar ülkemizin enerji temininde dışa bağımlılığını azaltmaya yöneliktir. Ülkemizin güneş, rüzgar ve hidroelektrik enerjisi potansiyeli düşünüldüğünde yenilenebilir enerjinin üretilmesi ve enerji ithalatının büyük ölçüde azaltılması mümkündür. Ayrıca tarıma elverişli bir ülkede yaşıyor olmamızın da temiz enerji elde etmede ciddi katkıları bulunmaktadır. Son yıllarda zorlu iklim koşullarında ve verimsiz topraklarda bile yetiştirilebilen ve birim alan başına en yüksek verimi sağlayan bitkilerin ekilmesi ile enerji tarımı hız kazanmıştır. Bu bitkilerin sağladığı yüksek verime rağmen üretim maliyetleri oldukça düşüktür. Bu hammadde kaynaklarından biyodizel üretimi için gerekli altyapı çalışmalarının yapılması ve büyük ölçekli üretime geçilmesi ülkemizin kendi imkanlarıyla daha ekonomik, temiz ve sürdürülebilir enerji üretmesine imkan sağlayacaktır (Öğüt ve Oğuz, 2006; Yaşar vd., 2016).

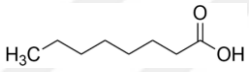
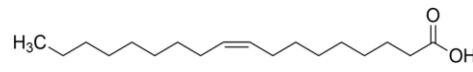
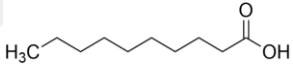
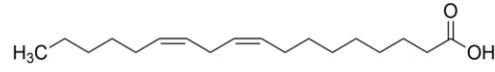
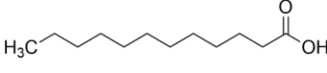
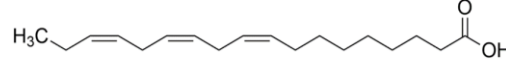
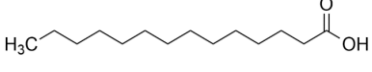
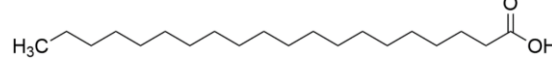
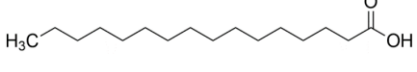
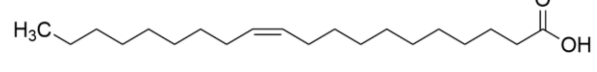
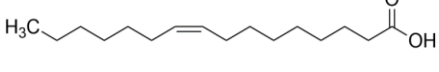
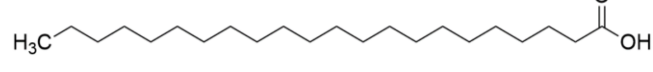
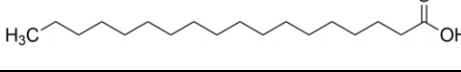
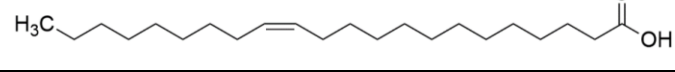
1.2. Bitkisel Yağ Kimyası

Bir yağ asidi, bir karboksil grubu (COOH) ile kapatılmış uzun bir hidrokarbon zinciridir. Doğada bulunan ve yapıları bilinen yağlarda pek çok yağ asidi bulunmakta, ıslahlar neticesinde ortaya çıkan bitkisel yağlarda farklı yağ asitlerine rastlanmaktadır. Doğal yağ asitlerinin dışında bir de çeşitli kimyasal tepkimeler sonucu yapıları ve özellikleri değişen farklı yağ asitleri de mevcuttur. Serbest yağ asitleri, yağlarda genellikle ester yapısında bulunan maddelerin kimyasal ve/veya enzimatik yollarla hidrolizi sonucu açığa çıkmasıyla meydana gelir. Bunlara verilebilecek en iyi örnek trigliseritlerdir. Yağ asitlerinin doymuşluk derecesi zinciri oluşturan karbon atomları arasındaki bağ sayısına ve bu bağların tek veya çift bağ olmasına göre farklılık göstermektedir. Aynı zincir uzunluğuna sahip doymuş ve doymamış yağ asitleri kıyasladığında fiziksel ve kimyasal özelliklerinde ciddi farklılıklar olduğu görülmektedir (Kayahan, 2003).

Normalde hayvansal yağlarda veya bitkisel yağlarda bulunan ve biyodizel sentezinde kullanılan en yaygın yağ asitlerinin bir listesi ve ana özellikleri Tablo 1.1'de verilmiştir. Bu tablonun ilk sütunu, yağ asidinin adını, ikinci sütunu yapı formülünü göstermektedir. Bu sütunda, iki nokta üst üste simgesiyle ayrılan birinci ve ikinci sayılar, sırasıyla yağ asidi zincirindeki karbon atomlarının sayısını ve karbon-karbon çift bağlarının sayısını belirtir. Moleküler yapılar da üçüncü sütunda verilmektedir (Sajjadi vd., 2016).

Tez çalışmasında Tablo 1.1'de verilen yağ asitlerinden bazıları kullanılarak modelleme yapılmıştır.

Tablo 1.1. Literatürdeki bilinen bazı yağ asitlerine ait yapı ve molekül formülleri (Sajjadi et al., 2016)

Yağ Asidi	Formülü	Yapısı	Yağ Asidi	Formülü	Yapısı
Kaprilik	C8:0 C ₈ H ₁₆ O ₂		Oleik	C18:1 C ₁₈ H ₃₄ O ₂	
Kaprik	C10:0 C ₁₀ H ₂₀ O ₂		Linoleik	C18:2 C ₁₈ H ₃₂ O ₂	
Laurik	C12:0 C ₁₂ H ₂₄ O ₂		Linolenik	C18:3 C ₁₈ H ₃₀ O ₂	
Miristik	C14:0 C ₁₄ H ₂₈ O ₂		Araşidik	C20:0 C ₂₀ H ₄₀ O ₂	
Palmitik	C16:0 C ₁₆ H ₃₂ O ₂		Gondoik	C20:1 C ₂₂ H ₄₂ O ₂	
Palmitoleik	C16:1 C ₁₆ H ₃₀ O ₂		Behenik	C22:0 C ₂₂ H ₄₄ O ₂	
Steraik	C18:0 C ₁₈ H ₃₆ O ₂		Erusik	C22:1 C ₂₂ H ₄₂ O ₂	

1.2.1. Doymuş yağ asitleri

Hidrokarbon zincirinde çift bağ içermeyen basit yağ asitleridir. Bütün yağların doğal yapısında, çift karbon sayılı doymuş yağ asitleri bulunmaktadır. Genelde çift sayıda karbon bulundurmaları yanında tek sayıda karbon atomu içeren yağ asitlerine de rastlanmaktadır. Kapalı formülü $C_nH_{2n}O_2$ şeklinde olan doymuş yağ asitleri $CH_3.(CH_2)_{2n}.COOH$ şeklinde de gösterilebilir. Bu tip yağ asitlerinin en kısa zincirli üyesi iki karbonlu olan asetik asit olsa da yağlarda gliserit formunda bulunan en kısa zincirli yağ asidi bütirik asittir. Yağlarda rastlanan ve bu gruba dahil olan en uzun zincirli yağ asidi ise lignoserik asittir.

Moleküldeki karbon sayısı arttıkça erime ve kaynama noktası yükselir. Alkol gibi hidrofil karakterli çözücülerdeki çözünürlükleri sıcaklık artışı ile doğru orantılı olarak yükselmektedir. Ayrıca bu tip yağ asitlerinde yoğunluk zincir uzunluğu ile ters orantılı, viskozite ise zincir uzunluğu ile doğru orantılı bir değişim göstermektedir. Yanma sonucu açığa çıkan kalori değeri ise zincir uzunluğu ile doğru orantılı olarak değişmektedir (Kayahan, 2003).

Doymuş yağ asitleri arasında bilinen en yaygın yağ asitleri palmitik asit ve stearik asittir.

1.2.1.1. Palmitik Asit (C16:0)

IUPAC adlandırma sisteminde ismi hegzadekanoik asittir. 16 karbonlu olan bu yağ asidinin kimyasal formülü $CH_3(CH_2)_{14}COOH$ şeklinde gösterilir. Kapalı formülü $C_{16}H_{32}O_2$ olan doymuş yağ asididir.

1.2.1.2. Stearik asit (C18:0)

IUPAC adlandırma sisteminde ismi oktadekanoik asittir. 18 karbonlu olan bu yağ asidinin kimyasal formülü $CH_3(CH_2)_{16}COOH$ şeklinde gösterilir. Kapalı formülü $C_{18}H_{36}O_2$ olan doymuş yağ asididir.

1.2.2. Doymamış yağ asitleri

Yapısında bir ya da birden fazla çift veya üçlü doymamış bağ içeren yağ asitleridir. Molekül ağırlığı ve doymamışlık derecesi yüksek olan yağ asitlerinde izomerleşme ve polimerleşme tepkimeleri daha çok gözlenmektedir. Doğada bulunan tüm doymamış yağ asitleri de eğer zincir yapısında herhangi bir dallanma yoksa çift sayıda karbon atomu ihtiva eder. Aynı sayıda karbon atom içeren doymuş yağ asitleri ile kıyaslandıklarında; çözünürlüklerinin daha iyi, erime ve donma noktalarının daha düşük, yine aynı şekilde kaynama noktaları ve buhar basınçlarının daha düşük, yoğunluklarının ise daha yüksek olduğu görülmektedir (Kayahan, 2003). Ayrıca %80-85'lik kısmı doymamış yağ asitlerinden meydana gelen, özellikle de yüksek linolenik ve linoleik asit içeriği ile karakterize edilen esterlerin oksitlenme kararlılığı düşük olmaktadır (Santos vd., 2013).

Doymuş yağ asitlerinde olduğu gibi doymamış yağ asitleri arasında da yaygın olarak görülen yağ asitleri mevcuttur. Bunlar oleik asit, linoleik asit ve linolenik asittir.

1.2.2.1. Oleik asit (C18:1)

Formülü $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$ olan monoenik (yapısında 1 tane çift bağ içeren) yağ asitleri grubunda yer almaktadır. Kapalı formülü $\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$ olan doymuş yağ asididir. 18 karbon atomu içerenler içinde doğal olarak sentezlenen yağ asitlerinden biridir. Renksiz ve kokusuzdur, suda çözünmemesine rağmen alkol ve diğer organik çözücülerde her oranda çözünebilir. Biyodizel özelliklerine olan etkileri sonraki başlıkta detaylı verilecektir (Kayahan, 2003).

1.2.2.2. Linoleik asit (C18:2)

Formülü $\text{COOH}(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_4\text{CH}_3$ olan ve yapısında iki adet çift bağ içeren doymamış yağ asididir. Fiziksel özellikleri ve çözünme şekli oleik asit gibidir (Kayahan, 2003). Ayçiçek, haşhaş, aspir gibi bitkisel yağların %50 sinden fazlasını meydana getirmektedir.

1.2.2.3. Linolenik asit (C18:3)

Formülü $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$ ve kapalı formülü $\text{C}_{18}\text{H}_{30}\text{O}_2$ olan, yapısında 3 adet çift bağ içeren bir yağ asididir.

Oksidatif bozunma yağın doymamışlık derecesi ile ilişkilidir. Yapıda bulunan metil grupları (-CH₂-) hidroperoksit oluşumuna neden olmaktadır. Dolayısıyla 3 adet çift bağ içeren linolenik asit (C18:3); linoleik (C18:2) ve oleik (C18:1) asite kıyasla oksitlenmeye daha yatkındır (Qi ve Li, 2014). Keten tohumu yağı linolenik asit gibi çoklu doymamış yağ asidi içeriği yüksek (%55) olduğundan yüksek sıcaklıklarda oksijen varlığında polimerize olma eğilimindedir (Puhan vd., 2010).

Yağ asitlerinin biyodizel özelliklerine olan etkileri ile alakalı detaylı bilgiler *Biyodizel Yakıt Özellikleri* ve *Kaynak Araştırması* başlıkları altında detaylı verilecektir.

1.3. Bitkisel Yağlarda Viskoziteyi Azaltma Teknikleri

Bitkisel yağın enerji içeriğinin fosil kökenli dizel yakıtı ile yakın değerlerde olması yağdan biyodizel eldesinde önemli bir kriter olmakla beraber viskozitesinin 10-20 kat fazla olması da bir dezavantajdır. Yağın direkt püskürtmeli motorlarda doğrudan yakıt olarak kullanılması ile enjektörlerde, yanma odasında, piston ve supaplarda kalıntılar meydana geleceğinden motor gücü düşer ve ömrü kısalmır. Yüksek viskozite ve karbon atığı probleminin çözülmesi ile bitkisel yağlar da dizel yakıtı alternatifi olarak kullanılabilir (Öğüt ve Oğuz, 2006).

Viskozitenin azaltılması amacıyla kimyasal ve ısıl olmak üzere iki yöntem uygulanmaktadır (Scott vd., 2010). Isıl yöntem ile viskozitenin azaltılması yağın ön ısıtılması ile gerçekleşmektedir. Fakat bu işlemin hareketli motor üzerinde uygulanmasının meydana getirdiği problemler sebebiyle kimyasal yöntemler daha çok tercih edilmektedir (Aksoy, 2010). Kimyasal yöntemler beş başlıkta özetlenmektedir (Öğüt ve Oğuz, 2006; Beycar Kafadar, 2010)

1.3.1. Seyreltme yöntemi

Yağların (hayvansal, bitkisel veya atık) bir dizel yakıt veya çözücü ile belirli bir oranda araştırılması neticesinde inceltmesidir (Gedik Dilek, 2020). Bu haliyle yakıt kullanıma hazırdır. Fakat hala viskozite değeri gerektiği kadar düşük değildir (Aksoy, 2010; Özdemir ve Mutlubaş, 2016).

1.3.2. Mikroemülsiyon

Kısa zincirli alkollerin (metil, etil alkol gibi) ilave edilmesiyle bitkisel yağın mikroemülsiyon haline getirilmesi yöntemidir. Viskozitedeki azalma seyreltme yöntemine göre daha iyidir ve yakıtın püskürtülmesi daha kolaydır (Aksoy, 2010; Özdemir ve Mutlubaş, 2016). Alkollerin setan sayısının düşük olması meydana getirilen emülsiyonun da setan sayısının düşük olmasına sebep olur bu da yanma kalitesini olumsuz etkilemektedir. Yanma sırasında polimerleşme ve karbon birikmesi gibi sebeplerle kullanışlı bir yöntem olarak görülmemektedir. Ayrıca düşük sıcaklıklarda karışım ayrışma eğilimindedir. Bu durum da yakıtın soğukta kullanım performansını olumsuz etkilemektedir (Öğüt ve Oğuz, 2006).

1.3.3. Piroliz

Sadece ısı uygulanarak veya katalizör eşliğinde ısı uygulanarak bitkisel yağların yakıtı dönüştürülmesi yöntemidir. İşlem esnasında ortamda oksijen kaynağının olmaması yakıtın oksijen içeriğinde azalmaya sebep olmaktadır (Patel ve Sankhavara, 2017). Bitkisel yağların termal ayrışması sonucunda meydana gelen ürünler birbirinden farklıdır. Bunu sebebi yağları meydana getiren trigliseridlerin moleküllerinin birbirinden farklı olmasıdır. Bu yapıların termal ayrışma mekanizmaları da komplekstir (Zappi vd., 2003). Viskozitenin düşürülmesinde oldukça etkili olmasına rağmen 400-600°C gibi yüksek sıcaklıklarda uygulandığından işlem maliyeti oldukça yüksektir (Aksoy, 2010; Özdemir ve Mutlubaş, 2016; Gebremariam ve Marchetti, 2017). Elde edilen yakıt kimyasal açıdan benzin ve dizel yakıtlara yakındır fakat akma noktası, yanma sonrası karbon ve kül atıkları gibi değerler standartlara uyumlu değildir (Yılbaşı, 2021).

1.3.4. Süperkritik Yöntem

Bir maddenin sıcaklığının kritik sıcaklık basıncının ise kritik basınç üzerine çıkarıldığında bulunduğu faz süper kritik akışkan fazıdır. Süper kritik akışkanların fizikokimyasal özelliklerinden bazıları sıvılara bazıları ise gazlara benzemektedir. Süper kritik yöntemin transesterifikasyon yönteminden farkı yüksek sıcaklıklarda kısa sürede reaksiyon gerçekleştirilmesidir. Transesterifikasyon reaksiyonunun uzun zaman alması büyük ölçekli üretimlerde dezavantaj olarak görüldüğünden bu yöntem uygulanmaya başlamıştır (Arslan, 2015).

1.3.5. Transesterifikasyon

Esterler, bir hidroksil grubundaki hidrojen atomunun bir organik grup (genelde R ile gösterilir) ile yer değiştirmesi neticesinde meydana gelen organik bileşiklerdir. Bir başka deyişle bir alkol molekülü ile bir asit molekülünün tepkimesi sonucu ortaya çıkarlar. Transesterifikasyon, esterlerin kimyasal reaksiyon sonucu farklı bir türüne dönüşmesi anlamına gelir. Esterin sahip olduğu alkoksi grubu, genellikle asidik veya bazik ortamda başka bir fonksiyonel grup ile yer değiştirmektedir. Trigliserit, bitkisel ve hayvansal yağların kimyasal adıdır ve bir tür esterdir. Üç adet yağ asidi ve bir gliserinden meydana gelmektedirler. Esterlerin asit ve alkol moleküllerinden meydana geldiği bilindiğinden bir tür ester olan trigliserit içeriğindeki gliserinin de alkol olduğu çıkarımı yapılmaktadır. Gliserin ($C_3H_8O_3$) bir ağır alkoldür (Uluengin, 2007). Yağ asitlerine bağlı olan gliserin bitkisel yağın daha kalın ve yapışkan yapıda olmasına sebep olmaktadır. Yakıtın düşük viskoziteli olması motor performansı ve ömrü için önemli bir kriter olduğundan transesterifikasyon reaksiyonu ile gliserin bitkisel yağdan uzaklaştırılır yağ daha düşük viskoziteli ve ince yapılı olan yakıtta dönüştürülür. Biyodizel üretiminin esası yağın içerisinde bulunan ester ile gliserinin ayrılmasıdır. Bir başka ifadeyle transesterifikasyon yağ asitlerinin (bitkisel, hayvansal, evsel atık yağlar gibi) bir katalizör eşliğinde kısa zincirli alkollerle esterleşme reaksiyonudur (ğt ve Oğuz, 2006).

Viskozitenin azaltılması amacıyla uygulanan yöntemler içinde en yaygın olanı transesterifikasyon yöntemidir. Çalışmamızda transesterifikasyon metodu kullanılmaktadır. Sonraki bölümde üretim basamakları ile alakalı genel bilgiler verilmektedir.

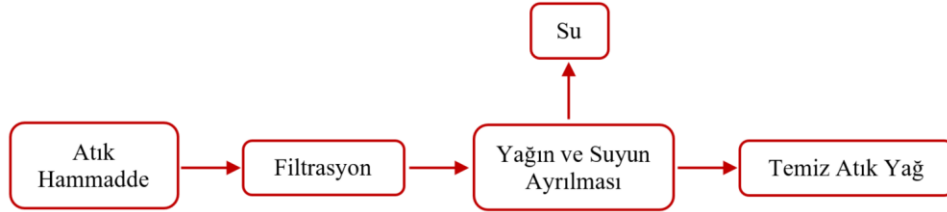
1.4. Biyodizel retim Basamakları

Biyodizel rimi temelde 3 aşamadan meydana gelmektedir.

1. n İşlemler
2. Reaksiyon
3. Ayırma ve Yıkama

1.4.1. Ön İşlemler

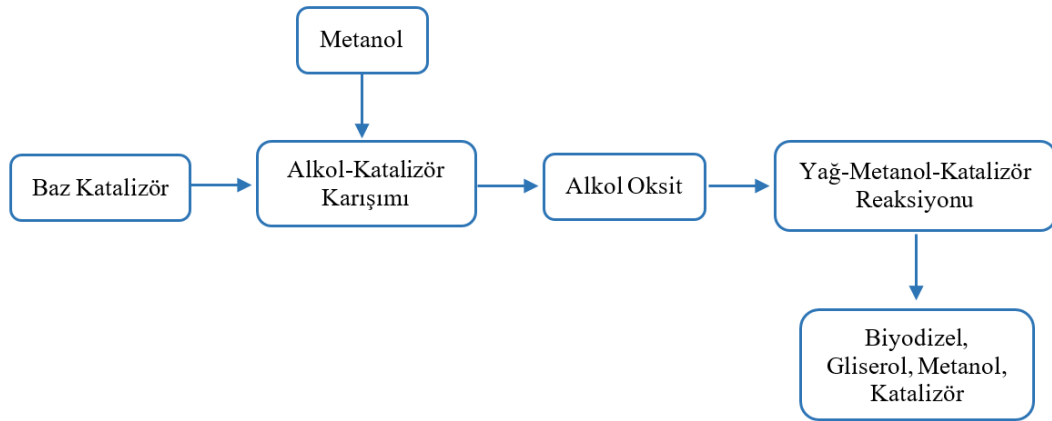
Eğer hammadde olarak atık yağ kullanılıyorsa muhakkak ön işlemlerden geçirilmelidir. Saflığından emin olduğumuz hammaddeler için bu işleme gerek yoktur. İşlemler Şekil 1.1 ile özetlenmiştir.



Şekil 1.1. Biyodizel üretiminde uygulanan ön işlemler (Öğüt ve Oğuz, 2006)

1.4.2. Reaksiyon

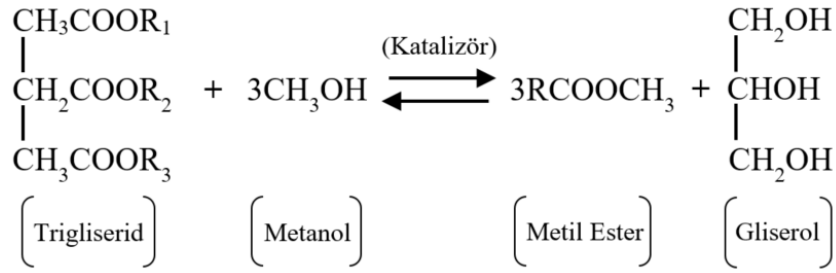
Transesterifikasyon reaksiyonu esnasında yağ asidi zincirlerini bir arada tutan gliserin molekülü asit zincirlerinden ayrılır ve yerine başka bir alkol molekülü bağlanır ve açığa çıkan gliserin yoğunluğunun fazla olması sebebiyle dibe çöker. Yani bu reaksiyon esterlerin yer değiştirmesi şeklinde sonuçlanır. Reaksiyon basamakları Şekil 1.2 ile özetlenmiştir.



Şekil 1.2. Transesterifikasyon reaksiyonu basamakları (Öğüt ve Oğuz, 2006)

Biyodizel üretiminde iki ana reaksiyon gerçekleşmektedir, Şekil 1.3 ve Şekil 1.4 (Öğüt ve Oğuz, 2006).

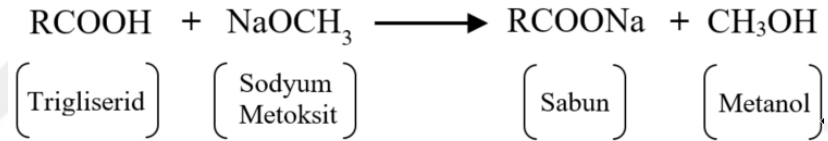
1. Trigliserid ile metanolün katalizör eşliğinde metil ester üretimi (biyodizel +gliserin)



Şekil 1.3. Transesterifikasyon reaksiyonu (Öğüt ve Oğuz, 2006)

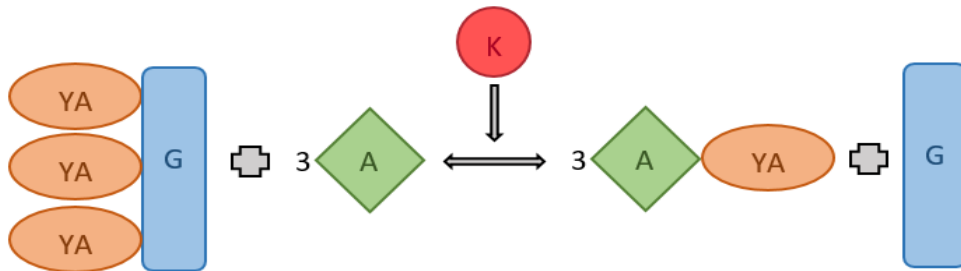
Trigliserid yapısında gösterilen R_1 , R_2 , R_3 hidrojen ve karbon atomlarından meydana gelen uzun zincirli yapılarıdır ve bazen yağ asidi olarak da adlandırılmaktadırlar.

2. Serbest yağ asidi ile sodyum metoksitin sabun ve metanol üretimi.



Şekil 1.4. Sabunlaşma reaksiyonu (Öğüt ve Oğuz, 2006)

Reaksiyon stokiyometrisinin şematik gösterimi Şekil 1.5'te verilmiştir. Tepkime sonunda 3 mol yağ asidi metil esteri (YAME) ve 1 mol gliserin elde edilmektedir.



Şekil 1.5. Transesterifikasyon reaksiyonunun şematik gösterimi (YA: Yağ Asidi, G: Gliserin, A: Alkol, K:Katalizör) (Uluengin, 2007)

1.4.2.1. Katalizör seçimi

Katalizörsüz ortamda trigliserit ile alkol (metanol veya etanol) arasında gerçekleşen transesterifikasyon reaksiyonu çok yavaştır bazen de reaksiyon gerçekleşmez. Bu sebeple asidik veya bazik bir katalizör yardımıyla reaksiyon hızlandırılır. Kullanılan bazlar genellikle sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksittir (KOH) (Melero vd., 2015; Silva vd., 2015; Özdemir ve Mutlubaş, 2016). NaOH (kostik soda) muhakkak saf olmalıdır. KOH ise daha az toksik etkiye sahiptir (Öğüt ve Oğuz, 2006). Günümüzde en çok bazik katalizörlerin tercih edilme nedeni nispeten daha düşük sıcaklık ve basınç altında da iyi sonuçlar vermesidir. Verimlilik esaslarına göre üretimin ekonomik boyutu da oldukça önemlidir (Uluengin, 2007; Beycar Kafadar, 2010).

Tepkimenin tersinir olması tepkimeye giren kimyasalların tamamının ürüne dönüşmediği anlamına gelmektedir. Dolayısıyla meydana gelen ürünlerde az da olsa hammaddeye rastlanmaktadır. Mümkün olan en yüksek dönüşümün sağlanabilmesi için (verimin yüksek olması için) reaksiyonun daha ileri yönünde gerçekleşmesi sağlanmalıdır, bu da katalizör kullanımı, ısı ve bazen de basınç uygulanması ile sağlanmaktadır (Uluengin, 2007).

1.4.2.2. Alkol-yağ oranı

Kullanılacak alkolün türü ve yağ ile arasındaki oran Transesterifikasyon reaksiyonu için oldukça önemli bir parametredir.

Üretimde, metanol (CH_3OH), etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), izopropil alkol ($\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$) ve bütil alkol ($\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$) gibi alkoller kullanılmaktadır (Melero vd., 2015). Metanol kullanımı, piyasadaki diğer alkollere göre daha verimli sonuçlar sağlamaktadır, yağ içindeki sudan daha az etkilenir ve düşük maliyette elde edilmektedir (Knothe ve Razon, 2017). Farklı alkollerin kullanılması reaksiyon şartlarını değiştirmektedir ve biyodizel üretimini zorlaştırmaktadır.

Tepkime stokiyo-metrisine göre kullanılacak alkol ve yağın mol oranının en az 3:1 olması gerekmektedir. (Özdemir ve Mutlubaş, 2016). Farklı alkoller ile farklı mol oranlarında reaksiyon gerçekleştiren çalışmalar da mevcuttur (Fukuda vd., 2001). Ürün dönüşümünü iyileştirmek için uygun oranın 6:1 olduğu bildirilmiştir (Hossain vd., 2010). Bu oranın daha da artırılması sonucunda ham biyodizel ile gliserolün ayrışma oranı düşmekte dolayısıyla reaksiyon verimi de düşmektedir (Meher vd., 2006; Yılbaş, 2022).

1.4.2.3. Reaksiyon sıcaklığı

Transesterifikasyon reaksiyonu kullanılan yağa ve alkole bağlı olarak farklı sıcaklıklarda gerçekleşebilir. Sıcaklık reaksiyon hızı üzerinde etkili olduğundan ayrıca sıcaklığın artması ile yağın viskozitesi de düşeceğinden yağ ve alkolün karışma oranı da artacaktır bu durum da reaksiyon verimini artıracaktır (Yılbaşı, 2022). Dolayısıyla uygun bir reaksiyon sıcaklığı belirlenmelidir. Hammaddenin ısıtılarak suyun uzaklaştırılması için uygulanacak sıcaklık değeri 50-55°C arasında olmalıdır. Metanolün kaynama noktası 64.7°C olduğundan bu sıcaklık değerinin üzerine çıkılması halinde buhar fazında uzaklaşan metanol reaksiyon ortamındaki alkol miktarının azalmasına sebep olmaktadır (Buasri vd., 2014). Dolayısıyla reaksiyon sıcaklığı alkolün kaynama sıcaklığına yakın bir değer seçilmelidir (Yılbaşı, 2022).

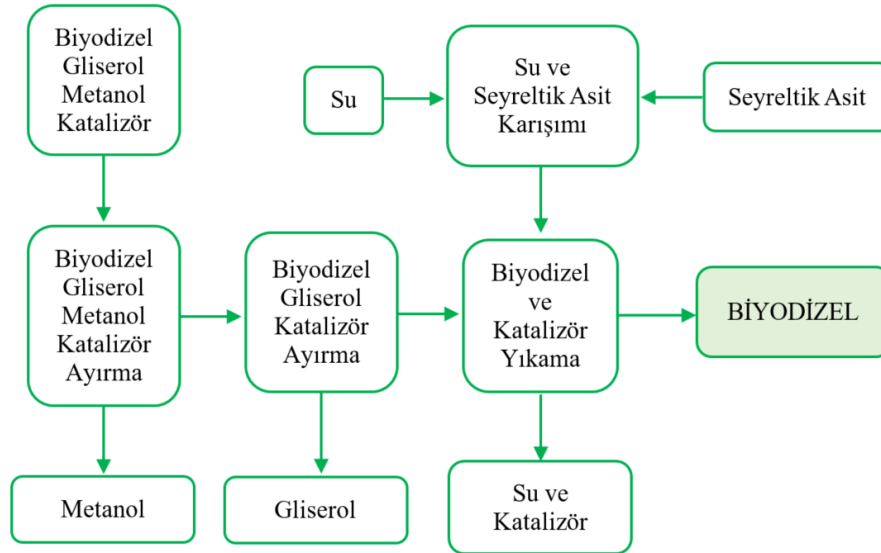
1.4.2.4. Reaksiyon süresi

Alkol ve yağ tamamen karıştıktan sonra reaksiyon hızlanır. Reaksiyonun olması gerekenden uzun süre gerçekleşmesi reaksiyonu ters yöne çevirerek ester kaybına ve sabun oluşumuna neden olmaktadır. Uygun reaksiyon süresi kullanılan yağ, katalizör ve alkole veya bunların oranlarına bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir (Yılbaşı, 2022).

1.4.3. Ayırma ve Yıkama

Teoride reaksiyon sonlandığında yağ asitlerinin gliserinden ayrıldığı kabul edilmektedir. Fakat uygulamada bu mümkün olmayabilir. Dolayısıyla elde edilen karışım içerisinde tekli (monogliserit) veya çiftli (digliserit) yağ asitleri serbest halde kalır ve biyodizelin içinde kolayca erimeleri sebebiyle karışımdan ayrıştırılamazlar. Bu serbest yağ asitlerinin yakıt performansına olumsuz etkileri söz konusudur. Tepkime sırasında kuvvetli bir asit olan bu kimyasallar katalizör olarak kullanılan sodyum veya potasyum hidroksit ile tepkimeye girerek ortamdaki katalizör miktarının azalmasına sebep olmaktadır. Bu durum da reaksiyon dönüşüm verimini düşürmektedir. Ayrıca ürünler içerisinde yer alan monogliseritler korozyona yol açarken digliseritler de tam

yanmadığından silindirlerde kurum oluşumuna sebep olmaktadır. Tüm bu problemler göz önüne alındığında elde edilen biyodizelin ne kadar az serbest yağ asidi içerdiği yakıtın motor performansı açısından önemlidir (Uluengin, 2007).



Şekil 1.6. Transesterifikasyon reaksiyonu ürünleri ayırma işlemleri (Öğüt ve Oğuz, 2006)

Ürünler ayrıca yan ürün olan sabunu, gliserolü, fazla alkolü ve eser miktarda suyu da içermektedir. Elde edilen ürünlerin ayırma basamakları sırasıyla Şekil 1.6'da gösterildiği gibidir. Su, baz katalizli transesterifikasyon sırasında ciddi bir sorun teşkil etmektedir. Sodyum ve potasyum hidroksitin su ile tepkimesi alkol ile tepkimesine oranla daha baskındır dolayısıyla su, trigliseridlerin tam tepkimeye girmesine engel olur ve tepkimeye giremeyen trigliseritler ürünler arasında yer alır. Daha büyük sıkıntı ise trigliseritlerin bazik ortamda su ile tepkimeye girerek sabun ve gliserine dönüşmesi yani sabunlaşmasıdır. Normalde biyodizelin suda çözünme özelliği yoktur fakat sabun oluşumu neticesinde suda çözünme özelliği kazanır (emülsifikasyon) ve ürünün saflaştırılması işlemlerinde yıkama yapılırken biyodizel suda çözünerek bulamaç kıvamında bir maddeye dönüşür. Bu sebeple su reaksiyondan önce mutlaka hammaddeden uzaklaştırılmalıdır (Uluengin, 2007).

1.5. Biyodizel Yakıt Özellikleri

Hammaddenin içerdiği yağ asidinin türü ve konsantrasyonu biyodizelin pek çok özelliğini etkilemektedir. Çoğu, yakıtın kullanımını doğrudan etkileyen özelliklerdir. Bu

sebeple yağ asidi bileşiminin bu özellikler üzerine etkilerinin incelenmesi biyodizel kalitesinin artırılabilmesinde önem arz etmektedir. Bu bölümde bahsi geçen biyodizel özelliklerine yağ asidi içeriğinin etkileri incelenecektir.

Bir biyodizelin kimyasal fizyolojik özellikleri ile moleküler yapısı arasındaki ilişkiyi araştırmak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Yağ asidinin türü, karbon zincir uzunluğu pek çok yağın fiziksel ve kimyasal özelliği üzerinde etkiye sahiptir ayrıca kullanılan alkol de yakıt özellikleri üzerinde önemli etkiye sahiptir (Puhan vd., 2010).

1.5.1. Yoğunluk

Yoğunluk biyodizel için anahtar özelliktir. Dizel motorlarda yakıtın enjeksiyonu ve havayla karıştırılması için uygun şartlar 15-50 MPa arası basınç ve 300-350 K arası sıcaklığın sağlandığı şartlardır. Motor içerisine püskürtülen yakıtın miktarı hacminden belirlenmektedir dolayısıyla yakıtın yoğunluğu hava/yanma oranını değiştirdiğinden yakıt enjeksiyon prosesini doğrudan etkilemektedir. Bunun sebebi yakıt enjeksiyon pompasının yakıtın kütlesini değil hacmini baz alarak ölçüm yapmasıdır. Dolayısıyla yoğunluğu yüksek olan yakıt aynı hacimde yoğunluğu daha az olan yakıtı göre kütlece daha fazla olacaktır (Alptekin ve Canakci, 2008; Refaat, 2009). Ayrıca yakıtın yoğunluğu viskozite, ısıl değer ve setan sayısı ile ilişkili olduğundan önemlidir (Knothe ve Steidley, 2005; Sajjadi vd., 2016).

Yakıtın yoğunluğu aynı zamanda egzozdan yayılan partikül madde miktarı ve NO_x emisyonu ile de yakından ilişkilidir. Yoğunluğun artması ile bu tür emisyonlar da artacaktır (Szybist vd., 2007; Canakci ve Sanli, 2008).

YAME'nin yoğunluk üzerindeki etkisi net olarak bilinmemektedir. Fakat bazı çalışmalarda bu duruma değişmektedir. Zincir uzunluğu ve doymuşluk derecesi arttıkça yoğunluk da artmaktadır (Graboski ve McCormic, 1998; Knothe ve Steidley, 2005). Bu sebeple hayvansal kökenli yağlardan üretilen biyodizel bitkisel kaynaklı olanlara göre daha yoğun olmaktadır (Graboski ve McCormic, 1998; Canakci ve Sanli, 2008). Fakat yoğunluk değerlerine bakıldığında farklı sonuçlar çıkmaktadır. Metil oleatın yoğunluğu 0.8729 g/ml iken metil stearatın yoğunluğu 0.8498 g/ml. Bu sonuca göre de doymamışlık arttıkça yoğunluk artmaktadır. Fakat metanol ve yağın yoğunluğunun biyodizele yakın olması sebebiyle biyodizelin yoğunluğunu çok fazla değiştirmedigine pek çok çalışmada değinilmiştir (Graboski ve McCormic, 1998). Biyodizelin yoğunluğunun petrodizelden fazla olması sebebiyle hacim ve kütle bazında enerji

içeriği daha azdır (Canakci ve Van Gerpen, 2001). Bu sebeple motordan aynı oranda güç elde etmek için yanma odasına gönderilen yakıtın miktarı fazla olmaktadır. Bu da gerekenden fazla yakıt tüketimine sebep olmaktadır (Refaat, 2009).

1.5.2. Kinematik viskozite

Viskozite, sıvı hacminin, kalibre edilmiş bir cam kapiler viskozimetre vasıtasıyla 40°C 'de belirli bir noktayı geçtiği süre olarak belirlenmektedir. Biyodizel ile alakalı temel problem viskozitesinin petrol dizelinden daha yüksek olmasıdır. Petrol dizeli ile kıyaslandığında bitkisel yağlar 9-17 kat, biyodizel ise 1.6 kat daha viskozdur. Yağ asidi zincirinde bulunan CH_2 (metilen) molekülü sayısı arttıkça yakıtın viskozitesi artarken doymamışlık derecesinin artması ile azalmaktadır. Özetle metil esterlerin viskozitesi eşdeğer yağ asidine ait etil esterin viskozitesinden daha düşüktür. Hardal ve sal tohumu yağı yüksek miktarda uzun zincirli yağ asidi içerdiğinden yenilebilir yağlar arasında viskozitesi yüksek yağlar sınıfında yer almaktadır. Hardal yağı %40.10 erüsik asit (C22:1) içermektedir. Sal tohumu yağı ise %43.58 stearik asit (C18:0) ve %41.96 oleik (C18:1) içermektedir. Uzun zincirli yağ asidi içeriğinden dolayı hardal yağının daha viskoz olması beklenmektedir fakat aksine viskozite değerleri birbirine oldukça yakındır. Her ne kadar hardal yağının uzun zincirli yağ asidi içeriği yüksek olsa da doymamışlık derecesi yüksek olan linolenik asit (C18:3) miktarı %18.79'dur. Doymamışlık derecesinin artması viskoziteyi azaltan etki göstermiştir (Sajjadi vd., 2016).

Sıcaklığın azalması ile viskozitede eksponansiyel olarak artış gözlenmektedir bu da akış özelliklerini olumsuz etkilemektedir (Knothe, 2008). Yağ asidi zinciri üzerinde meydana gelen dallanma ise kinematik viskozite üzerinde çift bağların varlığı ve doğasından daha az etkiye sahiptir. Dallanmış esterlerin viskozitesi düz zincirli aynı karbon sayısına sahip benzer yapılardan kayda değer oranda farklı değildir. Dolayısıyla dallanmanın viskoziteye fazla etkisi yoktur (Knothe ve Steidley, 2005).

1.5.3. Setan sayısı

Setan sayısı, dizel motorlarda yanma odasına püskürtülen yakıtın ateşleme gecikme süresi ile ilişkili boyutsuz bir parametredir (Ramos vd., 2009; Knothe, 2009). Yakıtın kendiliğinden tutuşabilirliğinin göstergesidir (Singh vd., 2021). Yakıtın tutuşma karakteristiği motorun performansı, gürültü seviyesi ve egzoz emisyonları açısından

önemlidir (Knothe, 2008; Sajjadi vd., 2016). Biyodizelin setan sayısının petrol dizelinden yüksek olması motorun ilk çalışmasını kolaylaştırmakta ve sessiz çalışmasını sağlamaktadır (Öğüt ve Oğuz, 2006).

Diğer özelliklerde olduğu gibi setan sayısı da yakıtın üretiminde kullanılan hammaddenin bileşimine bağlıdır. Yağ asidi karbon zincirinin uzaması, dallanmanın azalması ve doymuşluk derecesinin artması setan sayısının artmasını sağlar. (Knothe vd., 1998; Refaat, 2009; Ramos vd., 2009). Yağ asidi yapısının ve bileşiminin setan sayısı üzerine etkilerinin incelenmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Miraboutalebi ve diğerleri çalışmalarında yağ asidi metil esterinin stearik asit içeriğinin %51.95'ten yüksek olması durumunda setan sayısı üzerinde olumlu etki yaptığını, linolenik asit içeriğinin %68.4'ten yüksek olması durumunda ise setan sayısı üzerinde olumsuz etki yaptığını bildirmişlerdir (Miraboutalebi vd., 2016). Setan sayısının deneysel yollarla belirlenmesi meşakkatli olduğundan bazı tahmin modelleri geliştirilerek tespit edilebilmektedir. Ramadhas ve diğerleri YAME kompozisyonuna bağlı olarak geliştirdikleri tahmin modeli ile setan sayısı belirlemişlerdir. Bir başka çalışmada ise karbon sayısı 6, 10, 12, 14, 16 ve 18 olan düz zincirli YAME'lerin setan sayıları incelenmiş ve karbon sayısının artışıyla bu değer de arttığı fakat artışta herhangi bir lineerlikten bahsedilemeyeceği belirlenmiştir (Ramadhas vd., 2006; Sajjadi vd., 2016).

Geller ve Goodrum ve Fassinou linoleik (C18:2) ve linolenik (C18:3) asit gibi doymamış yağ asitlerinin fazla olduğu soya ve ayçiçeği gibi biyoyakıtların setan sayısının düşük olduğunu, palmitik ve stearik asit gibi doymuş yağ asitlerince zengin olanların ise setan sayısının yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir (Geller ve Goodrum, 2004; Fassinou, 2012).

Bazı yağ asidi esterlerinin setan sayıları detaylı incelendiğinde palmitik ve stearik asidin değerinin 80'den büyük, metil oleatın 55-58 arasında, linoleik asidin 40 civarı ve linolenik asidin 25 civarında olduğu görülmüştür. Setan sayısının 60 civarına yükseldiğinde NO_x egzoz emisyonlarında azalma olduğu gözlenmiştir (Ladommatos vd., 1996).

Icingur ve Altinparmak, doğrudan püskürtmeli dizel motorlarda setan sayısının etkisini gözlemek için bazı motor testleri yapmıştır. Bu çalışmada setan sayıları 46, 51, 54.5 ve 61.5 olan yakıtlarla motoru 150 bar püskürtme basıncı ile tam yükte çalıştırmışlardır. Çalışma sonucuna göre setan sayısının 46'dan 54.5 değerine yükselmesi ile motorun gücü ve torku %4-5 civarında artmıştır. Setan sayısının 54.5'in

üzerine çıktığı durumda ise motor performansında kayda değer bir iyileşme gözlenmemiştir (Icingur ve Altinparmak, 2003).

1.5.4. Isıl değer

Başlangıç sıcaklığında H₂O ve CO₂ üretmek için bir birim yakıtın yanması sırasında açığa çıkan ısı miktarıdır. Bu özellik yakıtın enerji içeriğini dolayısıyla da verimliliğini karakterize eder (Sajjadi vd., 2016). Isıl değer yakıt moleküllerindeki karbon atomlarının sayısı (zincir uzunluğu) arttıkça artar (Knothe, 2008; Ramirez-Verduzco vd., 2012). Aynı zamanda karbon ve hidrojenin azot ve oksijene olan oranı arttıkça yine ısı değerini arttırdığı görülmektedir. Zincir uzunluğundaki artış küçük zincirli moleküllerde daha kayda değer bir etki göstermektedir yani C8'den C14'e kadar olan değişiklikler C20'den C22'ye kadar olan değişikliklerden daha etkilidir. Biyodizelin içeriğinde aromatik bileşikler bulunmaz fakat yapısında bulunan metil esterler farklı doymuşluk seviyelerine sahiptir. Dolayısıyla setan sayısı ve viskozitede olduğu gibi biyodizelin ısı değeri çift bağ sayısının artmasıyla azalmaktadır (Ramirez-Verduzco vd., 2012). Doymamış bileşenler kütle bazında daha düşük enerji içeriğine sahiptir, fakat yoğunluklarının yüksek olması sebebiyle hacim bazında içerdikleri enerji miktarı daha yüksektir. Örneğin metil stearat 40°C'de kütle bazında 40.10 MJ/kg enerjiye sahiptir ve bu değeri ile 39.93 MJ/kg enerjiye sahip olan metil oleattan %0.41 daha fazla enerjiye sahiptir. Fakat bu durum hacim bazında incelendiğinde metil stearat 34.07 MJ/L enerjiye sahipken metil oleat 34.32 MJ/L enerji içermektedir. Dolayısıyla metil oleatın hacim bazında enerji içeriği %0.7 daha yüksek olmaktadır. YAME'nin doymamışlık derecesindeki bir birimlik artış ısı değerinde yaklaşık 0.21 MJ/kg'lık bir azalmaya tekabül etmektedir (Ramirez-Verduzco vd., 2012).

Isıl değer yakıt tüketiminin belirlenmesinde önemlidir. Yanma sonucu elde edilen ısı ne kadar yüksek ise yakıt tüketimi o kadar azalacaktır. Buna göre kısa zincirli doymuş bileşenler daha düşük ısı değere sahip olduğundan daha fazla miktarda tüketilmektedir (Knothe, 2008).

1.5.5. Parlama noktası

Parlama noktası, uçucu özellikteki bir yakıtın 101.325 kPa (1 atm) basınç altında ateşle temas ettiğinde alev aldığı minimum sıcaklık değeridir. Parlama noktası yakıtın depolanması, taşınması, dağıtımını esnasında ve NFPA (Ulusal Yangın Koruma Birliği) sınıflandırmalarında güvenlik açısından anahtar parametredir (Sajjadi vd., 2016). Parlama noktası, motorun çalışması ve ısınması için önemli bir yakıt özelliği olan uçuculuk değeri ile bağlantılıdır. Viskozitesi yüksek ve uçuculuğu düşük olan yakıtlar motorun teklemesine ve ateşlemede gecikmelere sebep olmaktadır (Szybist vd., 2007; Canakci ve Sanli, 2008). Çoğu bitkisel yağın parlama noktası oldukça yüksektir ve transesterifikasyon reaksiyonu sonucunda 160-190°C aralığına düşer. Bu değerler petrol dizelinden daha yüksek olduğundan biyodizel depolama, taşıma esnasında petrol dizelinden daha güvenlidir (Sajjadi vd., 2016). Performans olarak incelendiğinde ise parlama noktası yüksek olan yakıtların yanma odasında karbon birikmesine sebep olduğu görülmektedir (Canakci ve Sanli, 2008).

Yenilemez bitkisel yağların parlama noktası 259°C civarındadır ve yenilebilir özellikte olanlar 206°C civarındadır. Hammaddelerin parlama noktaları arasında bu kadar fark olmasına rağmen bu kaynaklardan üretilen biyodizel parlama noktaları verilen sıra ile 153°C ve 149°C civarındadır. Parlama noktasının düşük veya yüksek olması yağ asidi bileşimlerine bağlıdır. Doymamışlık arttıkça parlama noktası düşmektedir. Ayrıca C12:0 gibi hafif bileşenlerin çoğunlukta olması da parlama noktasını düşüren bir etkidir (Sajjadi vd., 2016). Parlama noktasının tayin edilmesindeki esas amaç üretilen YAME'nin aşırı metanolden yeteri kadar saflaştırıldığından emin olmaktır. Az miktarda da olsa metanol kalıntısı parlama noktasını düşürecektir (Hoekman vd., 2012).

1.5.6. Soğukta akış özellikleri

Soğukta akış özellikleri biyodizelin yaygın kullanımını sınırlandıran bir özelliktir. Biyodizel gibi karışımların erime noktasından söz edilemez fakat standartlara göre belirli bir erime aralığına sahiptir. Biyodizelin düşük sıcaklık özelliklerinin belirlenmesinde soğuk filtre tıkanma noktası ve düşük sıcaklık akış testi kullanılabilir (Dunn ve Bagby, 1995; Knothe, 2009).

1.5.6.1. Bulutlanma noktası

Bulutlanma noktası yakıt içerisinde filtrede tıkanmaya sebep olacak katı partiküllerin ilk görüldüğü sıcaklıktır. Bu noktada yakıt hala akışkan haldedir (Dunn ve Bagby, 1995; Knothe, 2009; Sierra-Cantor ve Guerrero-Fajardo, 2017). Özellikle doymuş yağ asidi içeriği ile belirlenir, doymamış yağ asidi içeriğine bağlı değildir. Bunun sebebi doymuş yağ asitlerinin doymamış olanlara göre daha yüksek erime noktasına sahip olmasıdır ve bu moleküller yüksek sıcaklıklarda kristalleşirler. Sıvı biyodizel soğutulduğunda stearik ve palmitik asitlerin metil esterleri ilk çöken bileşenler olmaktadır (Qi ve Li, 2014).

1.5.6.2. Akma noktası

Akma noktası ise genellikle bulutlanma noktasının birkaç derece altıdır ve bu sıcaklık yakıtın akıcılığını devam ettirebildiği son sıcaklıktır. Yakıt içerisindeki kristallerin büyüdüğü sıcaklık değerini verir ve bu noktada yakıt jelleşmeye ve akma özelliğini kaybetmeye başlamaktadır (Öğüt ve Oğuz, 2006). Erime noktası yüksek yani uzun zincirli doymuş yağ asitlerinin konsantrasyonu arttıkça biyodizelin soğukta akış özellikleri olumsuz etkilenmektedir (Refaat, 2009; Moser, 2014; Sierra-Cantor ve Guerrero-Fajardo, 2017). Kaynağına bakılmaksızın tüm dizel yakıtların bulutlanma ve akma noktası dizel yakıttan daha yüksektir. Bu da biyodizelin yaygın kullanımında en kritik engeldir (Graboski ve McCormic, 1998; Knothe ve Steidley, 2005; Öğüt ve Oğuz, 2006).

1.5.6.3. Donma noktası

Donma noktası yakıtın donarak akma özelliğini tamamen kaybettiği sıcaklıktır. Diğer soğukta akış özelliklerinde olduğu gibi donma noktası da yakıtın doyma derecesi ile doğru orantılı olarak değişmektedir.

1.5.6.4. Soğuk filtre tıkanma noktası

Biyodizelin düşük sıcaklık özelliklerinin belirlenmesinde soğuk filtre tıkanma noktası ve düşük sıcaklık akış testi kullanılabilir (Dunn ve Bagby, 1995; Knothe, 2009). Tek sayılı karbon içeren yapıların erime noktası çift sayıda içerenlere göre daha biraz daha düşük olmakla birlikte genelde yağ asitlerinin erime noktası zincir uzunluğu ile ve

artan doymuşluk derecesi ile artmaktadır (Knothe, 2009; Moser, 2014). Düşük sıcaklık özellikleri doymuş ester içeriğine bağlıdır ve doymamış ester bileşiminin etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Dolayısıyla soğuk filtre tıkanma noktası yağ asitlerinin erime noktasını baz alarak hesaplanan doyma derecesi ile orantılı olarak değişir (Ramos vd., 2009).

Bulutlanma noktasında meydana gelen kristallerin kümelenmeye başladığı sıcaklık değeridir. Bu durum filtrenin tıkanmasına neden olmaktadır. Bu değer yakıtın soğukta akış özelliklerini bulutlanma noktasına kıyasla daha iyi karakterize etmektedir (Öğüt ve Oğuz, 2006).

Düşük sıcaklık özellikleri doymuş ester içeriğine bağlıdır ve doymamış ester bileşiminin etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Dolayısıyla soğuk filtre tıkanma noktası yağ asitlerinin erime noktasını baz alarak hesaplanan doyma derecesi ile orantılı olarak değişir (Ramos vd., 2009). Soğuk filtre tıkanma noktası EN 14214 standartlarında yer almaktadır. Her ülke yaygın kullanılan iki standarttan birini kendi iklim koşullarına ve bulunduğu mevsim şartlarına göre seçebilmektedir (Knothe ve Steidley, 2005).

1.5.7. Su içeriği

Bitkisel yağ içeriğinde su yoktur fakat üretim ve depolama sırasında su karışma ihtimali vardır. Belirli bir su/yakıt emülsiyon oranına kadar yakıtın su içermesi motor için dezavantaj değildir hatta yanma sıcaklığını ve NO_x emisyonunu düşürme etkisi vardır. Fakat yüksek basınçlı enjeksiyon sistemlerinde suyun yakıttan ayrılarak enjektör sisteminde çürümelere sebep olma riski vardır (Öğüt ve Oğuz, 2006).

1.6. Biyodizel Standartları

Biyodizelin dizel yakıtların yerine kullanılabilmesi için kalite bakımından petrol dizeli ile rekabet edebilecek konumda olması beklenmektedir. Üretim parametrelerinin optimize edilmesi sonucu petrol dizele yakın hatta bazı noktalarda daha iyi özellikler sergileyen bir biyodizel elde etmek mümkündür (Öğüt ve Oğuz, 2006).

Biyodizel kullanımının yaygınlaşması ile kaliteyi ölçecek belli standartların gündeme gelmesi kaçınılmaz olmuştur. Biyodizel için Avrupa Birliği standartları EN 14214 ve Amerikan standartları ASTM D6751 uygulanmaktadır. Tablo 1.2'de AB ve ABD tarafından belirlenen standartlara ait test metotları ve limitleri özetlenmektedir.



Tablo 1.2. EN14214 ve ASTM D6751 standartlarının test metodu ve limitleri (Singh vd. 2021; Şahin, 2021; Yılbaşı, 2022; Ögüt ve Oğuz, 2006)

Özellik	Birim	EN 14214		ASTM D6751	
		Test metodu	Limitler	Test metodu	Limitler
Yoğunluk (15 °C)	g/cm ³	EN ISO 3675, EN ISO 12185	0.86 - 0.90	D 1298	En fazla 880
Kinematik viskozite (40 °C)	mm ² /s	EN ISO 3104, ISO 3105	3.5 - 5.0	D 445	1.9 - 6.0
Setan sayısı	-	EN ISO 5165	≥ 51	D 613	≥ 47
Parlama noktası	°C	EN ISO 3679	≥ 120	D 93	≥ 130
Bulutlanma noktası	°C	EN 116	-	D 2500	-3 ila -12
Asit sayısı	mgKOH/g	EN 14104	≤ 0,50	D 664	≤ 0,50
Bakır şerit korozyonu (3 saat 50 °C)	sınıf	EN ISO 2160	≤ 1	D 130	≤ 3
Oksidasyon kararlılığı (110 °C)	saat	EN 14112, EN 15751	≥ 6.0	EN 14112	≥ 3.0
Su miktarı	mg/kg	EN ISO 12937	≤ 500	D 2709	≤ 0.05 (%hacim)
Soğuk filtre tıkanma noktası	°C	EN 14107	-	-	-
Akma noktası	°C	EN 116, ISO 3016	-	-	-
Fosfor içeriği	mg/kg	EN 14107	≤ 10	D 4951	≤ 0.001 (%m/m)
Sülfür içeriği	mg/kg	EN ISO 20846, EN ISO 20884	≤ 10	D 5453	≤ 0.05 (%m/m)
Karbon kalıntısı	%(m/m)	EN ISO 10370	≤ 0.30 (%10 damıtma kalıntısı)	D4530	≤ 0.05 (%kütle)
Sülfatlanmış kül içeriği	%(m/m)	ISO 3987	≤ 0.02	D 874	≤ 0.02
Toplam gliserol	%(m/m)	EN 14105	≤ 0.25	D 6584	≤ 0.24
Serbest gliserol	%(m/m)	EN 14105, EN 14106	≤ 0.02	D 6584	≤ 0.02
Toplam kirlilik	mg/kg	EN 12662	≤ 24	D 5452	≤ 24
Ester içeriği	%(m/m)	EN 14103	≥ 96.5	-	-
Metanol içeriği	%(m/m)	EN 14110	≤ 0.20	EN 14110	≤ 0.20
Monogliserit içeriği	%(m/m)	EN 14105	≤ 0.80	D 6584	≤ 1.0
Digliserit içeriği	%(m/m)	EN 14105	≤ 0.20	D 6584	≤ 0.25
Trigliserit içeriği	%(m/m)	EN 14105	≤ 0.20	D 6584	≤ 0.25
Linoleik asit içeriği	%(m/m)	EN 14103	≤ 12	-	-
Alkali metaller (Na+K)	mg/kg	EN 14108, EN 14109	≤ 5.0	EN 14538	≤ 5.0 ppm (µg/g)
Toprak alkali metaller (Ca+Mg)	mg/kg	EN 14538	≤ 5.0	EN 14538	≤ 5.0 ppm (µg/g)

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Suvarna ve diğerleri (2022), yağ asidi profiline bağlı olarak yakıt özelliklerinden setan sayısı ve soğuk filtre tıkanma noktasının (CFPP) tahmin edilmesi amacıyla makine öğrenmesi (ML) tabanlı tahmin modelleri geliştirmişlerdir. Aşırı gradyan artırma (XGB) ve rassal orman algoritmaları test verilerinde sırasıyla 0,89 ve 0,91 R^2 değeri ile en iyi performans gösteren algoritmalar olmuştur. ASTM ve EN standartlarına uyumlu olup olmadığının araştırması amacıyla oksitlenme kararlılığı için de sınıflandırma modeli geliştirmişlerdir. Burada destek vektör sınıflandırıcısı (SVC), ASTM ve EN limitleri için sırasıyla 0.93 ve 0.77 değerleri ile en yüksek doğruluk elde ettikleri model olmuştur. Yeterli veri setine ulaşabildiklerinde diğer yakıt özellikleri ile ilişki kuracak bir model geliştirebileceklerini bildirmişlerdir.

Bemani vd. (2020), en küçük kareler destek vektör makinesi (LSSVM) algoritmasını kullanarak YAME profilinden setan sayısının tahmini için bir modelleme yapılmıştır. LSSVM performansını artırmak için bu algoritmayı Genetik algoritma (GA), Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) ve Hibrit GA-PSO (HGAPSO) yaklaşımlarıyla beraber kullanmışlardır. Önerilen modellerin setan sayılarının tahminindeki performansı, literatürden çıkarılan deneysel verilerle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Modelin performansını test etmek amacıyla eğitim ve test aşamaları için belirlilik katsayısı (R^2), ortalama kare hatası (MSE) ve standart sapma (STD) performans ölçütleri kullanılmıştır. LSSVM-GA, LSSVM-PSO ve LSSVM-HGAPSO için test fazındaki belirleme katsayıları sırasıyla 0.965, 0.966 ve 0.978 ile hesaplanmıştır. Ek olarak, algoritmaların grafiksel değerlendirmesi, önerilen modellerin üstün doğrulukta olduğunu göstermiştir. Özellikle LSSVM-HGAPSO farklı araçlarla optimize edilmiş, setan sayısının tahmini için umut verici bir kapasite göstermiştir. Buna ek olarak, setan sayısı tahmininin tüm yönünü açıklığa kavuşturmak için girdi değişkenlerinin setan sayısı üzerindeki etkisi üzerine kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, karbon sayısı, çift bağ ve moleküler ağırlığın biyodizelin setan sayısı üzerindeki etkisini açıklığa kavuşturmak için bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Analizler sonucunda karbon sayısı ve moleküler ağırlık ile setan sayısı arasında doğrusal bir ilişki gözlenirken, çift bağın ters etki yaptığı sonucuna varılmıştır. Analizlerin bir çıktısı olan ilişki faktörü (r) değerlerine göre çift bağ parametresinin, biyodizelin setan sayısı üzerinde en fazla etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Singh ve diğerkleri (2020), yakıt parametreleri ile hammadde bileşiminde bulunan önemli yağ asitleri arasındaki karmaşık (doğrusal olmayan) ilişkiyi ifade edebilmek amacıyla yapay sinir ağı uygulamalarını kullanmışlardır. Biyodizelin özgül ağırlık, anilin noktası, setan sayısı, parlama noktası ve ısıl değeri gibi fizikokimyasal özellikleri için modelleme yapılmıştır. Hesaplamalar neticesinde R^2 değerin yüksek, RMSE (Kök Ortalama Kare Hatası) değerin düşük çıkması yapay sinir ağı modelinin doğal bir ilişki elde etmede başarılı olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre; araşidik asitteki yüzde birlik değışim ile yakıtın ısıl değerinde 21.74 MJ/kg artış ve setan sayısında 7.17'lik bir düşüş olduğu görülmüştür. Bu sonuç, hammadde içeriğindeki araşidik asit miktarının düzenlenmesi ile yakıt kalitesini iyileştirmenin mümkün olacağını göstermektedir. Bu çalışmada ayrıca, yakıt niteliklerini koruyan dizel motorlarda kullanılabilir olası maksimum biyodizel karışımını tahmin etmek için yapay sinir ağları (YSA) tabanlı stokastik optimizasyon teknikleri, GA ve PSO kullanılmıştır.

Hosseinpour ve diğerkleri (2016), çalışmalarında YSA tabanlı kısmi en küçük kareler (PLS) yöntemini kullanarak setan sayısı ve YAME profili arasındaki ilişkiyi modellemişlerdir. Modelin doğruluğu R^2 , MSE ve yüzde hata (PE) performans ölçütleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Standart PLS yöntemi ile YSA'ya uyarlanmış PLS yöntemini kıyaslamış ve yeni önerilen bu modelin daha iyi sonuç verdiğini bildirmişlerdir. YSA'ya uyarlanmış PLS yöntemi ile setan sayısı tahmini modellemesi sonucunda MSE, PE ve R^2 sırasıyla 0.7226, %1.06 ve 0.9934 olarak belirlenmiştir. Sonuçlara göre YSA'ya uyarlanmış PLS yönteminin setan sayısını tahmin etmede güçlü bir model olduğunu bildirmişlerdir.

Miraboutalebi ve diğerkleri (2016), YAME kompozisyonu ile biyodizel setan sayısının tahmin edilmesi üzerine bir model geliştirmişlerdir. Setan sayısının belirlenmesinde kullanılan deneysel metotların pahalı olması, zaman kaybına neden olması ve her zaman güvenilir sonuç vermemesi sebebiyle tahmin yöntemlerinin kullanılmasının önemini vurgulamışlardır. Geliştirilen modelde literatürde mevcut 131 farklı YAME için deneysel veriler temel alınmıştır.

Sajjadi ve diğerkleri (2016), çalışmalarında yenilebilir ve yenilemez bitkisel yağlardan üretilen biyodizel, bunların bileşimleri ve özellikleri hakkında detaylı bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Buna göre 28 adet yemeklik bitkisel yağ ve 40 adet yenilemez bitkisel yağın yağ asidi profilleri toplanmıştır. Kükürt içeriği, yoğunluk, viskozite, parlama noktası, bulutlanma noktası, akma noktası, soğuk filtre tıkanma

noktası, setan sayısı, iyot sayısı, ısıtma değeri, asit değeri ve transesterifikasyon öncesi ve sonrası karbon kalıntısı gibi ana özellikleri detaylı olarak analiz edilmiştir. İncelenen çalışmalar arasından pek çoğunun üretimini optimize etmek ve en iyi özelliklere sahip biyodizel elde edebilmek için biyodizel özelliklerini ölçmeye yarayan tahmin modelleri geliştirdiğinden bahsetmektedirler. Kaliteli bir üretimde özellikle etkili olan üç faktörün, yağ asidi profilleri, yağ asidi yapıları içindeki doymamışlık derecesi ve moleküler ağırlık olduğu ve buna göre bu özellikler üzerine birçok model oluşturulduğu gözlenmiştir. İncelenen çalışmalardan özetle, yağ asidi zincirinde bulunan CH₂ molekülü sayısı arttıkça yakıtın viskozitesi artarken doymamışlık derecesinin artması ile azalmaktadır. Özetle metil esterlerin viskozitesi eşdeğer yağ asidine ait etil esterin viskozitesinden daha düşüktür. Örneğin hardal ve sal tohumu yağı yüksek miktarda uzun zincirli yağ asidi içerdiğinden yenilebilir yağlar arasında viskozitesi yüksek yağlar sınıfında yer almaktadır. Hardal yağı %40.10 erusik asit (C22:1) içermektedir. Sal tohumu yağı ise %43.58 stearik asit (C18:0) ve %41.96 oleik (C18:1) içermektedir. Uzun zincirli yağ asidi içeriğinden dolayı hardal yağının daha viskoz olması beklenmektedir fakat aksine viskozite değerleri birbirine oldukça yakındır. Her ne kadar hardal yağının uzun zincirli yağ asidi içeriği yüksek olsa da doymamışlık derecesi yüksek olan linolenik asit (C18:3) miktarı %18.79'dur. Doymamışlık derecesinin artması viskoziteyi azaltan etki göstermiştir. Yenilemez bitkisel yağların parlama noktası 259°C civarındadır ve yenilebilir özellikte olanlar 206°C civarındadır. Hammaddelerin parlama noktaları arasında bu kadar fark olmasına rağmen bu kaynaklardan üretilen biyodizel parlama noktaları verilen sıra ile 153°C ve 149°C civarındadır. Parlama noktasının düşük veya yüksek olması yağ asidi bileşimlerine bağlıdır. Doymamışlık arttıkça parlama noktası düşmektedir. Ayrıca C12:0 gibi hafif bileşenlerin çoğunlukta olması da parlama noktasını düşüren bir etkendir. Karbon sayısı 6, 10, 12, 14, 16 ve 18 olan düz zincirli YAME'lerin setan sayıları incelenmiş ve karbon sayısının artışıyla bu değer de arttığı fakat artışta herhangi bir lineerlikten bahsedilemeyeceği belirlenmiştir.

Verma ve Sharma (2016), farklı hammaddelerden biyodizel üretiminde önemli olan proses parametreleri üzerine yapılmış literatür çalışmalarını incelemişlerdir. Literatürdeki yağ asidi bileşiminin yakıt özellikleri üzerine etkilerini özetlemişlerdir.

Giwa ve diğerleri (2015) çalışmalarında, biyodizelin setan sayısı, parlama noktası, kinematik viskozitesi ve yoğunluğunu tahmin etmek için YSA tabanlı model geliştirmişlerdir. Literatürde bulunan 55 hammaddeden en yaygın beş yağ asidi olan

palmitik, stearik, oleik, linoleik ve linolenik asit model için girdi parametreleri olarak kullanılmıştır. Yakıtta bulunan diğer yağ asitleri, karbon atomu zincirlerinin sayısı ve doymuluk düzeyine göre değerlendirilmiştir. Ağların tahmin doğruluğu ve ortalama mutlak sapması; setan sayısı için (%96,69; %1,637), kinematik viskozite için (%95,80; %1,638), parlama noktası için (%99,07; %0,997) ve yoğunluk için (%99,40; %0,101) olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre yapay sinir ağı modelinin biyodizelin yakıt özelliklerini yüksek doğrulukla tahmin etmede başarılı olduğu sonucunu bildirmişlerdir.

Moser (2014), çalışmasında bazı biyodizel yakıtların düşük kükürtlü dizel ile karışımları üzerinde yağ asidi içeriğinin soğukta akış özelliklerine etkisini incelemiştir. ASTM D975 standardına göre belirlenen biyodizel-dizel karışımlarına B1'den B5'e kadar numara vermiş ve bu karışımlara ait veriler üzerinde en küçük kareler yöntemi gibi istatistiksel analizler gerçekleştirmiştir. 2012 yılında yaptığı çalışmaya paralel olarak doymuş yağ asidi içeriğinin yüksek olduğu (%48.8) palm yağında düşük sıcaklık özelliklerini en yüksek değerde elde etmiştir. Kanola yağında ise SFA içeriği <%7 olduğundan bu değerler istenen ölçüde düşük elde edilmiştir. İstatistikler analizler sonucunda B5 ve aşağısındaki karışım oranlarında, eğer biyodizel örneği yüksek miktarda (>%48) uzun zincirli (C16 ve üzeri) doymuş YA içermiyorsa; YA profilinin soğukta akış özellikleri üzerine etkisinin olmadığı bulunmuştur. Bir diğer önemli sonuç ise B1 ve B2 karışımları için bu özelliklerin yakıtın hammaddesine bakılmaksızın istatistiksel olarak eşdeğer olduğu görülmüştür.

Santos ve diğerleri (2013), çalışmalarında biyodizel üretiminde düşük linolenik içerikli soya kullanımının performans üzerine etkilerini ve avantajlarını araştırmışlardır. Soya biyodizel üretiminde oldukça yaygın kullanılan bir hammadde olmakla birlikte içeriğindeki yüksek miktarda PUFA düşük oksitlenme kararlılığına sebep olmaktadır. Bu sebeple linolenik asit içeriği düşük olan soya çeşidinin kullanılması durumunda oksitlenme kararlılığının ve CFPP özelliklerinin iyileşmesi beklenmektedir. Çalışmada soyanın iki farklı türü kıyaslandığında linolenik ve oleik asit içerikleri bakımında farklılık gösterdikleri ortaya çıkmaktadır. Düşük linolenik asit içerikli yağın oleik asit miktarı yaklaşık %31.14 ve linolenik asit miktarı yaklaşık %1.14 olarak belirlenmiştir. Oksitlenme kararlılığının yağın YAME bileşiminin modifiye edilmesi ile iyileştirilebileceğini vurgulamışlardır. Bu modifikasyon C18:3 (linolenik) miktarının azaltılması ya da C18:1(oleik) miktarının artırılması ile mümkün olmaktadır. Ticari soyadan elde edilen biyodizelin oksitlenme kararlılığı 1-4 saat aralığında değişirken düşük linolenik içerikli soyadan elde edilen biyodizelin oksitlenme kararlılığı 11 saat

olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak düşük linolenik asit içerikli yağın oksitlenme kararlılığı ve CFPP açısından iyi sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir.

Issariyakul ve Dalai (2012) palm ve hardal yağını kıyaslamış ve %42.2 doymuş yağ asidi (SFA) içeren palm yağının daha kararlı olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ana bileşen olarak %37.8 palmitik asit içerdiği görülmüştür.

Moser (2012), çalışmasında rafine fındık, ceviz ve yüksek oleik içeren yerfıstığı yağı metil esterleri kullanmıştır. Elde edilen metil esterlerin yağ asidi analizleri sonucuna göre; fındık yağının bileşiminin %76.9'lük kısmı tekli doymamış yağ asidi olan oleik asitten meydana gelmektedir. Yerfıstığı ise % 78.2 oleik asit içermektedir. Yerfıstığının yapısında diğerlerinden farklı olarak behenik, araşidik asit gibi çok uzun zincirli (>20 karbon) yağ asitleri de bulunmaktadır. Cevizde baskın olarak bulunan bileşen linoleik asittir (%60.7). Bu üç metil esterinin iyot sayısı incelendiğinde fındık ve yerfıstığının iyot sayısının ceviz düşük olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebi cevizin yapısında diğerlerine kıyasla daha fazla PUFA bulunmasıdır. Aynı zamanda yapıda bulunan PUFA miktarının fazla olmasının oksitlenme kararlılığını olumsuz etkilediğini bildirmişlerdir bu duruma bağlı olarak endüksiyon periyodu en kısa olan 2.9 saat ile ceviz olarak tespit edilmiştir. Bu değer ASTM D6751 standardında 110°C'de minimum 3 saat olarak kabul edilmektedir. Fındığın SFA içeriği en düşük (%7.4) olduğundan soğukta akış özelliklerinin iyi olduğunu bildirmişlerdir. Örneğin; bulutlanma noktası (CP) (-9.3°C), CFPP (-12.7°C) ve akma noktası (PP) (-13.0°C) olarak ölçülmüştür. Cevizin PUFA içeriği en yüksek olmasına rağmen SFA içeriği fındıktan yüksek olduğu için soğukta akış özellikleri fındığa göre olumsuz yönde değişim göstermektedir. Setan sayısı ve yağlayıcılık özellikleri üç yakıt için de standartlara uygun değerlerde okunmuştur. Fındık (%76.9) ve yerfıstığı (%78.2) için temel bileşen oleik asit iken ceviz (%60.7) linoleik asit temel bileşendir. Yerfıstığı içlerinde en iyi oksidatif kararlılığa sahip iken (endüksiyon periyodu 21.1 saattir) soğukta akış özellikleri oldukça zayıftır (CP; 17.8°C, CFPP; 16°C, PP; 15°C) ve bunun sebebinin yapısında yüksek miktarda bulunan çok uzun zincirli yağ asitlerinin olduğunu bildirmişlerdir. Sonuç olarak Fındığın içeriğinde yüksek MUFA ve düşük PUFA, SFA ve uzun zincirli yağ asidi bulunduğundan tüm yakıt özelliklerinin ASTM D6751 ve EN 14214 standartları ile uyum içinde olduğu görülmüştür. Bu sonuçlardan yola çıkılarak yakıtın yağ asidi bileşiminin yakıt özelliklerini etkileyen temel faktör olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

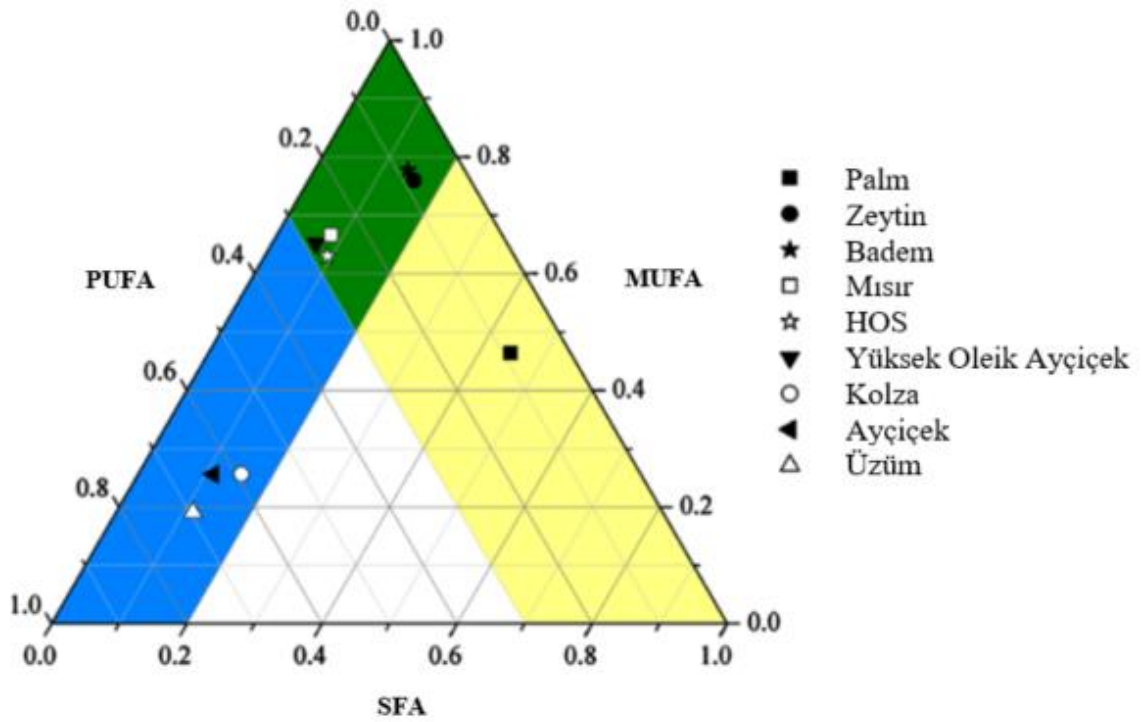
Hoekman ve diğ erleri (2012), 12 yaygın biyodizel hammaddesinin yağ asidi içeriğini incelemişlerdir. İncelenen hammaddeler arasında önemli ölçüde farklılıklar gözlenmiştir. Palm, hindistan cevizi ve iç yağı yüksek oranda doymuş YA içerirken mısır, kolza, aspir, soya ve ayçiçeği yağında doymamış yağ asidi içeriği daha baskındır. Çalışmanın gerçekleştirildiği tarihe kadar alg yağlarının biyodizel üretiminde kullanımı ile alakalı fazla kaynak olmasa da çalışmalarında bu hammaddeye de yer vermişler ve bazı alg türlerinin PUFA içeriğinin bitkisel yağlara oranla ciddi derecede yüksek olduğunu bildirmişlerdir. Biyodizele ait fiziksel ve kimyasal özelliklerde gözlenen farklılıkların büyük ölçüde YA profili ile açıklanabileceğini vurgulamışlardır. Viskozite, özgül ağırlık, setan sayısı, iyot sayısı, düşük sıcaklık performansı gibi özellikler YAME'nin ortalama doymamışlık derecesi ile yakından ilişkilidir. Biyodizel performansının kalitesini belirleyen özelliklerin (soğukta akış ve oksitlenme kararlılığı gibi) uzun zincirli doymuş YAME ve PUFA konsantrasyonlarının düşük olmasına bağlı olduğunu vurgulamışlardır.

Ramirez-Verduzco ve diğ erleri (2012), çalışmalarında yakıtın ısı değ erinin yakıt moleküllerindeki karbon atomlarının sayısı (zincir uzunluğu) ile doğru orantılı olduğunu gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda karbon ve hidrojenin azot ve oksijene olan oranı arttıkça yine ısı değ erin arttığı görülmektedir. Zincir uzunluğ undaki artışın küçük zincirli moleküllerde daha kayda değ er bir etki gösterdiğ ini yani C8'den C14'e kadar olan değ iş ikliklerin C20'den C22'ye kadar olan değ iş ikliklerden daha etkili olduğunu söylemişlerdir. Biyodizelin içeriğ inde aromatik bileş ikler bulunmadığını fakat yapısında bulunan metil esterlerin farklı doymuş luk seviyelerine sahip olduklarını bildirmişlerdir. Dolayısıyla setan sayısı ve viskozitede olduğu gibi biyodizelin ısı değ erinin de çift bağ sayısının artmasıyla azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

Vujicic ve diğ erleri (2010) ise %63.3 çoklu doymamış yağ asidi (PUFA) içeren ayçiçeği biyodizel örneğ inin soğ ukta akış özelliklerinin iyi olduğunu vurgulamışlardır. Serbest yağ asidi (FFA) içeriğ inin yüksek olduğu biyodizel örneğ lerinde alkali reaktantların sabunlaşmaya sebep olarak dönüşüm verimini düşürdüklerini bildirmişlerdir.

Ramos ve diğ erleri (2009), hammadde bileş iminin transesterifikasyon metodu ile ürettikleri biyodizelin kalitesine etkisini incelemişlerdir. 10 çeş it rafine bitkisel yağ ile sodyum metoksit katalizör ortamında ve standart reaksiyon koş ullarında (reaksiyon sıcaklığı 60°C ve reaksiyon süresi 1 saat, katalizör miktarı yağın başlangıç kütleğ inin %1'i kadar, metanol/yağ molar oranı 6:1) üretim gerçekleştirilmiştir.

Oksidasyon kararlılığı, setan sayısı, iyot değeri ve soğuk filtre tıkanma noktası gibi bazı kritik parametrelerin metil ester bileşimine bağlı olduğunu, metil esterlerin doymamışlık derecesi ve bileşenlerin zincir uzunluğunun incelenmesi gereken kriterler olduğunu bildirmişlerdir. Bu çalışmada MUFA, PUFA ve SFA metil esterlerini temel alan üçgen bir grafikten yararlanılmıştır. Burada amaç Avrupa standardına uygun, bileşimi bilinen biyodizellerin özellikleri ile grafik (Şekil 2.1) üzerinde belirli alanlar oluşturmak ve çalışma kapsamında üretilen biyodizellerin bileşimi ile kritik parametrelerini tahmin etmektir. Yağ asidinin türüne bağlı olarak doymuşluk ve doymamışlık derecesi belirlenmiştir.



Şekil 2.1. EN 14214 standartlarına göre hazırlanmış YAME diyagramı (Ramos vd., 2009)

Grafikte PUFA noktasının uzağında yer alan sarı bölge setan sayısı ve iyot sayısının iyi kabul edildiği değerleri temsil etmektedir. Bu alanda yer alan palm, zeytin, kolza, yüksek oleik içeren ayçiçeği, mısır ve badem yağlarının PUFA içeriği düşük, SFA içeriği yüksektir. Grafikten görüldüğü üzere tüm bu biyodizel örneklerinin SFA içeriği kütlice %50'den yüksektir. SFA noktasının uzağında yer alan mavi bölge ise CFPP iyi değerlerde kabul edildiği alanı temsil etmektedir. Bu alanda SFA konsantrasyonu düşük olan ürünler yer almaktadır. Palm yağı haricindeki tüm biyodizel örneklerinin bu alanda yer aldığı görülmektedir. Fıstık yağı CFPP sınırlamalarına uymamaktadır çünkü yapısında üçgen grafikte yer verilemeyen uzun karbon

Kullandıkları yağların oleik, linoleik ve linolenik asit içeriklerinin yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Bunun yanı sıra palmitik asidin yağ içerisinde %10 oranında bulunmasının bile setan sayısını ciddi anlamda yükseltici etki ettiği yorumunu yapmışlardır. Buna sebep olarak ise saf oleik, linoleik ve linolenik asitlerin setan sayılarının sırasıyla 57.2, 36.8 ve 21.6 değerlerine karşılık palmitik asidin setan sayısının 74.2 olarak ölçülmesi gösterilmektedir. Bahsi geçen yağlar için ölçülen ortalama setan sayısı 53.9 iken tahmin edilen değer 48'dir. İncelenen yağlara ait YAME ortalama setan sayılarının 36.8 ve 57.7 aralığında olması ve hatta linoleik asit içeriğinin oldukça yüksek olmasından dolayı 36.8'e yakın olması beklenmektedir. Fakat bu değer 48 olarak hesaplanması ve 57.7 değerine daha yakın bir değer olması üzerine (setan sayıları sırasıyla 76.4 ve 76.3 olan) %6 palmitik asit ve % 4 stearik asidin setan sayısını yükseltici etkisi olduğu yorumu yapılmıştır.

Canakci ve Sanli (2008), çalışmalarında farklı kaynaklardan biyodizel üretimi ve bu kaynakların yakıt özelliklerine etkisi üzerine araştırma yapmışlardır. Biyodizelin ticari boyutta yaygınlaşabilmesi için maliyetinin kullanılacak hammadde ile düşürülebileceğini vurgulamışlardır. Bu çerçevede hammadde kaynakları olarak yemeklik atık yağ, restoran atıkları ve hayvansal atık yağlar gibi alternatiflerin kullanılması ile maliyetin düşürülebileceğinin altını çizmişlerdir. Yakıt özelliklerini ayrı başlıklarda inceleyerek hammaddenin doymuşluk derecesine göre bu özellikleri nasıl etkilediğini yorumlamışlardır. Çalışmanın sonucunda yüksek kaliteli bitkisel yağlar ile çalışmada kullanılan ucuz ve atık yağlar kıyaslandığında bunların da hammadde olarak kullanılabilmesi fakat serbest yağ asidi içeriklerinin yüksek olması sebebiyle ön işlem den geçmeleri gerektiği vurgulanmıştır. Özellikle hayvansal yağlardan elde edilen yakıtların soğukta akış özelliklerinin kabul edilemeyecek derecede kötü olduğu görülmüştür. Örneğin dizel yakıtı için bulutlanma noktası -18°C iken don yağı metil esterinde bu değer 12°C olarak kaydedilmiştir. Buna sebep olarak doymuş yağ asidi konsantrasyonunun yaklaşık %50 olması öne sürülmektedir. Soğukta akış özelliklerinin iyileştirilebilmesi için transesterifikasyon reaksiyonunda dallanmış yapıda alkol kullanılabilmesi fakat bu tür alkollerin de ekonomik olmaması, yıkama esnasında metanole oranla daha fazla su absorplaması, aktifliklerinin düşük olması sebebiyle safsızlıklara sebep olması gibi dezavantajlarının olduğunun da altını çizmişlerdir.

Knothe ve Steidley (2008), yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla yağ asidi esterlerinin bileşiminin optimize edilmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Diğer çalışmalarla benzer şekilde yağ asidi profilinin yakıt özelliklerini etkileyen temel

sebeplerden olduğunu vurgulamaktadırlar. Oksitlenme kararlılığı, soğukta akış ve NO_x emisyonlarındaki artış gibi teknik problemlerin yağ asidi kompozisyonunun değiştirilmesi ile iyileştirilebileceğini savunmaktadırlar. Çalışmada biyodizelin çeşitli potansiyel ana bileşenlerinin özellikleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Örneğin, metil oleatın ana bileşen olmasına rağmen metil palmitoleatın özellikle düşük sıcaklık özelliklerine göre metil oleata kıyasla avantajlara sahip olduğu görülmüştür. C₈-C₁₀ gibi kısa zincirli doymuş esterler arasında yapılan kıyaslama sonucunda da C₁₀ esterinin daha uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Aynı zamanda, istenen özelliklere sahip olan biyodizel yakıtı elde etmek için, yakıtın mümkün olduğu kadar yüksek konsantrasyonda yalnızca bir ana bileşenden oluşmasının avantajlı olduğu, ancak avantajlı özelliklere sahip bileşen karışımlarının da kabul edilebilir olduğu bildirilmiştir.

Geller ve Goodrum (2004), yaptıkları çalışmada stearik ve palmitik asit gibi doymuş yağ asitlerinin setan sayısı üzerinde olumlu etkisinin olduğunu fakat linoleik, linolenik ve oleik gibi doymamış yağ asitlerinin setan sayısı üzerinde olumsuz etkisinin olduğunu bildirmişlerdir. Bu çalışmada da bahsi geçen sonuçlarla uyumlu olarak stearik asit ve miristik asit içeriğinin sırasıyla %51.95 ve %44.95'ten daha yüksek olduğu durumlarda setan sayısı üzerinde olumlu etki yaptığı ve diğer YAME asit yüzdelerinin bu sonucu değiştirmediğini tespit etmişlerdir. Ayrıca Linolenik asit miktarının %68.4 değerinden yüksek olduğu durumlarda setan sayısı üzerinde negatif etki gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Çalışmanın Literatüre Katkısı

Bu doktora tezinde öncelikle biyodizel yakıt özelliklerinin ölçülebilmesi amacıyla biyodizel üretimi gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucu standartlara uygunluğu teyit edilen biyodizellerin hammaddelerinde yağ asidi kompozisyonunun belirlenmesi amacıyla kromatografi analizleri gerçekleştirilmiştir. Son olarak tezin amacını yerine getirmek üzere yakıt özellikleri ile yağ asidi kompozisyonu arasındaki ilişkiyi verecek olan matematiksel modeller geliştirilmiştir. Çalışmanın literatüre katkısı ve özgün yanı özetlenecek olursa;

- Çalışma biyodizel üretimi, yağ asidi kompozisyonunun belirlenmesi ve yağ asidi profili ile yakıt özellikleri arasındaki ilişkinin tanımlanması amacıyla matematiksel model geliştirilmesi şeklinde üç bölümden meydana gelmektedir ve oldukça kapsamlı bir çalışmadır.
- Makine öğrenmesi yönteminin biyodizel uygulamalarında henüz yaygın kullanılan bir yöntem olmaması çalışmanın yenilikçi yönünü ortaya

koymaktadır. Literatürde bu çalışmaya benzer tek bir örneğe rastlanmış ve bahsi geçen çalışmadan farklı olarak doğrulamada kullanılan veriler bizzat deneysel çalışmalardan elde edilmiştir.

- Literatürden elde edilen verilerle geliştirilen modelin çalışma kapsamında yapılan deneysel değerlerle doğrulanması çalışmanın özgünlüğünü göstermektedir.
- Makine öğrenmesi verilerden öğrenmeye dayalı bir yöntem olduğundan modellemede kullanılan veri setinin niteliği de oldukça önemlidir. Bu çerçevede tahmin yöntemleri kullanılmadan önce düzensiz veriye bağlı yanlış öğrenmenin önüne geçilebilmesi amacıyla öznitelik seçimi analizi yapılmış ve modele uygun, nitelikli bir veri alt kümesi oluşturulmuştur. Bu yönüyle de tezin modelleme adımı oldukça kapsamlı bir hale getirilmiştir.
- Literatürde yer alan benzer çalışmalarda öznitelik analizine rastlanmamıştır. Bu çalışmada ilk olması da çalışmanın özgün yanlarından biridir.

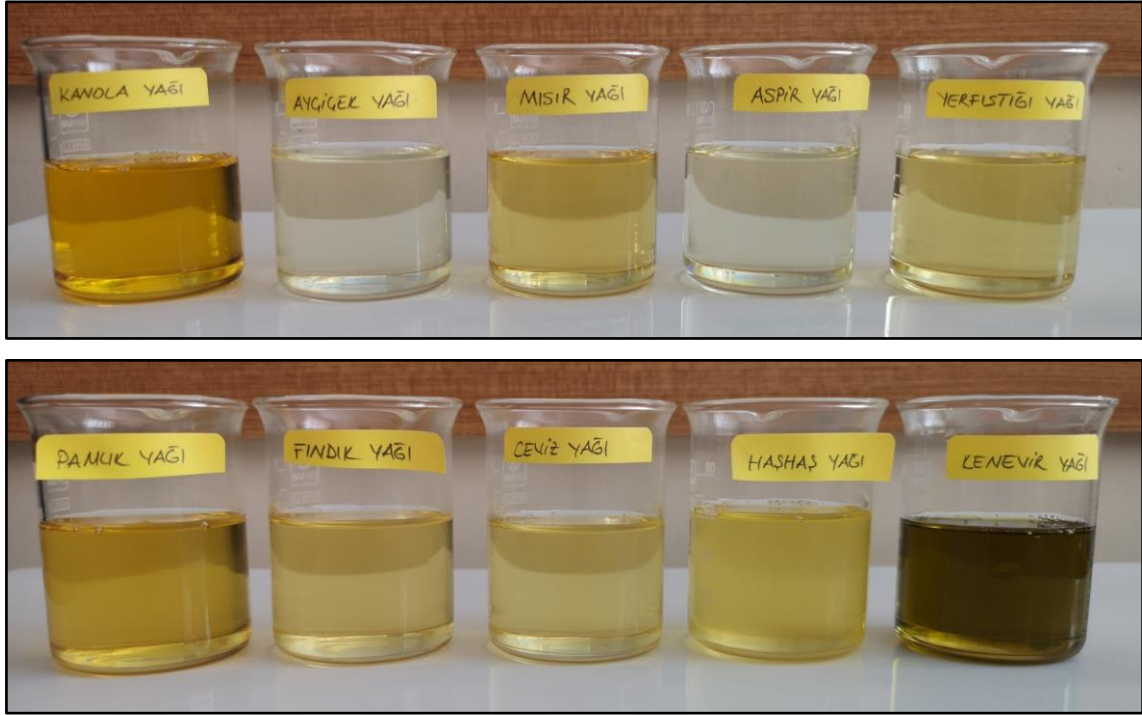
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışması kapsamında biyodizel üretiminde, yağ asidi analizinde ve yakıtın fizikokimyasal özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan materyal ve ekipmanlar alt başlıklarda verilmektedir.

Biyodizel üretimi için transesterifikasyon yöntemi kullanılmış olup üretim basamakları “Biyodizel üretimi” başlığı altında detaylı verilecektir. Üretilen biyodizellere ait özellikler yakıt analizi laboratuvarında ilgili cihazlar ile ölçülmüş olup detaylar “Yakıt analizleri” başlığı altında verilecektir. Yağ asidi kompozisyonunun belirlenmesi amacıyla yapılan gaz kromatografisi analizleri de “Yağ asidi analizleri” başlığı altında detaylı verilecektir. Yağ asidi ve yakıt özellikleri arasındaki ilişkinin belirlenmesi amacıyla makine öğrenmesi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin verilerden öğrenmeye dayalı olması sebebiyle öncelikli olarak veri setinin düzenlenmesi amacıyla Öznitelik Seçimi Yöntemleri (Filtre yöntemleri (Korelasyon, Pearson korelasyon katsayısı, Karşılıklı bilgi) ve Sarmalayıcı yöntemler (Sıralı ileri yönde seçim, Sıralı geri yönde seçim, Özyinelemeli özellik eleme)) kullanılmıştır. Bu yöntemler yardımıyla modellemeye uygun veri seti elde edildikten sonra Regresyon algoritmaları (Doğrusal regresyon, Kısmi en küçük kareler regresyonu, Ridge regresyon, Destek vektör regresyonu, Rassal orman ve Ekstrem gradyan yükseltme (XGB)) kullanılmıştır. Bu yöntemlerin başarı oranının belirlenmesi amacıyla R^2 ve Kök ortalama kare hatası (RMSE) performans ölçütleri kullanılmıştır. Makine öğrenmesi yöntemine ait detaylar “Yağ asitlerinin setan sayısına etkisinin makine öğrenmesi ile analizi” başlığı altında detaylı verilecektir.

3.1. Kullanılan Kimyasallar ve Ekipmanlar

Bu çalışmada biyodizel üretiminde kullanılan yağlar ticari amaçla üretim yapan firmalardan temin edilmiştir. Çalışma konusu yağ asitleri ile yakıt özellikleri arasındaki ilişkinin incelenmesi olduğundan bu etkinin gözlenebilmesi amacıyla farklı doyma derecelerine sahip yağlar seçilmiştir. Üretimde kullanılan yağlar Şekil 3.1’de verilmektedir.



Şekil 3.1. Biyodizel üretiminde kullanılan bitkisel yağlar

Çalışma kapsamında biyodizel üretiminde ve yağ asit kompozisyonu analizlerinde kullanılan kimyasal sarf malzemeler Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Biyodizel üretiminde ve yağ asidi kompozisyonu analizinde kullanılan materyaller

Madde	Kimyasal Formül/Simge	Marka	Safılık/Özellik	Kullanım Amacı
Metanol	CH ₃ OH	J.T.Baker	HPLC Gradient Grade	Metoksite Hazırlama
Metanol	CH ₃ OH	Sigma-Aldrich	%99.8 GC	Numune Türevlendirme
Sodyum Hidroksit	NaOH	ISOLAB	≥%99.0	Katalizör
Potasyum Hidroksit	KOH	Sigma-Aldrich	% 98.0 Pellets	Numune Türevlendirme
n-Hekzan	C ₆ H ₁₄	Sigma-Aldrich	≥ %97.0	Numune Türevlendirme
FAME Mix.	C4-C24	Sigma-Aldrich	sertifikalı referans malzeme	Kalitatif Tanımlama

Çalışma kapsamında biyodizel üretimi ve üretilen biyodizel yakıtların analizleri için kullanılan cihazlar Tablo 3.2’de özetlenmektedir. Ayrıca cihazlara ait genel bilgiler alt başlıklarda verilecektir.

Tablo 3.2. Biyodizel üretimi ve yakıt analizinde kullanılan ekipmanlar

Cihaz	Marka/ Model
Karıştırıcılı ısıtıcı	Mtops hsd150-03p
Yoğunluk ölçüm cihazı	Kem Kyoto DA-130N
Kinematik viskozite ölçüm cihazı	Koehler K 23377
Setan sayısı tayin cihazı	Shatox SX
Kalorimetre	IKA C 200
Bulutlanma ve akma noktası ölçüm cihazı	Polyscience
Soğuk filtre tıkanma noktası ölçüm cihazı	Tanaka AFP-102
Parlama noktası tayin cihazı	Koehler K16270
Bakır şerit korozyon test cihazı	Koehler K 25330
Su içeriği ölçüm cihazı	Kem Kyoto MKC-501
Renk ölçüm cihazı	Lovibond PFX 195

Biyodizel üretiminde kullanılan on farklı yağ numunesinin nitelik ve nicelik bakımından analizi için *Agilent 7890 Series A-GC / 5975 C-MSD* marka gaz kromatografi- alev iyonlaşmalı dedektör (GC-FID) sistemi kullanılmıştır. Gaz kromatografisi analizlerinde kullanılan *HP-88 kapiler kolon* (100m x 0.25m x 0.20µm, (%88 Cyanopropyl)aryl-polysiloxane) yüksek polar özelliğindedir.

3.2. Biyodizel Üretimi

Bu bölümde çalışma kapsamında üretimi gerçekleştirilen on farklı biyodizel ait üretim basamakları fotoğraflarla desteklenerek özetlenmektedir. Üretim sürecinde reaksiyon gerçekleştikten sonra gliserinin üründen ayrılması, yıkama ve suyun uzaklaştırılması gibi basamakların varlığı sebebiyle her bir aşamanın fotoğraflanması farklı zamanlarda gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla işlem basamaklarını özetleyen bu fotoğraflarda fotoğrafın çekildiği zamana, ortamın ışığına ve çekim açısına bağlı farklılıklar söz konusu olabilir. Üretimi gerçekleştirilen ve yakıt analizleri için hazırlanan on farklı biyodizel örneği Şekil 3.2’de görüldüğü gibidir.

**Şekil 3.2.** Üretimi gerçekleştirilen on farklı biyodizel

3.2.1. Aspir yağından biyodizel üretimi

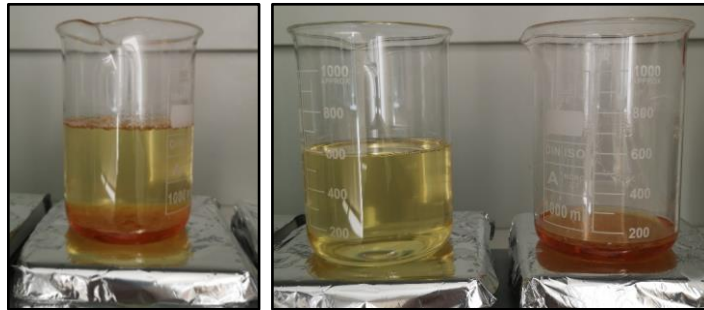
Çalışmada kullanılan yağlardan biri olan aspir yağı (Şekil 3.3) ile gerçekleştirilen biyodizel üretimi basamakları bu bölümde özetlenmektedir.



Şekil 3.3. Aspir yağına alkol ve katalizör ilave edilmesi ve reaksiyonun başlangıcı

Öncelikle alkol (metanol) ve katalizör (NaOH) uygun oranlarda karıştırılarak (tam çözünme olması için ısı verilir) sodyum metoksit çözeltisi elde edilir. Reaksiyon stokiyometrisine uygun oranda hammadde (aspir yağı) 50°C'ye kadar karıştırılarak ısıtılır. Yağ, 50-55°C aralığında bir sıcaklık değerine ulaştığında sodyum metoksit ile birleştirilir. Karışımın eklenmesi ile yağın sıcaklığı düşmektedir. Reaksiyonun düzgün ilerleyebilmesi için sıcaklık değerinin tekrar 50-55°C aralığında bir değere ulaşip reaksiyon boyunca bu aralıktan sapmaması için sürekli kontrol edilmesi gerekmektedir.

Bir saat boyunca uygun sıcaklık değeri kontrol edilerek ve sürekli karıştırılarak reaksiyon tamamlanmıştır. Reaksiyon sonrası en az 8 saat dinlendirildikten sonra gliserol dibe çöker ve gliserolü ana üründen ayırma işlemi gerçekleştirilir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Reaksiyon sonrası gliserinin ayrılması

Şekil 3.5’de aspir yağından biyodizel üretimine ait işlemlerimizin son basamağı olan yıkama işlemi ve sonrasında elde ettiğimiz saf biyodizele ait görseller verilmektedir. Dinlendirilen ve diğer yan ürünlerden ayrılan ürünün üzerine saf su püskürtülerek yıkanması, sonrasında en az 8 saat dinlendirilerek suyun yoğunluk farkından dolayı çöktürülmesi ve suyun tamamen ayrılmamış olması ihtimaline karşı yağın 110°C’ye karıştırılarak ısıtılması ve son olarak aspir biyodizelinin elde edilmesi ile üretim tamamlanmaktadır (Şekil 3.6).



Şekil 3.5. Yıkama işlemi ve suyun uzaklaştırılması



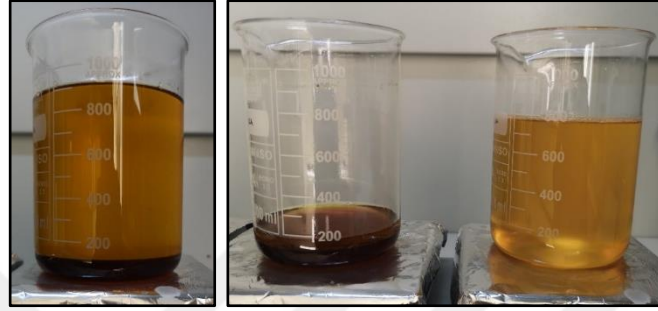
Şekil 3.6. Aspir yağından elde edilen biyodizel

3.2.2. Kanola yağından biyodizel üretimi

Kanola yağı ile gerçekleştirilen biyodizel üretimi basamakları bu bölümde özetlenmektedir. Reaksiyonun başlangıcı (Şekil 3.7-a), reaksiyon sonunda ana ürünün gliserolden ayrılması (Şekil 3.7-b), yıkama ve suyun uzaklaştırılması (Şekil 3.7-c), ve son olarak kanola yağından elde edilen biyodizel (Şekil 3.7-d).



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.7. Kanola yağından biyodizel üretim basamakları Ayçiçek yağından biyodizel üretim basamakları
 (a) reaksiyon başlangıcı (b) gliserinin ayrılması (c) yıkama ve suyun uzaklaştırılması (d) biyodizel

3.2.3. Ayçiçek yağından biyodizel üretimi

Ayçiçek yağı ile gerçekleştirilen biyodizel üretimi basamakları bu bölümde özetlenmektedir. Reaksiyonun başlangıcı (Şekil 3.8-a), reaksiyon sonunda ana ürünün gliserolden ayrılması (Şekil 3.8-b), yıkama ve suyun uzaklaştırılması (Şekil 3.8-c), ve son olarak kanola yağından elde edilen biyodizel (Şekil 3.8-d).



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.8. Ayçiçek yağından biyodizel üretim basamakları (a) reaksiyon başlangıcı (b) gliserinin ayrılması (c) yıkama ve suyun uzaklaştırılması (d) biyodizel

3.2.4. Mısır yağından biyodizel üretimi

Mısır yağı ile gerçekleştirilen biyodizel üretimi basamakları bu bölümde özetlenmektedir. Reaksiyonun başlangıcı (Şekil 3.9-a) reaksiyon sonunda ana ürünün gliserolden ayrılması (Şekil 3.9-b), yıkama ve suyun uzaklaştırılması (Şekil 3.9-c), ve son olarak kanola yağından elde edilen biyodizel (Şekil 3.9-d).



(a)



(b)



(c)

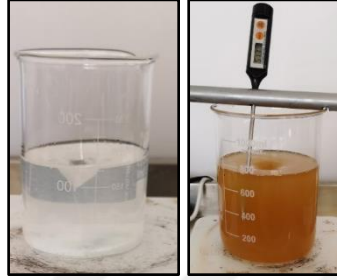


(d)

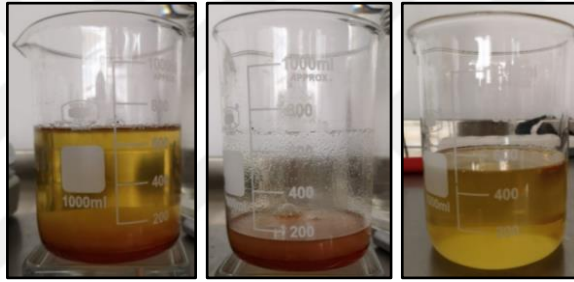
Şekil 3.9. Mısır yağında biyodizel üretim basamakları (a) reaksiyon başlangıcı (b) gliserinin ayrılması (c) yıkama ve suyun uzaklaştırılması (d) biyodizel

3.2.5. Yerfıstığı yağından biyodizel üretimi

Yerfıstığı yağı ile gerçekleştirilen biyodizel üretimi basamakları bu bölümde özetlenmektedir. Reaksiyonun başlangıcı (Şekil 3.10-a), reaksiyon sonunda ana ürünün gliserolden ayrılması (Şekil 3.10-b), yıkama ve suyun uzaklaştırılması (Şekil 3.10-c), ve son olarak kanola yağından elde edilen biyodizel (Şekil 3.10-d).



(a)



(b)



(c)



(d)

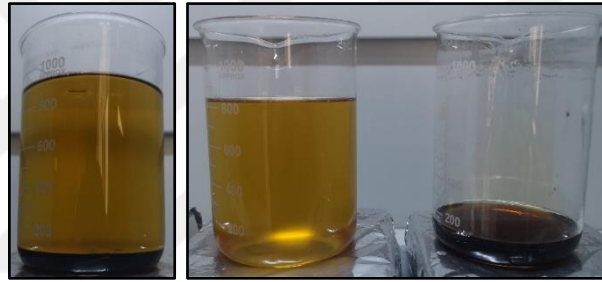
Şekil 3.10. Yerfıstığı yağından biyodizel üretim basamakları (a) reaksiyon başlangıcı (b) gliserinin ayrılması (c) yıkama ve suyun uzaklaştırılması (d) biyodizel

3.2.6. Pamuk yağından biyodizel üretimi

Pamuk yağı ile gerçekleştirilen biyodizel üretimi basamakları bu bölümde özetlenmektedir. Reaksiyonun başlangıcı (Şekil 3.11-a), reaksiyon sonunda ana ürünün gliserolden ayrılması (Şekil 3.11-b), yıkama ve suyun uzaklaştırılması (Şekil 3.11-c), ve son olarak kanola yağından elde edilen biyodizel (Şekil 3.11-d).



(a)



(b)



(c)

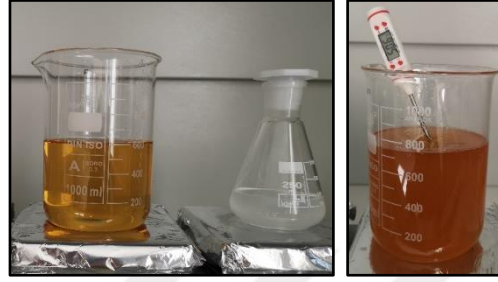


(d)

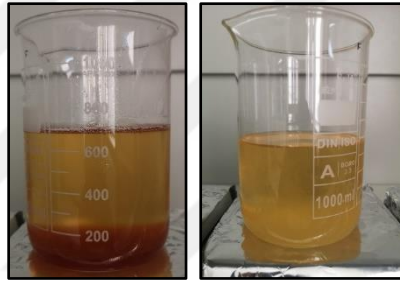
Şekil 3.11. Pamuk yağında biyodizel üretim basamakları (a) reaksiyon başlangıcı (b) gliserinin ayrılması (c) yıkama ve suyun uzaklaştırılması (d) biyodizel

3.2.7. Fındık yağından biyodizel üretimi

Fındık yağı ile gerçekleştirilen biyodizel üretimi basamakları bu bölümde özetlenmektedir. Reaksiyonun başlangıcı (Şekil 3.12-a), reaksiyon sonunda ana ürünün gliserolden ayrılması (Şekil 3.12-b), yıkama ve suyun uzaklaştırılması (Şekil 3.12-c), ve son olarak kanola yağından elde edilen biyodizel (Şekil 3.12-d).



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.12. Fındık yağından biyodizel üretim basamakları (a) reaksiyon başlangıcı (b) gliserinin ayrılması (c) yıkama ve suyun uzaklaştırılması (d) biyodizel

3.2.8. Ceviz yağından biyodizel üretimi

Ceviz yağı ile gerçekleştirilen biyodizel üretimi basamakları bu bölümde özetlenmektedir. Reaksiyonun başlangıcı (Şekil 3.13-a), reaksiyon sonunda ana ürünün gliserolden ayrılması (Şekil 3.13-b) yıkama ve suyun uzaklaştırılması (Şekil 3.13-c), ve son olarak kanola yağında elde edilen biyodizel (Şekil 3.13-d).



(a)



(b)



(c)



(d)

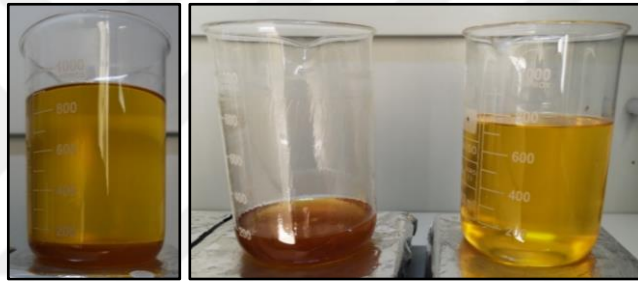
Şekil 3.13. Ceviz yağında biyodizel üretim basamakları (a) reaksiyon başlangıcı (b) gliserinin ayrılması (c) yıkama ve suyun uzaklaştırılması (d) biyodizel

3.2.9. Haşhaş yağından biyodizel üretimi

Haşhaş yağı ile gerçekleştirilen biyodizel üretimi basamakları bu bölümde özetlenmektedir. Reaksiyonun başlangıcı (Şekil 3.14-a), reaksiyon sonunda ana ürünün gliserolden ayrılması (Şekil 3.14-b), yıkama ve suyun uzaklaştırılması (Şekil 3.14-c), ve son olarak kanola yağından elde edilen biyodizel (Şekil 3.14-d).



(a)



(b)



(c)

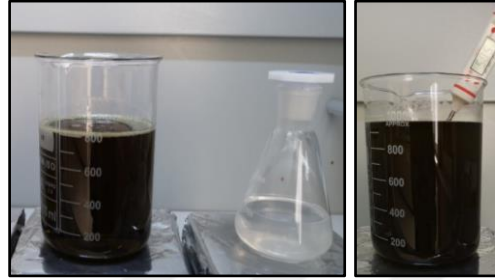


(d)

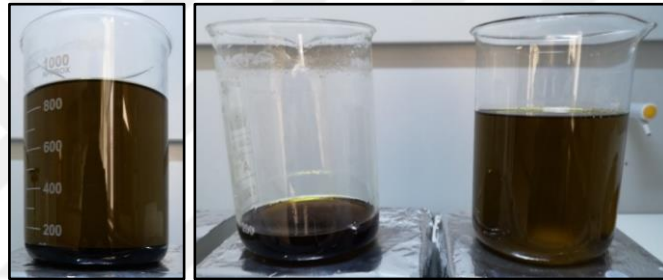
Şekil 3.14. Haşhaş yağından biyodizel üretim basamakları (a) reaksiyon başlangıcı (b) gliserinin ayrılması (c) yıkama ve suyun uzaklaştırılması (d) biyodizel

3.2.10. Kenevir yağından biyodizel üretimi

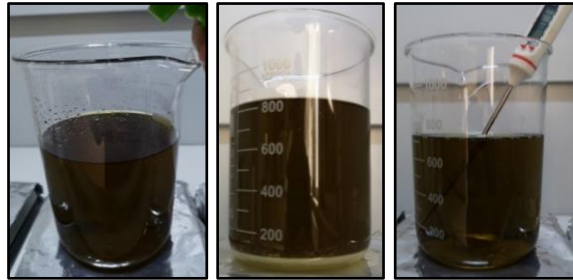
Kenevir yağı ile gerçekleştirilen biyodizel üretimi basamakları bu bölümde özetlenmektedir. Reaksiyonun başlangıcı (Şekil 3.15-a), reaksiyon sonunda ana ürünün gliserolden ayrılması (Şekil 3.15-b), yıkama ve suyun uzaklaştırılması (Şekil 3.15-c), ve son olarak kanola yağından elde edilen biyodizel (Şekil 3.15-d).



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.15. Kenevir yağından biyodizel üretim basamakları (a) reaksiyon başlangıcı (b) gliserinin ayrılması (c) yıkama ve suyun uzaklaştırılması (d) biyodizel

3.3. Yakıt Analizleri

On farklı bitkisel yağdan üretilen biyodizel yakıtların standartlara uygunluğu Selçuk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümünde yer alan, DPT 2004/7 nolu proje desteği (Öğüt vd., 2004) ile kurulan yakıt analiz laboratuvarındaki ölçüm cihazları kullanılarak analiz edilmiştir. Biyodizele ait yakıt özellikleri giriş bölümünde özetlenmiştir. Bu bölümde bahsi geçen yakıt özelliklerini belirlemede kullanılan cihazlar ve ölçüm yöntemleri ile alakalı bilgilere yer verilecektir.

3.3.1. Yoğunluk ölçümü

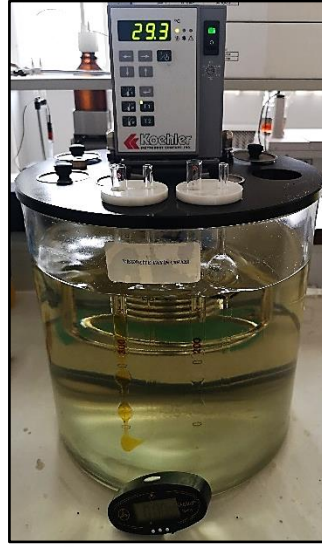
Çalışma kapsamında hammadde olarak kullanılan bitkisel yağların ve bu yağlardan üretilen biyodizel yakıtların yoğunlukları ayrı ayrı ölçülmüştür. Ölçümde kullanılan cihaz Şekil 3.16'da görülmektedir. Temiz bir kap içerisine alınan numune cihazın ucundaki ince boru vasıtasıyla çekilerek 15°C'deki yoğunluğu g/cm^3 biriminde kaydedilir. Cihazın ölçüm sıcaklık aralığı 0-40 °C olup, ölçüm aralığı 0.0000-2.0000 g/cm^3 'tür. Ölçümün doğruluğu açısından en az üç tekrar yapılması faydalı olacaktır. Her bir numunenin ölçümünden önce cihaz ölçülecek olan numune ile temizlenmelidir.



Şekil 3.16. Yoğunluk ölçüm cihazı

3.3.2. Kinematik viskozite ölçümü

Bitkisel yağların ve bu yağlardan üretilen tüm yakıtların kinematik viskozite değerlerinin belirlenmesi amacıyla kullanılan cihaz Şekil 3.17'de görülmektedir. Cihaz minimum ortam sıcaklığı maksimum 150°C sıcaklığa sahip numunelerin ölçümünde kullanılabilir. 0.01°C hassasiyetle ölçüm yapmak mümkündür.



Şekil 3.17. Kinematik viskozite ölçüm cihazı

Biyodizel kinematik viskozitesinin ölçülmesi için jel banyo 40°C sıcaklığa ayarlanır. Banyoya daldırılan kılcal tüp içerisine ölçüm yapılması planlanan numune doldurulur ve basınç farkından dolayı hareket eden sıvının belirli iki nokta arasında katettiği süre kaydedilir. Ölçümde farklı çaplarda kapiler tüpler kullanılabilir. Kullanılan tüpün çeşidine göre belirlenen katsayılar ile ölçülen süre dönüştürülerek viskozite değeri belirlenir.

3.3.3. Setan sayısı ölçümü

Üretimi gerçekleştirilen biyodizel yakıtların setan sayısının ölçülmesi amacıyla kullanılan cihaz Şekil 3.18’de görülmektedir. ASTM D613 ve EN ISO 5165 standartlarına uygun ölçüm yapmayı sağlamaktadır.

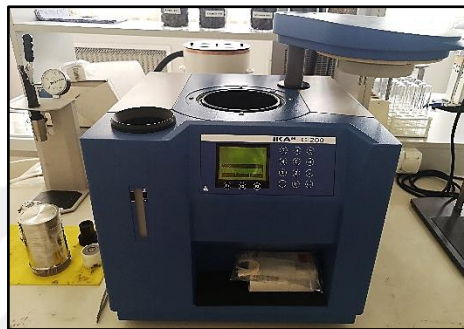


Şekil 3.18. Setan sayısı ölçüm cihazı

Cihaza bağlı ölçüm kabına belirlenen miktarda yakıt doldurulur ve yakıtın içeriğindeki setan bileşiklerinin ölçümü sağlanır. Setan sayısı sensörler aracılığı ile ölçülmektedir. Ölçümden sonra katsayı ile çarpılarak setan sayısı hesaplanır.

3.3.4. Kalori değeri ölçümü

Üretimi gerçekleştirilen biyodizel yakıtların kalori (ısı) değerlerinin belirlenmesi amacıyla kullanılan cihaz Şekil 3.19'da görülmektedir. Cihaz maksimum 40.000 Joule (J) değerine kadar ölçüm yapabilmektedir.



Şekil 3.19. Kalori değeri ölçüm cihazı

Belirli bir miktar yakıt kalori bombasına enjekte edilir, tutuşma ve yanmanın gerçekleşmesi için uygun şartlar hazırlanır. Bomba içerisine oksijen gazı doldurulur ve 2 elektrot vasıtasıyla yakma işlemi gerçekleştirilir. Yanma sonucu banyoya aktarılan ısı değerinden birim miktar yakıtın yanması sonucu açığa çıkan enerji değeri hesaplanır.

3.3.5. Bulutlanma ve akma noktası ölçümü

Üretimi gerçekleştirilen biyodizel yakıtların bulutlanma ve akma noktalarının belirlenmesi amacıyla kullanılan cihaz Şekil 3.20'de görülmektedir. Cihaz ASTM D97 standardına uyumlu sonuçlar vermektedir.



Şekil 3.20. Bulutlanma ve akma noktaları ölçüm cihazı

Cihaza yerleştirilen numuneler soğutma ünitesi yardımıyla soğutulur ve yakıtın fiziksel yapısında meydana gelen bulutlanma ve akıcılığını yitirme anındaki sıcaklık değerleri kaydedilir.

3.3.6. Soğuk filtre tıkanma noktası ölçümü

Yakıtların soğuk filtre tıkanma noktasının tayininde kullanılan cihaz Şekil 3.21’de görülmektedir. Soğutma ünitesi -60°C sıcaklık değerine kadar soğutma yapabilmektedir. Ölçüm değerleri ASTM D-6371 standardı ile uyumludur. Soğuk hava koşullarında yakıtın akış karakteristiğinin belirlenmesinde önemli bir cihazdır. Numuneler cihaza ait ölçüm kabına belirli seviyeye kadar doldurulur ve ölçüm probu numune içine daldırılır. Sistem vakuma 2kPa vakum basınç altında vakuma alınır ve numune probun üst kısmında yer alan sensörün hizasına kadar çekilip geri gönderilir. Bir yandan numune soğutulurken bu işlem cihaz tarafından tekrarlanır. Yakıtın sıcaklığı düştükçe çekme ve bırakma süresinin de uzadığı görülür. En son filtre tıkanığında cihaz uyarı verir ve bu noktada ölçülen sıcaklık değeri yakıtın soğuk filtre tıkanma noktası olarak kaydedilir.



Şekil 3.21. Soğuk filtre tıkanma noktası ölçüm cihazı

3.3.7. Parlama noktası ölçümü

Yakıtın güvenlik seviyesini belirlemede önem arz eden parlama noktası ölçüm cihazı Şekil 3.22’de görülmektedir. Ölçümü yapılacak yakıt numune kabına doldurulur ve cihaza bağlanan gaz kaynağı ile ısıtma işlemi gerçekleştirilir. Termometre vasıtasıyla devamlı sıcaklık ölçümü sağlanmalıdır. Numune kabına belirli aralıklarla daldırılan alev bir noktada hafifçe parlayacak veya kısa süreli sönecektir. Bu noktada ölçülen sıcaklık değeri yakıtın parlama noktası olarak kaydedilmektedir. Ölçüm oldukça hassastır ve ölçümü yapan kişinin dikkatine bağlıdır. Değer tespit edilemediğinde numune soğutularak yeniden ölçüm yapılmalıdır. Bu cihaz ile ölçülen değerler ASTM D93, ISO 2719 ve DIN 51758 standartları ile uyumludur.



Şekil 3.22. Parlama noktası ölçüm cihazı

3.3.8. Bakır şerit korozyon testi

Yakıtın bakır aksam üzerindeki korozif etkisinin belirlenmesi amacıyla uygulanan bir yöntemdir. Bu amaçla kullanılan test cihazı Şekil 3.23’de görülmektedir. Cihazın ölçüm yapabileceği maksimum sıcaklık değeri 190°C’dir. Test edilmek istenen numuneler uygun numune tüplerine doldurulur ve her bir numune içerisine Şekil 3.23’de görülen bakır çubuk daldırılmaktadır. 50°C sıcaklıktaki banyo içerisinde 3 saat bekletilen numunelerin bakır çubuk üzerinde yaptığı değişim cihaza ait test kartelası ile kontrol edilerek korozyon derecesi belirlenir. Cihaz ile elde edilen sonuçlar ASTM D130, DIN 51759 ve ISO 2160 standartları ile uyumludur.



Şekil 3.23. Bakır çubuk korozyon test cihazı

3.3.9. Su içeriği ölçüm cihazı

Karl-Fischer titrasyon yöntemine göre yakıt içerisindeki su miktarı tayin edilmektedir. Yakıt numunesinde bulunan eser miktardaki su ile cihazda bulunan Karl-Fischer reaktifleri arasındaki reaksiyona bağlı ölçüm gerçekleştirilmektedir. Şırınga aracılığıyla alınan yakıt numunesi hassas terazide tartılır daha sonra numune cihazın titrasyon kabına boşaltıldıktan sonra tekrar tartılır. Burada amaç reaksiyona giren numunenin tam miktarını belirlemektir. Reaksiyon tamamlandığında cihazın ekranından okunan değer yakıt içerisindeki su miktarını vermektedir. ASTM D2709 ve ISO 3987 standartlarına uyumlu ölçüm yapan cihaz Şekil 3.24’de görülmektedir



Şekil 3.24. Su içeriği ölçüm cihazı

3.3.10. Renk testi

Spektrofotometrik kalorimetre cihazı RCMSI (internet üzerinden uzaktan kalibrasyon ve bakım servisi) teknolojisiyle çalışmaktadır. Petrol, yenilebilir yağlar gibi sektörler için belirlenmiş renk skalası ile ölçüm yapmaktadır. ASTM D1500, D6045, ISO 2049 standartlarına uyumlu ölçüm yapan cihaz Şekil 3.25’de görülmektedir.



Şekil 3.25. Renk ölçüm cihazı

3.4. Yağ Asidi Analizleri

İçerdikleri yağ asitlerinin çeşitliliği yağın bileşimi ile yakıtın özellikleri arasındaki ilişkinin tespit edilmesinde önemli rol oynamaktadır. Toplam doyma derecesine göre değerlendirildiğinde bir yağın karakteri bitkinin yetiştirildiği şartlara göre farklılık göstermezken detaylı analiz sonucu yağ asitlerinin miktarı incelendiğinde bitkinin yetiştirildiği ortamın coğrafi şartları, yetiştirilme zamanı gibi kriterlere göre değişiklik gösterdiği görülmektedir. Bu sebeple üretimde kullanılan yağın orijinal numunesi üzerinden Kromatografi analizleri gerçekleştirilmiştir. Biyodizel üretiminde

kullanılan on farklı bitkisel yağın yağ asit kompozisyonlarının tayini Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi bünyesindeki Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (BİLTEM) yer alan Kromatografi laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

GC-FID sisteminde yağ asidi kompozisyonunun belirlenmesi için on farklı yağ numunesi yağ asidi metil esteri türevlendirme işlemine tabi tutulmaktadır (Arslan ve Çağlar, 2019). Metil ester türevlendirme işlemi için 0.1 g yağ numunesi santrifüj tüpüne koyulmuş ve üzerine ayrı bir yerde hazırlanan 2 N'lik metanollü KOH çözeltisinden 0.1 ml ilave edilmiştir. Son olarak 10 ml n-hekzan ilave edilerek elde edilen karışım 1 dk boyunca iyice karıştırılmıştır. Ardından 10000 rpm devirde 5 dakika boyunca santrifüjlenmiştir. İşlemler sonunda metil ester türevlerine dönüşen yağ asitleri tüpün üst kısmında toplanmaktadır. Üst faz alınarak GC vialine koyulmuş (Şekil 3.26) ve cihaza ait otomatik injektör vasıtasıyla cihaza enjekte edilmiştir. GC-FID analizlerine ait yöntem parametreleri Tablo 3.3'de özetlenmektedir.



Şekil 3.26. Gaz kromatografisi için hazırlanmış numuneler

Tablo 3.3. Yağ asidi kompozisyonu analizi için Uygulanan GC-FID Analiz Yöntem Parametreleri (Arslan ve Çağlar, 2019; Kenar vd., 2019)

Uygulanan GC-FID Analiz Yöntem Parametreleri	
Enjeksiyon	1 µL (enjektöre ait maksimum miktar) ; splitless mod
Enjeksiyon bloğu sıcaklık	250°C
Kolon	Agilent HP-88 kapiler GC kolon (88% Cyanopropyl)aryl-polysiloxane) (100 m×0.25 mm×0.20 µm)
Kolon sıcaklık programı	<u>Rampa sıcaklık bekletme süresi</u> - 45°C 4 dk 13°C/dk 175°C 27 dk 4°C/dk 215°C 35 dk
Hareketli faz	Yüksek saflıkta Hidrojen gazı
Akış hızı	1 mL/dk
Dedektör	Alev iyonlaşma dedektörü 250°C, H ₂ akış hızı 45 mL/dk, Hava akış hızı 450 mL/dk
Analiz süresi:	86 dk

3.5. Yağ Asitlerinin Yakıt Özelliklerine Etkisinin Makine Öğrenmesi ile Analizi

Günümüzde teknolojik ve bilimsel faaliyetlerin artması, disiplinler arası çalışmaların yaygınlaşması sonucu veri kavramı da önemli bir unsur haline gelmiştir. Yürütülen bir çalışmanın sonucunda elde edilen verinin analiz edilmesi ve bunun sonucunda anlamlı bir bilgiye ulaşılması gerekliliği veri madenciliği ve makine öğrenmesi kavramlarını gündeme getirmektedir.

Makine öğrenimi, bilgisayarların deneyimden öğrenmesine, büyük ve genellikle gürültülü veri kümelerinden yola çıkarak bazı bilgilerin elde edilmesi veya veriler arasındaki ilişkilerin tanımlamasına izin veren bir yapay zeka uygulamasıdır. Verileri işlerken bir dizi istatistiksel ve olasılık yaklaşımı kullanan disiplinler arası bir çalışma alanıdır (Bishop, 2006). Makine öğrenimini ile büyük bir veri seti üzerinden kümeleme, sınıflandırma veya tahmin etme üzerine kurulu algoritmalarla faydalı bilgiye ulaşım sağlanmaktadır (Filiz, 2019). Bir malzemenin özelliklerini tahmin etmek için simülasyonlar yapmak, bir laboratuvarında malzemeyi sentezlemek, geliştirmek ve test etmekten çok daha hızlı ve daha az maliyetlidir. Son dönemde yapılan çalışmalarda herhangi bir materyalin özelliklerinin tahmin edilmesi veya analizler sonucunda elde edilen belirli özellikler arasındaki ilişkinin tespit edilmesi gibi konularda araştırmacılar makine öğrenimi tekniğinden faydalanmaktadır. Bu da çalışmanın maliyetinin azaltılması açısından önemlidir (Bishop, 2006).

Eldeki geçmiş veriler kullanılarak verilere en uygun model aranır ve bu işlem öğrenme olarak adlandırılır. Uygun model oluşturulduktan sonra da yeni veriler modele uyarlanarak sonuç elde edilir (Kor, 2015). Verilerden öğrenme ve veriler üzerinden karar vermeye dayalı bir yöntem olması sebebiyle veri, makine öğrenimi algoritmaları için en önemli parametredir. Yeterli doğruluk derecesine sahip sonuçlar elde edebilmek verilerin yeterli sayıda olmasına, birbiri içinde tutarlı olmasına ve gerekli bilgiler içermesine bağlıdır (Filiz, 2019).

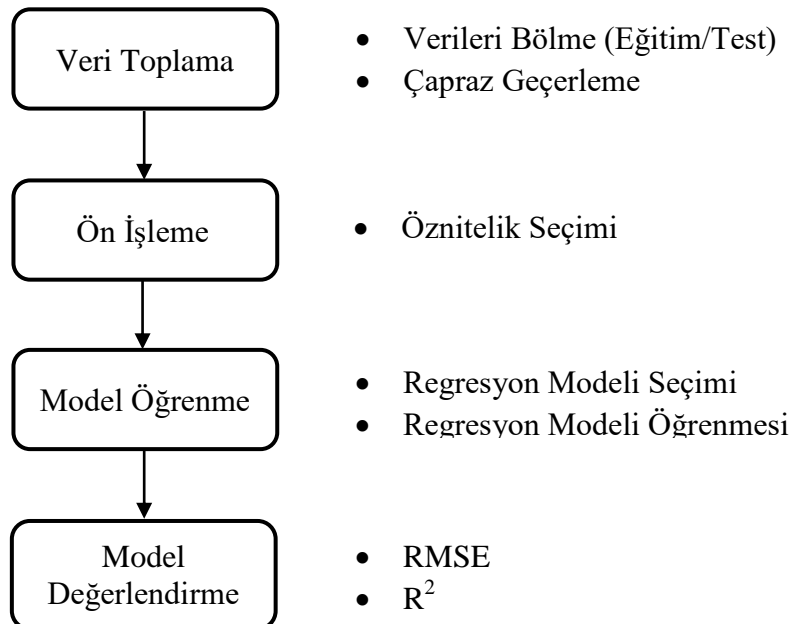
Hedeflenen model çıktısının oluşturulması amacıyla veri seti içerisinde bulunan özelliklerden yararlanarak elde edilen tablonun her bir sütunu bir özneliği temsil etmektedir. Bu tez çalışmasında biyodizel üretiminde kullanılan her bir yağın içeriğindeki yağ asitleri öznelikleri, yakıt özellikleri (setan sayısı, viskozite, CFPP gibi) ise tahmin edilecek olan değişkeni temsil etmektedir. Hedef çıktıyı belirlemek amacıyla her bir öznelik ile oluşturulan bir tabloda her bir öznelik bir sütunu temsil ederken her bir satır da ilgili biyodizele ait öznelik vektörü olarak adlandırılmaktadır.

Makine öğrenmesi yöntemleri analiz edilmek istenen probleme veya elde edilmesi planlanan çıktıya göre gruplara ayrılmaktadır. En yaygın olanlar sınıflandırma, kümeleme ve regresyondur. Bu çalışmada regresyon yöntemleri kullanılmaktadır. Amaç sınıflandırma problemlerindeki gibi kategorik sonuçların elde edilmesinin aksine sonucun reel bir sayı olarak tahmin edilmesi olduğundan regresyon modelleri uygulanmaktadır.

Bir makine öğrenmesi projesinde veri seti eğitim ve test amacıyla iki ayrı bölüme ayrılmaktadır. Eğitim için ayrılan veriler ile tahmin için en doğru sonuçları verecek olan makine öğrenmesi algoritmasının seçilmesi amaçlanır. Eğitim veri seti ile öğrenme işleminin tamamlanmasının ardından makine öğrenmesi modeli veri setinin test amacıyla ayrılan %20'lik kısmı üzerine uygulanmaktadır. Kurulan modele test verisindeki değişkenleri (x değerleri) eklenerek hedef değişkenin (y) tahmin edilmesi beklenmektedir. Tahmin edilen değişken daha önce tahmin edilen değişken ile kıyaslanarak modelin performansı performans ölçütleri yardımıyla ölçülmektedir.

Veri kümesindeki öznitelikler tahmin performansını etkileyen en önemli unsurlardan biridir. Öznitelik sayısının yetersiz veya gereğinden fazla olması durumunda modelin öğrenme ve tahmin performansı olumsuz etkileneceğinden modelin eğitim süresini azaltacak ve modelin başarısını artıracak yeterlilikte olan orijinal veri kümesini temsil eden bir öznitelik alt kümesinin oluşturulması gerekmektedir. Bir özneliğin tahmin edilecek olan değişken ile istatistiksel bir ilişkisinin olmadığı durumda da modelin performansı olumsuz etkileyecektir. Dolayısıyla modelin eğitimine dahil edilmesi planlanan en uygun özniteliklerin öznitelik seçimi yöntemleri ile belirlenmesi faydalı olacaktır.

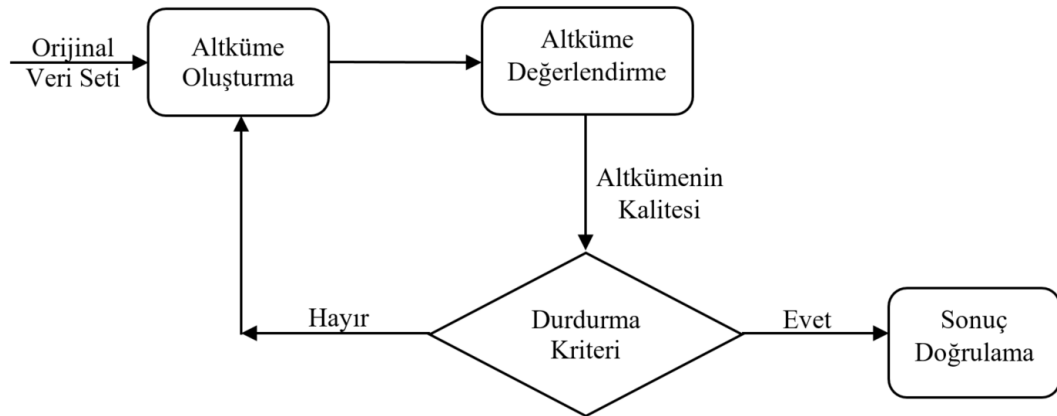
Bu çalışmada izlenen yol Şekil 3.27'de verilmiştir.



Şekil 3.27. Bu çalışmaya ait makine öğrenmesi akış diyagramı

3.5.1. Öznitelik seçimi yöntemleri

Makine öğrenmesi ile geliştirilen bir modelin performansı üzerinde doğrudan etkili kavramlardan biri öznitelik seçimidir. Model oluştururken uygulanacak ilk ve en önemli adımdır. Esas veri seti içinden orijinali ile uyumlu olan ve tahmin edilecek olan değişkene en çok katkıda bulunacak verilerden oluşan bir alt kümenin seçilmesi işlemidir (Forman, 2003; Sağbaş, 2022) Hedef problemin çözümü için en faydalı ve tutarlı özellikler seçilerek veri setindeki özellik sayısı azaltılır. Burada amaç hesaplama kolaylığı sağlaması ve modelin başarı oranını artırması için veri boyutunu azaltmaktır. Veri sayısının azaltılması algoritmanın öğrenme performansını artırmada da etkilidir (Saeys vd., 2007; Budak, 2015). Veri seti içindeki ilgisiz veya yeteri kadar ilgili olmayan veriler ile öğrenme gerçekleştirildiğinde istenen değerler ile öğrenme olmayacağından modelin doğruluktan sapmasına sebep olacaktır. Öznitelik seçimi akış diyagramı Şekil 3.28’de gösterildiği gibidir.

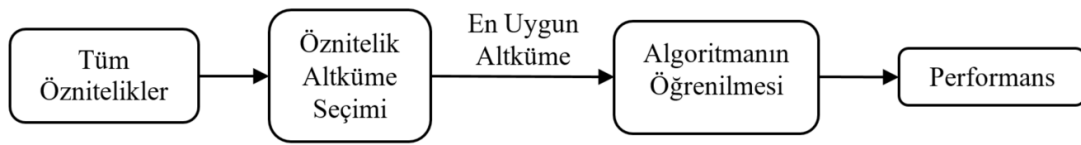


Şekil 3.28. Öznitelik seçimi akış diyagramı (Sainin ve Alfred, 2011)

En iyi öznitelik alt kümesini belirlemek amacıyla kullanılan yöntemler *filtre yöntemleri* ve *sarmalayıcı yöntemler* başlıkları altında incelenebilir. Model geliştirilirken kullanılacak olan analiz metodu ile uyumlu olanlar seçilerek öznitelik seçimi işlemi gerçekleştirilmektedir.

3.5.1.1. Filtre yöntemleri

Filtre yöntemleri, yalnızca verilerin özniteliklerine bakarak bu özniteliklerin ilişki düzeyini değerlendirir. Her bir öznitelik için bir öznitelik ilişki puanı (skor) hesaplanır ve düşük puanlı öznitelikler alt kümeye dahil edilmez. Elde edilen alt küme algoritma girdisi olarak kullanılır. Filtre yöntemlerinin avantajları, çok yüksek boyutlu veri setlerine kolayca ölçeklenebilmeleri, hesaplama açısından basit ve hızlı olmalarıdır (Saeys vd., 2007; Alpaydın, 2010). Filtre yöntemleri akış diyagramı Şekil 3.29'da gösterildiği gibidir.



Şekil 3.29. Filtre yöntemleri akış diyagramı (Sainin ve Alfred, 2011)

- **Korelasyon (F-skör)**

Veri setindeki her bir öznitelik için f-skör değeri hesaplandıktan sonra bu değerlerin ortalaması alınıp bulunan değer eşik değer olarak kabul edilmektedir. Eşik değerinden büyük olan öznitelikler veri setinden ayıklanarak oluşturulan alt kümeye dahil edilirken eşik değerinin altında kalanlar kümeye dahil edilmemektedir (Uzer, 2014).

- **Pearson korelasyon katsayısı**

Korelasyon, iki veya daha fazla öznitelik arasındaki doğrusal ilişkiyi verir. İki öznitelik arasında yüksek korelasyon varsa özniteliklerden biri diğeri üzerinden tahmin edilebilmektedir. Özellikle doğrusal modeller ile çalışırken bağımlı öznitelik ile yüksek korelasyonlu öznitelikler seçilir. Diğer özniteliklerin kendi arasında yüksek korelasyona sahip olması model için fazla bilgi sağlamayacağından sadece birinin seçilmesi yeterlidir. Başarı oranı yüksek bir model geliştirilebilmesi için bağımlı öznitelikle yüksek ilişkili ancak kendi aralarında ilişkisiz olan öznitelikler seçilmelidir. Pearson korelasyon katsayısı -1 ile +1 arasında değerler alabilir. Pozitif değerler öznitelikler arasında doğrusal ilişki olduğunu gösterir. Negatif değerler ise iki öznitelik arasındaki zıt ilişkiyi göstermektedir. Korelasyon katsayısının sifıra yaklaşması öznitelikler

arasındaki ilişkinin zayıfladığı anlamına gelir. Sıfır olması durumunda ikili arasında bir ilişki olmadığını göstermektedir (Kuhn ve Johnson, 2013).

Pearson korelasyon katsayısı Denklem 3.1 ile hesaplanmaktadır.

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \#(3.1)$$

Burada,

r = Pearson korelasyon katsayısı, x_i = x değişkeni, y_i = y değişkeni,

\bar{x} = x değişkenlerinin ortalaması, \bar{y} = y değişkenlerinin ortalaması

f-skor ve pearson korelasyon katsayısı birbirine oldukça benzer. Pearson korelasyon katsayısının farkı [-1,1] arası değer olarak negatif ve pozitif yönleri belirtmesidir. F-skor ise sadece korelasyon gücünü vermektedir.

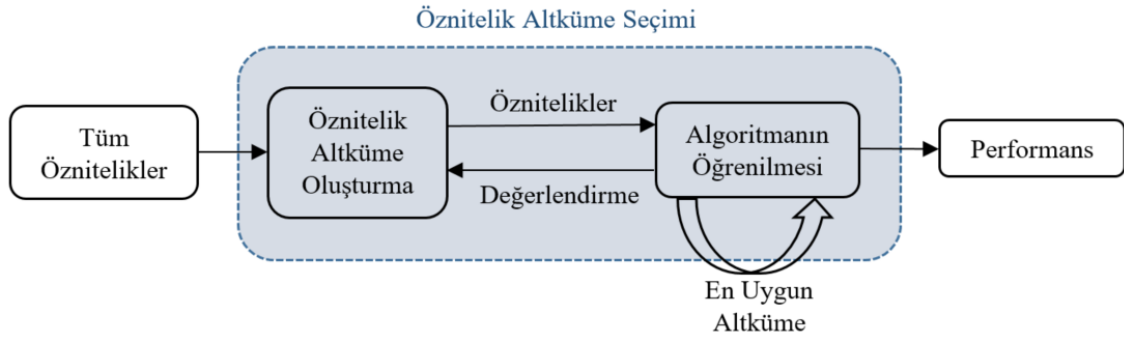
- **Karşılıklı bilgi**

İki öznitelik arasında hesaplanır ve özniteliklerden birinin diğeri hakkında ne kadar bilgi verdiğinin ölçüsüdür (Ross, 2014). Bir özellik ile hedef arasında istatistiksel bir bağlantı kurmanın yolu olup olmadığını belirlemeye yarayan yöntemdir. Karşılıklı bilgi puanı ne kadar yüksek olursa öznitelik ile hedef arasındaki ilişkinin o kadar kuvvetli olduğunu gösterir. Dolayısıyla o özneliğin eğitim setine dahil edilmesi gerektiği sonucuna ulaşılır. Karşılıklı bilgi puanının 0 veya 0.01 gibi çok düşük bir değerde olması ise öznitelik ve hedef arasında zayıf bir bağlantı olduğu anlamına gelmektedir.

3.5.1.2. Sarmalayıcı yöntemler

Filtre yöntemi bir öğrenme algoritması belirlenip ona uygun öznitelik alt kümesi seçimi mantığıyla çalışmamaktadır, yani model seçiminden bağımsız bir alt küme oluşturulmaktadır. Önemli olan hedef ile en yüksek ilişkiye sahip özniteliklerin seçilmesi ve bir alt küme oluşturulmasıdır. Sarmalayıcı yöntemlerde ise bir öğrenme algoritması belirlenerek öznitelik seçimi bu algoritmaya bağlı gerçekleştirilmektedir. Algoritmanın performansını artırıcı yönde seçimler yapılmaktadır. Olası öznitelik alt kümesi uzayında arama yapılarak birden fazla alt küme oluşturulur ve değerlendirilir. Belirli bir öznitelik alt kümesinin değerlendirilmesi belirli bir modelin eğitilmesi ve test

edilmesi sonucu gerçekleştirilir ve algoritmaya uyarlanır. Sarmalayıcı yöntemlerde eğitim setinin öğrenme algoritmasına uygulanması sonucu elde edilen sonuçlara bağlı olarak öznelik seçimi gerçekleştirildiğinden filtre yöntemlerine kıyasla daha yüksek başarı oranı sağlanmaktadır. (Hall, 1999; Guyon vd. 2002; Saeys vd., 2007; Budak, 2015). Sarmalayıcı yöntemler akış diyagramı Şekil 3.30'da gösterildiği gibidir.



Şekil 3.30. Sarmalayıcı yöntemler akış diyagramı (Sainin ve Alfred, 2011)

- **Sıralı İleri Yönde Seçim**

Sıralı ileri yönde seçim (sequential forward selection-SFS), boş bir özellik seti ile başlayıp her defasında farklı bir özelliği kümeyle ekleyerek en iyi özelliklere sahip alt kümeyle oluşturma prensibine göre çalışır. Bu sayede her adımda en iyi genelleme yeteneğine sahip yeni öğrenilmiş bir model ortaya çıkmaktadır. SFS yöntemi tarafından kümeyle yeni özelliklerin eklenmesi RMSE'nin en düşük olduğu veya R^2 nin en yüksek olduğu noktaya kadar devam eder. SFS'nin dezavantajlarından biri, her adımda yalnızca bir özellik dahil edildiğinden, birbirine bağlı özellikleri ekleyememesidir. Ayrıca SFS, kümeyle eklendikten sonra bir özelliği kaldıramaz. Öte yandan, algoritmanın hızlı olması, çalışır durumda ve az sayıda özellik elde etmesi gibi avantajları vardır (Erdaş, 2013; Budak, 2015). Sıralı ileri yönde seçime ait algoritma Tablo 3.4'deki gibidir.

Tablo 3.4. Sıralı ileri yönde seçim algoritması (Erdaş, 2013)

Algoritma: Sıralı İleri Yönde Seçim

Girdi: $P = \emptyset$ ilk öznelik seti

Q - tüm öznelik seti

J - minimize etmek için kriter fonksiyonu

Çıktı: P - son öznelik seti

tekrarla

tüm $x \in Q$ için

set $P' \leftarrow P \cup \{x\}$

hesapla $J(P')$ Burada P' kümesindeki öznelikleri kullanarak regresyon modeli oluşturup

RMSE hesaplıyoruz

set $P \leftarrow P \cup \{x^+\}$ burada $x^+ = \text{argmin} [J(P')]$ (argmin kriter J 'yi en düşük hale getiren özneliği bulur ve onu kümeye ekleriz)

set $Q \leftarrow Q \setminus \{x^+\}$

J de daha fazla iyileşme olmayana kadar

• Sıralı geri yönde seçim

Sıralı geri yönde seçim (sequential backward elimination-SBE), ilk veri setinde bulunan tüm özelliklerle başlayıp her adımda kriter fonksiyonuna göre bir özelliği kaldırma prensibiyle çalışır. SFS'de olduğu gibi SBE de bir özelliği kalıcı olarak kaldırır ve daha sonra özellik setine ekleyemez (Erdaş, 2013; Budak, 2015). Sıralı geri yönde seçime ait algoritma Tablo 3.5'deki gibidir.

Tablo 3.5. Sıralı geri yönde seçim algoritması (Erdaş, 2013)

Algoritma: Sıralı Geri Yönde Seçim

Girdi: P - tüm öznelik seti

J - minimize etmek için kriter fonksiyonu

Çıktı: P - son öznelik seti

tekrarla

tüm $x \in P$ için

set $P' \leftarrow P \setminus \{x\}$

hesapla $J(P')$ Burada P' kümesindeki öznelikleri kullanarak regresyon modeli oluşturup

RMSE hesaplıyoruz

set $P \leftarrow P \setminus \{x^-\}$ burada $\{x^-\} = \text{argmax} [J(P')]$ (argmax kriter J yi en yüksek hale getiren özneliği bulur ve onu kümeden çıkarırız)

J de daha fazla iyileşme olmayana kadar

• Özyinelemeli özellik eleme

Özyinelemeli özellik eleme (recursive feature elimination-RFE) yönteminde öncelikli olarak, veri setindeki tüm özelliklerin kullanılması ile bir model oluşturulduktan sonra her bir öznelik için bir önem puanı hesaplanmaktadır. Daha sonra daha az öneme sahip olan özellikler kademeli olarak teker teker kaldırılmaktadır. Bu işlemler sonucunda model yeniden oluşturulur ve önem puanları yeniden hesaplanır (Guyon vd., 2002).

3.5.2. Regresyon algoritmaları

3.5.2.1. Doğrusal regresyon

Doğrusal regresyon analizi ile tahmin edilmesi beklenen ve bağımsız değişkenler (X_1, X_2, \dots, X_n) ile ilişkili olan bağımlı değişken (Y) belirlenmektedir. Belirlenen bu değişkenler vasıtasıyla bir model kurularak bağımlı değişken ve bağımsız değişkenler arasında bir ilişki tanımlanmaktadır. Burada amaç elde edilen modele yeni veri setleri uygulandığında bağımlı değişkenin değerinin tahmin edilebilmesidir (Budak, 2015). Basit doğrusal regresyon Denklem 3.2'deki gibi ifade edilmektedir.

$$y = w_0 + w_1x \quad (3.2)$$

Burada, y bağımlı değişken, x tahmin katsayısı yani bağımsız değişken, w_0 tahmini kesişme noktası, w_1 ise tahmini eğimi vermektedir.

Bir bağımlı değişken ile bir veya birden fazla bağımsız değişken arasında doğrusal matematiksel bir fonksiyon oluşturulmaktadır. Analiz edilmek istenen, bir değişkenin veya bir durumun hangi verilerden veya durumlardan etkilendiğidir. Değişkenler belli sayıda ve ölçülebilir olmalıdır (Weisberg, 2005).

Doğrusal regresyon modelleri nispeten basit olmasının yanında anlaşılması ve yorumlanması kolay matematiksel bir denklem sağlamaktadır. Makine öğrenimi ve yapay zeka uygulamalarında yaygın kullanılan bir yöntemdir. Bunun sebebi, yeni bir veri setinin eğitilmesi için fazlaca veri ve zaman gerektiren sinir ağları ve destek vektör makinelerinden farklı olarak kolayca ve yeniden eğitilebilir olmasıdır.

3.5.2.2. Kısmi en küçük kareler regresyonu (PLSR)

Kısmi en küçük kareler regresyonu (partial least square regression-PLSR), kimya ve endüstriyel uygulamalarda fazlaca kullanılan yöntemdir. PLSR, X ve Y olmak üzere iki veri matrisini doğrusal çok değişkenli bir modelle ilişkilendirmeye yarayan yöntemdir, ancak X ve Y 'nin yapısını da modellediği için geleneksel regresyonun ötesine geçer (Wold vd., 2001). PLSR esas olarak verilen "bağımsız değişkenler" X ile "bağımlı değişken" Y 'yi aramayı ve benzer olan istatistiksel nitelikleri çıkarmayı amaçlamaktadır (Erdaş, 2013). Hem X hem de Y 'deki birçok, gürültülü, eşdoğrusal ve hatta eksik değişkenli verileri analiz edebilmesi sebebiyle çok kullanışlıdır. İlgili

değişkenlerin ve gözlemlerin artmasıyla model parametrelerinin de kesinliği artmaktadır (Wold vd., 2001).

3.5.2.3. Ridge regresyon

Ridge regresyonu, bağımsız değişkenlerin yüksek oranda ilişkili olduğu durumlarda çoklu regresyon modellerinin katsayılarını tahmin etmeye yarayan yöntemdir. Temelde çoklu doğrusal regresyona benzer (Güven, 2022). En küçük kareler yöntemi çoklu regresyon modellerinde yaygın olarak kullanılan ve katsayıları tahmin etmeye yarayan bir yöntemdir. Veriler arasında çoklu bağlantı (veriler arasında yüksek korelasyon) olması durumunda en küçük kareler yöntemi tarafsızdır ve varyanslar büyüktür bu durum da tahmin edilen değerlerin gerçek değerlerden çok uzak olmasına neden olmaktadır. Bu sorunun çözülmesi amacıyla diğer yönteme kıyasla daha doğru R^2 değerine sahip modellerin geliştirilebildiği ridge regresyonu kullanılmaktadır (Tırınk, 2020).

Doğrusal regresyondaki maliyet fonksiyonuna L2 düzenleme terimi eklenmesi sonucu Denklem 3.3 ortaya çıkmaktadır. Burada α modelin düzenleme seviyesini kontrol etmektedir. α arttıkça katsayıların büyüklüğü azalmaktadır. $\alpha=0$ ise ridge regresyonu geleneksel lineer regresyona dönüşmektedir. Cezanın amacı en küçük kareler ile tahmin edilen katsayıların küçültülmesidir.

$$\|y - X_w\|_2^2 + \alpha \|w\|_2^2 \#(3.3)$$

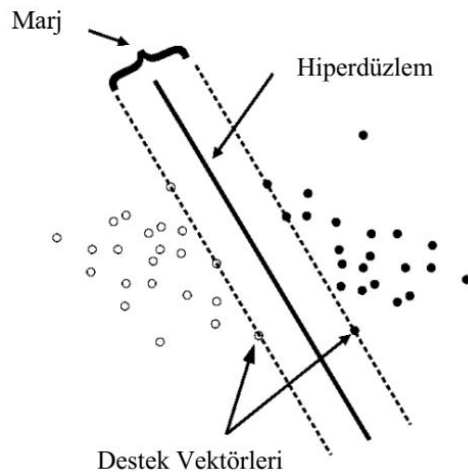
Bu yöntem geleneksel regresyon modellerinde veriyi daha kullanışlı hale getirmeye yarayan alt küme seçimi tekniğine bir alternatif olmaktadır. Ridge regresyonu ile katsayı tahminlerinin sıfıra eşit veya yakın olduğu doğrusal modeller üretilmektedir. (Güven, 2022). Tahminlere yanlılık ekleyerek standart hataların azaltılması sağlanmaktadır (Aytekin, 2021).

3.5.2.4. Destek vektör regresyonu

Girdi veri setinin yetersiz olduğu veya bazı veri setlerinin tutarlı olmadığı durumlarda parametrelerin katsayılarını tahmin eden alternatif yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaç için geliştirilmiş çok sayıda yöntem ve model bulunmaktadır.

Özellikle son on yılda daha fazla önem kazanan bir makine öğrenme modeli olan Destek Vektör Makineleri (DVM), çeşitli disiplinlerde istatistiksel analiz üzerine yapılan önceki çalışmalarda görüldüğü üzere, öğrenme modeli üretmek için daha az girdi verisi gerektirir ve YSA'dan daha doğru tahminler yapmaktadır (Tolun, 2008; Kor, 2015). Literatürde DVM'nin optimize edilmesi için daha az parametre gerektiğinden YSA'dan daha kullanışlı ve kullanıcı dostu olduğunu ifade eden çalışmalar yer almaktadır (Kor, 2015).

DVM, sınıflandırma amacıyla yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Sınıflandırmanın yapılacağı ve aynı düzlem üzerinde bulunan iki grup birbirinden bir sınır yardımıyla ayrılır. Bunun için iki grubun da elemanlarına en uzak olan yerden birbirine paralel iki sınır çizgisi çizilir (destek vektörleri) ve bu çizgiler birbirine yaklaştırılarak ortak sınır çizgisi (hiperdüzlem) meydana getirilir.



Şekil 3.31. Doğrusal sınıflandırma (Kor, 2015)

Şekil 3.31'de gösterildiği gibi, en yakın veri noktalarından geçen sınır “destek vektörlerini”, destek vektörleri arasındaki mesafe “marjı” ve marjı maksimize eden sınıflandırıcı “optimal ayırıcı hiperdüzlemi” ifade etmektedir (Kor, 2015).

DVM'de sınıflandırma ve regresyon matematiksel olarak birbirine benzemektedir. İki yöntem de istatistiksel öğrenme mantığı ile çalışmaktadır. Sayısal bir değer elde edilmek isteniyorsa bu regresyon ile sağlanmaktadır. DVM'nin regresyon modeli Destek Vektör Regresyonu (DVR) olarak adlandırılmaktadır. Veri setinin eğitim için ayrılan kısmı ile bir regresyon modeli oluşturulur ve test için ayrılan verilerin bu modele uygulanması ile de hedef değer tahmin edilmektedir (Kor, 2015). Destek

vektörü regresyonu, Vapnik tarafından geliştirilen destek vektör makinelerinin bir uzantısıdır (Cortes ve Vapnik, 1995) Temel anlamda, DVR Denklem 3.4'deki fonksiyona yaklaştırmaya çalışır (Erdaş, 2013).

$$f(x) = w \cdot x + b \quad \#(3.4)$$

Burada, x giriş verilerinin bir özellik vektörüdür, w ağırlık vektörüdür ve b sapmadır.

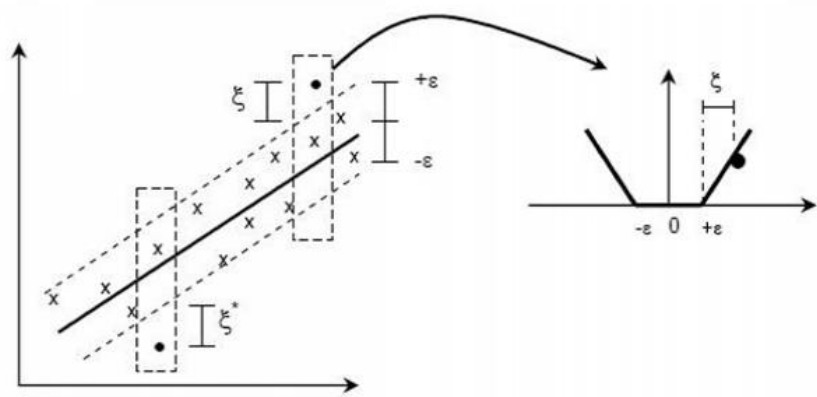
DVR, destek vektörü sınıflandırmasında olduğu gibi marj yerine tahmin hatasını hesaplar. Bir kayıp fonksiyonunun kullanılması, DVR'yi eski usul regresyon tekniklerinden ayırır. Vapnik tarafından oluşturulan ve " ϵ -tüpü" olarak adlandırılan ϵ yarıçaplı bir tüpü tanımlayan " ϵ -duyarsız kayıp fonksiyonu Denklem 3.5'te verildiği gibidir (Erdaş, 2013).

$$E(x, y, f) = |y - f(x)|_\epsilon = \begin{cases} 0 & \text{if } |y - f(x)| \leq \epsilon \\ |y - f(x)| - \epsilon & \text{otherwise} \end{cases} \quad \#(3.5)$$

Burada f , x , ve y sırasıyla giriş ve çıkış verileri arasındaki fonksiyon, bağımsız değişkenlerin giriş vektörü ve tahmin edilecek çıkış değerini temsil etmektedir. Tahmin edilen değer yarıçapı ϵ olan tüpün sınırları içinde yer alıyorsa Denklem 3.5 sıfıra eşit olacaktır. Tahmini değer tüpün sınırları dışında ise kayıp, tahmini değer ile ϵ arasındaki fark kadardır. Denklem 3.4'deki kaybın azaltılması için Denklem 3.6'daki toplama terimi en aza indirilmelidir (Erdaş, 2013).

$$\frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n |y - f(x)|_\epsilon \quad \#(3.6)$$

burada C , "test hatası ile marjin genişliği arasındaki değiş tokuş" için bir sabittir. C parametresi marjin ile hata arasında ayarlama yapan bir parametredir. Büyük C değerleri küçük marjine yol açar, bu da eğitim kümesinde hatanın düşük çıkmasını sağlamaktadır. DVM'nin amacı marjini geniş tutmaktır çünkü geniş marjin test hatasını düşürmektedir. Yani C büyüdükçe eğitim hatası azalır ama test hatası artabilir. Küçük C ise marjini geniş tutar fakat eğitim hatası artabilir. Bu sebeple optimum C bulunmalı, marj yeterince geniş ve hata yeterince az olmalıdır.



Şekil 3.32. ε -tüp, gürültülü veriler için değişkenler, ξ , ξ^* ve kayıp fonksiyonu (Erdaş, 2013)

Kullanılan veriler gürültülü ise, Şekil 3.32'de gösterildiği gibi arka plandaki gürültünün sonuçlarını ortadan kaldırmak için Denklem 3.7 ve Denklem 3.8' deki yeni gevşek değişkenler ξ_i ve ξ_i^* eklenir.

$$\frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*) \quad (3.7)$$

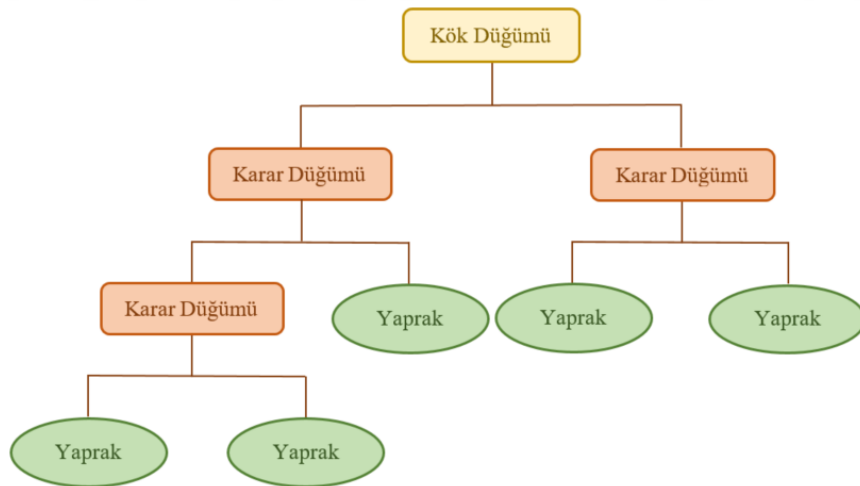
$$\begin{aligned} y_i - f(x) &\leq \varepsilon + \xi_i \\ f(x) - y_i &\leq \varepsilon + \xi_i^* \\ \xi_i, \xi_i^* &\geq 0 \end{aligned} \quad (3.8)$$

Burada $i = 1, \dots, n$ dir. Gevşek değişkenler ne kadar küçük olursa C değeri artacaktır bu da hatanın azalması anlamına gelmektedir. Burada ε -tüpün üzerine veya dışına yerleştirilen destek vektörlerinin miktarını düzenleyen ε -tüpünün yarıçapıdır. ε daha yüksek olursa, destek vektörlerinin miktarı sonunda sıfıra düşer ve tahmin geçersiz olur (Erdaş, 2013).

DVM altında çeşitli kerneller olabilir. Bunların en önemlileri lineer, polinom ve radyal tabanlı kernellerdir. Kernel, elimizdeki veriyi daha büyük boyutlu bir uzaya yansıtıp doğrusallaştırmayı hedefleyen fonksiyondur. Bu çalışmada lineer ve radyal tabanlı DVM kullanılmıştır.

3.5.2.5. Karar ağaçları

Karar ağacı (KA), sınıflandırma ve tahmin için en güçlü ve popüler yöntemlerdendir. Toplu halde bulunan büyük veri kümelerinin basit adımlarla parçalanması ve daha küçük veri kümelerine bölünmesi prensibiyle çalışmaktadır (Keskinbıçak, 2023). KA, ağaç yapısına benzeyen bir akış şeması şeklindedir (Şekil 3.33). Her bir düğüm öznitelik üzerindeki testi belirtir ve her dal da bu testin sonucunu temsil eder. Bu karar düğümü daha fazla alt düğüm oluşturamıyorsa en son oluşan düğüm yaprak düğümüdür. Son olarak oluşan her yaprak düğümü de bir sınıflandırma veya tahmin için karar değeri olarak belirlenmektedir (Lin vd., 2012). Basit ve kolay anlaşılır olması, çok boyutlu verileri işleyebilmesi, doğruluk ve başarı oranının yüksek olması, yapraklardan köke doğru tahmin değerlerinin takip edilebilmesi, yeni bir veri kullanılması durumunda da tahmin yapılabilmesi gibi avantajları olan bir yöntemdir. Avantajları yanında dezavantajlarından da vardır. Veri setinin özelliklerine bağlı olarak büyük ve karmaşık ağaç yapıları meydana gelebilir, sayısal olmayan verilerin işlenmesinde problemler meydana gelebilir, ezber öğrenme olayı görülebilir (Keskinbıçak, 2023).

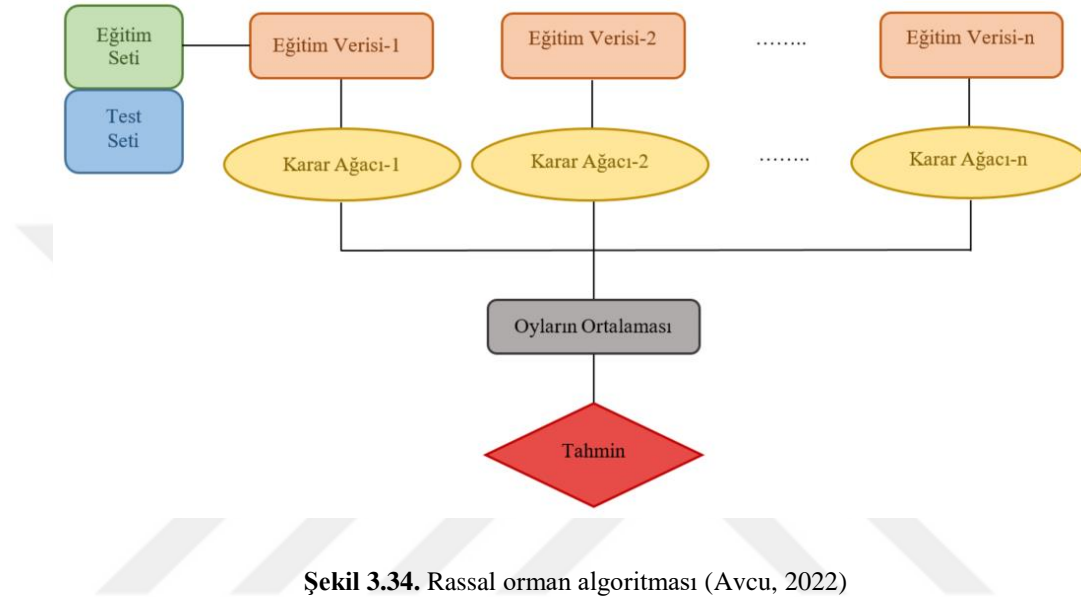


Şekil 3.33. Karar ağacı algoritması (Avcu, 2022)

3.5.2.6. Rassal orman

Rassal orman (RO), denetimli öğrenme topluluğu algoritmasıdır. Bir orman oluşturmak için birden fazla karar ağacı birleştirilir. Karar ağacı algoritmasından farkı

kök düğümünün ve bu düğümleri bölme işlemlerinin rastgele gerçekleştirilmesidir. Doğruluğu yüksek ve istikrarlı bir tahmin elde edilebilmesi için oluşturulan karar ağları birleştirilir (Şekil 3.34). Test verileri her bir karar ağacından geçirilir ve ağaçların oyuna göre en çok oy alan sonuçlardan yola çıkılarak tahmin modeli geliştirilir (Liang vd.,2020; Güven, 2022). Özelliklerin rastgele seçilmesi ve ormanda yeteri kadar ağaç bulunması ile ağaçlar arasındaki aşırı korelasyon sorununun üstesinden gelmektedir.



Şekil 3.34. Rassal orman algoritması (Avcu, 2022)

3.5.2.7. Ekstrem gradyan yükseltme (XGB)

Ekstrem gradyan yükseltme (Extreme Gradient Boosting-XGB), temelde gradient boosting (gradyan yükseltme) ve karar ağacı algoritmaları mantığıyla çalışan bir makine öğrenimi algoritmasıdır. Gradient boosting ile önce veri setinden bir karar ağacı oluşturulur ve tahmin ile çıktı arasındaki hata hesaplanır. Elde edilen hata yeni çıktı değeri olarak kabul edilir ve yeni bir karar ağacı oluşturulur. Önceki ağacın meydana getirdiği hatayı yeniden oluşturmak için ağaç eğitilir. En baştaki çıktı değeri ile son aşamadaki tahmin arasındaki hata istenilen seviyeye gelene kadar yeni karar ağaçları eklenmeye devam edilir. XGBoost yöntemi de bu mantıkla çalışır farkı ise farklı regülarizasyon (düzenleme) teknikleri kullanarak karar ağaçlarının karmaşık yapısını kontrol altına alabilmesidir (Patrous, 2018; Yangın, 2019). Diğer algoritmalara oranla 10 kat hızlı tahmin gücüne sahiptir. Aşırı öğrenme ya da aşırı benzerlik problemlerini çözebilme yeteneğine sahiptir. Kullanılacak değişken sayısının artması modelin aşırı öğrenme olasılığını artırmaktadır. Yüzlerce değişken içeren bir model

yerine daha az değişken içeren bir model daha kullanışlı olmaktadır. Regülerizasyon ise bu aşırı öğrenme probleminin çözülmesi için kullanılan bir tekniktir (Yangın, 2019).

3.5.3. Performans ölçümü

3.5.3.1. Başarı ölçütleri

Tahmin değerlerinde başarı ölçütü olarak R^2 ve RMSE yöntemleri kullanılmıştır.

- **R Kare (R^2)**

Regresyonda, R^2 değeri regresyon fonksiyonunun gerçek veri noktalarına ne kadar iyi yaklaştığının istatistiksel bir ölçüsüdür. R^2 değerinin 1.0 olması gözlemlenen verilerle regresyon çizgisinin mükemmel derecede uyumlu olduğu anlamına gelirken, R^2 değerinin 0.0 olması hiçbir korelasyon olmadığı anlamına gelmektedir. R^2 değeri hesaplanırken Denklem 3.9 kullanılmaktadır. (Erdaş, 2013).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y}_i)^2} \#(3.9)$$

Burada, y_i , \hat{y}_i ve \bar{y}_i sırasıyla, gerçek, gözlenen ve ortalama yanıt değişkenleridir.

- **Kök ortalama kare hatası (RMSE)**

Kök ortalama kare hatası (Root mean square error-RMSE), gerçek değerler ile tahmin edilen değerler arasındaki standart sapmayı verir. Tahmin edilen değerlerin orijinal verilerden ne kadar uzakta olduğunu ifade eder. RMSE, sıfır ile sonsuz aralığında bir değer alabilir. Değerin sıfıra yaklaşması modelin başarı sağladığı, sıfır olması ise modelde hiç hata olmadığı anlamına gelmektedir. RMSE değeri Denklem 3.10'da verildiği gibi hesaplanmaktadır (Erdaş, 2013; Keskinbıçak, 2023).

$$R^2 = \sqrt{\frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \#(3.10)$$

Burada, y_i ve \hat{y}_i gerçek ve tahmin edilen değişkenler, n ise gözlem sayısıdır.

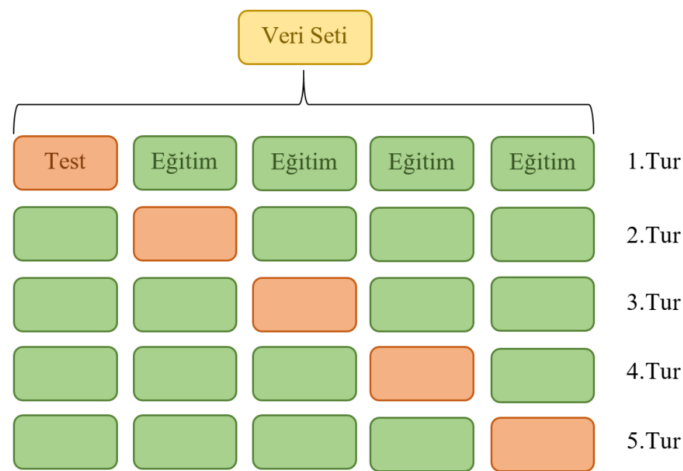
3.5.3.2. Model doğrulama yöntemleri

- **Eğitim ve test kümelerine ayırma**

Modellemede kullanılacak veri setinin bir kısmı eğitim için bir kısmı da test için ayrılmaktadır. Eğitim için ayrılan veri seti ile probleme uygun makine öğrenmesi yönteminin bulunabilmesi için farklı yöntemler denenmektedir. Denemeler sonucunda uygun makine öğrenmesi yöntemine karar verilir ve en son test verisi olarak ayrılan veriler ile modelin performans değerlerine bakılır (Keskinbıçak, 2023).

- **n-katlı çapraz geçерleme**

Veri setinin sayıca yetersiz olduğu durumlarda uygulanan bir yöntemdir. Makine öğrenmesi yöntemlerinin uygulanmasında önemli adımlardan biri eldeki verilerin bir kısmını eğitim bir kısmını da test için ayırmaktır. n-katlı çapraz geçерleme geçерleme yönteminde veri seti n eşit parçaya bölünür ve bu eşit parçalardan n-1 tanesi eğitim için kalan bir tanesi de test için ayrılır. İşlem n defa tekrarlanır ve işlem sonunda her bir parça hem test hem de eğitim verisi olarak kullanılmış olur. n değeri 2, 5 ve 10 alınarak yapılan hesaplama örneklerine literatürde rastlamak mümkündür (Budak, 2015; Filiz, 2019). Bu çalışmada 5'li çapraz geçерleme geçерleme yöntemi kullanılmıştır (Şekil 3.35).



Şekil 3.35. 5'li çapraz geçерleme geçерleme yöntemi (Keskinbıçak, 2023)

Verinin %80'i eğitim için %20'si ise test için ayrılarak modelin başarısı ölçülmektedir. Beş parçaya bölünen veri setinde her bir parça bir turda test verisine

tekabül ederken diğer dört parça eğitim verisi olarak kullanılır. Her bir parça test verisi olarak kullanılacak şekilde beş tur uygulama gerçekleştirilir ve elde edilen doğruluk yüzdesinin ortalaması alınır. Böylece veri setinin her bir parçası hem eğitim hem de test verisi olarak kullanılmış olacaktır (Keskinbıçak, 2023).



4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar 3 ana başlık altında verilmektedir.

- Seçilen yağ numunelerinden elde edilen biyodizel yakıtlara ait özelliklerin incelendiği yakıt analizlerine ait sonuçlar
- Yakıt üretiminde kullanılan yağların bileşenlerinin incelendiği kromatografi analizlerine ait sonuçlar
- Üretilen biyodizel yakıtlara ait özellikler ile üretimde kullanılan yağların bileşimi arasındaki ilişkinin incelendiği makine öğrenmesi analizlerine ait sonuçlar

4.1. Yakıt Analizi Sonuçları

Tez çalışmasının ilk kısmında on farklı bitkisel yağ kullanılarak üretilen biyodizel numunesine ait yakıt analizleri gerçekleştirilmiştir. Yağlara ve biyodizellere ait analiz sonuçları Tablo 4.1’de verilmiştir.

ASTM D6751 standartları yoğunluk için herhangi bir sınırlama getirmemiştir fakat EN 14214 standardına göre biyodizel yoğunluğu $0.86-0.90 \text{ g/cm}^3$ aralığında olmalıdır (Hoekman vd., 2012; Sajjadi vd., 2016). Petrol dizelin yoğunluğu yaklaşık 0.85 g/cm^3 değeri ile biyodizelden daha düşüktür. Standartlara göre bitkisel yağ yoğunluğu $0.91-0.93 \text{ g/cm}^3$ aralığında değişirken reaksiyon sonrası $0.86-0.90 \text{ g/cm}^3$ değerlerine kadar düşmektedir (Sajjadi vd., 2016). Tablo 4.1'e göre on farklı biyodizel için yoğunluk değerleri $0.872-0.887 \text{ g/cm}^3$ aralığındadır dolayısıyla her bir biyodizel için yoğunluk değerinin ilgili standartlarda verilen limit değerler aralığında kaldığı görülmektedir.

Soğuk havadan kaynaklı viskozite artışı haricinde yüksek viskoziteli bir yakıt hava ile yavaş karışacağından tam yanma gerçekleşmez, egzoz dumanı ve emisyon değeri artar. Diğer taraftan, düşük viskoziteli bir yakıt, yakıt enjeksiyon pompalarının tam olarak oturması için yeterli yağlamayı sağlayamadığından aşınma ve kaçaklar artar (Freitas vd., 2011). Bu sebeple belirli aralıklarda optimum viskozite değerleri belirlenmiştir. ASTM D6751 standartlarına göre biyodizel için viskozite değeri $1.9-6.0 \text{ mm}^2/\text{s}$ aralığında olmalıdır. EN 14214 standardı ise bu aralığı $3.5-5.0 \text{ mm}^2/\text{s}$ olarak belirlemiştir (Hoekman vd., 2012; Sajjadi vd., 2016). Transesterifikasyon yönteminin uygulanmasındaki amaç da bitkisel ve hayvansal kökenli yağların viskozitesini bu referans değerlere uyabilecek ölçüde azaltmak ve alternatif dizel yakıtına dönüştürmektir. Tablo 4.1'de görüldüğü üzere yağlara ait viskozite değerleri $40.5-29.81 \text{ mm}^2/\text{s}$ aralığında ölçülmüştür. Biyodizellere ait viskozite değerlerinin ise $6.09-4.21 \text{ mm}^2/\text{s}$ arasında ölçüldüğü görülmektedir. Bu sonuçlara göre her bir yağdan üretilen biyodizelin viskozite değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu durum da yağdan metil estere dönüşümün gerçekleştiğinin bir göstergesidir. Elbette sadece viskozite değeri başarılı bir yakıt üretildiği yorumunu yapmak için yeterli değildir. Diğer tüm yakıt özellikleri tek tek incelenerek ve Tablo 1.2'de verilen biyodizel standartlarında limit değerleri sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmelidir.

Yakıtın en verimli ve kaliteli biçimde yanması setan sayısının yüksek, ateşleme gecikme süresinin düşük olmasına bağlıdır (Sajjadi vd., 2016). Yüksek setan sayısı motorun soğuk çalıştırma performansını artırırken beyaz duman oluşumunu en aza indirmektedir (Ramos vd., 2009; Refaat, 2009). Setan sayısı düşük olan yakıtlar motorun vurunutulu çalışmasına ve eksik yanmadan dolayı gaz ve partikül biçiminde egzoz emisyonlarının artmasına sebep olmaktadır (Knothe vd., 1998; Refaat, 2009). EN 14212 standartlarına göre setan sayısı en az 51 olmalıdır. ASTM standartlarına göre ise

bu değeri 48-67 aralığında olmalıdır (Ramos vd., 2009; Sajjadi vd., 2016). Tablo 4.1 incelendiğinde tüm yakıtlara ait setan sayılarının 57.3-59.7 aralığında olduğu görülmektedir dolayısıyla sonuçlar ilgili standart ile uyum içerisindedir.

Yanma ısısı ya da yakıtın ısı değeri ile alakalı ASTM D6751 ve EN 14214 standartlarında herhangi bir sınırlandırma yoktur. Fakat Avrupa standartları ısıtmada kullandıkları biyodizel için alt ısı değeri 35 MJ/kg olarak belirlemişlerdir (Knothe, 2008). Literatürde bu özellik bazı çalışmalarda alt ısı değeri, bazı çalışmalarda üst ısı değeri bazılarında ise ısı değeri olarak karşımıza çıkmaktadır. Genelde petrol dizelinin ısı değeri yaklaşık 46 MJ/kg değeri ile ortalama 39.57-41.33 MJ/kg aralığında bir değere sahip olan biyodizelden yaklaşık %12 daha yüksektir (Sajjadi vd., 2016). Tablo 4.1'e göre yakıtlara ait en düşük ve en yüksek ısı değerleri sırasıyla 38,64 ve 39,64 MJ/kg olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu değerlerin Avrupa standartlarıncı belirlenen 35 MJ/kg alt ısı değerinin üzerinde olması sebebiyle standartlara uygun olduğu söylenebilir.

Soğukta akış özelliklerinde bulutlanma noktası ASTM D6751'de yer alır fakat herhangi bir limit belirlenmemiştir. Bunun sebebi ise ABD'de hava koşullarındaki keskin değişikliklerdir. Fakat yakıtın kullanıldığı bölgenin minimum sıcaklık değerinden 6°C daha düşük olması kabul edilmektedir (Van Gerpen vd., 2004; Şahin, 2021). Tablo 4.1'de görüldüğü üzere biyodizel numuneleri için bulutlanma noktası 11.2 ile -1.1°C aralığında ölçülmüştür. Yerfıstığı ve pamuk yağından üretilen biyodizellere ait bulutlanma noktası değerleri sırasıyla 11.2°C ve 6.8°C'dir. Diğer sekiz biyodizel ile kıyaslandığında soğukta akış özelliklerinin kötü olduğu ve sıfırın altında seyreden hava sıcaklıklarında kullanımının uygun olmadığı görülmektedir.

Akma noktası genellikle bulutlanma noktasının birkaç derece altıdır bu noktadan sonra yakıt jelleşmeye başlayacağından akıcılığını kaybetmektedir. Tablo 4.1'de verilen akma noktası sıcaklıkları -12.2 ve 8.6°C aralığındadır. Bulutlanma noktasında olduğu gibi en düşük ve en yüksek sıcaklık değerleri kanola ve yerfıstığına aittir.

Donma noktası yakıtın tamamen donduğu sıcaklıktır ve Tablo 4.1'de görüldüğü üzere en düşük ve en yüksek sıcaklık değerleri sırasıyla -20 ve 5.2°C olarak kaydedilmiştir. Bulutlanma, akma ve donma noktaları her bir biyodizel için ayrı ayrı incelendiğinde beklenen şekilde bulutlanmanın ilk görüldüğü sıcaklıktan donma sıcaklığına doğru azalma eğiliminde olduğu görülmektedir.

Soğuk filtre tıkanma noktası bulutlanma noktasında meydana gelen kristallerin küme haline geldiği sıcaklıktır ve yakıtın filtreden geçebileceği en düşük sıcaklık

değeridir. Bu özellik Avrupa standartlarında yer almakla birlikte herhangi bir limit değerden söz edilmemektedir. Tablo 4.1 incelendiğinde CFPP değerlerinin -11 ile 7°C aralığında ölçüldüğü görülmektedir. Üretilen on biyodizel için genel bir değerlendirme yapılırsa soğukta akış özelliği en iyi olan kanola yağından üretilen biyodizeldir.

ASTM D6751 standartlarına göre parlama noktası 130°C üzerinde olmalıdır fakat EN 14214 Avrupa standartlarına göre bu değer minimum 120°C'dir. Brezilya standartları (ANP 07/2008) daha esnektir ve bu değer 100°C olarak belirlenmiştir (Boog vd., 2011; Sajjadi vd., 2016). Tablo 4.1'de verilen parlama noktası sıcaklıkları incelendiğinde 110-150°C aralığında olduğu görülmektedir. Kanola yağından üretilen biyodizel (110°C) haricinde tüm yakıtların limit değerinin üzerinde olduğu ve standartlarla uyumlu olduğu görülmektedir. Üretilen biyodizeller arasında sadece kanola biyodizeli 110 °C olarak ölçülmüştür, diğer biyodizelere ait parlama noktası değerleri limit değerinin üzerinde ölçülmüştür.

EN ISO12937 standardına göre biyodizel yakıtın su içeriğinin kütle başına maksimum değeri 500 ppm olarak kabul edilmektedir (Öğüt ve Oğuz, 2006). Tablo 4.1'e göre en düşük ve en yüksek su içeriği değerleri 146.11 ppm (haşhaş) ve 489.36 ppm (mısır) olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla tüm değerler standartlar ile uyumludur. Burada haşhaş ve yerfıstığı yağından üretilen biyodizellere ait su içeriğinin diğerlerinden daha düşük ölçülmesinin sebebi bu numunelerin analizler esnasında havadaki neme maruz kalmasından dolayı tekrar kurutma işleminin uygulanmasıdır.

Renk tayini daha çok üretilen hammaddenin çeşidine ve yetiştirme şartlarına göre değişiklik göstermektedir.

Yakıtların içeriğindeki kükürt, su ve asit bileşikler bakır aksamalarda kararmaya neden olduğundan yakıtta bakır şerit korozyon testi uygulanmaktadır. TS 2741 EN ISO 2160 standardına göre bakır şeritler için bazı sınıflandırmalar mevcuttur. Tablo 4.1'de yer alan bakır şerit korozyon değerleri standartta yer alan en düşük sınıfa ait 1a değerinde ölçülmüştür. Bir başka ifadeyle yeni parlatılmış bakır şerit ile hemen hemen aynı renkte açık turuncu sınıfı ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Yakıt analizleri sonucunda üretilen 10 çeşit biyodizelin büyük oranda tüm yakıt özelliklerinin standartlara uygun olduğu görülmektedir.

4.2. Bitkisel Yağ Numunelerinin Kromatografi Analizlerine Ait Sonuçlar

Tez çalışmasının ikinci kısmında hammadde olarak kullanılan on farklı bitkisel yağın yağ asidi kompozisyonları gaz kromatografisi tekniği ile tayin edilmiştir. Kromatografi analizleri sonucunda elde edilen her bir numuneye ait kromatogramlar Şekil 4.1-10'da verilmektedir. Analiz sonuçları ise g yağ asidi/100 g toplam yağ asidi cinsinden Tablo 4.1'de verildiği gibidir.

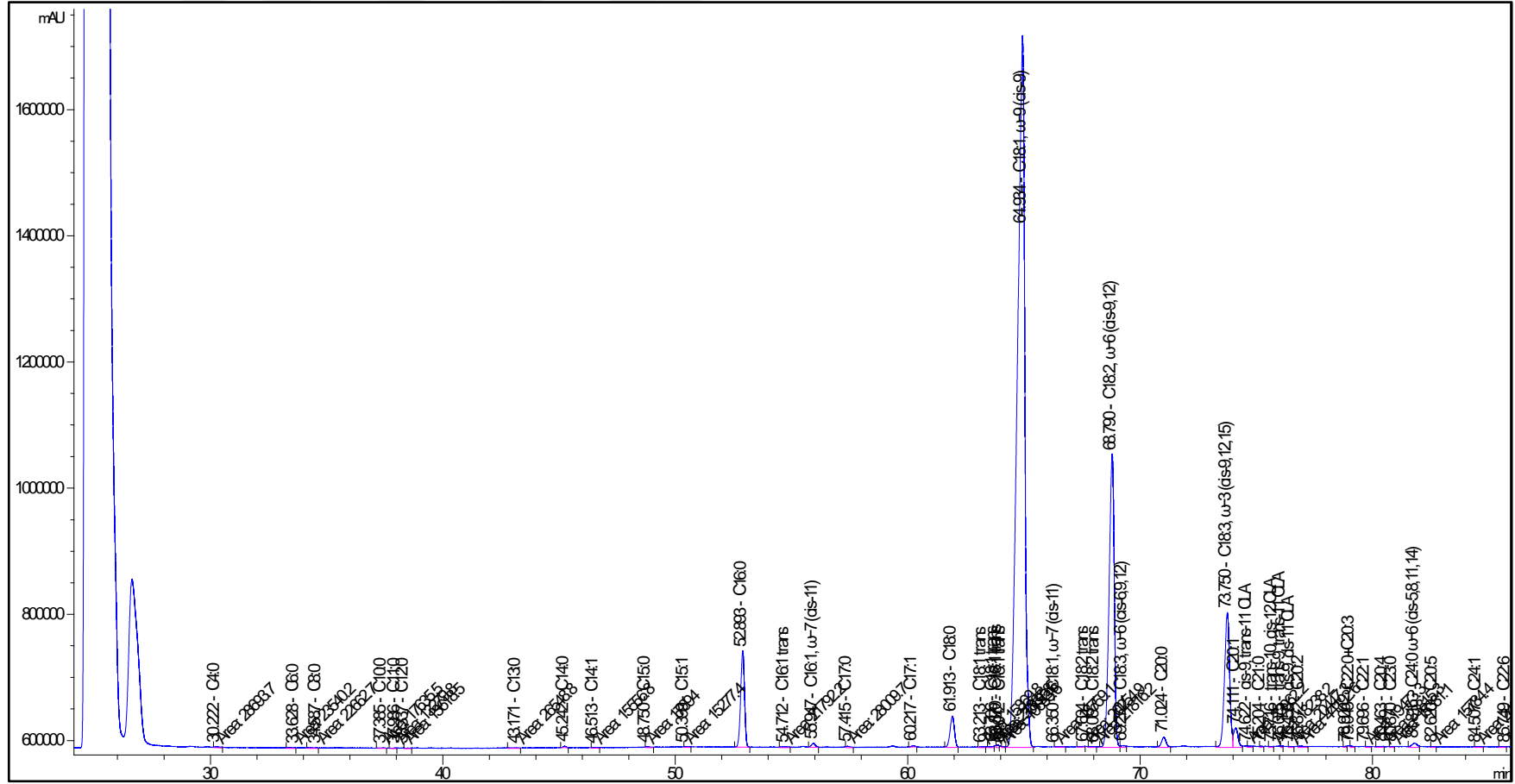
Tablo 4.1'deki veriler incelendiğinde her bir yağ numunesi için C4-C24 aralığında farklı yapılarda yağ asitlerinin kompozisyonu görülmektedir. Bu çalışma kapsamında yağ seçiminde gözetilen kriterlerden biri doyma dereceleridir. Tabloda her bir numune için \sum SFA, \sum MUFA ve \sum PUFA değerleri de verilmektedir. Değerler incelendiğinde numunelerin doymuş, doymamış, çoklu doymamış yağ asitleri içeriği bakımından birbirinden farklı olduğu görülmektedir.

\sum PUFA miktarındaki azalma yakıtın soğukta akış özellikleri üzerinde olumlu etki yapmaktadır (Verma ve Sharma, 2016). Tablo 4.1'deki değerler incelendiğinde kanola ve fındık yağlarının \sum PUFA değerleri sırasıyla 27.61 ve 13.45 olarak ölçülmüştür. Bu sonuca göre diğer biyodizellere kıyasla kanola ve fındık yağlarından elde edilen biyodizellerin soğukta akış özelliklerinin oldukça iyi olduğu görülmektedir.

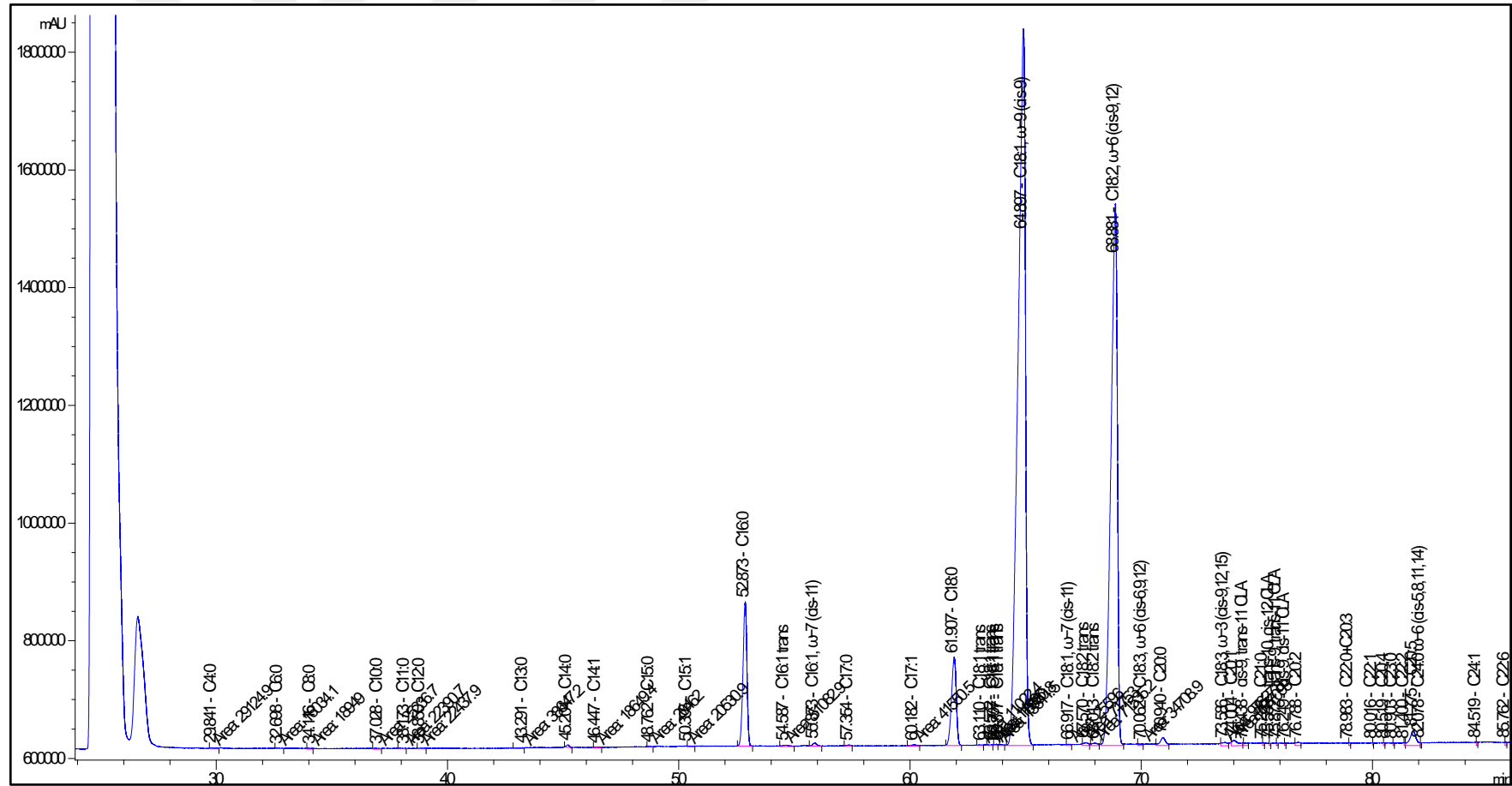
Tablo 4.2. Bitkisel yağ numunelerine ait GC–FID yağ asit profili analiz sonuçları (%) [g yağ asidi/100 g toplam yağ asidi]

Yağ asitleri	Bitkisel Yağlar									
	Kanola Yağı	Ayçiçek Yağı	Mısır Yağı	Aspir Yağı	Yerfıstığı Yağı	Pamuk Yağı	Fındık Yağı	Ceviz Yağı	Haşhaş Yağı	Kenevir Yağı
C4:0 (butanoik asit)	0,0730	0,0560	0,0490	0,0830	0,1020	0,0690	0,0540	0,0590	0,1020	0,0460
C6:0 (hexanoik asit)	0,0600	0,0310	0,0310	0,0630	0,0610	0,0730	0,0440	0,0620	0,0420	0,0430
C8:0 (octanoik asit)	0,0580	0,0370	0,0310	0,0540	0,0680	0,0420	0,0400	0,0510	0,0460	0,0360
C10:0 (decanoik asit)	0,0450	0,0490	0,0490	0,0780	0,0590	0,0780	0,0420	0,0680	0,0410	0,0520
C11:0 (undecylic acid)	0,0340	0,0430	0,0430	0,0480	0,0620	0,0620	0,0530	0,0480	0,0350	0,0330
C12:0 (dodecanoik asit)	0,0350	0,0430	0,0640	0,0540	0,1100	0,0690	0,0420	0,0450	0,0420	0,0450
C13:0 (tridecylic acid)	0,0680	0,0750	0,1920	0,4150	0,1330	0,0820	0,1470	0,1160	0,0730	0,1700
C14:0 (myristik asit)	0,0560	0,0710	0,1010	0,1070	0,1330	0,6660	0,1110	0,0450	0,0530	0,0460
C14:1 (myristoleik asit. n9)	0,0400	0,0360	0,0980	0,0570	0,0790	0,0720	0,0610	0,0330	0,0750	0,0320
C15:0 (pentadecanoik asit)	0,0460	0,0400	0,0740	0,0560	0,0640	0,0590	0,0590	0,0470	0,0570	0,0230
C15:1 (ginkgolik asit)	0,0390	0,0400	0,0360	0,0750	0,0840	0,0550	0,1170	0,0940	0,0620	0,0290
C16:0 (palmitik asit)	4,5010	5,5990	11,9920	6,6380	9,7880	21,7060	5,9900	6,9090	8,8620	6,9610
C16:1 trans	0,0560	0,0990	0,1000	0,0820	0,1410	0,1730	0,0690	0,0760	0,1180	0,1110
C16:1, ω-7 (cis-11) (palmitoleik asit)	0,1850	0,1240	0,1760	0,0910	0,1200	0,5200	0,1900	0,1050	0,1260	0,0990
C17:0 (heptadecanoik asit)	0,0720	0,0340	0,0600	0,1070	0,0730	0,1230	0,0480	0,1130	0,0970	0,0650
C17:1 (heptadecanoleik asit)	0,0570	0,0800	0,1330	0,0630	0,1140	0,0770	0,0760	0,1250	0,0330	0,1090
C18:0 (stearik asit)	1,6450	4,1740	1,9790	2,7100	3,1770	2,3970	2,5510	2,6220	2,3470	3,0070
C18:1 trans	0,0410	0,0210	0,0380	0,0380	0,0610	0,0290	0,0290	0,0330	0,0950	0,0320
C18:1 trans	0,0560	0,0230	0,0400	0,0340	0,0510	0,0460	0,0770	0,0510	0,0620	0,0240
C18:1 trans	0,0770	0,0360	0,0630	0,0420	0,0850	0,0580	0,0920	0,0750	0,0490	0,0430
C18:1 trans	0,0270	0,0260	0,0430	0,0290	0,0630	0,0480	0,0300	0,0360	0,0300	0,0410
C18:1, ω-9 (cis-9) (oleik asit)	63,1130	52,2310	31,0380	13,1950	51,4510	16,8330	75,3970	26,6360	13,4340	16,6440
C18:1, ω-7 (cis-11) (oleik asit)	0,0480	0,0490	0,3060	0,0470	0,1140	0,0640	0,0540	0,1620	0,0880	0,0250
C18:2 trans	0,0520	0,1390	0,4260	0,1830	0,1930	1,0580	0,2210	1,9030	0,1420	0,1340
C18:2 trans	0,0560	0,1380	0,3900	0,1020	0,1830	1,0520	0,2340	1,9070	0,0700	0,0530
C18:2, ω-6 (cis-9,12) (linoleik asit)	18,4300	34,1380	49,3480	73,7570	27,0970	52,5980	12,4900	52,1780	71,6560	54,0800
C18:3, ω-6 (cis-6,9,12) (linolenik asit)	0,0930	0,0670	0,2230	0,0900	0,0660	0,0610	0,0290	0,0830	0,0760	0,0300
C20:0 (arachidik asit)	0,5650	0,4250	0,5610	0,4310	1,3420	0,2970	0,1950	1,1960	0,2390	0,8280
C18:3, ω-3 (cis-9,12,15) (linolenik asit)	8,3290	0,1890	0,9670	0,1850	0,7890	0,1720	0,2010	3,3040	0,7210	16,0810
C20:1 (gadoleik asit)	1,0360	0,3420	0,1470	0,2200	1,0670	0,0430	0,2570	0,2920	0,1200	0,0580

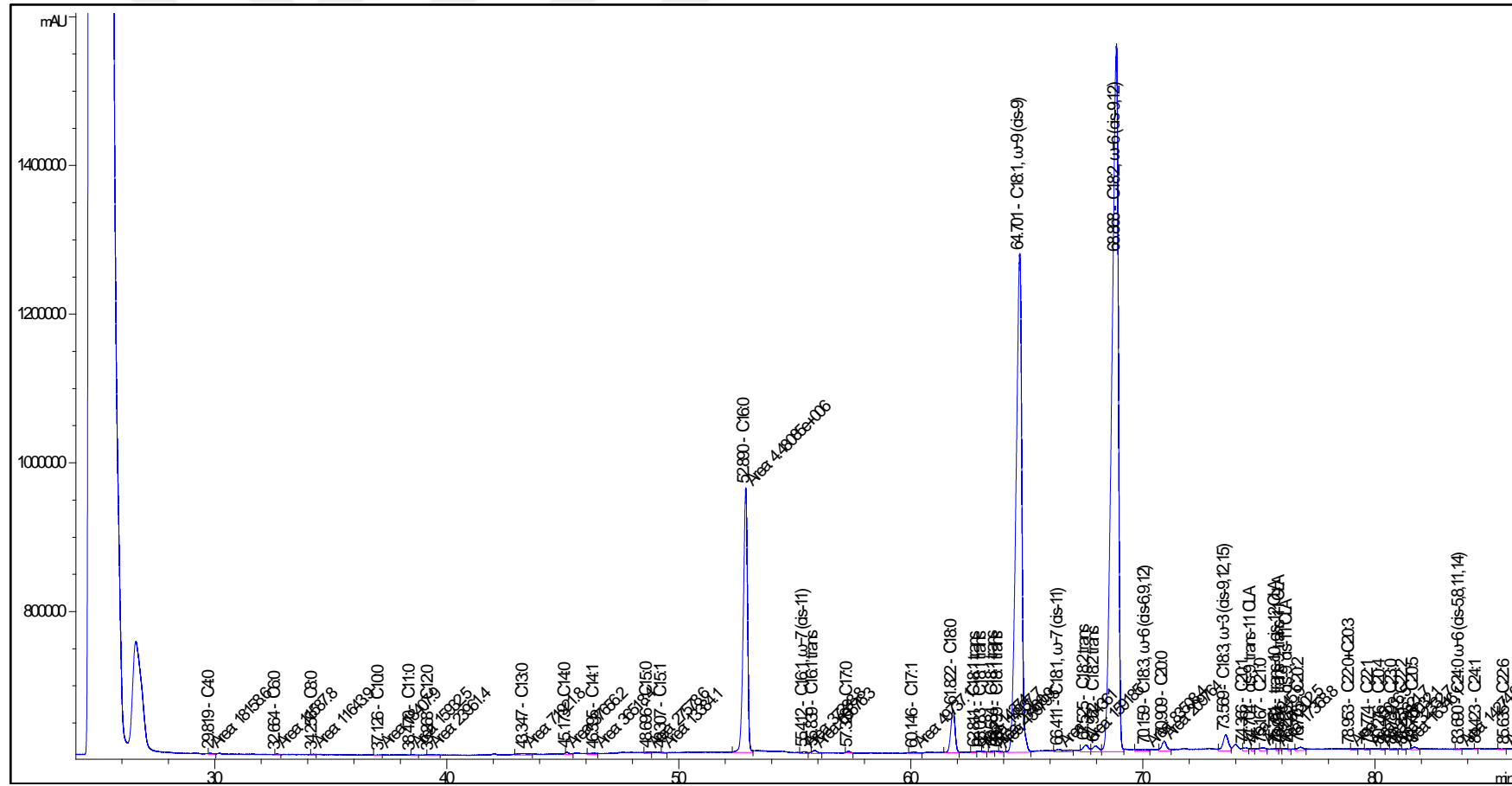
cis-9, trans-11 CLA	0,0610	0,1000	0,0710	0,0350	0,0700	0,0530	0,0620	0,1140	0,0420	0,0300
C21:0 (heneicosylic acid)	0,0420	0,0380	0,1770	0,0420	0,0620	0,0610	0,0670	0,0970	0,1550	0,0220
trans-10, cis-12 CLA	0,0470	0,0250	0,0460	0,0660	0,0900	0,0690	0,0630	0,0740	0,0350	0,0280
trans-9, trans-11 CLA	0,0270	0,0340	0,0280	0,0460	0,0810	0,0650	0,0570	0,0610	0,0370	0,0330
cis-9, cis-11 CLA	0,0520	0,0280	0,0410	0,0540	0,0750	0,0310	0,0690	0,0940	0,0370	0,0240
C20:2 (eikosadienoik asit)	0,1130	0,1410	0,2310	0,0370	0,0830	0,2950	0,1690	0,4130	0,1800	0,0190
C22:0+C20:3 (behenic acid+eicosatrienoic acid)	0,0350	0,0410	0,0940	0,0660	0,0660	0,0350	0,0620	0,0420	0,1230	0,0310
C22:1 (erucik asit)	0,0520	0,0220	0,0620	0,0690	0,0620	0,0510	0,0390	0,0290	0,0300	0,3100
C20:4 (lignocerik asit)	0,0500	0,0310	0,0540	0,0460	0,0550	0,0580	0,0490	0,0360	0,0380	0,1070
C23:0 (trikosylik asit)	0,0610	0,0300	0,0870	0,0420	0,0760	0,0670	0,0670	0,0370	0,0300	0,0240
C22:2 (cis-13,16-doco. asit)	0,0390	0,0300	0,0440	0,0460	0,0730	0,0580	0,0430	0,1440	0,0410	0,0220
C20:5 (eikosapentaeno.asit)(EPA)	0,2760	0,8970	0,1570	0,2110	1,9190	0,1190	0,1100	0,0770	0,0430	0,0250
C24:0 ω-6 (cis-5,8,11,14) (ligno. asit)	0,0400	0,0310	0,0380	0,0300	0,0620	0,0350	0,0520	0,1050	0,0370	0,2630
C24:1 (nervonik asit)	0,0610	0,0440	0,0280	0,0380	0,1940	0,2740	0,0430	0,0940	0,1540	0,0410
C22:6 (docosaheptaenoic acid) (DHA)	0,0530	0,0500	0,0430	0,0390	0,1030	0,0480	0,0470	0,1050	0,0290	0,0410
ΣSFA	7,40	10,78	15,53	10,96	15,37	25,89	9,56	11,62	12,26	11,66
ΣMUFA	64,63	52,97	32,02	13,86	53,29	17,99	76,23	27,57	14,12	17,35
ΣPUFA	27,61	35,77	51,35	74,68	30,57	53,66	13,45	56,73	73,06	70,55
trans FAs	0,37	0,48	1,10	0,51	0,78	2,46	0,75	4,08	0,57	0,44



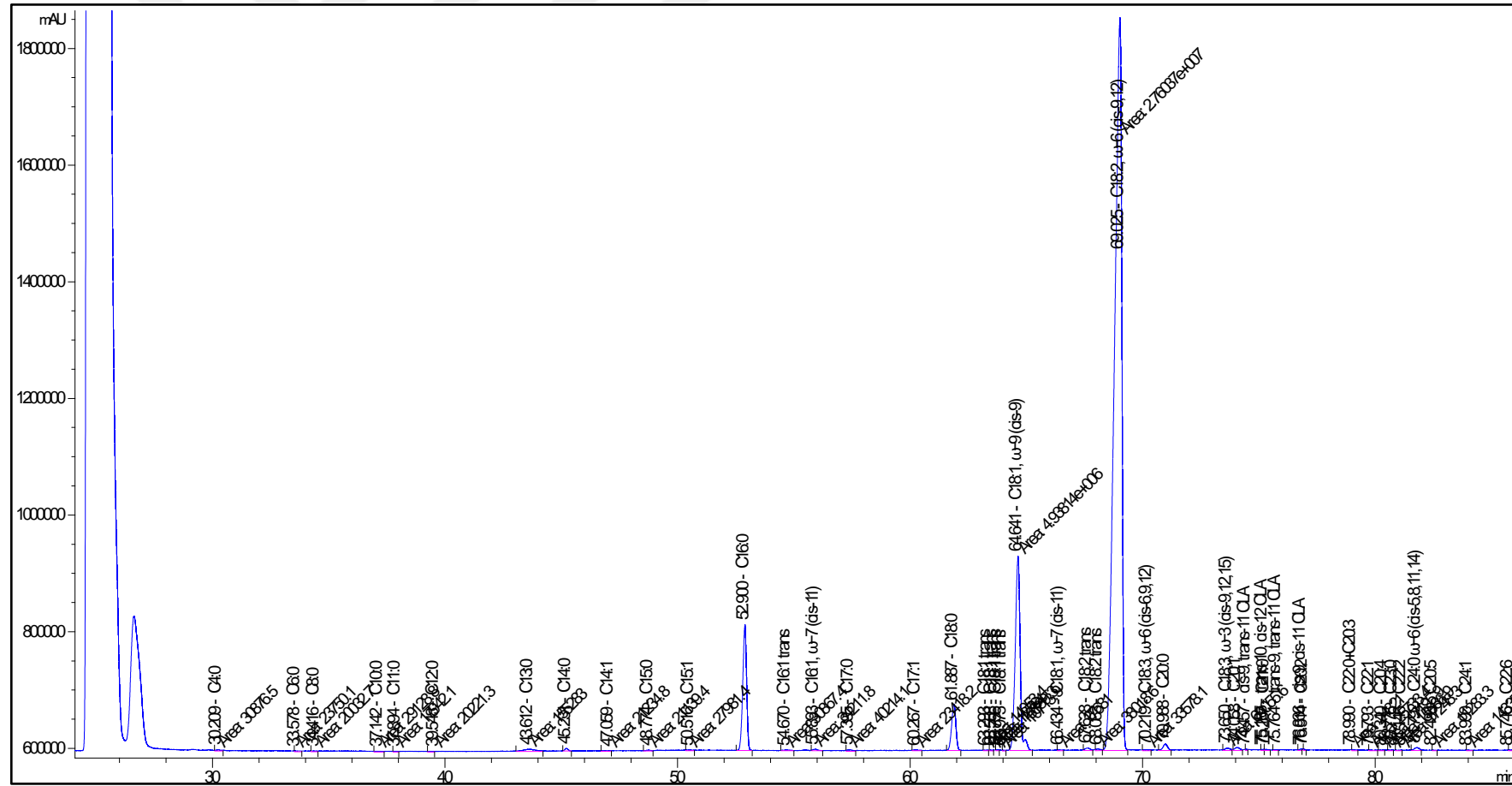
Şekil 4.1. Kanola yağı numunesine ait yağ asit kompozisyonu analiz kromatogramı



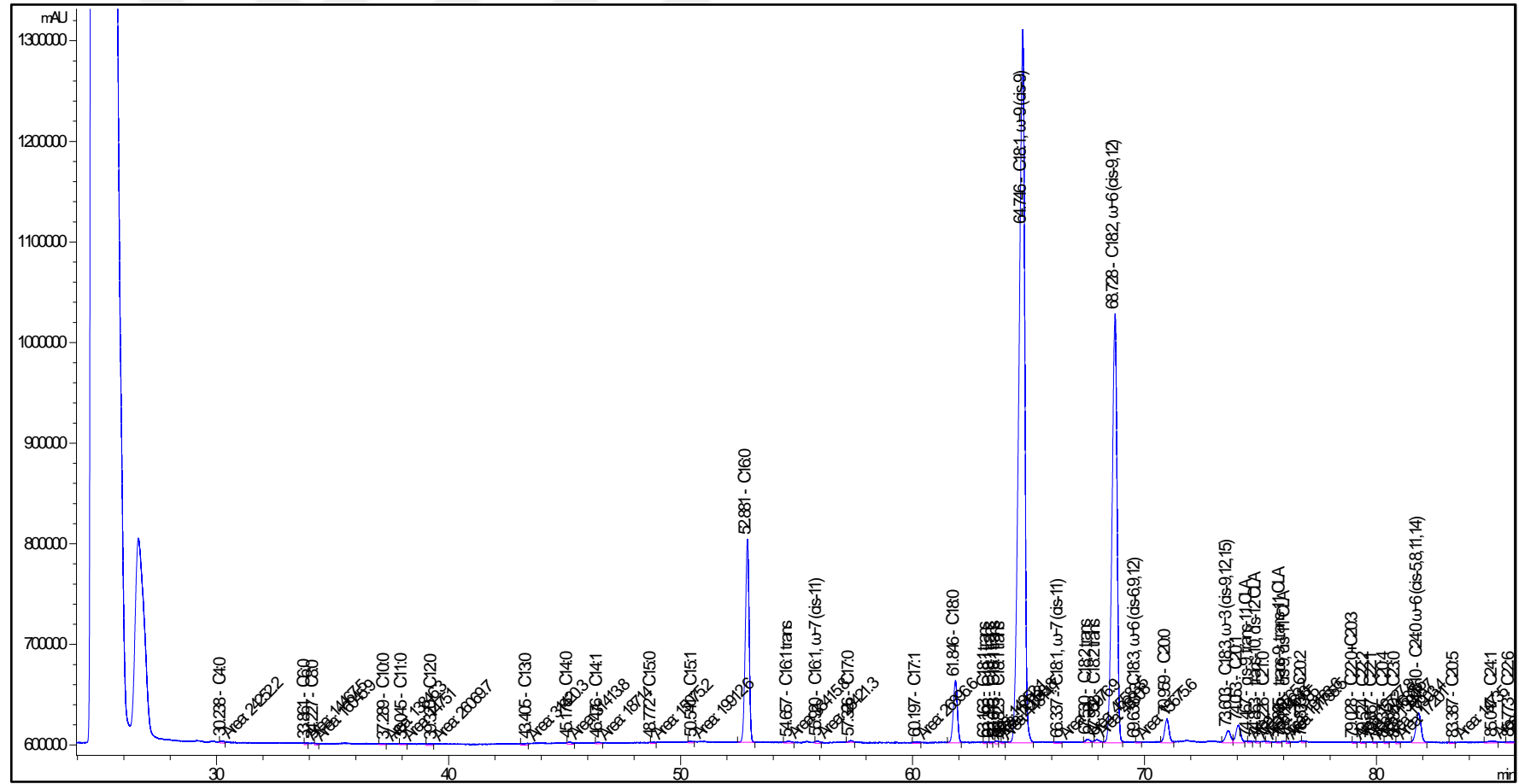
Şekil 4.2. Ayçiçek yağı numunesine ait yağ asit kompozisyonu analiz kromatogramı



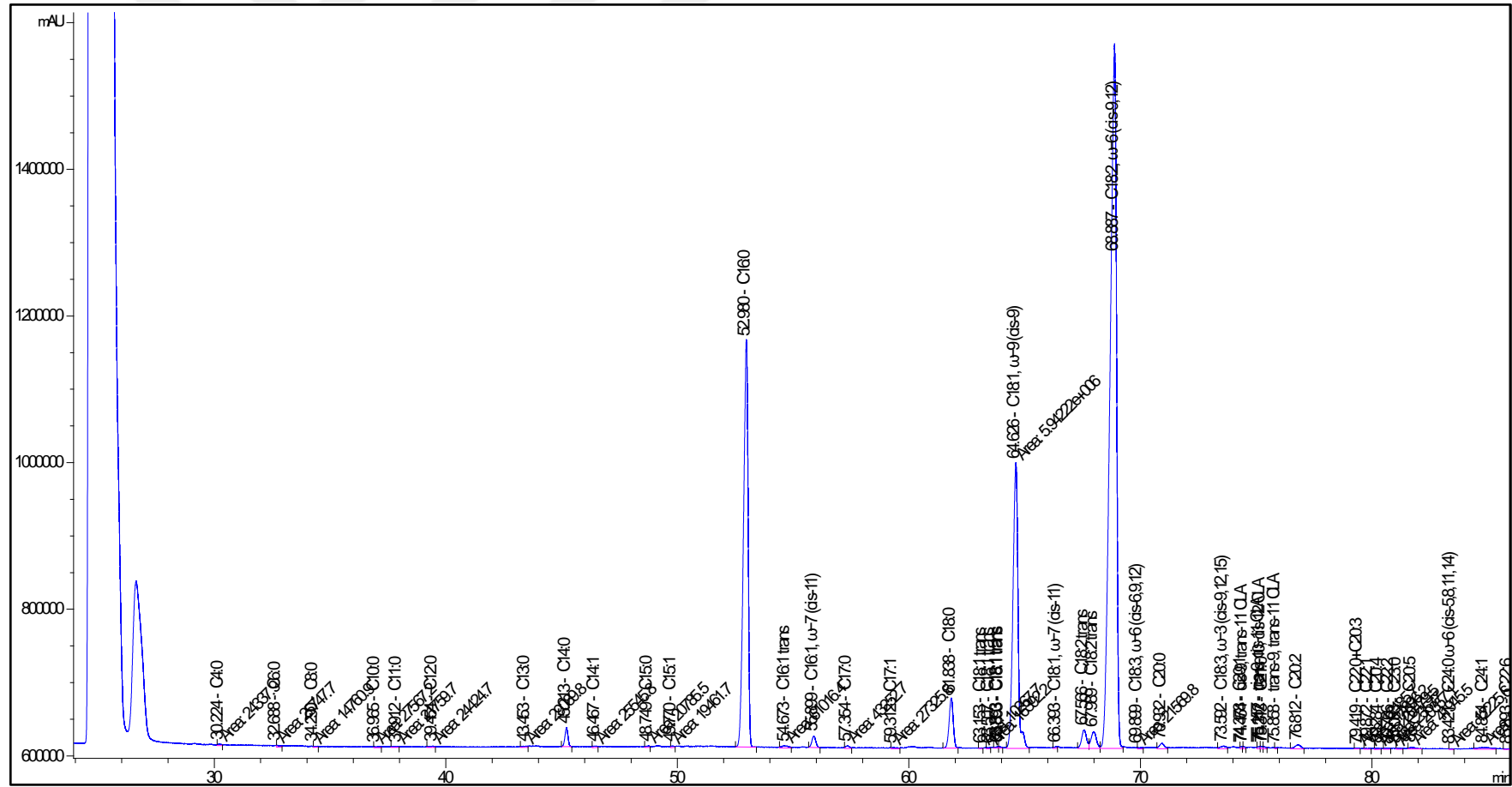
Şekil 4.3. Mısır yağı numunesine ait yağ asit kompozisyonu analiz kromatogramı



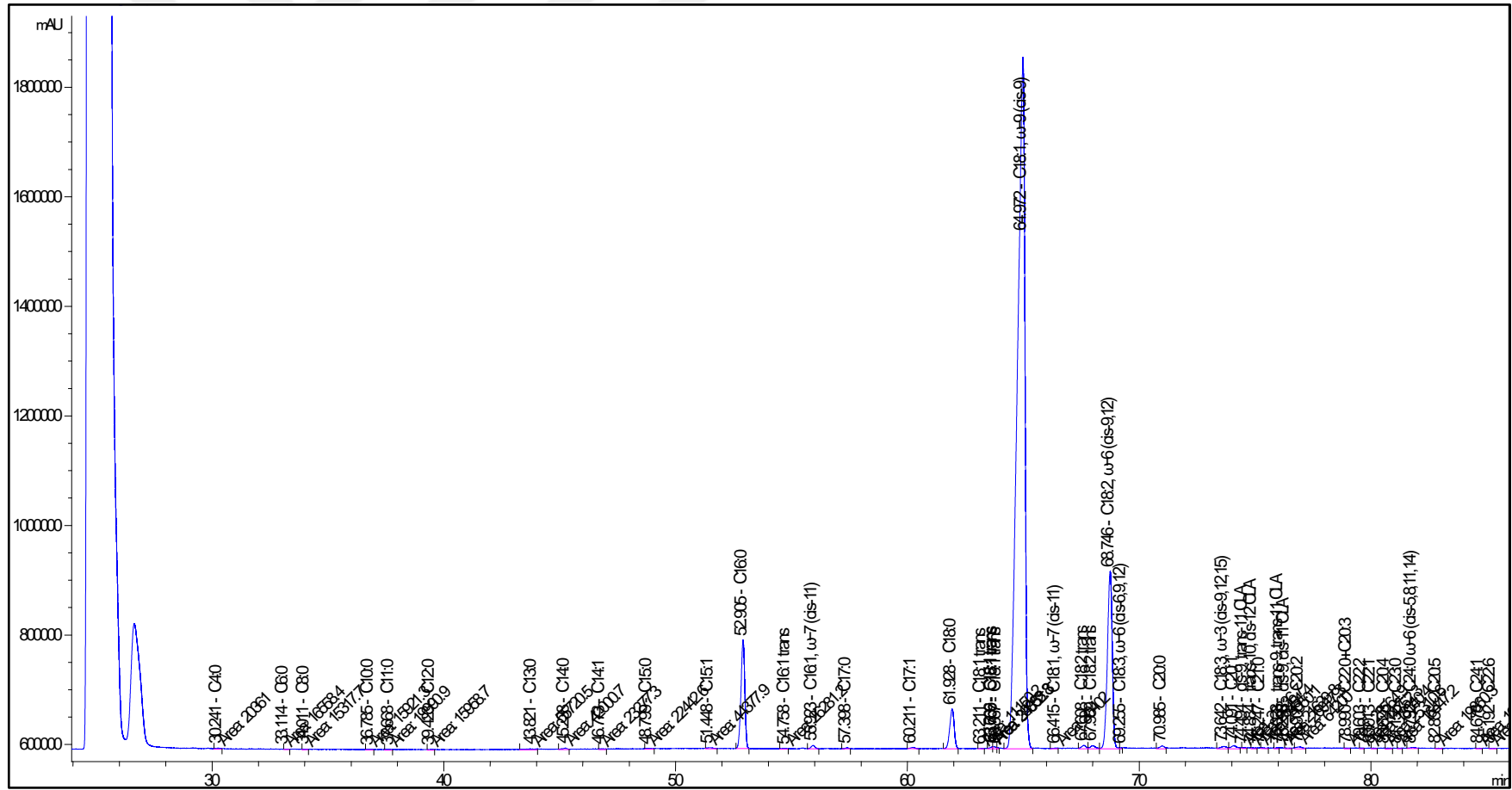
Şekil 4.4. Aspirin yağı numunesine ait yağ asit kompozisyonu analiz kromatogramı

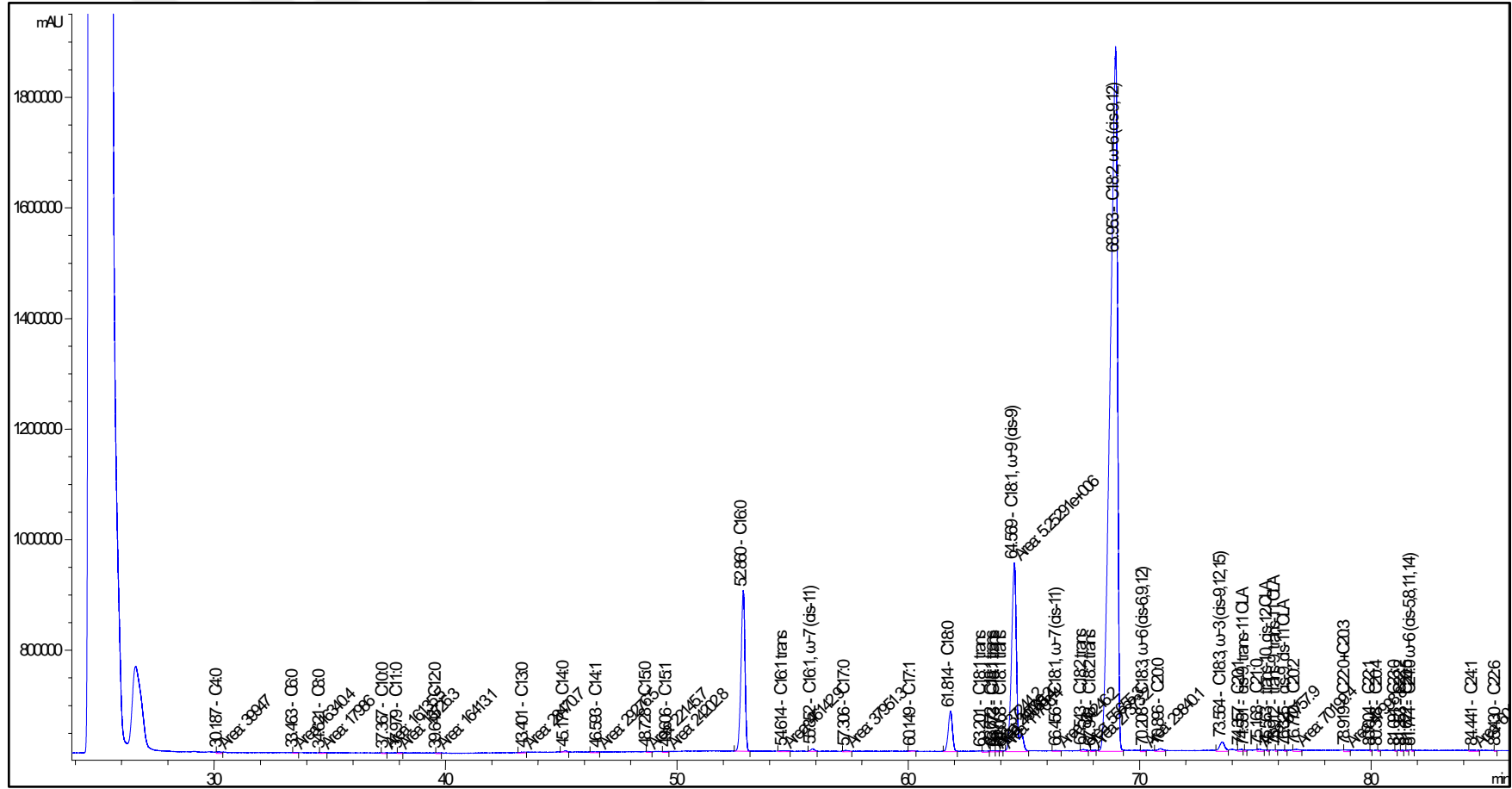


Şekil 4.5. Yerkıstığı yağı numunesine ait yağ asit kompozisyonu analiz kromatogramı

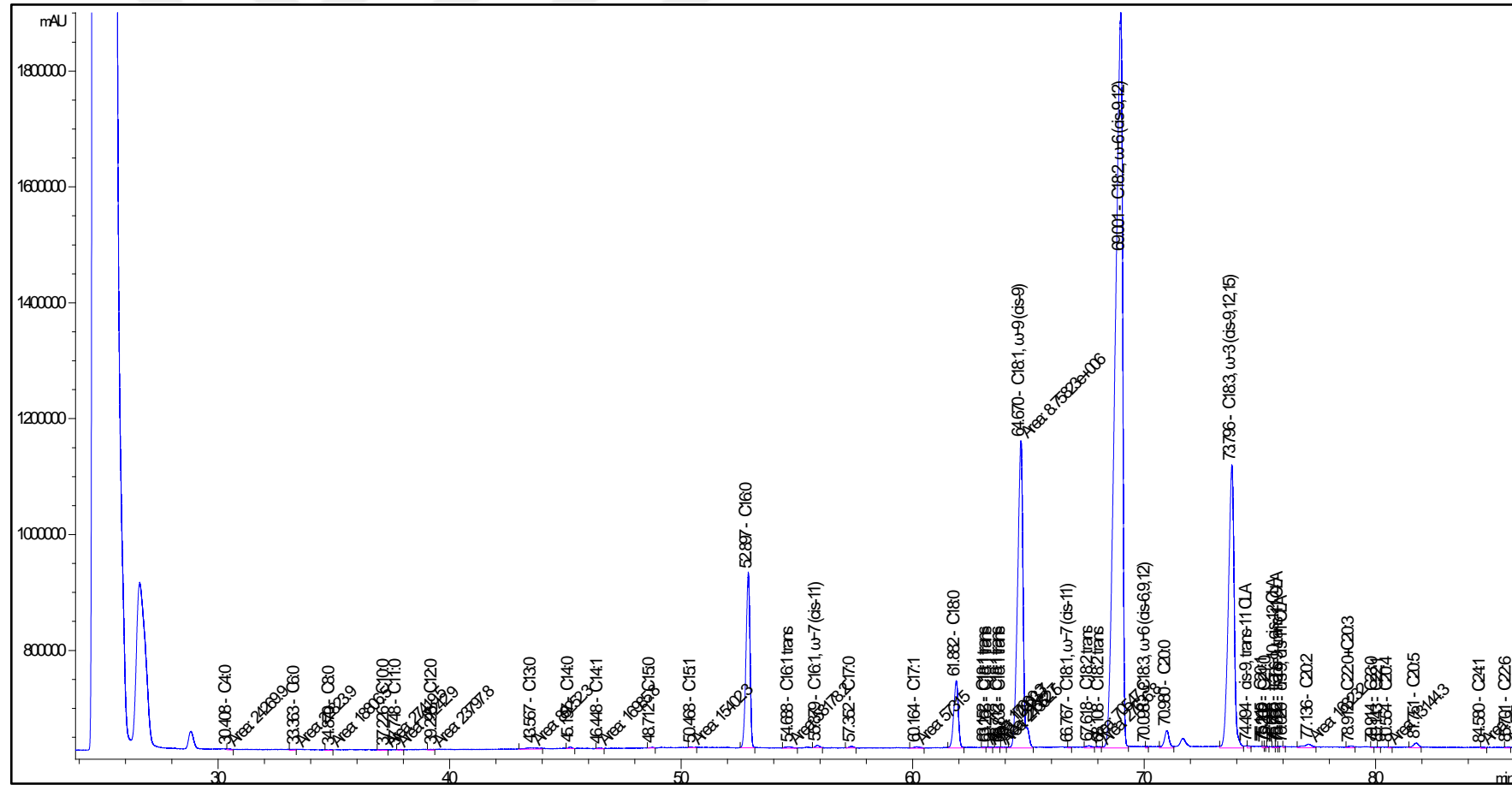


Şekil 4.6. Pamuk yağı numunesine ait yağ asit kompozisyonu analiz kromatogramı





Şekil 4.9. Haşhaş yağı numunesine ait yağ asit kompozisyonu analiz kromatogramı

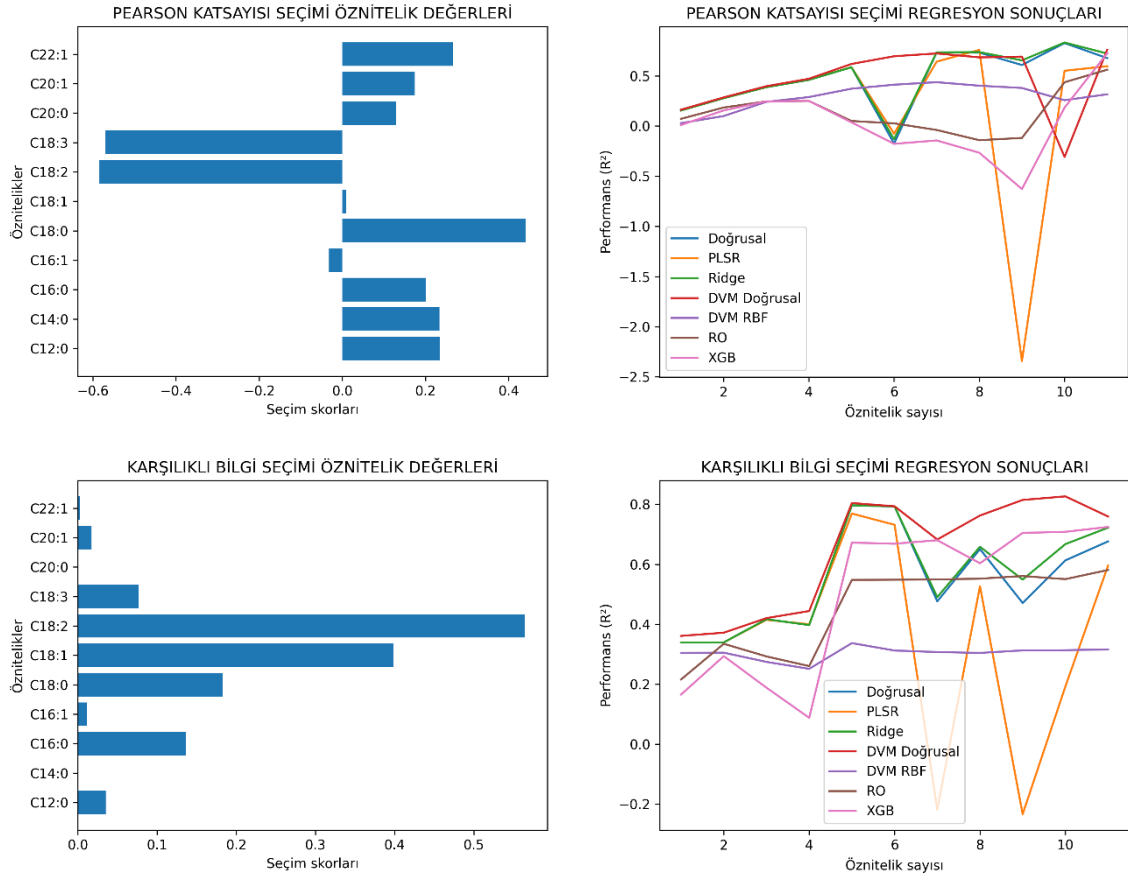


Şekil 4.10. Kenevir yağı numunesine ait yağ asit kompozisyonu analiz kromatogramı

setan sayısının belirlenmesinde yüksek korelasyona sahip olduğunu ortaya koymuştur. Karşılıklı bilgi yöntemi ise C18:2'ye ilaveten C18:1 (oleik asit) ve C18:0'ın önemli öznelikler olduğunu ortaya koymuştur. Pearson katsayısına göre ise C18:2 ve C18:3'ün ters korelasyona sahip olduğu tespit edilmiştir. Yani C18:2 ve C18:3'ün miktarı arttıkça setan sayısının düştüğü söylenebilir. Literatürdeki bazı çalışmalar da bu ifadeyi desteklemektedir (Ramos vd., 2009; Ramirez-Verduzco vd., 2012; Bemani vd., 2020). C18:0'ın ise pozitif korelasyona sahip olduğu, yani artışının ise setan sayısını arttırdığı değerlendirilebilir. Bu sonuç literatürdeki çalışmaları destekler niteliktedir (Miraboutalebi vd., 2016). Pek çok çalışmaya göre doyma derecesi arttıkça setan sayısı da artmaktadır. Bir başka ifadeyle çift bağ sayısındaki artış setan sayısında düşüşe sebep olmaktadır (Knothe vd., 1998; Refaat, 2009; Ramos vd., 2009). Pearson katsayısına göre diğer öznelikler 0.3'ten küçük değerlere sahip oldukları için setan sayısı ile aralarında zayıf bir istatistiksel ilişki bulunmaktadır. F-skor ve pearson katsayısı yöntemleri C16:1 (palmitoleik asit) ve C18:1 metil esterlerinin setan sayısını belirlemede en zayıf ilişkiye sahip öznelikler olduğunu ortaya koymuştur. Buna karşılık karşılıklı bilgi yöntemi ise sırasıyla C14:0 (miristik asit), C20:0 (araşidik asit) ve C22:1(erusik asit)'in setan sayısı ile ilişkisinin istatistiksel olarak zayıf olduğunu ortaya koymuştur.

Belirtilen filtre yöntemlerinin seçtiği metil esterler ile kurulan tahmin modellerinin 5'li çapraz geçirme kullanarak elde ettiği performans (R^2 değerleri) ise Şekil 4.11'de verilmiştir. Tablo 4.4'te ise bahsi geçen filtre yöntemleri tarafından en değerli ve en değersiz seçilen öznelikler özetlenmektedir. Öznelikler f-skor değerlerine göre sıralanmış ve her adımda sıradaki yüksek skorlu öznelik değişken kümesine eklenerek regresyon modelleri kurulmuştur. F-skor seçim yöntemi ile seçildiğinde ilk iki özneliğin (C18:3 ve C18:2) setan sayısının açıklanmasında neredeyse %50 payı olduğu görülmektedir. En iyi sonuçların genelde 7 veya 9 tane öznelik seçildiğinde elde edildiği değerlendirilmektedir. Değişken kümesine C20:1 (eikosenoik asit) eklendiğinde tahmin performansı düşerken C20:0 eklendiğinde performansın arttığı görülmüştür. Bu durum C20:0 ve C20:1'in kombinasyonunun setan sayısı ile bireysel korelasyonlarının toplamından daha yüksek bir ilişkiye sahip olduğu şeklinde yorumlanabilir. En iyi R^2 değerlerini ilk 9 özneliği kullanan doğrusal yöntemler (doğrusal regresyon, ridge regresyon ve PLSR) elde etmiştir.

Pearson katsayısı yöntemi ise sadece öznelikler ve setan sayısının korelasyonu değil aynı zamanda da ilişkinin yönü ile ilgili bilgi vermektedir. Pearson katsayısı



Şekil 4.11. F-skor, pearson katsayısı ve karşılıklı bilgi yöntemleri tarafından elde edilen skorlar ve bu yöntemler ile kurulan regresyon modellerinin performansları

Tablo 4.4. F-skor, pearson katsayısı ve karşılıklı bilgi yöntemleri tarafından en değerli ve en değersiz seçilen öznitelikler

Öznitelikler	Korelasyon	Pearson Katsayısı	Karşılıklı Bilgi
C12:0	4,6912	0,2354	0,0356
C14:0	4,6086	0,2334	0,0000
C16:0	3,3555	0,2006	0,1366
C16:1	0,0817	-0,0319	0,0115
C18:0	19,4272	0,4420	0,1832
C18:1	0,0071	0,0094	0,3989
C18:2	41,6595	-0,5852	0,5647
C18:3	38,5131	-0,5701	0,0765
C20:0	1,3437	0,1285	0,0010
C20:1	2,5161	0,1746	0,0176
C22:1	6,1234	0,2666	0,0027

Tablo 4.5'te filtre yöntemleri kullanılarak öznitelik seçimi yapıldığında regresyon modellerinin kaç tane öznitelik kullanarak en yüksek tahmin performansına eriştikleri belirtilmiştir. Önceden rassal olarak ayrılmış olan 82 adet veri eğitim için ve 21 adet veri de test için kullanılmıştır. Eğitim ve test verileri için elde edilen R^2 ve

RMSE değerleri ile 5'li çapraz geçerleme geçerleme kullanılarak elde edilen R^2 değerleri tabloda yer almaktadır. Çapraz geçerleme kullanıldığında f-skor seçimi ile seçilen 9 özniteliği ve ridge regresyon algoritmasını kullanan modelin 0.8607 ile en iyi performansı elde ettiği görülmektedir. Ancak eğitim ve test verisi kullanıldığında Karşılıklı Bilgi yöntemini kullanan doğrusal regresyon 5 öznitelikle test verilerinde 0.8582 R^2 ve 2.4577 RMSE ile en başarılı yöntem olmuştur. Genel olarak bakıldığında en başarılı regresyon algoritmaları doğrusal olanlardır. Bu da setan sayısı tahmin probleminin doğrusal modellere daha iyi oturduğunu düşündürmektedir.

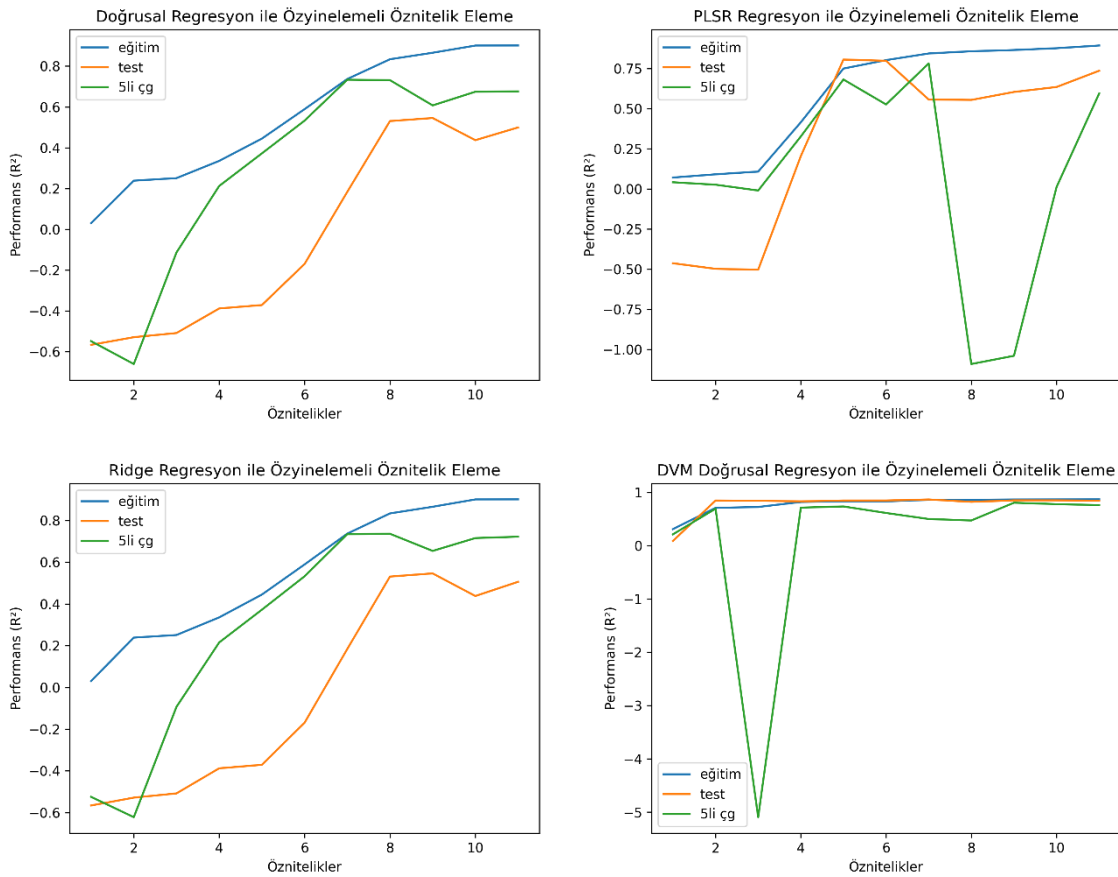
Tablo 4.5. F-Skor, pearson katsayısı ve karşılıklı bilgi öznitelik seçim yöntemleri kullanıldığında regresyon modellerinin elde ettiği en iyi sonuçlar

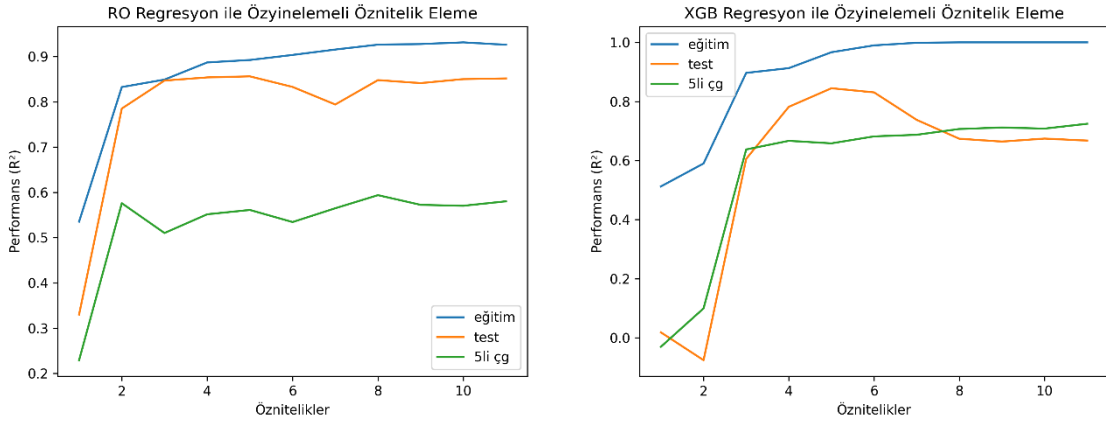
F-Skor Seçimi						
Yöntem	R^2 eğitim	R^2 test	RMSE eğitim	RMSE test	R^2 ÇG	Öznitelik sayısı
Doğrusal	0.8964	0.7152	3.3052	3.4830	0.8596	9
PLSR	0.8884	0.7749	3.4302	3.0965	0.8135	9
Ridge	0.8964	0.7154	3.3052	3.4818	0.8607	9
DVM Doğ.	0.8457	0.7719	4.0345	3.1170	0.8131	7
DVM RBF	0.4817	0.5848	7.3935	4.2053	0.4241	2
RO	0.8860	0.6887	3.4672	3.6414	0.6105	4
XGB	1.0000	0.6676	0.0009	3.7628	0.7245	11
Pearson Katsayısı Seçimi						
Yöntem	R^2 eğitim	R^2 test	RMSE eğitim	RMSE test	R^2 ÇG	Öznitelik sayısı
Doğrusal	0.9002	0.6046	3.2439	4.1036	0.8262	10
PLSR	0.8133	0.5339	4.4369	4.4555	0.7577	8
Ridge	0.9002	0.6050	3.2439	4.1018	0.8316	10
DVM Doğ.	0.8678	0.8435	3.7335	2.5822	0.7594	11
DVM RBF	0.4901	0.3589	7.3335	5.2258	0.4362	7
RO	0.9314	0.8255	2.6889	2.7259	0.5610	11
XGB	1.0000	0.6676	0.0009	3.7628	0.7245	11
Karşılıklı Bilgi Seçimi						
Yöntem	R^2 eğitim	R^2 test	RMSE eğitim	RMSE test	R^2 ÇG	Öznitelik sayısı
Doğrusal	0.8392	0.8582	4.1182	2.4577	0.7967	5
PLSR	0.8312	0.8355	4.2196	2.6471	0.7692	5
Ridge	0.8392	0.8582	4.1182	2.4578	0.7967	5
DVM Doğ.	0.8664	0.8535	3.7541	2.4981	0.8265	10
DVM RBF	0.4004	0.4995	7.9520	4.6174	0.3370	5
RO	0.9208	0.8388	2.8893	2.6203	0.5810	11
XGB	1.0000	0.6676	0.0009	3.7628	0.7245	11

Daha sonra sarmalayıcı öznitelik seçme yöntemlerinden özyinelemeli öznitelik eleme ve sıralı ileri/geri öznitelik seçimi yöntemleri hem ayrılmış eğitim/test verileri ve 5'li çapraz geçerleme geçerleme ile birlikte kullanılmış ve sonuçlar Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te gösterilmiştir.

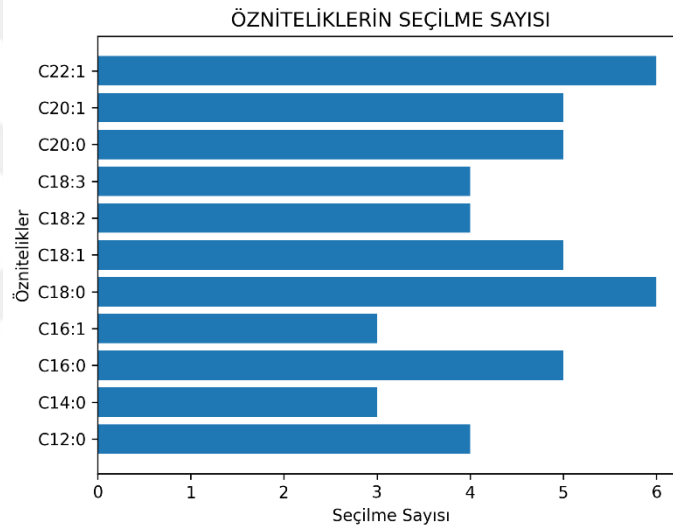
Özyinelemeli öznitelik eleme yöntemi kullanılırken algoritmanın yapısı sebebiyle radyal tabanlı fonksiyon kullanan destek vektör makineleri dahil

edilememiştir. Regresyon modellerinin genelde 4 öznitelik ile en iyi performanslarına ulaştıkları ancak en iyi R^2 değerlerini 7-11 öznitelik kullandıklarında elde ettikleri tespit edilmiştir. PLSR kullanıldığında 11 öznitelikten 8 özniteliğe düşüşte performans kaybının oldukça büyük olduğu gözlemlenmiştir. C16:1 (palmitoleik asit) değişken kümesinden çıkarıldığında R^2 değerinin tekrar 0.5'in üzerine çıktığı görülmüştür. Benzer şekilde doğrusal DVM ile kurulan modellerde değişken kümesinden C18:1 çıkarıldığında R^2 değeri -5'e düşerken C16:1 çıkarıldığında tekrar 0.6929'a yükselmiştir. Rassel Orman ve XGBoost yöntemlerinde de sırasıyla C18:3 ve C18:2'nin değişken kümelerinden çıkarılması performansı ciddi ölçüde düşürmüştür. Şekil 4.13'e göre öz yinelemeli öznitelik eleme yöntemi kullanan regresyon modellerinin en çok tercih ettiği öznitelikler C18:0 ve C22:1'dir. Bunları C16:0, C18:1, C20:0 ve C20:1 izlemektedir. En az tercih edilen öznitelikler ise C14:0 ve C16:1'dir.





Şekil 4.12. Regresyon modellerinin özyinelemeli öznitelik eleme yöntemi kullanıldığında elde ettiği performans



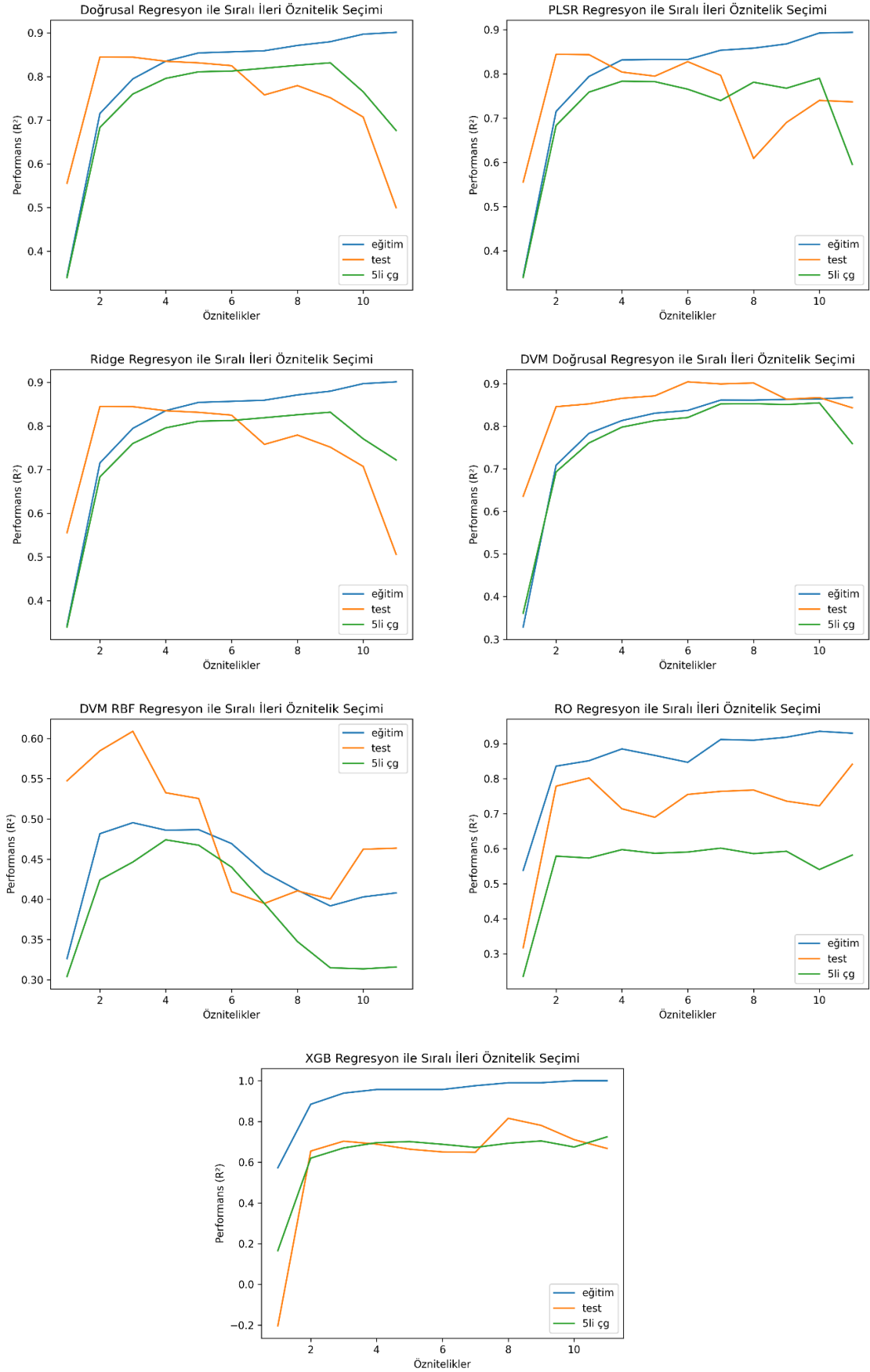
Şekil 4.13. Özyinelemeli öznitelik eleme yöntemi kullanıldığında regresyon modellerinin öznitelikleri seçme sayıları

Tablo 4.6’da özyinelemeli öznitelik eleme yöntemi kullanan regresyon modellerinin elde ettiği en iyi sonuçlar listelenmiştir. Tabloya göre 5’li çapraz geçişleme geçişleme ve test verileri kullanıldığında en yüksek R^2 değerlerini sırasıyla 0.8043 ve 0.8487 ile 9 öznitelik kullanan doğrusal DVM elde etmiştir. Bu değerleri elde ederken C12:0 (dodekanoik asit) ve C14:0 hariç diğer bütün metil esterler kullanılmıştır. Şekil 4.12 incelendiğinde 3 özniteliğe düştüğü zaman DVM modelinin performansının çok düştüğü görülmektedir. Bu da C18:1 metil esterinin değişken listesinden çıkarılması ile gerçekleşmiştir.

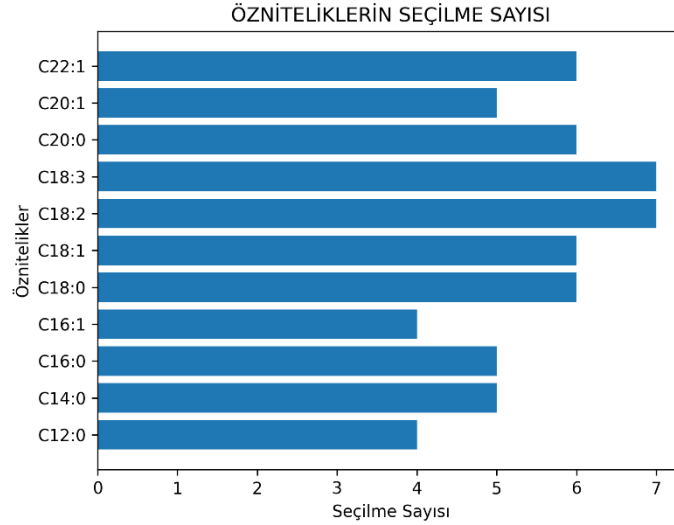
Tablo 4.6. Özyinelemeli öznitelik eleme yöntemi kullanıldığında regresyon modellerinin elde ettiği en iyi sonuçlar

Özyinelemeli Öznitelik Eleme						
Yöntem	R ² eğitim	R ² test	RMSE eğitim	RMSE test	R ² ÇG	Öznitelik sayısı
Doğrusal	0.8337	0.5308	4.1879	4.4707	0.7312	8
PLSR	0.8445	0.5574	4.0496	4.3417	0.7825	7
Ridge	0.8337	0.5311	4.1879	4.4689	0.7362	8
DVM Doğ.	0.8654	0.8487	3.7678	2.5382	0.8043	9
RO	0.9265	0.8481	2.7843	2.5435	0.5938	8
XGB	0.9999	0.6676	0.0009	3.7628	0.7245	11

Sıralı ileri öznitelik seçimi yöntemi kullanıldığında regresyon modellerinin ilk iki öznitelik eklendiğinde performansın gözle görülür bir şekilde arttığı görülmektedir. 7 regresyon modelinin de ilk seçtiği öznitelikler sırasıyla C18:2 ve C18:3'tür. Şekil 4.14'e bakıldığında en düşük performansı radyal tabanlı fonksiyon kullanan destek vektör makinesi (DVM Rbf) göstermiştir. DVM Rbf ilk 4 öznitelikte (sırasıyla C18:2, C18:3, C18:1 ve C16:1) en yüksek R² değerini 0.4741 olarak elde etmiş ve sonrasında öznitelik sayısı arttıkça performansı düşmüştür. En iyi R² değerini de başta DVM doğrusal olmak üzere doğrusal regresyon yöntemleri elde etmiştir. Sıralı ileri öznitelik seçimi yöntemi kullanan regresyon modellerinin en iyi performanslarını elde ettikleri değişken kümesinde seçilen özniteliklerin sayısı Şekil 4.15'te verilmiştir. C18:2 ve C18:3'ün bütün regresyon modelleri tarafından seçildiği görülmektedir. En az tercih edilen öznitelikler ise C12:0 ve C16:1'dir.



Şekil 4.14. Regresyon modellerinin sıralı ileri öznitelik seçimi yöntemi kullanıldığında elde ettiği performans



Şekil 4.15. Sıralı ileri öznitelik seçimi yöntemi kullanıldığında regresyon modellerinin öznitelikleri seçme sayıları

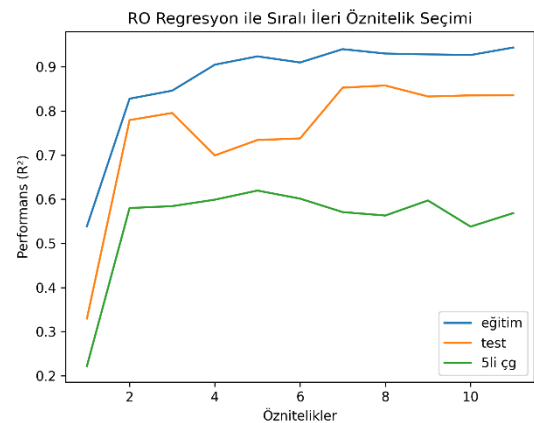
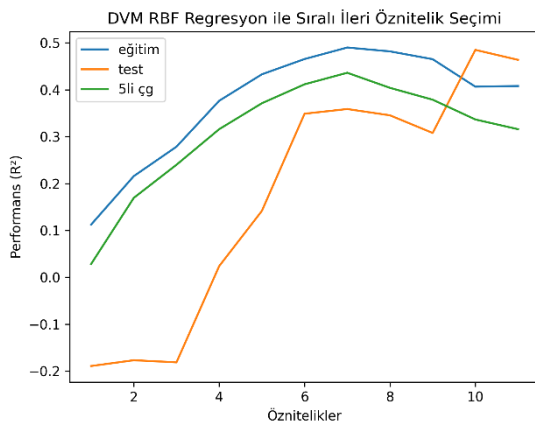
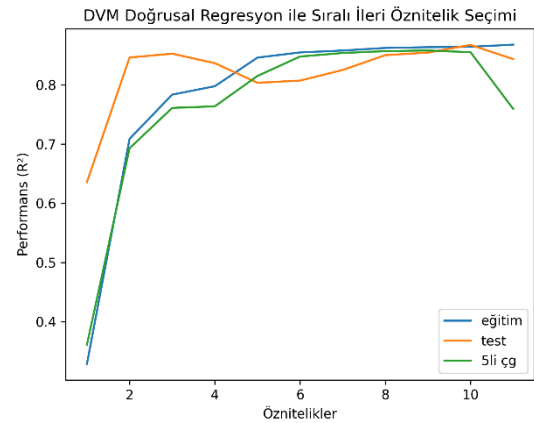
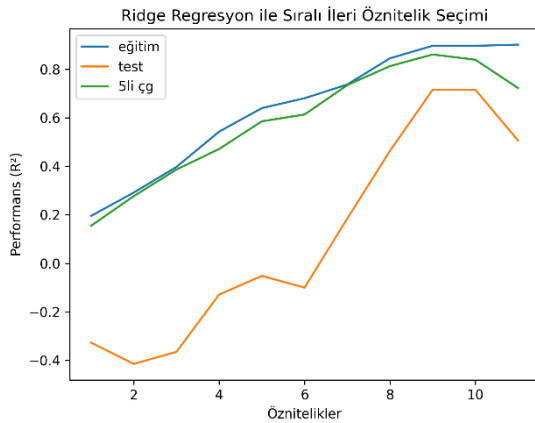
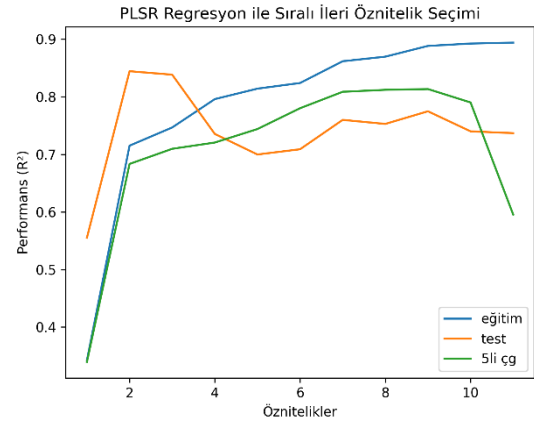
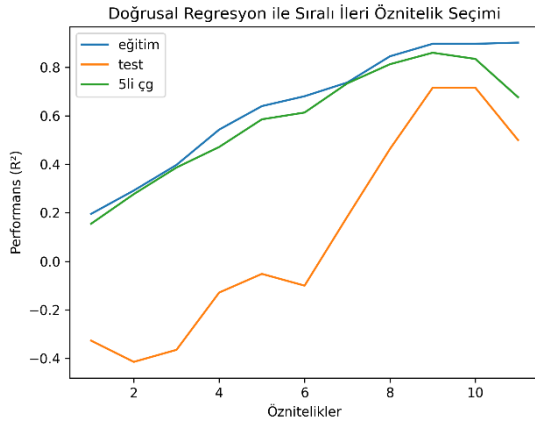
Tablo 4.7’de sıralı ileri öznitelik seçimi yöntemini kullanan regresyon modellerinin elde ettiği en iyi performans değerleri bulunmaktadır. Doğrusal DVM test verileri ve 5’li çapraz geçişleme verileri ile en yüksek R^2 değerlerine (sırasıyla 0.8674 ve 0.8551) ulaşmışlardır. Bu değerlere ulaşırken C20:1 haricinde bütün öznitelikler kullanılmıştır.

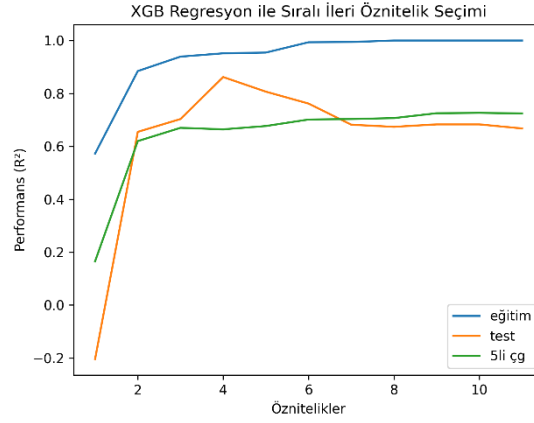
Tablo 4.7. Sıralı İleri Öznitelik Seçimi yöntemi kullanıldığında regresyon modellerinin elde ettiği en iyi sonuçlar

Sıralı İleri Öznitelik Seçimi						
Yöntem	R^2 eğitim	R^2 test	RMSE eğitim	RMSE test	R^2 ÇG	Öznitelik sayısı
Doğrusal	0.8796	0.7513	3.5641	3.2546	0.8313	9
PLSR	0.8926	0.7401	3.3659	3.3274	0.7902	10
Ridge	0.8796	0.7514	3.5641	3.2541	0.8314	9
DVM Doğ.	0.8643	0.8674	3.7831	2.3762	0.8551	10
DVM Rbf	0.4861	0.5326	7.3622	4.4618	0.4741	4
RO	0.9118	0.7639	3.0491	3.1713	0.6018	7
XGB	0.9999	0.6676	0.0009	3.7628	0.7245	11

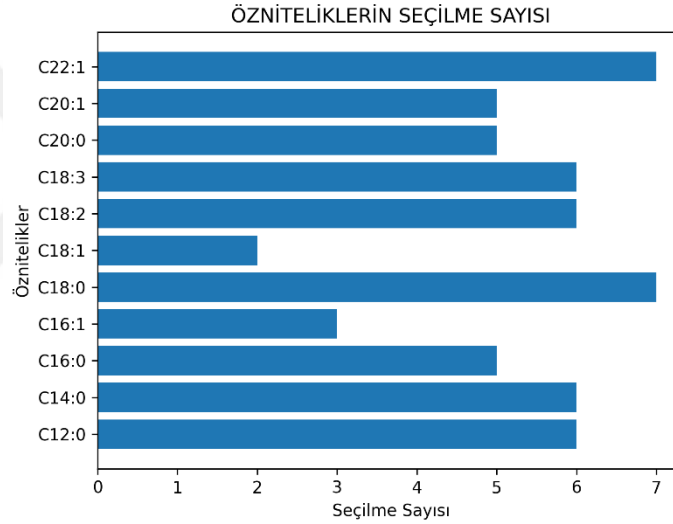
Sıralı geri öznitelik seçimi yöntemi kullanıldığında öznitelik sayılarına göre 7 regresyon modelinin elde ettiği performans (R^2) değişimleri Şekil 4.16’da görülmektedir. PLSR, Doğrusal DVM, RO ve XGB regresyon yöntemleri sadece C18:2 ve C18:3’ü kullandıklarında en yüksek performanslarına yakın R^2 değerleri elde etmişlerdir. Doğrusal, ridge ve DVM Rbf regresyon yöntemleri ise öznitelik sayısı arttıkça doğrusal bir performans artışı elde etmişlerdir ve elemelerde son kalan öznitelik olarak C18:0’ı seçmişlerdir. Şekil 4.17’de sıralı geri öznitelik seçimi yöntemini kullanan regresyon

modellerinin en yüksek R^2 değerlerini elde ettikleri değişken kümelerinde seçtikleri öz niteliklerin sayıları bulunmaktadır. Buna göre 7 model de en iyi sonuçları aldıkları değişken kümelerinde C18:0 ve C22:1 metil esterlerini kullanmışlardır. Bunları takiben C18:2, C18:3, C12:0 ve C14:0 da en çok tercih edilen öz nitelikler olmuştur. En az kullanılan öz nitelikler sırasıyla C18:1 ve C16:1 olmuştur. Bu sonuç f-skor ve pearson katsayısı seçimi yöntemlerini desteklemektedir.





Şekil 4.16. Regresyon modellerinin sıralı geri öznitelik seçimi yöntemi kullanıldığında elde ettiği performans



Şekil 4.17. Sıralı geri öznitelik seçimi yöntemi kullanıldığında regresyon modellerinin öznitelikleri seçme sayıları

Sıralı geri öznitelik seçimi yöntemini kullanan regresyon algoritmalarının ulaştığı en yüksek R^2 değerleri ve öznitelik sayıları Tablo 4.8’de verilmiştir. Buna göre, 5’li çapraz geçiş verileri kullanılırken ridge regresyon modeli $0.8607 R^2$ değerini elde ederken önceden rassal olarak ayrılmış test verilerini kullanan doğrusal DVM regresyon modeli $0.8545 R^2$ değerini ve 2.4898 hata değerini elde ederek en başarılı modeller olmuşlardır. Sıralı ileri öznitelik seçimi yönteminde olduğu gibi en yüksek performans yine doğrusal (doğrusal, ridge, PLS ve doğrusal DVM) regresyon modelleri tarafından elde edilmiştir. 4 model de 9 öznitelik kullanırlarken ortak olarak C12:0, C14:0, C18:0, C18:2, C18:3, C20:0 ve C22:1 metil esterleri tercih etmişlerdir.

Doğrusal DVM regresyon modeli bunlara ek olarak C16:1 ve C18:1'i en iyi performanslı değişken kümesinde bulundururken diğer 3 doğrusal model C16:0 ve C20:1'i değişken kümelerine eklemiştir. En düşük performans ise 5'li çapraz geçişleme, eğitim ve test verilerinde sırasıyla 0.4362, 0.4901 ve 0.3589 R^2 değerleri ile DVM Rbf'ye aittir.

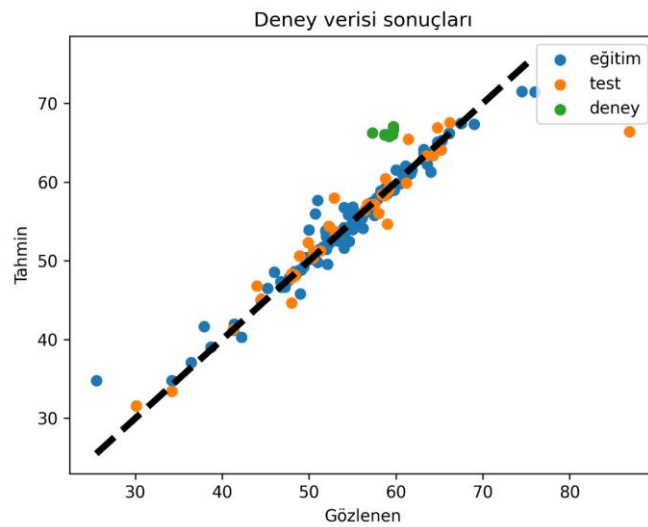
Tablo 4.8. Sıralı geri öznitelik seçimi yöntemi kullanıldığında regresyon modellerinin elde ettiği en iyi sonuçlar

Sıralı Geri Öznitelik Seçimi						
Yöntem	R^2 eğitim	R^2 test	RMSE eğitim	RMSE test	R^2 ÇG	Öznitelik sayısı
Doğrusal	0.8964	0.7152	3.3052	3.4830	0.8596	9
PLSR	0.8884	0.7749	3.4302	3.0965	0.8135	9
Ridge	0.8964	0.7154	3.3052	3.4818	0.8607	9
DVM Doğ.	0.8636	0.8545	3.7929	2.4898	0.8580	9
DVM Rbf	0.4901	0.3589	7.3335	5.2258	0.4362	7
RO	0.9238	0.7343	2.8353	3.3641	0.6197	5
XGB	0.9999	0.6831	0.0010	3.6740	0.7266	10

Setan sayısının tahmini için gerçekleştirilen öznitelik analizinde filtre ve sarmalayıcı yöntemler test edilip bulunan sonuçlar rapor edilmiştir. Filtre yöntemlerinden f-skor ve pearson katsayısının fikir birliği ile önemli gördüğü öznitelikler sırasıyla C18:2, C18:3, C18:0 ve C22:1 olmuştur. Pearson katsayısına göre C18:2 ve C18:3 metil esterleri setan sayısı ile negatif korelasyon içerisinde bulunmaktadırlar yani bu iki metil esterinin artışı setan sayısını düşürmektedir. İki filtre yöntemi de C18:1 ve C16:1'in setan sayısını belirlemede en düşük etkiye sahip olduğunu belirlemiştir. Ancak, karşılıklı bilgi yöntemi diğer iki yöntem gibi en değerli özniteliği C18:2 olarak belirlerken sırasıyla C18:1, C18:0 ve C16:0 da değerli öznitelikler arasında yer almıştır. Üç filtre yönteminin de hemfikir olduğu konu C16:1'in setan sayısı ile çok düşük korelasyona sahip olduğudur. Sarmalayıcı yöntemlerin elde ettiği sonuçlara bakıldığında, sıralı geri öznitelik seçim yöntemi ile en çok C18:2 ve C18:3 metil esterleri seçilirken sıralı geri öznitelik seçim ve özyinelemeli öznitelik eleme yöntemleri ise en değerli öznitelik olarak C22:1 ve C18:0 metil esterlerini seçmişlerdir. Bu üç yöntem ortak olarak C16:1 metil esterini seçmeme eğilimi göstermişlerdir. Kullanılan bütün yöntemler ile öznitelikleri sıraladığımızda C18:2, C18:3, C18:0, C22:1, C18:1, C16:0, C12:0, C20:0, C20:1, C14:0 ve C16:1 gibi bir önem sıralamasına ulaşmaktayız. Bu sıralamayı yaparken düşük performans gösteren Rbf çekirdekli DVM ve her deneyde farklı sıralamalar sunan rassal ormanlar regresyon yöntemlerinden elde edilen sonuçlar göz ardı edilmiştir. Ayrıca, ridge

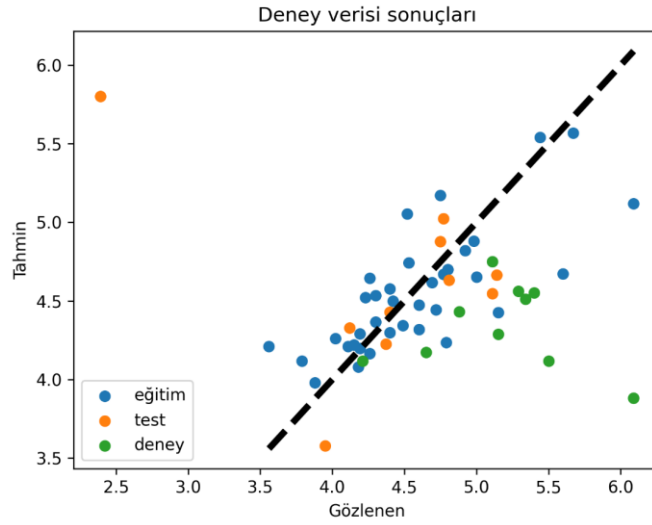
regresyon yöntemi Doğrusal regresyon ile neredeyse aynı sonuçları verdiği için sıralamaya katılmamıştır. Regresyon yöntemlerinin başarısı göz önüne alındığında ve öznelik seçimi doğru yapıldığında, doğrusal regresyon, ridge, PLSR ve doğrusal çekirdekli DVM yöntemleri setan sayısındaki varyansın %80'den fazlasını açıklayarak en başarılı yöntemler olmuşlardır. Bu sonuç da setan sayısı tahminin doğrusal bir modele uyduğu iddiasını güçlendirmektedir. Deneyle yapılırken herhangi bir parametre optimizasyonu yapılmadığı unutulmamalıdır.

4.3.2. Gerçek deney verisi sonuçları



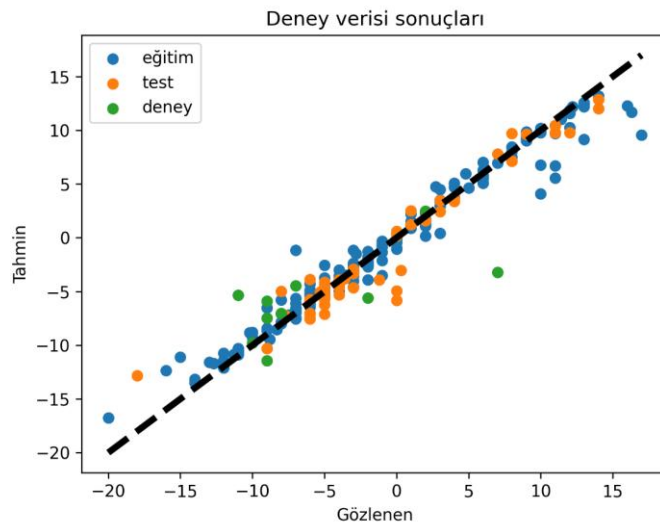
Şekil 4.18. Setan sayısı için deney verisi sonuçları

Literatürden (Suvarna vd., 2022) elde edilen 202 adet biyodizele ait veri ve DVM Doğrusal kullanarak eğitim (%80), test (%20) ve gerçek deney verisinin (10 adet biyodizel) kullanılması ile setan sayısı tahmini yapılarak elde edilen sonuçlar Şekil 4.18'de görüldüğü gibidir. Setan sayısı 25.5 ila 86.9 arasında olmakla birlikte ortalaması 54.86 ve standart sapması 8.54'tür. Eğitim ve test verisinde sırasıyla 0.9698 ve 0.8571 R^2 değerleri elde edilmiştir. Gerçek deney verisinde ise elde edilen R^2 değerleri modelin bu veriye uygun olmadığını göstermektedir. Deney verisi incelendiğinde bütün setan sayısı değerlerinin 57-59 aralığında olduğu fakat modelin 65-67 aralığında tahminlerde bulunduğu görülmektedir.



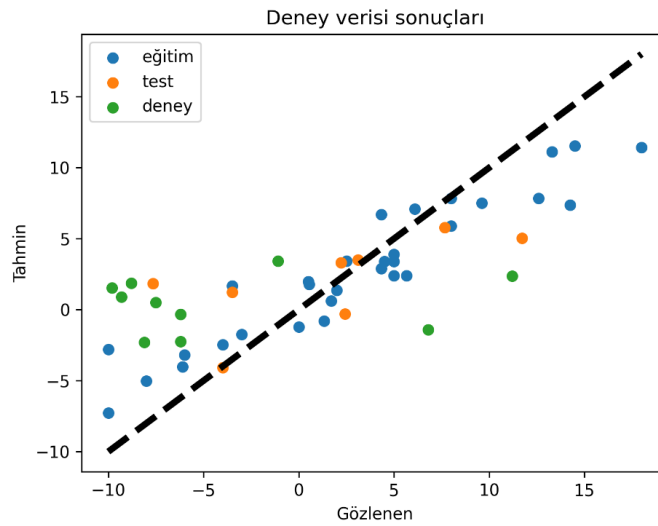
Şekil 4.19. Viskozite için deney sonuçları

Literatürden (Alviso vd., 2020) elde edilen 49 adet biyodizelle ait veri ve DVM Doğrusal algoritması kullanarak eğitim (%80), test (%20) ve gerçek deney verisinin (10 adet biyodizel) viskozite tahmini yapılarak elde edilen sonuçlar Şekil 4.19'da gösterilmektedir. Viskozite 2.39 ila 6.09 arasında olmakla birlikte ortalaması 4.53 ve standart sapması 0.6'dır. Eğitim verisinde $0.55 R^2$ değeri elde edilmiş ve bu değer düşük bulunduğu için regresyon analizine devam edilmemiştir. Gerçek deney verisinde ise elde edilen R^2 değerleri setan sayısı kadar düşük olmasa da modelin bu veriye uygun olmadığını göstermektedir. Sonuçlar incelendiğinde en yüksek viskoziteye sahip biodizelin viskozitesinin düşük tahmin edildiği not edilmiştir.



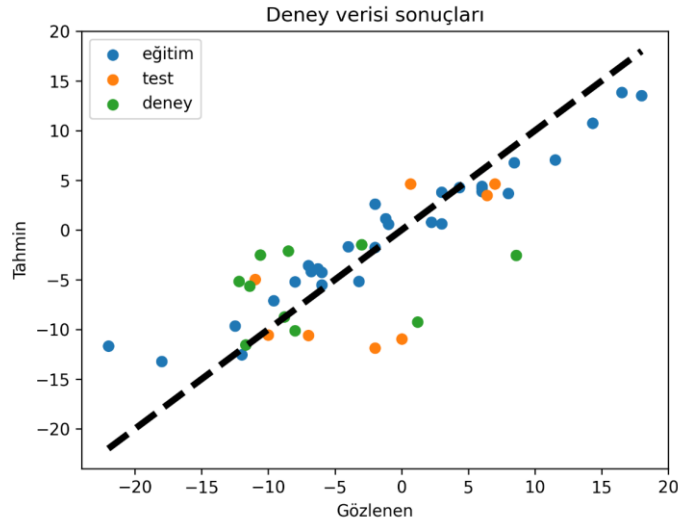
Şekil 4.20. CFPP için deney sonuçları

Literatürden (Suvarna vd., 2022) elde edilen 267 adet biyodizel ait veri ve Rassal Orman kullanarak eğitim (%80), test (%20) ve gerçek deney verisinin (10 adet biyodizel) CFPP tahmini yapılarak elde edilen sonuçlar Şekil 4.20’de gösterilmektedir. CFPP değeri -20 ile 17 °C arasında olmakla birlikte ortalaması -0.8 ve standart sapması 7.24’tür. Eğitim, test ve deney verisinde sırasıyla 0.9665, 0.9332 ve 0.4550 R^2 değerleri elde edilmiştir. Deney verisinde düşük performans göstermesine rağmen grafiksel hata kabul edilebilir görülmektedir. CFPP’yi belirleyen en önemli yağ asitleri sırasıyla C16:0 (palmitik), C18:0 (stearik) ve C22:1 (erusic) olarak bulunmuştur. Doğrusal regresyon modellerine göre (doğrusal regresyon, PLSR, Ridge ve DVM) bu yağ asitlerine ek olarak C18:1 (oleik), C18:2 (linoleik) ve C18:3 (linoleik) yağ asitlerinin de negatif doğrultuda önemli olduğu sonucu elde edilmiştir.



Şekil 4.21. Bulutlanma noktası için deney sonuçları

Literatürden (Alviso vd., 2020) elde edilen 39 adet biyodizel ait veri ve Rassal Orman kullanarak eğitim (%80), test (%20) ve gerçek deney verisinin (10 adet biyodizel) bulutlanma noktası tahmini yapılarak elde edilen sonuçlar Şekil 4.21’de gösterilmektedir. Bulutlanma noktası -10 ila 18 derece arasında olmakla birlikte ortalaması 2.77 ve standart sapması 6.96’dır. Eğitim ve test sırasıyla 0.8322 ve 0.5781 R^2 değerleri elde edilmiştir. Test sonuçlarının düşük olması, deney ve 5 katlı çapraz geçiş sonuçlarının ise negatif çıkması modelin bu veriye uygun olmadığını göstermektedir.



Şekil 4.22. Akma noktası için deney sonuçları

Literatürden (Alviso vd., 2020) elde edilen 38 adet biyodizel ait veri ve Rassal Orman kullanarak eğitim (%80), test (%20) ve gerçek deney verisinin (10 adet biyodizel) akma noktası tahmini yapılarak elde edilen sonuçlar Şekil 4.22’de gösterilmektedir. Akma noktası -22 ila 18 derece arasında olmakla birlikte ortalaması -0.95 ve standart sapması 9’dur. Test verisi, deney verisi ve 5 katlı çapraz geçirme sonuçlarının ise negatif çıkması modelin bu veriye uygun olmadığını göstermektedir.

Yağ asitlerinin biyodizellerin viskozite, setan sayısı, CFPP, bulutlanma ve akma noktasının tahmininde ne kadar etkili olduğunu incelemek amacıyla literatürden (Alviso vd., 2020; Suvarna vd., 2022) elde edilen veri setleri ile regresyon analizi çalışılmıştır. Veriler özneliklerin birbiri üzerine baskınlık kurmaması amacıyla normalize edilmiştir. Normalize edilen veriler üzerinde doğrusal çekirdekli DVM çalıştırılmış ve öznelik katsayıları Tablo 4.9’da gösterilmiştir. Doğrusal çekirdekli DVM seçiminin sebebi doğrusal regresyon yöntemleri arasında en başarılı sonucu vermesi ve yağ asitlerinin negatif etkilerini de ortaya koyabilmesidir.

Tablo 4.9. Doğrusal çekirdekli DVM Doğrusal'dan elde edilen katsayılara göre yağ asitlerinin yakıt özelliklerini belirlemedeki baskınlık derecesi

Yağ asidi	Kapalı formül	Viskozite	Setan Sayısı	CFPP	Bulutlanma noktası	Akma noktası
Laurik Asit	C12:0	Yok*	Yok	+	Yok*	Yok*
Miristik Asit	C14:0	+++++	Yok	-	Yok	-
Palmitik Asit	C16:0	+	++	+++++	+++	++
Palmitoleik Asit	C16:1	+	Yok	-	Yok	+
Stearik Asit	C18:0	+++	++	+	+++	+
Oleik Asit	C18:1	++++	+	----	++++	-
Linoleik Asit	C18:2	-	----	----	++	----
Linolenik Asit	C18:3	-	-	--	+	-
Araşidik Asit	C20:0	-	+	+	++	+
Gadoleik Asit	C20:1	+	+	Yok	--	Yok
Erusik Asit	C22:1	----	++	++	+++	-

*Eldeki veride o yağ asidi bulunmamaktadır.

Yok : <0.01

(+) : 0.01- 0.1 aralığında

(++) : 0.1-0.2 aralığında

(+++): 0.2-0.3 aralığında

(++++): 0.3-0.4 aralığında

(+++++): >0.4

(-) : (-0.1) – (-0.01) aralığında

(--) : (-0.2) – (-0.1) aralığında

(---): (-0.3) – (-0.2) aralığında

(----): (-0.4) – (-0.3) aralığında

(-----): < -0.4

DeneySEL sonuçların herhangi bir tahmin metoduna bağlı olmaksızın doğrudan yağ asitlerinin doyma derecesine ve zincir uzunluğuna bağlı yorumlanması sonucu Tablo 4.9 elde edilmektedir.

Tablo 4.10. Doyma derecesine göre yağ asitleri ile yakıt özellikleri arasındaki ilişki

	Setan Sayısı	Viskozite	Soğukta Akış	Parlama Noktası
Σ SFA	Doğru Orantılı	Doğru Orantılı	Ters Orantılı	-
Σ MUFA	-	Ters Orantılı	Doğru Orantılı	-
Σ PUFA	Ters Orantılı	Ters Orantılı	Doğru Orantılı	-
CH ₂ sayısı	Doğru Orantılı	Doğru Orantılı	Ters Orantılı	Doğru Orantılı

Bazı çalışmalar PUFA miktarının artışı ve SFA miktarının azalışı ile soğukta akış özelliklerinin iyi yönde değiştiğini vurgulamaktadır (Verma ve Sharma,2016; Moser,2012). Bu çalışmada yerfistiğinin ve fındığın Σ PUFA değeri sırasıyla 30.57 ve 13.45 olarak ölçülmüştür. CFPP değerleri yerfistiği, pamuk ve fındık için sırasıyla 7, 2 ve -10 °C olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla yerfistiğinin PUFA değeri fındığın PUFA değerinden yüksek olduğundan soğukta akış özelliklerinin iyi olması beklenir fakat yerfistiğinin Σ SFA değeri (15.37) ve fındığın Σ SFA değerinden (9.56) yüksek olduğundan yerfistiğinin soğukta akış özellikleri fındıktan kötüdür. Benzer sonuçlar

pamuk biyodizeli için de geçerlidir. Buradan SFA'nın soğukta akış özellikleri üzerindeki etkisinin PUFA'nın etkisinden daha yüksek olduğu sonucuna varabiliriz.

Karbon sayısındaki artış yakıtın soğuk filtre tıkanma noktasını olumsuz etkilemektedir (Ramos vd., 2009; Moser,2012). Tablo 4.2 incelendiğinde yerfıstığına ait yağ asidi profilinde C20:1(gadoleik), C20:5 (EPA), C24:1(nervonik) ve C22:6(DHA), benzer şekilde pamuk yağında da C20:2 (eikosadienoik), C20:5 (EPA), C24:1(nervonik) gibi uzun zincirli yağ asitlerinin diğer numunelere oranla daha yüksek olduğu görülmektedir. Σ SFA değerinin yüksek olmasının yanında bu uzun zincirli yağ asitlerinin varlığının da yerfıstığı ve pamuktan üretilen biyodizellerin soğuk filtre tıkanma noktasını olumsuz etkilediği görülmektedir.

Sajjadi ve diğerleri (2016), yağ asitlerinin zincir uzunluğu arttıkça viskozitenin artacağını, doymamışlık arttıkça azalacağını bildirmişlerdir. Bazı durumlarda da her ne kadar zincir uzunluğu fazla olsa da bileşimde linolenik asit gibi doymamış bir yağ asidi varsa bu etkiyi tersine çevirebileceğini vurgulamışlardır. Tablo 4.1 incelendiğinde viskozitesi diğerlerine kıyasla daha düşük olan biyodizeller Aspir, ceviz ve pamuktur. En yüksek olan ise kenevir biyodizelidir. Bu sonuçlara göre Tablo 4.2'deki veriler incelendiğinde aspir, ceviz ve pamuk yağları için toplam doymamış yağ asidi miktarları sırasıyla 88.54, 84.3 ve 71.65 olduğu görülmektedir. Bu verilerle tutarlı şekilde viskoziteleri de sırasıyla 4.21, 4.65 ve 4.88 mm²/ olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar toplam doymamışlığın artması ile viskozitenin azaldığı sonucunu doğrulamaktadır. Kenevir biyodizeline viskozitenin yüksek çıkmasının yapısında bulunan C24:0 (lignoserik) ve C22:1 (erusik) gibi uzun zincirli yağ asitlerinin diğer numunelere oranla daha yüksek olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

Miraboutalebi ve diğerleri 2016, çalışmalarında miristik, palmitik, stearik, oleik, linoleik ve linolenik asitin setan sayısının belirlenmesinde etkili olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre setan sayısı üzerinde etkili olan yağ asitlerini önem sırasına göre sıralandığında linoleik (C18:2), linolenik (C18:3), stearik (C18:0), erusik (C22:1), oleik (C18:1), palmitik (C16:0), laurik (C12:0), araşidik (C20:0), gadoleik (C20:1), miristik (C14:0) ve palmitoleik (C16:1) sonucu elde edilmektedir. Bu sonuçlar doğrusal, PLSR, Ridge, DVM-doğrusal ve XGB regresyon yöntemleri ile elde edilen sonuçlar olup, setan sayısının tahmininde en etkili olan yağ asidi linoleik asit (C18:2) ve en az etkiye sahip yağ asidi ise palmitoleik asit (C16:1) olmuştur.

Singh ve diğlerleri (2020), çalışmalarında araşidik asit miktarı arttıkça setan sayısının dūřtūđunu bildirmişlerdir. Bu sonuca gōre araşidik asitin setan sayısının iyileştirilmesi ve dolayısıyla yakıt kalitesinin artırılmasında etkili olduğunu vurgulamışlardır. Bu sonuca benzer şekilde elde ettiğimiz modellerde araşidik asit miktarının setan sayısının belirlenmesinde etkili olan yađ asitlerinden olduğu tespit edilmiştir.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Biyodizelin yakıt özelliklerinin kullanılan yağın yağ asidi bileşimi ile ilişkisini açıklamak amacıyla tahmine dayalı modeller geliştirilmesi son zamanların tercih edilen konularından olmuştur. Literatürde yağ asidi ve yakıt özellikleri arasındaki ilişkiyi inceleyen çalışmalar iki başlık altında toplanabilir. Deneysel sonuçlar üzerinden daha çok yağın doyma derecesi ve yakıt özellikleri arasındaki ilişkiyi yorumlayan çalışmalar ve bu ilişkiyi tahmine dayalı bir model ile ifade eden çalışmalar. Sadece kullanılan yağın yağ asidi içeriği düşünüldüğünde bile yakıt özelliklerine etki eden pek çok parametreden söz etmek mümkündür. Bu noktada ilişkiyi ifade etmek oldukça zor olmaktadır. Uygun bir veri seti oluşturulması ve verilerden öğrenme yoluyla hangi yağ asidinin yakıt özellikleri üzerinde ne derece etkisi olduğunun bilgisini veren makine öğrenmesi yöntemi pek çok açıdan çalışmanın verimini artırmaktadır. Öğrenme girdisi olarak kullanılan özniteliklerin yani yağ asitlerinin seçimi için filtre yöntemleri (f-skor, pearson korelasyon katsayısı, karşılıklı bilgi) ve sarmalayıcı yöntemler (sıralı ileri/geri öznitelik seçimi, özyinelemeli özellik eleme) kullanılmıştır. Bu yöntemleri kullanan regresyon modelleri (doğrusal regresyon, kısmi en küçük kareler (PLSR), ridge regresyon, destek vektör regresyonu (DVR) (doğrusal ve radyal tabanlı), rassal ormanlar, XGBoost) setan sayısı ve yağ asitleri arasında bir ilişki olduğunu doğrulamıştır. Üç filtre yöntemi de palmitoleik asit (C16:1) ile setan sayısı arasındaki korelasyonun çok düşük olduğu sonucuna ulaşmıştır. Setan sayısını tahmin etmede en etkin üç yağ asidi ise sırasıyla linoleik (C18:2), linolenik (C18:3), ve oleik asit (C18:1) olarak belirlenmiştir. Tanımlanan önemli yağ asitleri aynı zamanda yağ asitlerinin genel kimyası ve bunların literatürde belirlendiği şekilde yakıt özellikleri üzerindeki karşılık gelen etkileri ile doğrulanmıştır. Doğrusal regresyon, ridge, PLSR ve doğrusal çekirdekli DVM yöntemleri setan sayısındaki varyansın %80'den fazlasını açıklayarak en başarılı yöntemler olmuşlardır. Elde edilen veriler ile biyodizelin viskozitesi için bir model oluşturulmak istendiğinde viskozite ile yağ asitleri arasında doğrusal bir ilişki olmadığı tespit edilmiştir. Bunu sebebi literatürden toplanan verilerin farklı zamanlarda farklı numunelerden elde edilmiş olmasıdır. Makine öğrenmesi yöntemi temelde verilerden öğrenme mantığı ile çalıştığından veri setinin farklı cihazlardan elde edilmiş olması dahi sonucu ciddi derecede etkileyebilmektedir. Aynı laboratuvar ortamında elde

edilen numunelerden oluşturulan bir veri seti ile daha sağlıklı sonuçlar elde edilebileceği düşünülmektedir. Bu durum da takip eden çalışmayanın odak noktası olmaktadır. Setan sayısı ve CFPP için tahmin sonuçlarının başarı oranının viskozite, bulutlanma ve akma noktasına oranla daha yüksek çıkması bu özellikler için literatürden toplanan verilerin 200'den fazla olması ile açıklanabilir. Yöntemin verilerden öğrenmeye dayalı olması sebebiyle veri sayısı tahmin başarısını etkilemektedir. Viskozite, bulutlanma ve akma noktası için literatürden toplanan verilerin sayı olarak yeterli olmamakla birlikte farklı kaynaklara ait olması da tahmin başarısını etkilemiştir. Setan sayısı için elde edilen sonuçlar incelendiğinde test ve eğitim verilerinden elde edilen sonuçların başarı oranı yüksek iken gerçek deneysel değerler ile elde edilen sonuçların başarı oranının daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum modelin eğitilmesi ve test edilmesi için kullanılan değerlerin literatürden toplanması, tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneysel değerlerin ise farklı bir laboratuvar ortamında ve farklı cihaz ile ölçüm sonucu elde edilmiş olmasından kaynaklanmaktadır.

Özetle, bu çalışmada makine öğrenimi yönteminin kullanılması biyodizel araştırmalarında veri bilimi ve makine öğrenimi kavramlarının önemini vurgulamada öncü çalışmalardan biri olarak görülebilir. Ayrıca verilerden daha nitelikli bir alt küme elde edilmesi amacıyla öznitelik seçim analizinin yapılmış olması bu çalışmanın özgün yanı olup literatüre önemli katkı sağlamaktadır. Esas amaç yakıt özelliklerinin tahmin edilmesi olmayıp yağ asitlerinin yakıt özelliklerine etkisinin araştırılması olduğundan önemli parametre yağ asitleridir. Yağ asitlerinin etkisinin tek tek incelenebilmesi amacıyla öznitelik seçimi yöntemlerinin kullanılmasının hedefe yönelik bir seçim olduğu düşünülmektedir. Her alanda verimliliğin önemi artmakta ve veriye bağlı öğrenme ile teorik olarak gerçekleştirilen bu ve benzeri çalışmaların zamandan, malzemedenden ve emekten tasarruf sağlayacağı düşünüldüğünde verimliliğe katkısı önem arz etmektedir.

5.2. Öneriler

Bu tez kapsamında biyodizel üretim parametrelerinde herhangi bir optimizasyon yapılmamış klasik deneysel prosedür uygulanmıştır. Deneysel parametreleri değiştirilerek üretim verimi artırılabilir.

Bu çalışmada esas amaç yağ asitlerinin yakıt özelliklerine etkisinin incelenmesidir. Burada yağ asitleri ön plandadır. Dolayısıyla modellemeye uygun veri

alt kümesinin oluşturulması amacıyla öznitelik seçimi analizine ağırlık verilmiştir. Doğrudan bir yakıt özelliğinin tahmin edilmesi üzerine bir çalışma yapılmak istenirse daha yüksek başarı oranı elde etmek amacıyla yapay sinir ağları ile modelleme yapılabilir.

Yakıt özellikleri ile yağ asidi bileşimi arasındaki ilişkiyi sayısal olarak ifade edebilmek amacıyla geliştirilen model üzerinde optimizasyon yapmak faydalı olacaktır.

Ayrıca yağ asidi bileşiminin miktarına bağlı olarak yakıt özellikleri üzerinde etkisinin incelenmesi amacıyla tersine mühendislik uygulaması kullanılarak çalışma geliştirilebilir.



6. KAYNAKLAR

- Aksoy, L., 2010, Alternatif enerji kaynağı olarak biyodizel ve üretim prosesleri, *Electronic Journal of Vehicle Technologies*, 2, 45-52.
- Allen, C. A. W., Watts, K. C., Ackman, R. G. and Pegg, M. J., 1999, Predicting the viscosity of biodiesel fuels from their fatty acid ester composition, *Fuel*, 78, 1319-1326.
- Alpaydın, E., 2010, Introduction to machine learning, *The MIT Press, Second Edition*, London, England, 137-139.
- Alptekin, E. and Canakci, M., 2008, Determination of the density and the viscosities of biodiesel–diesel fuel blends. *Renewable Energy*, 33 (12), 2623-2630.
- Alviso, D. Artana, G. and Duriez, T., 2020, Prediction of biodiesel physico-chemical properties from its fatty acid composition using genetic programming, *Fuel*, 264, 116844.
- Anonymous 2017, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), Motorin türlerine biodizel harmanlanması hakkında tebliğ, *T.C. Resmî Gazete*, 30098, 16 Haziran 2017.
- Anonymous 2022, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), Ham petrol ithalatı 1996-2023, <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/DownloadIstatistikselTablo?p=z0lwTtyxWEca8guW2dnOZokgazzQkT5l2mTRzjq6uh1oO/oe8eOe5svBaxf3cTvI>, [Ziyaret Tarihi: 30.03.2023].
- Anwar, M., 2021, Biodiesel feedstocks selection strategies based on economic, technical, and sustainable aspects, *Fuel*, 283, 119-204.
- Arslan F. N. and Çağlar F., 2019, Attenuated Total Reflectance–Fourier Transform Infrared (ATR–FTIR) Spectroscopy Combined with Chemometrics for Rapid Determination of Cold–Pressed Wheat Germ Oil Adulteration, *Food Analytical Methods*, 12, 355-370.
- Arslan, M., 2015, Laboratuvar ölçekli biyodizel üretim tesisinin projelendirilerek imal edilmesi ve yabani zeytinden (oleaoleaster) üretilecek biyodizelin yakıt özelliklerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, 10-18.
- Avcu, F. M., 2022, Comparison of Deep Learning and Other Classification Algorithms in Small Dataset Studies: Example of Agonist and Antagonist Ligand, *Journal of Inonu University Health Services Vocational School*, 10 (1), 356-371.

- Aytekin, H. T., 2021, Makine öğreniminin araştırmacıların veri analizi bağlamında potansiyel önemi, *Ufuk Üniversitesi 1. Uluslararası Sosyal Bilimler Kongresi*, Ankara.
- Bangboye, A. I. and Hansen, A. C., 2008, Prediction of cetane number of biodiesel fuel from the fatty acid methyl ester (FAME) composition, *International Agrophysics*, 22, 21-29.
- Bemani, A., Xiong, Q., Baghban, A., Habibzadeh, S., Mohammadi, A.H., Doranehgard, M.H., 2020, Modeling of cetane number of biodiesel from fatty acid methyl ester (FAME) information using GA-, PSO-, and HGAPSO- LSSVM models, *Renewable Energy*, 150, 924-934.
- Beycar Kafadar, A., 2010, Yağlardan biyodizel eldesine etki eden faktörlerin araştırılması, Doktora Tezi, *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Diyarbakır 3-33.
- Bhatia, S. K., Bhatia, R. K., Jeon, J.-M., Pugazhendhi, A., Awasthi, M. K., Kumar, D., Kumar, G., Yoon, J.-J. and Yang, Y.-H., 2021, An overview on advancements in biobased transesterification methods for biodiesel production: Oil resources, extraction, biocatalysts, and process intensification technologies, *Fuel*, 285, 119117.
- Bishop, C. M., 2006, Pattern recognition and machine learning, *Springer*, Singapore, 1-66.
- Boog J. H. F., Silveira E. L. C., deCaland, L. B. and Tubino, M., 2011, Determining the residual alcohol in biodiesel through its flash point, *Fuel*, 90 (2), 905-907.
- Bozan, B. and Temelli, F., 2008, Chemical composition and oxidative stability of flax, safflower and poppy seed and seed oils, *Bioresource Technology*, 99, 6354-6359.
- Buasri A., Worawanitchaphong, P., Trongyong, S. and Loryuenyong, V., 2014, Utilization of scallop waste shell for biodiesel production from palm oil-optimization using taguchi method, *Procedia APCBEE*, 8, 216-221.
- Budak, H., 2015, Özellik seçim yöntemleri ve yeni bir yaklaşım, Doktora Tezi, *Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 3-46.
- Canakci, M. and Sanli, H., 2008, Biodiesel production from various feedstocks and their effects on the fuel properties, *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 35, 431-441.
- Canakci, M. and van Gerpen, J. H., 2001, The performance and emissions of a diesel engine fueled with biodiesel from yellow grease and soybean oil. *American Society of Agricultural Engineers, ASAE Annual International Meeting*, Sacramento-California-USA, Paper N. 016050.
- Cortes, C. and Vapnik, V., 1995, Support-vector networks, *Machine Learning*, 20, 273-297.

- Dunn, R. O. and Bagby, M. O., 1995, Low-temperature properties of triglyceride-based diesel fuels: transesterified methyl esters and petroleum middle distillate/ester blends, *Journal of American Oil Chemists' Society*, 72, 895-904.
- Erdaş, Ö., 2013, Predicting the binding affinities of drug-protein interaction by analyzing the images of binding sites, Ph.D Thesis, *The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University*, Ankara, 15-29.
- Fassinou, W. F., 2012, Higher heating value (HHV) of vegetable oils, fats and biodiesels evaluation based on their pure fatty acids 'HHV, *Energy*, 45 (1), 798-805.
- Filiz, E., 2019, Makine öğrenmesi yöntemleri ve eğitim verisi üzerine bir uygulama: uluslararası matematik ve fen eğilimleri araştırması 2015 Türkiye örneği, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 11-30.
- Folayan, A. J., Anawe, P. A. L., Aladejare, A. E. and Ayeni, A. O., 2019, Experimental investigation of the effect of fatty acids configuration, chain length, branching and degree of unsaturation on biodiesel fuel properties obtained from lauric oils, high-oleic and high-linoleic vegetable oil biomass, *Energy Reports*, 5, 793-806.
- Forman, G., 2003, An Extensive empirical study of feature selection metrics for text classification, *Journal of Machine Learning Research*, 3, 1289-1305.
- Freitas, S. V. D., Pratas, M. J., Ceriani, R., Limas, A. S. and Coutinho, J. A. P., 2011, Evaluation of predictive models for the viscosity of biodiesel, *Energy Fuels*, 25(1), 352-358.
- Fukuda, H., Kondo, A. and Noda, H., 2001, Biodiesel fuel production by transesterification of oils, *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 92, 405-416.
- Gebremariam, S. N., and Marchetti, J. M., 2017, Biodiesel production technologies: review, *AIMS Energy*, 5 (3), 425-457.
- Gedik Dilek, B., 2020, Uşak ve denizli illerinde şeker pancarı kist nematodu, heterodera schachtii schmidt (tylenchida: heteroderidae)'nin yayılış alanlarının ve populasyon yoğunluğunun belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Uşak, 1-8.
- Geller, D. P. and Goodrum, J. W. 2004, Effects of specific fatty acid methyl esters on diesel fuel lubricity. *Fuel*, 83, 2351-2356.
- Giwa, S. O., Adekomaya, S. O., Adama, K. O. and Mukaila, M. O., 2015, Prediction of selected biodiesel fuel properties using artificial neural network, *Frontiers in Energy*, 9, 433-445.
- Graboski, M. S. and McCormic, R. L., 1998, Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines, *Progress in Energy and Combustion Science*, 24, 125-164.

- Guyon, I., Weston, J. and Barnhill, S., 2002, Gene selection for cancer classification using support vector machines, *Machine Learning*, 46, 389-422.
- Güven, A., 2022, Hava kirliliğinin makine öğrenmesi yöntemleriyle tahmini, Yüksek Lisans Tezi, *Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, 9-17.
- Hall, M. A., 1999, Correlation-based feature selection for machine learning, PhD Thesis, *The University of Waikato Department of Computer Science*, Hamilton, NewZeland, 121-128.
- Hoekman, S. K., Broch, A., Robbins, C., Cenicerros, E. and Natarajan, M., 2012, Review of biodiesel composition, properties and specifications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 143-169.
- Hossain, A. B. M. S., Boyce, A. N., Salleh, A. and Chandran, S., 2010, Impacts of alcohol type, ratio and stirring time on the biodiesel production from waste canola oil, *African Journal of Agricultural Research*, 5 (14), 1851-1859.
- Hosseinpour, S., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M. and Khalife, E., 2016, Exact estimation of biodiesel cetane number (CN) from its fatty acid methyl esters (FAMES) profile using partial least square (PLS) adapted by artificial neural network (ANN), *Energy Conversion and Management*, 124, 389-398.
- Icingur, Y. and Altinparmak, D., 2003, Effect of fuel cetane number and injection pressure on a DI diesel engine performance and emissions, *Energy Conversion and Management*, 44, 389-397.
- Imahara, H., Minami, E., Saka, S., 2006, Thermodynamic study on cloud point of biodiesel with its fatty acid composition, *Fuel*, 85, 1666-1670.
- Issariyakul, T. and Dalai, A. K., 2012, Comparative kinetics of transesterification for biodiesel production from palm oil and mustard oil, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 90 (2), 342-350.
- John, C. B., Solamalai, A. R., Jambulingam, R. and Balakrishnan D., 2020, Estimation of fuel properties and characterization of hemp biodiesel using spectrometric techniques, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Latest Articles, 1-18.
- Kahraman, A., Oguz, H., Ors, I. And Solmaz, O., 2013, Effect of cottonseed oil methyl ester on the performance and exhaust emissions of a vehicle, *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 2 (4), 104-110.
- Kayahan, M., 2003, Yağ kimyası. *ODTÜ Yayıncılık, 1. Baskı*, Ankara, 7-35.
- Kenar, A., Cicek, B., Arslan, F. N., Akın, G., Karuk Elmas, Ş.N. and Yılmaz, I., 2019, Electron Impact–Mass Spectrometry Fingerprinting and Chemometrics for Rapid Assessment of Authenticity of Edible Oils Based on Fatty Acid Profiling, *Food Analytical Methods*, 12, 1369-1381.
- Keskinbıçak, F., 2023, Makine öğrenmesi ile nohutta verim ve tür tahmini, Yüksek Lisans Tezi, *Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Şanlıurfa, 26-41.

- Knothe, G. and Steidley, K. R., 2005, Kinematic viscosity of biodiesel fuel components and related compounds. Influence of compound structure and comparison to petrodiesel fuel components, *Fuel*, 84, 1059-1065.
- Knothe, G. and Razon, L. F., 2017, Biodiesel fuels, *Progress in Energy and Combustion Science*, 58, 36-59.
- Knothe, G. and Steidley, K. R., 2005-b, Lubricity of components of biodiesel and petrodiesel. The origin of biodiesel lubricity, *Energy Fuels*, 19 (3), 1192-1200.
- Knothe, G. and Steidley, K. R., 2007, Kinematic viscosity of biodiesel components (fatty acid alkyl esters) and related compounds at low temperatures, *Fuel*, 86, 2560-2567.
- Knothe, G., 2008, "Designer" biodiesel: optimizing fatty acid composition to improve fuel properties, *Energy & Fuels*, 22, 1358-1364.
- Knothe, G., 2009, Improving biodiesel fuel properties by modifying fatty ester composition, *Energy & Environmental Science*, 2, 759-766.
- Knothe, G., Bagby, M. O. and Ryan, T. W., 1998, Precombustion of fatty acids and esters of biodiesel, A possible explanation for differing cetane numbers, *Journal of American Oil Chemists' Society* 75 (8), 1007-1013.
- Kor, K., 2015, Penetration rate optimization with support vector regression method, M.Sc. Thesis, *Istanbul Technical University Graduate School of Science Engineering and Technology*, Istanbul, 51-81.
- Kuhn, M. and Johnson, K., 2013, Applied predictive modeling, *Springer*, New York.
- Ladommatos, N., Parsi, M. and Knowles, A., 1996, The effect of fuel cetane improver on diesel pollutant emissions, *Fuel*, 75, 8-14.
- Liang, Y.-C., Yona, M., Chen, A. H.-L. and Juarez, J. R. C., 2020, Machine learning-based prediction of air quality, *Applied Science*, 10, 1-17.
- Lin, S.-W., Ying, K.-C., Lee, C.-Y. and Lee, Z.-J., 2012, An intelligent algorithm with feature selection and decision rules applied to anomaly intrusion detection, *Applied Soft Computing*, 12, 3285-3290.
- Matzenberger, J., Kranzi, L., Tromborg, E., Junginger, M., Daioglou, V., Goh, C. S. Keramidas K., 2015, Future perspectives of international bioenergy trade, *Renewable and Sustainable Energy*, 43, 926-941.
- Meher, L. C., Vidya Sagar, D. and Naik, S. N., 2006, Technical aspects of biodiesel production by transesterification-a review, *Renewable and Sustainable Energy*, 10, 248-268.
- Melero, J. A., Bautista, L. F., Morales, G., Iglesias, J. and Sanchez-Vazquez, R., 2015, Acid catalyzed production of biodiesel over arenesulfonic SBA-15: Insights into the role of water in the reaction network, *Renewable Energy*, 75, 425-432.

- Miraboutalebi, S.M., Kazemi, P. and Bahrami, P., 2016, Fatty Acid Methyl Ester (FAME) composition used for estimation of biodiesel cetane number employing random forest and artificial neural networks: A new approach. *Fuel*, 166, 143-151.
- Moser, B.R., 2012, Preparation of fatty acid methyl esters from hazelnut, high-oleic peanut and walnut oils and evaluation as biodiesel. *Fuel*, 92, 231-238.
- Moser, B.R., 2014, Impact of fatty ester composition on low temperature properties of biodiesel–petroleum diesel blends. *Fuel*, 115, 500-506.
- Oğuz, H. and Çelik Tolu, M., 2018, A review on biodiesel production using eggshell as Catalyst, *International Journal of Energy Applications and Technologies*, 5 (3), 147-152.
- Oğuz, H., Öğüt, H., Aydın, F., Ciniviz, M., and Eryılmaz, T., 2019, Investigation of engine performance and kit design for the usage of safflower oil as in diesel engine. *Renewable Energy*, 143, 692–702.
- Öğüt, H. ve Oğuz, H., 2006, Üçüncü mileniyumun yakıtı biyodizel. *Nobel Yayın Dağıtım, 2. Baskı*, Ankara, 1-94.
- Öğüt, H., Akınerdem, F., Pehlivan, E., Aydın, M. E. ve Oğuz, H., 2004, Türkiye’de bazı yağ bitkilerinden biyodizel üretim prosesleri ve dizel motorlarda kullanımının tarım, çevre, gıda, kimya ve teknolojik boyutlarıyla araştırılması: DPT Proje No:2004/7, *Biyoenjerji 2004 Sempozyumu*, İzmir.
- Özdemir, Z. Ö. ve Mutlubaş H., 2016, Biyodizel üretim yöntemleri ve çevresel etkileri, *Kırklareli University Journal of Engineering and Science*, 2, 129-143.
- Parvez A. M., Lewis J. D. and Afzal M. T., “Potential of industrial hemp (Cannabis sativa L.) for bioenergy production in Canada: Status, challenges and outlook”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141 (C), 2021.
- Patel, R. L., and Sankhavara, C. D., 2017, Biodiesel production from Karanja oil and its use in diesel engine: A review, *Renewable and Sustainable Energy*, 71, 464-474.
- Patrous, Z. S., 2018, Evaluating XGBoost for user classification by using behavioral features extracted from smartphone sensors, Master Thesis, *KTH Royal Institute of Technology School of Computer Science and Communication*, Sweden, 26-38.
- Piloto-Rodriguez, R., Sanchez-Borroto, Y., Lapuerta, M., Goso-Perez, L. and Verhelst, S., 2013, Prediction of the cetane number of biodiesel using artificial neural networks and multiple linear regression, *Energy Conversion and Management*, 65, 255-261.
- Puhan, S., Saravanan, N., Nagarajan, G. and Vedaraman, N, 2010, Effect of biodiesel unsaturated fatty acid on combustion characteristics of a DI compression ignition engine. *Biomass and Bioenergy*, 34, 1079-1088.

- Qi, D. F. and Li, C. F., 2014, Influence of soybean biodiesel content on basic properties of biodiesel-diesel blends. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 45, 504-507.
- Ramadhas, A. S., Jayaraj, S., Muraleedharan, C. and Padmakumari, K., 2006, Artificial neural networks used for the prediction of the cetane number of biodiesel. *Renewable Energy*, 31 (15), 2524-2533.
- Ramirez-Verduzco, L. F., Rodriguez-Rodriguez, J. E. and Jaramillo-Jacob, A.R., 2012, Predicting cetane number, kinematic viscosity, density and higher heating value of biodiesel from its fatty acid methyl ester composition, *Fuel*, 91,102-111.
- Ramos, M. J., Fernandez, C. M., Casas, A., Rodrigues, L. and Perez, A., 2009, Influence of fatty acid composition of raw materials on biodiesel properties, *Bioresource Technology*, 100, 261-268.
- Refaat, A. A., 2009, Correlation between the chemical structure of biodiesel and its physical properties, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 6 (4), 677-694.
- Ross, B. C., 2014, Mutual information between discrete and continuous data sets, *Plos One*, 9 (2), 1-5.
- Saeyns, Y., Inza, I. and Larranaga, P., 2007, A review of feature selection techniques in bioinformatics, *Bioinformatics*, 23, 2507-2517.
- Sağbaşı, E. A., 2022, Makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak akıllı telefon tabanlı stres tespit sistemi geliştirilmesi, Doktora Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 1-48.
- Sainin, M. S. and Alfred, R., 2011, A genetic based wrapper feature selection approach using nearest neighbour distance matrix, *3rd Conference on Data Mining and Optimization (DMO)*, Selangor, Malaysia, 237-242.
- Sajjadi, B., Raman, A. A. A. and Arandiyani, H., 2016, A comprehensive review on properties of edible and non-edible vegetable oil-based biodiesel: compositioni specification and prediction models, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 63, 62-92.
- Santos, M. E., Piovesan, N. D., de Barros, E. G. and Moreira, M. A., 2013, Low linolenic soybeans for biodiesel: Characteristics, performance and advantages. *Fuel*, 104, 861-864.
- Scott, S. A., Davey, M. P., Dennis, J. S., Horst, I., Howe, C. J., Lea-Smith, D. J., and Smith, A. G., 2010, Biodiesel from algae: challenges and prospects, *Current Opinion in Biotechnology*, 21, 277-86.
- Sierra-Cantor, J. F. and Guerrero-Fajardo, C. A., 2017, Methods for improving the cold flow properties of biodiesel with high saturated fatty acids content: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 774-790.

- Silva, M. A. A., Correa, R. A., Tavares, M. G. de O., and Antoniosi Filho, N. R., 2015, A new spectrophotometric method for determination of biodiesel content in biodiesel/diesel blends, *Fuel*, 143, 16-20.
- Singh, S., Lahiri, S. K., Chakrabarty, J., 2020, Assessing the correlation between fatty acid composition of biodiesel with the fuel property using Artificial Intelligence and optimization, *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 40, 3.
- Suvarna, M., Jahirul, M. I., Aaron-Yeap, W. H., Augustine, C. V., Umesh, A., Rasul, M. G., Günay, M. E., Yildirim, R. and Janaun, J., 2022, Predicting biodiesel properties and its optimal fatty acid profile explainable machine learning”, *Renewable Energy*, 189, 245-258.
- Szybist, J. P., Song, J., Alam, M. and Boehman, A. L., 2007, Biodiesel combustion, emissions and emission control, *Fuel Processing Technology*, 88, 679-691.
- Şahin, S., 2021, Motorin ve aspir biyodizeli karışımlarına ilave edilen bazı katkı maddelerinin yakıt özellikleri, motor performansı ve emisyon değerlerine etkilerinin belirlenmesi, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 5-96.
- Tırınk, C., Abacı, S. H. and Önder, H., 2020, Comparison of ridge regression and least squares methods in the presence of multicollinearity for body measurements in saanen kids, *Journal of The Institute of Science and Technology*, 10 (2), 1429-1437.
- Tolun, S., 2008, Destek vektör makineleri: banka başarısızlığının tahmini üzerine bir uygulama, Doktora Tezi, *İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, İstanbul, 64-117.
- Uluengin, M. B., 2007, Siz de evinizde biyodizel üretebilirsiniz!, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 15-31.
- Uzer, M. S., 2014, Örüntü tanıma uygulamalarında yapay zekâ ve öznitelik dönüşüm metotları kullanılarak geliştirilen öznitelik seçme algoritmaları, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 18-51.
- Van Gerpen, J., Shanks, B., Pruszek, R., Clements, D. ve Knothe, G., 2004, Biodiesel analytical methods, *Contract*, 303, 275-3000.
- Verma, P. and Sharma, M. P., 2016, Review of process parameters for biodiesel production from different feedstocks, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1063-1071.
- Viswanathan, M. B., Cheng, M.-H., Clemente, T. E., Dweikat, I. and Singh, V., 2021, Economic perspective of ethanol and biodiesel coproduction from industrial hemp, *Journal of Cleaner Production*, 299, 126875.
- Vujicic, D. J., Comic, D., Zarubica, A., Micic, R. and Boskovic, G., 2010, Kinetics of biodiesel synthesis from sunflower oil over CaO heterogeneous catalyst. *Fuel*, 89, 2054-2061.

- Weisberg, S., 2005, Applied linear regression, John Wiley & Sons, Inc., Forth Edition, Hoboken, New Jersey, 19-47.
- Wold, S., Sjöstrom, M. and Eriksson, L., 2001, PLS-regression: a basic tool of chemometrics, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 58, 109-130.
- Yangın, G., 2019, XGBoost ve karar ağacı tabanlı algoritmaların diyabet veri setleri üzerine uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, *Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 26-46.
- Yaşar, B., Subaşı, O. S. ve Uysal, O., 2016, Türkiye’de yağlı tohumlar potansiyeli, enerji tarımı ve biyodizel. *XII. Ulusal Tarım Ekonomisi Kongresi*, 2016, Isparta, 1361-1368.
- Yaşar, F., 2020, Comparison of fuel properties of biodiesel fuels produced from different oils to determine the most suitable feedstock type, *Fuel*, 264, 116817.
- Yılbaşı, Z., 2022, Kenevir (cannabis sativa l.) Yağı biyodizeli- dizel yakıt karışımına farklı ağır alkol ve atık eps ilavelerinin bir dizel motorun karakteristikleri üzerine etkileri ile termodinamik, ekonomik ve çevresel analizleri, Doktora Tezi, *Yozgat Bozok Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Yozgat, 1-19.
- Yılbaşı, Z., Yesilyurt, M. K. and Arslan, M., 2021, The production of methyl ester from industrial grade hemp (Cannabis sativa L.) seed oil: a perspective of Turkey — the optimization study using the Taguchi method, *Biomass Conversion and Biorefinery*.
- Zappi, M., Hernandez, R., Sparks, D., Horne, J., Brough, M. and Swalm, D. C., 2003, A Review of the Engineering Aspects of the Biodiesel Industry, MSU E-TECH Laboratory Report, *Mississippi University Consortium for the Utilization of Biomass MSU Environmental Technology Research and Applications Laboratory*, Mississippi State.