

**T.C.  
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI YAKIT KARIŞIMLARI VE EMİSYON AZALTMA  
TEKNİKLERİ UYGULANAN BİR DİZEL MOTORDA OPTİMUM  
PARAMETRELERİN TAGUCHI YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Çiçek ÇANGAL**

**Enstitü Anabilim Dalı : OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Vezir AYHAN**

**Haziran 2019**

T.C.  
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FARKLI YAKIT KARIŞIMLARI VE EMİSYON AZALTMA  
TEKNİKLERİ UYGULANAN BİR DİZEL MOTORDA OPTİMUM  
PARAMETRELERİN TAGUCHİ YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

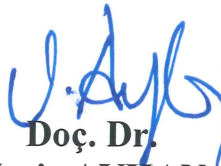
Çiçek ÇANGAL

Enstitü Anabilim Dalı : OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 13/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği /  
oyçokluğu ile kabul edilmiştir.



Doç. Dr.  
Halit YAŞAR  
Jüri Başkanı



Doç. Dr.  
Vezir AYHAN  
Üye



Doç. Dr.  
İdris CESUR  
Üye

## BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

  
Çiçek ÇANGAL

13/06/2019

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitiminin boyunca hem tez aşamasında hem de diğer akademik çalışmalarında her türlü desteğini aldığım, bilgi ve birikiminden yararlandığım, beni sürekli teşvik eden değerli danışman hocam Doç. Dr. Vezir AYHAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım esnasında bana eşlik eden ve her türlü konuda benden desteğini esirgemeyen Arş. Gör. Adem Tüylü'ye ve diğer arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu zorlu süreçte bana maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen, sabırlı olup beni yüreklendiren eşim Cem Gürkan ÇANGAL'a teşekkür ederim. Ayrıca eğitim hayatım boyunca ve yine bu süreçte maneviyatlarını yoğun bir şekilde hissettiğim babaannem Tarife CEYHAN'a, anneme, babama, kardeşime ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLOLAR LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY .....	xi
<b>BÖLÜM 1.</b>	
<b>GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>BÖLÜM 2.</b>	
<b>BİYODİZEL VE ETANOL .....</b>	<b>10</b>
2.1. Biyodizel .....	10
2.1.1. Bitkisel yağlar .....	10
2.1.1.1. Mısır yağı .....	11
2.1.1.2. Yakıt olarak bitkisel yağların özellikleri ve performansı.....	12
2.1.2. Biyodizelin üretim yöntemleri ve yakıt özellikleri .....	13
2.1.2.1. Seyreltme.....	14
2.1.2.2. Piroliz .....	14
2.1.2.3. Mikroemülsiyon .....	14
2.1.2.4. Transesterifikasyon .....	15
2.1.3. Biyodizelin yakıt olarak performansı ve emisyonlara etkisi.....	17
2.2. Etanol .....	23
2.2.1. Etanolün yakıt özellikleri .....	23
2.2.2. Etanolün yakıt olarak performansı ve emisyonlara etkisi .....	25
<b>BÖLÜM 3.</b>	
<b>DİZEL MOTOR EMİSYONLARI, EGR VE AŞIRI DOLDURMA.....</b>	<b>32</b>
3.1. Dizel Motor Emisyonları.....	32
3.1.1. Hidrokarbon emisyonu (HC).....	33
3.1.2. Karbon monoksit emisyonu (CO) .....	33
3.1.3. Karbondioksit emisyonu (CO <sub>2</sub> ).....	34
3.1.4. İs (Duman) emisyonu .....	35
3.1.5. Azot oksit emisyonu (NO <sub>x</sub> ).....	35
3.2. Egzoz Gazı Resirkülasyonu (EGR).....	36

3.3. Aşırı Doldurma .....	40
---------------------------	----

## **BÖLÜM 4.**

<b>DENEY TASARIMI VE TAGUCHI YÖNTEMİ .....</b>	<b>43</b>
4.1. Deney Tasarımı .....	43
4.2. Taguchi Yöntemi.....	45
4.2.1. Taguchi yönteminin gelişimi ve felsefesi .....	45
4.2.2. Taguchi yönteminde kalite kontrol .....	46
4.2.3. Taguchi kayıp fonksiyonu.....	48
4.2.4. Taguchi yönteminde performans karakteristiği ve performans istatistiği.....	51
4.2.5. Taguchi yönteminde parametre tasarımı .....	52
4.2.6. Taguchi yönteminin uygulama adımları .....	57
4.2.7. Taguchi deney tasarım yönteminin Minitab programında uygulanması.....	59

## **BÖLÜM 5.**

<b>MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>63</b>
5.1. Materyal .....	63
5.1.1. Biyodizel üretimi.....	63
5.1.2. Etanol fumigasyonu .....	64
5.1.3. Deneylerde kullanılan yakıtların özellikleri.....	65
5.1.4. EGR sistemi .....	66
5.1.5. Aşırı doldurma sistemi .....	66
5.1.6. Deney düzeneği.....	67
5.1.6.1. Deney motoru.....	68
5.1.6.2. Dinamometre.....	69
5.1.6.3. Yakıt sarfiyatının ölçülmesi .....	69
5.1.6.4. Sıcaklık ölçümleri .....	70
5.1.6.5. Emisyon ölçümleri .....	70
5.2. Yöntem (Taguchi Deney Tasarım Yöntemi).....	71
5.2.1. Problemin tanımlanması .....	71
5.2.2. Performans karakteristiklerinin belirlenmesi .....	71
5.2.3. Performans karakteristiklerine etki eden faktörlerin listelenmesi.....	72
5.2.4. Kontrol edilebilen faktörlerin belirlenmesi .....	72
5.2.5. Faktör seviyelerinin belirlenmesi.....	73
5.2.6. Etkileşimlerin belirlenmesi .....	74
5.2.7. Deney tasarımının (ortogonal dizi) seçilmesi ve faktörlerin tasarım matrisine atanması.....	74
5.2.8. Deney uygulama planının oluşturulması.....	75
5.2.9. Deneylerin yapılması ve performans karakteristiklerinin değerlerinin bulunması .....	75
5.2.9.1. Döndürme momenti .....	77
5.2.9.2. Efektif güç.....	77
5.2.9.3. Özgül yakıt sarfiyatı.....	78
5.2.9.4. Efektif verim .....	78
5.2.9.5. Belirsizlik analizi .....	79
5.2.10. Performans karakteristiklerine uygun S/N oranlarının seçilmesi .....	79
5.2.11. Veri analizi yapılarak en iyi kombinasyonların belirlenmesi .....	80

5.2.12. Varyans analizi.....	80
5.2.13. Doğrulama deneylerinin yapılması .....	81

## **BÖLÜM 6.**

<b>ARAŞTIRMA BULGULARI .....</b>	<b>82</b>
6.1. Motor Performans Karakteristikleri İçin Optimum Deney Kombinasyonlarının Belirlenmesi .....	82
6.1.1. Döndürme momenti ve efektif güç .....	82
6.1.2. Efektif verim .....	86
6.1.3. Özgül yakıt sarfıyatı (ÖYS) .....	89
6.2. Motor Emisyon Karakteristikleri İçin Optimum Deney Kombinasyonlarının Belirlenmesi .....	92
6.2.1. NO emisyonları .....	92
6.2.2. İş emisyonları .....	94
6.2.3. HC emisyonları .....	97
6.2.4. CO emisyonları .....	99
6.2.5. CO <sub>2</sub> emisyonları .....	102
6.3. Doğrulama Deneylerinin Sonuçları.....	104

## **BÖLÜM 7.**

<b>GENEL DEĞERLENDİRME .....</b>	<b>105</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>109</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>117</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$\Delta$	: Kayıp fonksiyonundaki tolerans
$\Delta V$	: Tüketilen yakıt hacmi
$\Delta t$	: Yakıt tüketme süresi
$a$	: Ortogonal dizi sembolündeki deney sayısı
$A_i$	: A faktörünün toplam seviyesinin toplamı
$b$	: Ortogonal dizi sembolündeki seviye sayısı
$b_e$	: Özgül yakıt sarfiyatı
$C$	: Karbon
$c$	: Ortogonal dizi sembolündeki faktör sayısı
$CO$	: Karbon monoksit
$CO_2$	: Karbondioksit
$DF$	: Serbestlik derecesi
$F$	: Fren terazi kuvveti
$F_{factor}$	: Faktörün F oranı
$H$	: Hidrojen atomu
$H_2$	: Hidrojen
$H_2O$	: Su buharı
$HC$	: Hidrokarbon
$H_u$	: Yakıtın alt ısıl değeri
$K$	: Potasyum
$k$	: Kayıp fonksiyonunda sapmayı para birimine çeviren katsayı
$k_A$	: A faktörünün seviye sayısı
$L_a(b^c)$	: Ortogonal dizi sembolü
$L$	: Moment kolu uzunluğu
$m$	: Kayıp fonksiyonunda hedef değer
$M_d$	: Döndürme momenti



MS	: Kareler ortalaması
$\dot{m}_y$	: Kütlesel yakıt debisi
N	: Azot
N	: Toplam deney sayısı
n	: Motor devri
N <sub>2</sub>	: Azot molekülü
N <sub>2</sub> O	: Diazot monoksit
N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	: Diazot dioksit
N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	: Diazot pentaoksit
Na	: Sodyum
n <sub>Ai</sub>	: A faktörünün seviyesinin toplamı
$\eta_e$	: Efektif verim
NO	: Azot monoksit
NO <sub>2</sub>	: Azot dioksit
NO <sub>x</sub>	: Azot oksit
O	: Oksijen atomu
O <sub>2</sub>	: Oksijen
OH	: Hidroksit
P <sub>e</sub>	: Efektif güç
ppm	: Milyonda bir partikül
R	: Belirsizlik analizine göre sistemde ölçülen büyüklük
$\rho_y$	: Yakıtın yoğunluğu
S/N	: Sinyal / Gürültü oranı
SO <sub>2</sub>	: Kükürt dioksit
SS	: Kareler toplamı
SS <sub>A</sub>	: A faktörüne bağlı karelerin toplamı
SS <sub>factor</sub>	: Faktörün karelerinin toplamı
SS <sub>T</sub>	: Toplam değişkenliğe sahip olan karelerin toplamı
T	: Deneylerin toplamının S/N oranları toplamı
v	: Serbestlik derecesi
v <sub>A</sub>	: A faktörünün serbestlik derecesi
v <sub>AxB</sub>	: A ve B etkileşiminin serbestlik derecesi

$V_B$	: B faktörünün serbestlik derecesi
$V_{factor}$	: Faktörün varyansı
$V_{LN}$	: Tüm faktör ve etkileşimlerin serbestlik derecesi
$W_R$	: Sistemde ölçülen büyüklüğün belirsizliği
$Y$	: Kayıp fonksiyonunda hedef değişkeninin ölçülen değeri
ANOVA	: Varyans analizi
ASTM	: Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
CNG	: Sıkıştırılmış doğal gaz
DIN	: Alman Standartlar Enstitüsü
ECU	: Elektronik kontrol ünitesi
EGR	: Egzoz gazı resirkülasyonu
HFk	: Hava fazlalık katsayısı
KMA	: Krank mili açısı
LNT	: Fakir azot oksit tuzağı
LPG	: Sıvılaştırılmış petrol gazı
ÖYS	: Özgül yakıt sarfiyatı
PM	: Partikül madde
SCR	: Seçici katalitik indirgeme
STD	: Standart motor
ÜÖN	: Üst ölü nokta

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Yağ asitlerinin gliserinle esterleşmesi .	10
Şekil 2.2. Bitkisel yağın metanol ile reaksiyonu	15
Şekil 3.1. Dizel motorlarında yanma sırasında emisyonların oluşumu	32
Şekil 3.2. EGR'nin çalışma prensibi	38
Şekil 3.3. Dizel motorlarında EGR sistemine göre difüzyon alevinin durumu.	38
Şekil 4.1. Taguchi'nin üretim-kalite çemberi	47
Şekil 4.2. Taguchi kayıp fonksiyon grafiği	49
Şekil 4.3. Hedef değer en iyi kayıp fonksiyonun grafiği .	50
Şekil 4.4. En küçük en iyi kayıp fonksiyonun grafiği	50
Şekil 4.5. En büyük en iyi kayıp fonksiyonun grafiği .	51
Şekil 4.6. Robust tasarım diyagramı	53
Şekil 4.7. Minitab 17 kullanıcı ara yüzü	60
Şekil 5.1. Biyodizelin transesterifikasyon yöntemiyle üretim şeması	63
Şekil 5.2. Etanol fumigasyonun yapıldığı sistem	65
Şekil 5.3. Deney düzeneği	67
Şekil 5.4. Deney düzeneğinin şematik görünümü	68
Şekil 5.5. Dinamometre	69
Şekil 5.6. Yakıt tankı ve yakıt ölçme kabı	69
Şekil 5.7. Gösterge paneli ve sıcaklık göstergesi	70
Şekil 5.8. Emisyon ölçüm sistemi	70
Şekil 5.9. İS emisyonu ölçüm sistemi	71
Şekil 6.1. Döndürme momenti için faktör seviyeleri S/N değerleri	83
Şekil 6.2. Efektif güç için faktör seviyeleri S/N değerleri	83
Şekil 6.3. Efektif verim için faktör seviyeleri S/N değerleri	87
Şekil 6.4. Özgül yakıt sarfiyatı için faktör seviyeleri S/N değerleri	90
Şekil 6.5. NO emisyonu için faktör seviyeleri S/N değerleri	92
Şekil 6.6. İS emisyonu için faktör seviyeleri S/N değerleri	95
Şekil 6.7. HC emisyonu için faktör seviyeleri S/N değerleri	98
Şekil 6.8. CO emisyonu için faktör seviyeleri S/N değerleri	100
Şekil 6.9. CO <sub>2</sub> emisyonu için faktör seviyeleri S/N değerleri	102

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Bazı yağ bitkileri ve yağ oranları.....	4
Tablo 1.2. Dizel Motorları Avrupa Birliği Emisyon Standartları .....	7
Tablo 2.1. Mısır yağı içerisindeki başlıca yağ asitlerinin miktarları.....	12
Tablo 2.2. Bazı bitkisel yağların ve dizelin yakıt özellikleri .....	13
Tablo 2.3. Biyodizelin yakıt özellikleri .....	16
Tablo 2.4. Farklı ülkelerin belirlediği biyodizel standartları . .....	16
Tablo 2.5. Bitkisel yağların kimyasal formülleri .....	18
Tablo 2.6. Etanolün fiziksel ve kimyasal özellikleri .....	24
Tablo 4.1. Faktöriyel tasarım ve Taguchi yönteminin karşılaştırılması.....	46
Tablo 4.2. Taguchi ortogonal dizi seçim tablosu. ....	56
Tablo 4.3. $L_4(2^3)$ ortogonal dizisi.....	56
Tablo 4.4. $L_9(3^4)$ ortogonal dizisi.....	57
Tablo 5.1. Deneylerde kullanılan yakıtların özellikleri .....	65
Tablo 5.2. Deney motorunun teknik özellikleri .....	68
Tablo 5.3. Faktör ve seviyeleri.....	73
Tablo 5.4. Ortogonal dizi .....	74
Tablo 5.5. Deney kombinasyonları .....	76
Tablo 5.6. Ölçülen parametreler ve ölçüm cihazlarının özellikleri.....	77
Tablo 5.7. Belirsizlik analizi tablosu .....	79
Tablo 5.8. S/N oranlarının hesaplanmasında kullanılan formüller .....	80
Tablo 6.1. Döndürme momenti için varyans analizi .....	86
Tablo 6.2. Efektif güç için varyans analizi .....	86
Tablo 6.3. Efektif verim için varyans analizi .....	89
Tablo 6.4. Özgül yakıt sarfıyatı için varyans analizi .....	91
Tablo 6.5. NO emisyonu için varyans analizi .....	94
Tablo 6.6. İS emisyonu için varyans analizi .....	97
Tablo 6.7. HC emisyonu için varyans analizi .....	99
Tablo 6.8. CO emisyonu için varyans analizi .....	102
Tablo 6.9. CO <sub>2</sub> emisyonu için varyans analizi.....	103

# FARKLI YAKIT KARIŞIMLARI VE EMİSYON AZALTMA TEKNİKLERİ UYGULANAN BİR DİZEL MOTORDA OPTİMUM PARAMETRELERİN TAGUCHI YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ

## ÖZET

Dünya nüfusunun hızla artması ve gelişen sanayi ile enerjiye duyulan ihtiyaç da katlanarak artmaktadır. Enerjiye duyulan ihtiyacın çoğunluğu fosil kaynaklardan elde edildiğinden ihtiyacın artması ile fosil yakıt rezervleri giderek azalmaktadır. Diğer yandan fosil yakıtların kullanımı çevreye büyük zararlar vermektedir. Bu durum yenilenebilir ve sürdürülebilir enerjiye olan yönelimi zorunlu kılmıştır. Bu doğrultuda dizel motorlarında bitkisel kaynaklardan üretilen biyodizel ve etanol yakıtlarının kullanımı ön plana çıkmaktadır.

Dizel motorlarının en önemli sorunlarından biri çevreye olumsuz etkileri olan  $NO_x$  emisyonlarıdır.  $NO_x$  emisyonları yüksek yanma odası sıcaklıklarında ve oksijenin varlığında meydana gelir.  $NO_x$  emisyonlarının azaltılması için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bunlardan biri egzoz gazı resirkülasyonudur (EGR). EGR ile egzoz gazlarının silindire geri sevki yapıp karışımın oksijen konsantrasyonu azaltılarak yanma sıcaklığının düşmesi sağlanır. Bu durumda  $NO_x$  emisyonlarının oluşumu azalmaktadır.

Petrol krizinin ortaya çıkışı ile alternatif yakıtlara olan yönelimle beraber motorlardan elde edilen performansın artırılmasına yönelik çalışmalar da hız kazanmıştır. Diğer yandan emisyon azaltıcı tekniklerden biri olan EGR sisteminin motora uygulanması motor performansını kötüleştirmektedir. Bu bağlamda aşırı doldurma sistemleri devreye alınabilir. Aşırı doldurma ile, silindir içerisine alınan havanın yoğunluğunun ve basıncının artırılmasıyla aynı motordan alınan güç artırılır.

Bu çalışmada, farklı yakıt karışımları, EGR ve aşırı doldurmanın direkt enjeksiyonlu su soğutmalı bir dizel motorunda performans ve emisyonlar üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Dizel yakıtı ilave olarak biyodizel (mısır yağı metil esteri) ve etanol kullanılmıştır. Biyodizel transesterifikasyon yöntemiyle üretilmiş ve dizel yakıtı belirli oranlarda kütleli olarak karıştırılmıştır. Etanol, fumigasyon yöntemiyle farklı oranlarda emme manifolduna püskürtülmüştür. Belirli oranlarda sisteme uygulanan EGR ve aşırı doldurmanın yapılabilmesi için deney düzeneğine ilave donanımlar eklenmiştir. Deneysel çalışmalar, Taguchi istatistiksel deney tasarım yöntemi kullanılarak belirlenen kombinasyonlara göre tekrarlı olarak yapılmıştır. Deneyler sonucunda veri analizi yapılarak performans ve emisyonlar için ayrı ayrı en iyi kombinasyonlar belirlenmiş ve sonuçlar varyans (ANOVA) analizi ile test edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Taguchi deney tasarımı, Biyodizel, Etanol, EGR, Aşırı doldurma, Motor performansı, Emisyon

# **DETERMINATION OF OPTIMUM PARAMETERS BY TAGUCHI METHOD IN A DIESEL ENGINE APPLIED DIFFERENT FUEL MIXTURES AND EMISSION REDUCTION TECHNIQUES**

## **SUMMARY**

The need for energy with the rapid growth of the world population and developing industry is growing exponentially. Because most of the energy needs are fulfilled by fossil sources, fossil fuel reserves are gradually decreasing with the increase in need. On the other hand, the use of fossil fuels causes great harm to the environment. This necessitates the orientation to renewable and sustainable energy. In this respect, the use of biodiesel and ethanol fuels produced from plant sources in diesel engines comes to the fore.

One of the most important problems of diesel engines is the  $\text{NO}_x$  emissions which have negative effects on the environment.  $\text{NO}_x$  emissions occur at high combustion chamber temperatures and in the presence of oxygen. Several methods have been developed to reduce  $\text{NO}_x$  emissions. One of these is the exhaust gas recirculation (EGR). With the EGR, the exhaust gases are returned to the cylinder and the oxygen concentration of the mixture is reduced so that the combustion temperature is reduced. In this case, the formation of  $\text{NO}_x$  emissions is reduced.

With the emergence of the oil crisis and the tendency towards alternative fuels, the efforts to increase the performance of the engines have accelerated. On the other hand, the application of the EGR system, one of the emission reduction techniques, to the engine worsens the engine performance. In this context, super charge systems can be activated. With super charge, the force taken from the same engine is increased by increasing the density and pressure of the air taken in the cylinder.

In this study, the effects of different fuel mixtures, EGR and super charge on a performance and emissions in a water-cooled direct-injection diesel engine were investigated. Biodiesel (corn oil methyl ester) and ethanol were used as alternative fuels. Biodiesel was produced by transesterification method and mass-mixed to diesel fuel at certain rates. Ethanol was sprayed to the intake manifold in different proportions by fumigation. In addition to the EGR and charge air receiver applied to the system in certain proportions, additional equipment has been added to the experimental setup. Experimental studies were performed in accordance with the combinations determined by using Taguchi statistical experiment design method. As a result of the experiments, data analysis was performed and the best combinations for performance and emissions were determined and the results were tested with variance (ANOVA) analysis.

Keywords: Taguchi experiment design, Biodiesel, Ethanol, EGR, Supercharging, Engine performance, Emissions

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Enerji ihtiyacı, nüfus artışı ve sanayileşmenin sonucu olarak sürekli artmaktadır. Enerjinin büyük çoğunluğu hidrolik, termik, nükleer santraller, kömür ve petrol aracılığıyla sağlanmaktadır. Enerji talebinin hızla artmasıyla özellikle kömür ve petrol gibi sınırlı kaynakların tükenme tehdidiyle karşı karşıya kalınmaktadır. Bu olumsuzluğa tedbir olarak ülkeler, enerji politikalarını yeni kaynaklara yönelik olarak oluşturmaktadırlar. Ülkelerin ihtiyaç duyduğu enerji, gelişmişlik düzeyine göre farklılık göstermektedir. Enerjinin elde edilmesinde öncelikle yerel kaynakların kullanılması büyük önem taşımaktadır. Bunun yanı sıra çevrenin kirletilmemesi, verimli ve sürekli kaynakların kullanılması, kaynakların çeşitliliği, üzerinde durulması gereken diğer önemli unsurlardır. Ülkeler enerji politikalarını oluştururken ekonomik, güvenilir, temiz ve kaliteli enerji kaynaklarının kullanımı üzerinde durmalıdırlar (İçingür ve Yanık, 2003).

Küresel enerji tüketiminin büyük bir bölümü ulaştırma alanında gerçekleşmektedir. Bu durumda, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim her alanda olduğu gibi taşıtlar açısından da büyük önem arz etmektedir. Günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarının taşıtlardaki kullanımları konusunda yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Ancak dünya genelinde taşıtların enerji kullanımlarına bakıldığında petrol türevli yakıtların hala en çok tercih edilen yakıtlar olduğu görülmektedir (Çakmak ve Bilgin, 2017; Petrol Sanayi Derneği Sektör Raporu, 2017 (Url-1)). Örneğin 2016 yılında yapılan bir araştırmaya göre AB üyesi 28 ülkede toplam petrol talebi 626,1 milyon tondur. Ayrıca Avrupa ülkelerinde dizel yakıt talebi sürekli artış göstermektedir (PETDER, 2017 (Url-1)). Türkiye’de 2019 yılına ait trafiğe kayıtlı araç sayısı verilerine bakıldığında, trafiğe kayıtlı araçların %37,8’i LPG’li, %37’si dizel yakıtlı, %24,8’i ise benzin yakıtlıdır. Bu rakamlar petrol kökenli yakıtların hala ne kadar yaygın olduğunu göstermektedir (Türkiye İstatistik Kurumu, 2019 (Url-2)).

Petrol kaynaklı yakıtlara bağımlılığın meydana getirdiği tükenme sorununun yanı sıra bir diğer önemli sorun ise çevreye verdikleri zararlardır. Bu zararların başında hava kirliliği gelmektedir. Taşıt motorlarında yanma sonu oluşan emisyonlar dış ortama atılmakta ve küresel ısınmaya, asit yağmurlarına, çeşitli solunum yolu hastalıklarına neden olmaktadır (Pulkrabek, 2010). Bu sorunların artması, çeşitli ülkelerin hava kirliliği için bazı tedbirler almasını zorunlu kılmıştır. Bu doğrultuda, Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa Birliği ülkeleri enerji politikalarını yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik oluşturmaktadırlar (Fizik Mühendisleri Odası, 2019 (Url-3); Avrupa Çevre Ajansı, 2019 (Url-4)). Çin Ulusal Enerji İdaresi, büyük boyutlara ulaşan hava kirliliğinin önlenmesi ve azaltılması için 2020 yılına kadar yenilenebilir enerjiye 361 milyar dolar yatırım yapılacağını açıklamıştır. Buna göre, kömür kullanımının azaltılarak yenilenebilir enerji kaynaklarının (rüzgar, güneş, temiz yakıt, nükleer enerji vb.) kullanımının artırılması hedeflenmektedir. Türkiye’de de hava kirliliğinin azaltılmasına yönelik yasal düzenlemeler ve örgütlenmeler yönünden kayda değer gelişmeler olduğu bilinmektedir (Sümer, 2014).

Enerji kaynakları birincil ve ikincil olarak iki grupta toplanabilir. Birincil enerji kaynakları teknolojik gelişmelerle beraber faydalanılan ve potansiyel olarak mevcut olan ‘yeni’ kaynaklar şeklinde ifade edilir. İkincil kaynaklar ise tükenmeyen ‘yenilenebilir’ enerji kaynakları olarak isimlendirilir (Öğüt ve Oğuz, 2006). Yenilenebilir enerji kaynakları üzerinde yapılan araştırmalar gün geçtikçe hız kazanmaktadır. Bu kaynaklar çevreye karşı duyarlı ve aynı zamanda yerel olan rüzgar enerjisi, güneş enerjisi ve biyokütle enerjisi gibi kaynaklardır. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin çoğu bu kaynakların geliştirilip kullanılmasını çeşitli teşvik yollarıyla artırmaktadır (Altıparmak vd., 2007).

Biyokütle enerjisi, yapısal olarak karbonhidratlardan oluşan hayvansal ve bitkisel kökenli maddelerden üretilen enerjidir. Sürdürülebilir bir kaynak olması, elde edilmiş alanlarının geniş olması ve kırsal bölgelerde sosyo-ekonomik kalkınmayı desteklemesi açısından biyokütle enerjisinin kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Biyokütle için kaynak teşkil eden unsurlardan bazıları; yağlı tohum bitkileri, odun, otlar, yosunlar, algler, evsel ve endüstriyel atıklar, hayvansal atıklar ve bitkisel atıklardır (Enerji İşleri Genel Müdürlüğü [YEGM], 2019 (Url-5); Karaosmanoğlu, 2002).



Büyükötle enerjisinin önemi, artan çevre kirliliği ve petrol kökenli yakıtların gitgide azalması sonucu artmıştır. Özellikle 1970'li yıllarda meydana gelen petrol krizi sebebiyle araç motorları için alternatif yakıtlara yönelim zorunlu hale gelmiştir. Bu alternatif yakıtlar etanol, metanol, sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), sıkıştırılmış doğal gaz (CNG), bitkisel yağlar, farklı formüllü dizel ve benzin yakıtlarıdır. Bunlar arasında etanol ve bitkisel yağlar fosil kaynaklardan elde edilmeyen, yenilenebilir yakıtlardır (Monyem, 1998). Özellikle biyokötle kökenli olup dizel motorlarında kullanılan en önemli alternatif yakıt biyodizeldir (YEGM, 2019 (Url-5); Karaosmanoğlu, 2002).

Biyodizel, yenilenebilir yağlardan elde edilen uzun zincirli asitlerin mono alkol esterleri olarak ifade edilir. Ester kaynaklı, oksijen içeriği zengin olan biyolojik bir yakıt türüdür (Connemann vd., 2000). Diğer bir deyişle biyodizel, yağlı tohum bitkilerinden, hayvansal kökenli yağlardan ve atık kıvartma yağlarından bir katalizör eşliğinde metanol veya etanol gibi alkoller ile tepkimeye girerek elde edilen mono alkil esterdir (Çelikten ve Arslan, 2008).

Biyodizel, motorlarda herhangi bir yapısal değişikliğe gerek duyulmadan kullanılabilir. Ayrıca depolama ve taşıma kolaylığı, yağlayıcılığının iyi olması, motor torkunu ve gücünü fazla değiştirmemesi, temiz yakıt olması gibi olumlu yönleri de biyodizelin tercih edilmesinde etkin rol oynamaktadır (Ultraenerji, 2019 (Url-6)).

Dizel motorlarında biyodizel kullanılması, biyodizelin yenilenebilir bir yakıt olmasının yanı sıra motor performansında dizel yakıtı yakın sonuçlar vermesi ve bazı emisyonları azaltması açısından da önem arz etmektedir. Dizel motorlarında yapılan çalışmaların birçoğunda yakıt olarak biyodizel kullanılması ile dizel yakıtı göre CO (karbon monoksit), HC (hidrokarbon) ve is emisyonlarında azalmalar kaydedilmiştir (Haşimoğlu vd., 2008; Behçet ve Oral, 2014; Keskin ve Ekşi, 2006; Manigandan vd., 2019; Nabi ve Rasul, 2018; Chen vd., 2018; Aydın ve Öğüt, 2017; Usta vd., 2005; Ayhan vd., 2019; Karabaş, 2009). Biyodizel içerisinde kükürt bileşeni olmadığı için SO<sub>2</sub> (kükürt dioksit) emisyonları da yakıttaki biyodizel oranına bağlı olarak düşmektedir. Ancak biyodizel kullanımında dizel yakıtı oranla daha yüksek NO<sub>x</sub> (azot oksit) emisyonu meydana gelmektedir (Haşimoğlu vd., 2008; Behçet ve Oral, 2014; Keskin ve Ekşi, 2006; Nabi ve Rasul, 2018; Chen vd., 2018; Usta vd., 2005; Ayhan vd., 2019; Karabaş, 2009;

Aydoğan, 2008). Bu durum biyodizel kullanımı ile beraber NO<sub>x</sub> azaltıcı yöntemlerin de uygulanması konusunu önemli bir boyuta taşımaktadır.

Dizel motorlarında bitkisel yağların saf olarak kullanılması motorun yapısı ve yanma olayı açısından bir takım problemler teşkil etmektedir. Bu problemler yanma odasında aşırı karbon birikmesi, enjektör tıkanması, yağlama yağının seyrelmesi, segman sıkışması, silindirlerin aşınması, atomizasyonun kötüleşmesi, buharlaşmanın düşük olması, eksik yanma gibi olumsuzluklardır ve bunlar bitkisel yağların yüksek viskozite ve moleküler ağırlıkları sebebiyle meydana gelmektedir (Haşimoğlu, 2005; Aydoğan, 2008; Al-Widyan vd., 2002; Dorado vd., 2003). Bitkisel yağların üretimi sırasında bu gibi olumsuzlukların azaltılması için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden en etkili olanı transesterifikasyon yöntemidir. Transesterifikasyon ile biyodizel üretimi aşamasında, trigliseridlerden gliserol ayrıştırılır ve bunun yerine alkol bağlanır. Bu yöntem sayesinde yağın viskozitesinin azaltılması sağlanır, ancak yağın setan sayısı ve ısıl değerinde herhangi bir değişiklik olmaz. Böylece bu yakıt, dizel motorlarında yapısal bir değişikliğe mahal vermeden kullanılır hale getirilir (Haşimoğlu, 2005; Monyem ve Gerpen, 2001). Tablo 1.1'de biyodizelin elde edildiği bazı bitkiler ve yağ oranları verilmiştir.

Tablo 1.1. Bazı yağ bitkileri ve yağ oranları (Aydoğan, 2008; Foodelphi, 2019 (Url-7)).

BİTKİLER	YAĞ İÇERİKLERİ (%)
Ayçiçeği	22-50
Soya	18-24
Yerfıstığı	40-60
Kanola	40-50
Aspir	20-25
Keten	30-45
Kenevir	30-32
Hintyağı	50-60
Mısır	15-20
Pamuk	20-30

Diğer bir alternatif yakıt olan etanol, bazı olumlu özellikleri sayesinde ve petrol kullanımını azaltmak açısından dizel motorlarında dizel yakıt yerine kullanılmaya en

müsait yakıtlardan biridir. Etanol, dizel yakıt gibi kükürt ve ağır metaller içermemesi, daha küçük moleküler yapıda olması ve bünyesinde oksijen bulundurması sayesinde bazı egzoz emisyonlarında azalma sağlamaktadır (Tutak vd., 2017; Aydın ve Öğüt, 2017; Jamrozik, 2017; Sezer, 2017; Usta vd., 2005). Etanol, karbonhidratların enzimler ile katalize edilerek fermantasyonu sonucu elde edilen yenilenebilir bir yakıttır. Karbonhidrat olarak mısır, şeker pancarı, buğday, patates, pirinç, çavdar ve farklı meyveler seçilerek üretilebilmektedir (Can vd., 2005).

Alkollerin (metanol ve etanol) yenilenebilir bir yakıt olması nedeniyle dizel motorlarında kullanımı ile ilgili 1970'li yıllardan beri çalışmalar yapılmaktadır (Usta vd., 2005). Bu çalışmalar özellikle is ve partikül maddenin (PM) azaltılmasına yoğunlaşmıştır. Literatür incelendiğinde yapılan bazı çalışmalarda dizel yakıtta etanol ilave edilmesiyle HC, CO ve is emisyonlarının azaldığı görülmektedir (Tutak vd., 2017; Aydın ve Öğüt, 2017; Jamrozik, 2017; Sezer, 2017; Usta vd., 2005). Diğer yandan dizel yakıtta alkol eklendiğinde dizel yakıtın fiziksel ve kimyasal özelliklerinde değişimler meydana geldiği bir gerçektir. Bunun için etanolün motora gönderilmesi ile ilgili bazı teknikler geliştirilmiştir (Usta vd., 2005).

Motorlu taşıtların çevreye yaydıkları yakıt-yağ buharı, egzoz emisyonları, kurşun bileşikleri, korozyon ile meydana gelen atıklar kirletici etki oluşturmaktadır. Bilhassa, taşıtların yoğun olarak kullanıldığı büyük şehirlerdeki hava kirliliğinin büyük bir kısmı (%60-70'i) motorlu taşıtlar sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu emisyonların önemli bir miktarı yanma ile meydana gelmektedir. Hem dizel hem de benzin motorlarında hidrokarbon kaynaklı yakıtlar kullanılmaktadır. İdeal şartlarda, hidrokarbonlu yakıtların hava ile tam yanması ile karbondioksit (CO<sub>2</sub>), su buharı (H<sub>2</sub>O) ve azot oksitler oluşur. Teoride bu şekilde olmasına karşın gerçekte durum daha farklıdır. Yanma ideal şartlarda sağlanamadığında tam yanma gerçekleşmez ve bunun sonucu olarak zararlı emisyonlar oluşur. Egzoz gazlarının içerisinde; kısmen yanmış hidrokarbonlar, karbon monoksit, azot oksit, kükürt dioksit, kurşun bileşikleri ve is bulunmaktadır. Bunlardan en zararlı olanları hidrokarbon, karbon monoksit, azot oksit ve is emisyonlarıdır (Ayhan, 2009).

Dizel motorları ile buji ateşlemeli motorların çalışma prensipleri gereği açığa çıkardıkları emisyonlar farklılık göstermektedir. Benzin motorlarında kısmi eksik yanma sonucu oluşan CO ve HC önem taşımakta iken, dizel motorları daha fakir

karışımlar ile çalıştığından  $\text{NO}_x$  ve partikül madde oluşumu önem arz etmektedir (Ayhan, 2009). Dizel motorlarında silindirdeki havanın sıkıştırma oranı 1/14 ile 1/22 değerleri arasında değişmektedir. Bu oran, benzin motorlarındaki oranın iki katına denk gelmektedir. Bu şekilde sıkışarak yüksek sıcaklık ve basınca sahip olan hava, yakıt püskürtüldüğünde daha kolay tutuşmaktadır. Dizel motorlarında yanmanın daha iyi olması için teorik olarak hesaplanan hava miktarının 1,5 ile 2 misli kadar hava ortamda var olmalıdır. Zararlı emisyonların oluşması yanma olayı ile ilişkilidir. Dizel motorlarında teorik tam yanma miktarına göre gerçek hava/yakıt oranı fazla olsa dahi yakıt zerreciklerinin etrafında yeterli oranda havanın bulunmaması eksik yanmaya sebebiyet vermektedir. Bu durumda is oluşumu kaçınılmaz olmaktadır (Haşimoğlu, 2005). Dizel motorlarında meydana gelen emisyonlar gaz ve partikül fazında olup, oldukça karmaşık yapıdadırlar. Emisyonların yapısı motorun çalışma koşullarına, motor ve yakıtın tipine, yağlama yağına ve motorda emisyon kontrol sisteminin bulunup bulunmamasına bağlıdır (İçingür vd., 2003).

Kirletici emisyonların çevre için oluşturduğu tehdit konusunda Avrupa Birliği ve diğer bazı ülkeler ciddi önlemler almaktadır. Bunun için çeşitli emisyon sınırlayıcı yasalar yürürlüğe girmekte ve bu durum otomotiv üreticilerini emisyonların azaltılması yönünde çalışmalar yapmaya mecbur kılmaktadır. Emisyon standartlarını sağlayabilmek için uygulanan yöntemler genellikle motor performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Dolayısıyla emisyonlarla birlikte motor performansını iyileştiren uygulamaların geliştirilmesi gerekmektedir (Ayhan vd., 2008). Avrupa Birliği Emisyon Standartları Tablo 1.2'de verilmiştir. Tablo incelendiğinde 1992 yılındaki Avrupa Birliği sınırları içerisinde olan dizel araçların  $\text{NO}_x$  üst limiti 8.0 g/kWh olarak belirlenmiştir. En son yürürlüğe giren Euro 6 standartlarına göre  $\text{NO}_x$  üst limiti 0.4 g/kWh değerinde olmaktadır. Aradan geçen 22 yıl boyunca  $\text{NO}_x$  emisyonlarının üst limiti 20 kat düşmüştür.

Tablo 1.2. Dizel Motorları Avrupa Birliği Emisyon Standartları (Euro Emisyon Standartları, 2019 (Url-8)).

	Tarih	Test Periyodu	CO	HC	NO <sub>x</sub>	PM	İs
Euro I	1992, < 85 kW	ECE R-49	4.5	1.1	8.0	0.612	-
	1992, > 85 kW	ECE R-49	4.5	1.1	8.0	0.36	-
Euro II	Ekim 1996	ECE R-49	4.0	1.1	7.0	0.25	-
	Ekim 1998	ECE R-49	4.0	1.1	7.0	0.15	-
Euro III	Ekim 1999	ESC&ELR	1.0	0.25	2.0	0.02	0.15
	Ekim 2000	ESC&ELR	2.1	0.66	5.0	0.10, 0.13*	0.8
Eoru IV	Ekim 2005	ESC&ELR	1.5	0.46	3.5	0.02	0.5
Euro V	Ekim 2008	ESC&ELR	1.5	0.46	2.0	0.02	0.5
Euro VI	31 Aralık 2013 <sup>[14]</sup>	ESC&ELR	1.5	0.13	0.4	0.01	-

\*Ağır ticari taşıtlar içindir.

Egzoz emisyon standartlarını yakalayabilmek için birçok yöntem geliştirilmiştir. Aşağıda bu yöntemler belirtilmektedir (Haşimoğlu, 2005):

- Yanma öncesi alınan önlemler: Kullanılan yakıtın emisyonları azaltmaya yönelik hazırlanması (alternatif yakıtlar, katkı maddeleri vb.).
- Yanma sırasında alınan önlemler: Emisyonların yanma esnasındaki oluşumunu azaltmak (aşırı doldurma, egzoz gazı resirkülasyonu, sıkıştırma oranı, yanma odası şekli, subap zamanlaması vb.).
- Yanma sonrası alınan önlemler: Oluşan emisyonları egzoz gazı içerisinde arındırmak (katalitik konvertör, seçici katalitik indirgeme (SCR), termik reaktör, partikül filtresi vb.).

Dizel motorlarında NO<sub>x</sub> oluşma nedeni yüksek yanma odası sıcaklığıdır. Yanma odası sıcaklığı 1800 °C'yi aştığında karışım içerisindeki azot ve oksijen birleşerek NO<sub>x</sub> emisyonlarını meydana getirir (İlkılıç vd., 2009). Dolayısıyla NO<sub>x</sub>'leri azaltmak için yanma sonu oluşan maksimum sıcaklığın azaltılması birincil hedef olmalıdır. Egzoz gazı resirkülasyonu ile egzoz gazlarının bir kısmı soğutulup silindir içerisine geri gönderilerek yanma sonu sıcaklığının düşürülmesi sağlanmaktadır (Özülkü, 2002). Literatürde EGR ile yapılan çalışmalar incelendiğinde NO<sub>x</sub> emisyonlarının kayda değer oranda azaldığı görülmüştür (Haşimoğlu vd., 2002; Tok, 2010; He vd., 2018; Verma vd., 2019). Ancak NO<sub>x</sub> emisyonunun azaltılması için verilen

EGR oranının artırılması ile bazı emisyonlar ve motor performansı kötüleşmektedir. Bunun önüne geçmek için EGR yüzdesinin %30'dan fazla verilmesi önerilmemektedir (Haşimoğlu vd., 2002; Ayhan, 2009).

Petrol kaynaklarının azalması, alternatif yakıtlara olan yönelimle beraber motorlarda farklı uygulamaların geliştirilmesine de neden olmuştur. Üretilen motorlarda, verim ve gücün artırılmasının ve yakıt sarfiyatının azaltılmasının yanı sıra çevreye karşı duyarlı olma faktörü de önem kazanmıştır. Dizel motorlarında yanma odalarının büyütülmesi, farklı püskürtme sistemi tasarımlarının ve aşırı doldurma sistemlerinin geliştirilmesi motor gücünün ve veriminin olumlu yönde sonuçlar vermesine yol açmıştır. Özellikle aşırı doldurma sistemleri hem çevreci hem de performans artırıcı olmalarıyla dizel motorlarında tercih sebebi olmaktadır. Aşırı doldurma genel bir ifadeyle, silindir içerisine alınan havanın yoğunluğunun ve basıncının artırılmasını sağlayarak motor efektif gücünü artırmasını veya tam tersi belirli bir efektif güç için motorun ağırlığının ve hacminin düşürülmesini sağlamaktadır. Diğer yandan aşırı doldurma, motor verimini yükseltmekte ve egzoz emisyonlarının birim güç başına olan miktarlarını düşürmektedir (Özülkü, 2002). Bu sayede dizel motorları, aşırı doldurma sistemleri ile binek araçlarda yaygın bir şekilde kullanılabilir duruma gelmiştir.

Araştırmacılar motorların performansını artırmak ve emisyonlarını azaltmak için motor tasarımından, farklı yakıt kullanımlarına kadar birçok yöntemi bir arada incelemektedirler. Bu aşamada doğru sonuca ulaşabilmek için deney tasarımının önemi büyüktür. Farklı bilim dallarına ait deneylerde olduğu gibi motor deneylerinde de farklı girdi parametrelerinin hedef değer üzerindeki etkilerinin araştırılmasında genellikle tam veya kısmi faktöriyel deney planları kullanılmaktadır. Tam faktöriyel deney planları; deneyde girdi parametresi olarak seçilen her bir faktörün tüm seviyelerinin diğer faktörlerin her bir seviyesi ile eşleşmesi sonucu oluşan tüm kombinasyonların yapılmasını kapsamaktadır. Bu deney planı faktörlerin tüm kombinasyonlarını denediği için zaman ve maliyet bakımından oldukça dezavantajlı bir yöntemdir. Kısmi faktöriyel deney planları ise; ortogonal diziler kullanılarak her bir faktörün bazı seviyelerinin birbiriyle eşleşmesi ile daha az sayıda deney yapılmasını sağlayan deney planlarıdır. Ancak bu deney planı da tüm kombinasyonların yapılmaması sonucu bazı etkileşimlerin anlaşılmasına neden olmaktadır (Şanyılmaz, 2006). Diğer kısmi faktöriyel deney

tasarım yöntemlerinden biri ise Taguchi yöntemidir. Taguchi yöntemi; ürün ve süreçteki değişkenliği minimum seviyeye indirmek için, değişkenliği oluşturan kontrol edilemez faktörlere karşı, kontrol edilebilir faktörlerin seviyelerinin optimum kombinasyonlarının seçilmesiyle oluşturulan bir deney tasarım yöntemidir (Güneş, 2015). Bu yöntem ile ortogonal deney planlarından yararlanılarak faktör ve seviyelerinin en etkili kombinasyonları belirlenir ve daha az sayıda deney ile doğru sonuçlar elde edilmesi sağlanır. Dolayısıyla fazla sayıda faktör ve seviye içeren deney planlarında en iyi kombinasyonların tespiti için Taguchi yöntemi önerilmektedir. Bu yöntemin yapılan birçok çalışmada deneyler esnasında yaşanan zaman ve maliyet kayıplarını azalttığı görülmüştür (Wu ve Wu, 2013; Lee vd., 2013; Wu vd., 2014).

Bu çalışmada, tek silindirli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda belirli oranlarda alternatif yakıt kullanarak ve motora farklı oranlarda EGR ve aşırı doldurma uygulayarak motor performans ve emisyon parametreleri optimize edilmiştir. Dizel yakıtı alternatif olarak biyodizel (mısır yağı metil esteri) ve etanol kullanılmıştır. Biyodizel dizel yakıtı kütleli oranda karıştırılarak, etanol ise emme manifolduna püskürtülerek uygulanmıştır. Belirli oranlarda motora uygulanan EGR ve aşırı doldurmanın yapılabilmesi için deney düzeneğine bazı donanımlar ilave edilmiştir. Deneysel çalışmalar farklı yük şartlarında ve motor devirlerinde gerçekleştirilmiştir. Taguchi istatistiksel deney tasarım yönteminin kullanıldığı çalışmada kontrol edilebilen faktörler ve seviyeleri belirlenmiş, Minitab programı ile bu faktör ve seviyelerine uygun ortogonal dizi oluşturulmuştur. Deneysel çalışmalar, Taguchi'nin belirlediği L16 ortogonal dizisindeki kombinasyonlara göre tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerden elde edilen verilerin analizi Minitab programı ile yapılarak performans ve emisyonları optimum yapan faktör kombinasyonları belirlenmiştir. Son olarak elde edilen veriler varyans analizi ile yorumlanmıştır.

## BÖLÜM 2. BİYODİZEL VE ETANOL

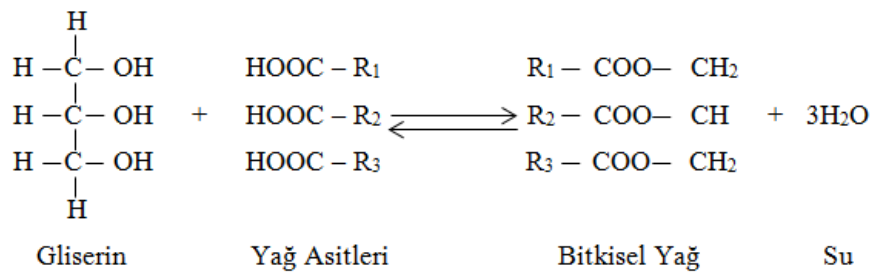
### 2.1. Biyodizel

#### 2.1.1. Bitkisel yağlar

Uzun yıllardır enerji kaynağı olarak petrol kullanımının kaynakların hızla azalmasına yol açması, yeni kaynaklara yönelimi zorunlu kılmıştır. Bunun yanında içten yanmalı motorların tasarımı, petrol kaynaklı yakıtlara göre gelişim gösterdiğinden halihazırdaki motor tasarımlarında fazla bir değişikliğe gidilmeden dizel yakıtına alternatif olabilecek farklı yakıtların araştırılması önemli hale gelmiştir.

Alternatif yakıt söz konusu olduğunda özellikle tarımsal alanların geniş olduğu ülkelerde bitkisel yağlar ilk sıralarda yer almaktadır. Bitkisel yağlar, yağlı tohum bitkilerinden elde edilmektedir. Çok çeşitli bitkisel yağ olmakla birlikte, Türkiye’de en fazla üretimi yapılan yağlar; ayçiçek, mısır, pamuk, zeytin, soya, kolza, aspir, haşhaş, keten ve kenevir tohumudur (Haşimoğlu, 2005).

Farklı uzunluktaki yağ asitlerinin (R-COOH), gliserin ile meydana getirdiği esterlere bitkisel yağ denir. Gliserinin, yağ asitleri ile bir enzim etkisinde ve uygun bir ortamda esterleşmesi sonucu trigliserid oluşur. Şekil 2.1’de yağ asitlerinin gliserin ile esterleşmesi görülmektedir (Yamık, 2002).



Şekil 2.1. Yağ asitlerinin gliserinle esterleşmesi (Yamık, 2002).



Gliserin, hidroksil grubundan üç adet bulunduran bir alkoldür. Su ve alkolde çözünür. 20°C ergime noktası ve 290°C kaynama noktası olan, kokusuz, hafif ve tatlı bileşiklerden oluşur. Biyodizel üretimi sırasında, bitkisel yağların etanol veya metanol gibi alkollerle esterleşmesi sonucu yan ürün olarak ortaya çıkar (Ekinci vd., 2015).

Yağların fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirleyen yağ asitleri aşağıdaki gibi iki gruba ayrılır. Bunlar doymuş yağ asitleri ve doymamış yağ asitleridir.

- Doymuş yağ asitleri: Karbon atomlarının tek bağa sahip olduğu ve karbon atomlarının hidrojene tamamen doyduğu yağ asitleridir. Yapısı düz zincirler şeklindedir. Genel formülleri R-COOH şeklindedir.
- Doymamış yağ asitleri: Dallanmış bir yapıya sahiptir ve bir ya da iki çift bağ içerir. Bu moleküller hidrojene doymamış karbon atomları içerir. Genel formülleri denklem 2.1’de gösterilmiştir (Karaca ve Aytaç, 2007).



#### 2.1.1.1. Mısır yağı

Mısır yağı, Graminae familyasından Zea mays bitkisinin tohumlarından elde edilmektedir. Mısırın nişasta oranı yüksek olduğu için önemli bir enerji kaynağıdır ve içerisinde çeşitli vitamin ve mineraller bulunur. Türkiye’deki tahıl üretimi arasında mısır üretiminin yeri buğday ve arpadan sonra gelmektedir. Kültür bitkileri içerisinde dünyada en çok üretimi yapılan bitki olan mısır, ülkemizde de büyük önem taşımaktadır. Türkiye’deki mısır üretimi yoğun olarak Akdeniz, Karadeniz, Marmara, Ege ve Güney Doğu Anadolu Bölgeleri’nde yapılmaktadır. Mısırın verim değerleri dikkate alındığında ileriki yıllarda daha da önemli olacağı düşünülmektedir (Şahin, 2001; Aksoy, 2015).

İklim, sıcaklık, toprak çeşidi gibi faktörler mısırın kompozisyonunu önemli derecede etkiler. Ayrıca mısır bitkisinden istenilen verimin alınabilmesi için mısırın aynı tarlaya belirli aralıklarla ekilmesi ve gübrenmesi gereklidir (Şahin, 2001).

Mısır yağı, fazla oranda çoklu doymamış yağ asidi içerir. Mısır yağının bünyesinde, %13 doymuş yağ, %31 tekli doymamış yağ ve %56 çoklu doymamış yağ vardır. Mısır

yağının trigliserid yapısı 40, 42, 44, 46 ve 48 karbonlu trigliseridlerden meydana gelmektedir. Tablo 2.1’de mısır yağının yağ asitleri oranları verilmiştir (Öz ve Kapar, 2007).

Tablo 2.1. Mısır yağı içerisindeki başlıca yağ asitlerinin miktarları.

Yağ Asidi	Miktar (%)
Oleik asit	19-49
Linoleik asit	34-62
Palmitik asit	10

Mısır yağı, %34-62 oranlarında linoleik asit ve %19-49 oranlarında oleik asit içerir. Bu özelliği ile mısır yağı oleik-linoleik yağ grupları arasında bulunmaktadır. Doymuş yağ asidinin büyük bir kısmını ise yaklaşık %10 oran ile palmitik asit oluşturur (Öz ve Kapar, 2007)

#### **2.1.1.2. Yakıt olarak bitkisel yağların özellikleri ve performansı**

Alternatif yakıtlara ve özellikle biyokütle kökenli yakıtlara duyulan ihtiyaç doğrultusunda bitkisel yağların yakıt olarak kullanılması konusunda birçok araştırma yapılmaktadır. Bitkisel yağların yakıt olarak uygun olup olmadığına dizel yakıt için ortaya konulmuş sınır değerlerine bakılarak karar verilir (Haşimoğlu, 2005). Bazı bitkisel yağlarla dizel yakıtın özellikleri Tablo 2.2’de görülmektedir.

Bitkisel yağların özellikleri motorine göre farklılıklar göstermektedir. Bu yağların molekül ağırlıkları motorine göre fazla olduğundan viskoziteleri de motorine göre yaklaşık 10-20 kat yüksektir. Setan sayıları motorine kıyasla daha düşüktür, ASTM alt sınırı olan 40’a yakın oldukları tablodan anlaşılmaktadır. Bu yağların zengin oksijen içeriklerinden dolayı alt ısıl değerleri düşüktür. Akma ve donma noktaları bakımından herhangi bir uygunsuzluk yoktur. Tutuşma noktasının dizel yakıtı göre çok yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca karbon kalıntısı, su ve tortu, kül ve kükürt oranı gibi değerler ASTM sınırları içerisinde (Srivastava ve Prasad, 2000).

Tablo 2.2. Bazı bitkisel yağların ve dizelin yakıt özellikleri (Haşimoğlu, 2005).

	Özgül ağırlık (g/ml)	Kinematik viskozitesi (cSt)	Isıl değer (kJ/kg)	Setan sayısı (ASTM D613)	Donma noktası (°C)	Akma noktası (°C)
Ayçiçek	0,92	34,9	39644	33	7,2	-15
Soya	0,92	36,4	39390	39	-3,9	-12,2
Pamuk	0,91	37,4	37420	51	1,7	-15
Kolza	0,92	39	39913	37,6	-3,9	-31,7
Motorin	0,86	2,9	42450	50,8	-15	-33
Karbon kalıntısı	Tüm bitkisel yağlarda %0,22-0,30 (ASTM sınır değeri %0,35)					
Kükürt oranı	Tüm bitkisel yağlarda %0,01 (ASTM sınır değeri %0,5)					
Kül oranı	Tüm bitkisel yağlarda %0,005-0,01 (ASTM sınır değeri %0,01)					
Su ve tortu	Tüm bitkisel yağlarda %0,05 (ASTM sınır değeri %0,05)					

Bitkisel yağlar dizel motorlarında herhangi bir işlem görmeden kullanıldığında çeşitli sorunlara sebep olmaktadır. Hidrokarbon kaynaklı yakıtlara göre bitkisel yağların enjeksiyonu, atomizasyonu ve yanma özellikleri farklılık göstermektedir. Bitkisel yağlardaki yüksek viskozite atomizasyonun kötü olmasına yol açar, bu durum da tam yanmanın sağlanamamasına sebebiyet verir. Yüksek viskozitenin oluşturduğu problem yanma olayı ile sınırlı kalmayıp enjektör ve segmanlarda çeşitli birikintilere ve yağlama yağının özelliğini kaybetmesine neden olur. Ayrıca bitkisel yağların düşük uçuculuğa sahip olmaları yanma odasında fazla oranda birikintiye ve segman yapışmasına sebep olur. Bu olumsuzlukları bertaraf etmek için bitkisel yağların yüksek viskozite sorununun giderilmesi büyük önem taşımaktadır. Bunun için motorlarda yapısal değişikliklere gidilmekte veya bitkisel yağların elde edilmesi sırasında uygulanan yöntemlerin geliştirilmesi üzerinde durulmaktadır (Karaosmanoğlu vd, 1996; Rao ve Gopalakrishnan, 1991).

### 2.1.2. Biyodizelin üretim yöntemleri ve yakıt özellikleri

Biyodizel, bitkisel ve hayvansal yağlardan çeşitli yöntemlerle elde edilen yenilenebilir bir dizel yakıttır. Organik yağların baz ve alkol ile belirli oranlarda karıştırılmasıyla meydana gelen reaksiyon sonucu oluşan, uzun zincirli yağ asitlerinin mono alkil esterleridir (Durmuş ve Koçer, 2017). Biyodizel üretim yöntemlerinin çoğu viskozitenin düşürülmesi üzerinde yoğunlaşmaktadır (Alibaş ve Ulusoy, 1995).

### **2.1.2.1. Seyreltme**

Bitkisel yağlar etanol, çözücü veya dizel yakıt ile seyreltilebilir. Seyreltme işleminin yapıldığı bir çalışmada, ayçiçek yağı dizel yakıt ile 1/3 oranında birleştirilmiş ve oluşan yeni yakıtın özellikleri incelenmiştir. Bu karışımın 40°C'deki viskozitesi 4,88 cSt olarak ölçülmüştür. ASTM standartlarına göre 40°C için üst değer 4 cSt'dir. Sonuç olarak bu karışımın direkt enjeksiyonlu dizel motorlarında uzun süre kullanılmaması önerilmiştir (Srivastava ve Prasad, 2000; Oğuz, 2004).

### **2.1.2.2. Piroliz**

Piroliz, hava veya nitrojen varlığında ısıl enerjinin meydana getirdiği kimyasal değişimi ifade eder. Diğer bir deyişle, piroliz yöntemi moleküllerin yüksek sıcaklık etkisiyle daha küçük moleküllere bölünmesidir. Bu yöntemle yapılan birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar, hidrokarbon esaslı dizel yakıtlara benzer parafin ve olefinlerin elde edilmesinde sıcaklığın ve kullanılan katalizörün etkisinin önemini gösterir. Bu yöntemin bitkisel yağların viskozitesini düşürdüğü ancak yapılan işlemlerin maliyeti artırdığı belirtilmektedir (Srivastava ve Prasad, 2000; Doğan, 2017).

### **2.1.2.3. Mikroemilsiyon**

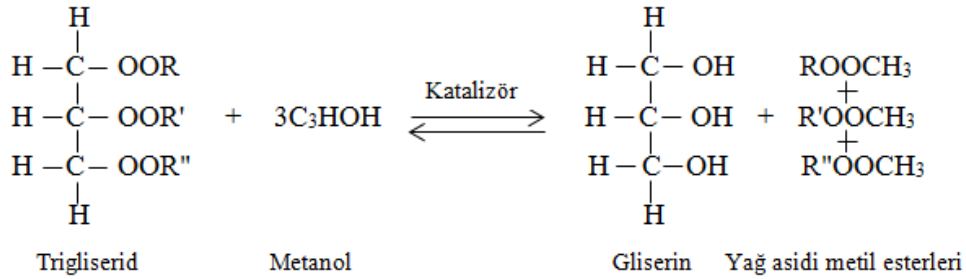
Mikroemilsiyonlar, yağ ve su gibi birbirine karışmayan iki sıvının bir yüzey aktif madde yardımıyla (süfaktan) karışması sonucu elde edilen çok küçük çapta damlacıklardır. Etanol veya metanol ile bitkisel yağın mikroemilsiyon boyutuna getirilmesi ile oluşturulur. Bu yöntem sayesinde bitkisel yağın viskozitesi önemli ölçüde azalmaktadır. Dizel yakıtı göre daha düşük hacimsel ısıl değere sahip olan mikromilsiyonların setan sayıları da daha azdır. Bu durum, motor efektif gücünün azalmasına neden olmaktadır. Bir diğer özelliği ise gizli buharlaşma ısısının yüksek olmasıdır. Yanma odasının soğumasını sağlayan bu özellik, enjektör nozülleri ve egzoz valfleri çevresinde tortu birikimini azaltmaktadır (Srivastava ve Prasad, 2000; Ercan, 2014; Oğuz, 2004).

#### 2.1.2.4. Transesterifikasyon

Transesterifikasyon işlemi, yağın bir katalizör eşliğinde monohidrik bir alkol ile esterleşmesidir. Reaksiyon sonunda yağ asitleri ve gliserin ana ürün olarak oluşur. Sebest yağ asitleri, di ve monogliseridler ve reaktan fazlası ise yan ürün olarak meydana gelir. Diğer bir adı alkoliz olan bu işlem trigliseridlerin viskozitesinin düşürülmesi için yapılır (Arslan ve Alibaş, 2015; Kılınçlı, 2011). Bu yöntemin bitkisel yağların viskozitelerinin azaltılmasında en etkili yöntem olduğu bilinir (Haşimoğlu, 2005). Transesterifikasyon işleminin reaksiyon formülü denklem 2.2’de verilmiştir (Srivastava ve Prasad, 2000);



Bu işlemde alkol olarak metanol kullanıldığında yeni reaksiyon Şekil 2.2’deki gibi olmaktadır (Srivastava ve Prasad, 2000; Oğuz, 2004);



Şekil 2.2. Bitkisel yağın metanol ile reaksiyonu (Srivastava ve Prasad, 2000).

Biyodizel üretiminde daha çok ayçiçek, mısır, soya, pamuk gibi bitkisel yağlar kullanılmaktadır. Alkollerden metanol, katalizör olarak ise potasyum veya sodyum hidroksit tercih edilmektedir (Srivastava ve Prasad, 2000).

Biyodizelin özelliklerinin dizel yakıtı yakın olması ihtiyaç durumunda biyodizelin dizel yakıtı yerine kullanılmasının önünü açmaktadır. Tablo 2.3’te görüldüğü üzere transesterifikasyon işlemi ile trigliseridlerin metil veya etil esterlere dönüştürülmesi trigliseridlerin molekül ağırlığını yaklaşık üçte bir oranında düşürür. Viskoziteleri sekiz

kat azalırken uçuculukları az oranda artar. Bu esterler, moleküler ağırlık olarak %10 - %11 arasında oksijen içerir. Yakıtın oksijen içeriği, hidrokarbon kaynaklı yakıtlara göre yanmayı daha fazla teşvik eden bir durumdur. 50 civarında setan sayısına sahip olan biyodizelin uçuculuğu iyileştiğinden dolayı ilk hareket sorunu önemli ölçüde aşılmaktadır. Biyodizelin hacimsel ısıl değeri dizel yakıtına göre yaklaşık %12 daha azdır. Ayrıca ester yakıtların parlama noktası, akma ve dumanlanma noktaları motorine göre daha fazladır (Srivastava ve Prasad, 2000).

Tablo 2.3. Biyodizelin yakıt özellikleri (Haşimoğlu, 2005; Srivastava ve Prasad, 2000).

Yağ asidi metil esteri	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Kinematik Viskozite (cSt)	Alt ısıl değer (kJ/kg)	Setan sayısı (ASTM D613)	Parlama noktası (°C)
Ayçiçek	0,88	4,6	40579	49	183
Soya	0,885	4,5	39760	45	178
Fıstık	0,883	4,9	33600	54	176
Motorin	0,86	2,9	42450	50,8	55

Biyodizel farklı yöntemlerle üretildiğinde yakıt özellikleri de farklılık göstermektedir. Dolayısıyla biyodizel için bazı standartlar getirilmiş ve sınır değerler belirlenmiştir. Tablo 2.4’te farklı ülkelerin biyodizel için belirledikleri standart değerler verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi ülkeler farklı standartlar kullanmaktadır. Büyük dizel motor üreticileri de bu standartları temel kabul etmektedirler (Oğuz, 2004).

Tablo 2.4. Farklı ülkelerin belirlediği biyodizel standartları (Oğuz, 2004).

	Birim	Avusturya	Fransa	Almanya	İtalya	ABD
Standart/Özellikler	-	ÖN C 1191		DIN E 51606	UNI 10635	ASTM PS121-99
Tarih	-	1997	1997	1997	1997	1999
Uygulama	-	YAME	BYME	YAME	BYME	YAMAE
Yoğunluk (15°C)	g/cm <sup>3</sup>	0,85-0,89	0,87-0,90	0,875-0,90	0,86-0,90	
Viskozite (40°C)	cSt	3,5-5	3,5-5	3,5-5	3,5-5	1,9-6
Damıtma (%95)	°C		≤ 360	-	≤ 360	-
Parlama noktası	°C	≥ 100	≥ 100	≥ 110	≥ 100	≥ 100
Akma noktası	°C	-	< -10	-	-	-
Kükürt	% kütle	≤ 0,02	-	≤ 0,01	≤ 0,01	≤ 0,05
Kül	% kütle	-	-	-	≤ 0,01	-
Su	mg/kg	-	≤ 200	≤ 300	≤ 700	≤ % 0,05

Tablo 2.4. (Devamı)

	Birim	Avusturya	Fransa	Almanya	İtalya	ABD
Bakır korozyonu	3h/50 °C	-	-	1	-	≤ No.3
Setan sayısı	-	≥ 49	≥ 49	≥ 49	-	≥ 40
Asit sayısı	MgKOH/g	≤ 0,8	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,8
Metanol içeriği	% kütle	≤ 0,20	≤ 0,1	≤ 0,3	≤ 0,2	-
Ester içeriği	% kütle	-	≥ 96,5	-	≥ 98	-
Monoglisericid	% kütle	-	≤ 0,8	≤ 0,8	≤ 0,8	-
Diglisericid	% kütle	-	≤ 0,2	≤ 0,4	≤ 0,2	-
Triglisericid	% kütle	-	≤ 0,2	≤ 0,4	≤ 0,1	-
Serbest gliserol	% kütle	≤ 0,02	≤ 0,02	≤ 0,02	≤ 0,05	≤ 0,02
Toplam gliserol	% kütle	≤ 0,24	≤ 0,25	≤ 0,25	-	≤ 0,24
İyot sayısı	-	≤ 120	≤ 115	≤ 115	-	-
Fosfor içeriği	mg/kg	≤ 20	≤ 10	≤ 10	≤ 10	-
Alkalin (Na,K)	mg/kg	-	≤ 5	≤ 5	-	-

### 2.1.3. Biyodizelin yakıt olarak performansı ve emisyonlara etkisi

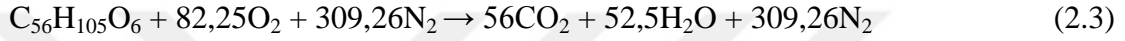
Biyodizel yakıtı hidrokarbon kökenli yakıtlarla karşılaştırıldığında daha yüksek setan sayısına sahip olması, yanma süresini uzatırken ateşleme gecikmesini kısaltmaktadır. Bundan dolayı partikül emisyon oluşumu az olmaktadır. Biyodizel kullanıldığında, egzozdan gelen koku dizel yakıtınki kadar kötü değildir ve enjektör nozullarında daha az karbon birikintisi meydana gelir. Biyodizelin ısıl değerinin düşük olması özgül yakıt sarfiyatını artırmaktadır. Biyodizel tek başına yakıt olarak kullanıldığı gibi HC kökenli yakıtlara karıştırılarak da kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda, biyodizelin motorine %20 oranında karıştırılmasının en iyi karışımı oluşturduğu belirtilmektedir. Bazı çalışmalar, biyodizel-dizel karışım yakıtlarının duman koyuluğunu, partikülleri, yanmamış hidrokarbonları, karbondioksit ve karbon monoksiti azalttığını, ancak azot oksitleri artırdığını ifade etmektedir (Haşimoğlu, 2005; Srivastava ve Prasad, 2000).

Hidrokarbon kaynaklı dizel yakıtlara göre bitkisel yağlardan elde edilen biyodizel yakıtının formülü farklılık göstermektedir. Bu durum teorik tam yanma için gerekli olan hava/yakıt oranının değişmesine sebep olmaktadır (Haşimoğlu, 2005). Tablo 2.5'te bazı bitkisel yağların kimyasal formülleri verilmektedir. Buna göre mısır yağı metil esterinin hava/yakıt oranının hesabı aşağıda görülmektedir.

Tablo 2.5. Bitkisel yağların kimyasal formülleri (Çakmak ve Bilgin, 2017).

Bitkisel Yağ	Kimyasal Formül	Yaklaşık Kimyasal Formül
Ham soya	$C_{56,2972}H_{102,4294}O_6$	$C_{56}H_{102}O_6$
Ham pamuk	$C_{55,3341}H_{102,4012}O_6$	$C_{55}H_{102}O_6$
Ham mısır	$C_{56,1227}H_{103,3569}O_6$	$C_{56}H_{103}O_6$
Soya metil esteri	$C_{53,3363}H_{100,6104}O_6$	$C_{53}H_{101}O_6$
Ayçiçek metil esteri	$C_{53,5881}H_{100,6104}O_6$	$C_{54}H_{101}O_6$
Mısır yağı metil esteri	$C_{55,98}H_{105,39}O_6$	$C_{56}H_{105}O_6$

Mısır yağı metil esterinin teorik olarak belirlenen tam yanma denklemi 2.3'te belirtilmiştir;



Teorik tam yanma için haya/yakıt kütle oranının hesabı 2.4 numaralı formülle yapılır;

$$\frac{H}{Y} = \frac{[(82,25 \times 32) + (309,26 \times 28)]}{[(56 \times 12) + (105 \times 1) + (6 \times 16)]} = \frac{11291,28}{873} = \frac{12,93}{1} \quad (2.4)$$

$$\frac{H}{Y} = \frac{12,93}{1} \text{ kg hava/kg yakıt}$$

olarak belirlenir.

Biyodizel kullanımı ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde bazı çalışmalarda biyodizelin (%10, %20, %50 oranlarında) standart motora göre motor gücü ve momentinde iyi yönde değişimlere sebep olduğu belirtilmiştir (Manigandan vd., 2019; Usta vd., 2005; Ayhan vd., 2019; Karabaş, 2009). Bazı çalışmalarda biyodizel (genel olarak %50 ve %100 oranlarında) kullanımı ile motor gücü ve momentinin bir miktar azaldığı ifade edilmektedir (Behçet ve Oral, 2014; Keskin ve Ekşi, 2006; Efe vd., 2018; Nabi ve Rasul, 2018; Khoobbakhta vd., 2019; Aydın ve Öğüt, 2017; Ayhan vd., 2019; Karabaş, 2009). Motor gücü ve momentindeki bu değişimlerin biyodizel içeriğindeki oksijenin fazla olmasından kaynaklandığı ileri sürülmektedir. Biyodizel karışımı ile efektif verimde bazı çalışmalarda iyileşmelerin olduğu (Haşimoğlu vd., 2008; Ejder, 2007; Ayhan vd., 2019), bazı çalışmalarda ise kötüleşmelerin olduğu ifade edilmiştir (Ayhan vd., 2019; Karabaş, 2009). Özgül yakıt sarfiyatında ise biyodizel karışımları kullanılarak yapılan çalışmaların bir kısmında artmaların meydana geldiği (Haşimoğlu



vd., 2008; Behçet ve Oral, 2014; Keskin ve Ekşi, 2006; Efe vd., 2018; Khoobakhta vd., 2019; Ayhan vd., 2019; Karabaş, 2009), bir kısmında ise azalmaların olduğu görülmüştür (Manigandan vd., 2019; Ejder, 2007; Ayhan vd., 2019). Genel olarak yakıt içerisindeki biyodizel oranının artması ile NO<sub>x</sub> emisyonlarının arttığı; HC, CO ve is emisyonlarının ise azaldığı görülmektedir (Haşimoğlu vd., 2008; Behçet ve Oral, 2014; Keskin ve Ekşi, 2006; Manigandan vd., 2019; Nabi ve Rasul, 2018; Chen vd., 2018; Aydın ve Öğüt, 2017; Usta vd., 2005; Ayhan vd., 2019; Karabaş, 2009). Çalışmalarda farklı sonuçların elde edilmesinin deneylerin yapıldığı koşulların ve motor ayar parametrelerinin farklılık göstermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Manigandan ve diğerleri (2019) su soğutmalı ve çok silindirli bir dizel motorunda dizel yakıtına çeşitli oranlarda karıştırılmış mısır yağı metil ester, pentanol ve titanyum karışım yakıtları ile deneysel çalışmalar yapmışlardır. Deneyleri farklı motor yükü ve motor devirlerinde gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonrasında, %25 mısır yağı biyodizeli, %50 dizel, %20 pentanol ve %5 titanyum içeren karışım yakıtından (M25D50P20T5) ve dizel yakıttan elde edilen veriler karşılaştırıldığında karışım yakıtı ile CO, HC ve is emisyonlarında önemli ölçüde azalmaların olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu sonucu, mısır yağı metil esterinin oksijen içeriğinin fazla olmasıyla ilişkilendirmişlerdir. M25D50P20T5 yakıtının dizel yakıtına göre özgül yakıt sarfiyatının daha az, motor torkunun ise daha fazla olduğu sonucuna varmışlardır. Diğer taraftan bu karışım yakıtında elde ettikleri NO<sub>x</sub> miktarının dizel yakıtına göre daha az olduğunu tespit etmişlerdir. NO<sub>x</sub> miktarındaki bu azalmanın yakıt içerisindeki pentanol ve titanyumdan kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir.

Keskin ve Ekşi (2006) direkt enjeksiyonlu tek silindirli bir dizel motorunda %100 mısır yağı biyodizelinin kullanılmasının motor performans ve emisyonlara etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar, 1800 d/d ile 3200 d/d arasında değişen motor hızlarında ve tam yük şartlarında gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları aynı şartlarda dizel yakıt ile çalışan motor verileriyle karşılaştırılmıştır. Mısır yağı biyodizelinin kullanılmasının motorun moment ve gücünde önemli bir değişime sebebiyet vermediğini (az oranda düşürmüştür), özgül yakıt tüketiminde ise artışa sebebiyet verdiğini gözlemlemişlerdir. Araştırmacılara göre mısır yağı biyodizelinin alt ısı değeri dizel yakıtına oranla düşük olduğundan, biyodizel kullanılan çalışmalarda

özgül yakıt tüketiminde artma olmaktadır. Biyodizel kullanımı ile CO ve is emisyonlarının azaldığı, NO<sub>x</sub> emisyonlarının arttığı sonucuna varmışlardır.

Efe ve diğerleri (2018) bir dizel motorunda beş farklı biyodizel (mısır, ayçiçeği, soya fasulyesi, kanola ve fındık) ve dizel yakıt ile motor performansındaki değişimi test etmek için deneysel çalışmalar yapmış ve deney sonuçlarını her bir biyodizel ve dizel yakıt ile karşılaştırmışlardır. Biyodizel yakıtları transesterifikasyon yöntemiyle üretmişlerdir. Biyodizel yakıtların tümünü %20, %50 ve %100 oranlarında uygulamışlardır. Motor performansı açısından en iyi sonuçları %20 fındık biyodizelinde elde etmişlerdir. Mısır yağı biyodizelinin kullanımı ile dizel yakıtı göre efektif güçte genel olarak azalma, özgül yakıt sarfiyatında ise artmanın olduğunu tespit etmişlerdir.

Ayhan ve diğerleri (2019) dizel yakıt ve ayçiçek yağı metil esteri karışımları kullanarak direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda, motor performansının ve emisyonların değişimlerini deneysel olarak araştırmışlardır. Transesterifikasyon yöntemiyle üretilen biyodizeli, dizel yakıtı B10, B20 ve B50 oranlarında kütleli olarak karıştırarak farklı oranlarda biyodizel-dizel yakıtlar elde etmişlerdir. Deneyleri, dizel yakıt ve farklı oranlardaki biyodizel-dizel yakıt ile yapmışlardır. B10 ve B20 yakıtlarını kullanarak yapmış oldukları deneyler sonucu motor gücü ve momentinde dizel yakıtlı motora göre artış gözlemlerken, B50 yakıtında azalmaların olduğunu gözlemlemişlerdir. B10 ve B20 yakıtında meydana gelen iyileşmelerin biyodizel içerisindeki zengin oksijen miktarından ve biyodizelin yoğunluğunun fazla olmasından kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir. Yakıt içerisindeki biyodizel miktarı az olduğunda ÖYS'nin azaldığını, efektif verimin ise arttığını saptamışlardır. B50 yakıtında ise ÖYS ve efektif verimin kötüleştiği sonucuna ulaşmışlardır. Motor performansı açısından en iyi sonuçları B20 yakıtıyla yapılan çalışmalar sonucu elde etmişlerdir. HC, CO ve is emisyonlarının B20 yakıtı kullanıldığında kayda değer oranlarda azaldığını, NO emisyonlarının ise arttığını tespit etmişlerdir. Biyodizel kullanımında NO emisyonlarının artmasının başlıca sebebinin yanma odası sıcaklığının artmasının ve motorun daha fakir çalışmasının bir sonucu olduğu kanısına varmışlardır.

Karabaş (2009) tek silindirli, su soğutmalı bir dizel motorunda tütün tohumu yağı biyodizeli kullanarak motorun performans ve emisyonlarındaki değişimlerini deneysel çalışma yaparak incelemiştir. Tam yük koşullarında ve %10, %20, %50 ve %100

kütlesel biyodizel oranlarında gerçekleştirilen deneylerin sonuçlarını standart motor verileri ile karşılaştırmıştır. B10, B20 ve B50 karışımları ile yaptığı deneyler sonucu dizel yakıtı göre daha yüksek motor gücü ve motor momentini tespit etmiştir. B100 yakıtı kullanıldığında ise moment ve güçte azalmalar gözlemlenmiştir. Tüm biyodizel karışımları kullanarak yaptığı deneyler sonucunda dizel motora göre efektif verimin azalması, özgül yakıt sarfiyatının arttığını tespit etmiştir. B10, B20, B50 ve B100 kullanımı ile ve yakıt içerisindeki biyodizel oranı arttıkça NO<sub>x</sub> emisyonlarının artış gösterdiğini, HC, CO ve is emisyonlarının ise azaldığını saptamıştır.

Haşimoğlu ve diğerleri (2008) direkt enjeksiyonlu ve turboşarjlı bir dizel motorunda biyodizel kullanımının (%100) motorun performans ve emisyonlarına etkilerini deneysel çalışma yaparak araştırmışlardır. Biyodizel olarak rafine ayçiçek yağı kullanmışlar ve biyodizeli transesterifikasyon yöntemiyle üretmişlerdir. Kısmi yük şartlarında gerçekleştirilen deneylerin sonuçları incelendiğinde, motor performans ve emisyonlarının standart motora göre değişim gösterdiğini gözlemlenmiştir. Biyodizelin kullanılmasıyla efektif verim, özgül yakıt tüketimi ve NO<sub>x</sub> emisyonlarında artış, egzoz gazı sıcaklığında ve is emisyonlarında ise azalma tespit etmişlerdir. Genel olarak dizele oranla biyodizelin düşük alt ısıl değere sahip olmasının bu gibi değişimlere neden olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Behçet ve Oral (2014) direkt enjeksiyonlu, tek silindirli ve hava soğutmalı bir dizel motorunda balık ve fındık yağından ürettikleri biyodizeli kullanarak, biyodizelin motor performans ve emisyonlarındaki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Her iki biyodizeli transesterifikasyon yöntemiyle üretmişler ve biyodizelleri %50 oranlarda dizel yakıt ile hacimsel olarak karıştırmışlardır. Karışım yakıtlarıyla yapılan deneyler sonucunda motor döndürme momentini, efektif güç, CO, HC ve SO<sub>2</sub> emisyonlarında dizel motora göre düşüş gözlemlenmiştir. NO<sub>x</sub> emisyonları ve özgül yakıt sarfiyatında ise artma meydana gelmiştir. Karışım yakıtlarında NO<sub>x</sub> emisyonunun daha yüksek olmasının çalışma sıcaklığının daha fazla olmasından ve biyodizel içerisindeki oksijen miktarından kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir. Araştırmacılar çalışmanın sonunda, biyodizelin neden olduğu NO<sub>x</sub> artışının SCR (seçici katalitik redüksiyon), LNT (fakir azot oksit tuzağı) ve EGR gibi emisyon azaltıcı sistemler ile azaltılabileceği önerisinde bulunmuşlardır.

Koç (2010) yapmış olduğu deneysel çalışmada bir dizel motorunda biyodizel kullanarak motorun değişimlerini incelemiştir. Deneyle, B100 ve D100 yakıtları ile gerçekleştirmiş ve sonuçları karşılaştırmıştır. B100 yakıtının kullanımının motorda aşınma gibi istenmeyen durumlara sebebiyet verdiğini gözlemlemiştir. Bunun yanı sıra biyodizelin yağlayıcılık gibi olumlu sonuçlarını da tespit etmiştir. Sonuç olarak, biyodizelin dizel yakıtı belli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen yakıt ile yapılacak çalışmalarda olumlu sonuçlar alınacağını ileri sürmüştür.

Nabi ve Rasul (2018) bir dizel motorunda üç farklı biyodizel ile yapmış oldukları deneysel çalışmalarda dizel motorunun performansını, emisyonlarını, enerji ve ekserji parametrelerini incelemişler ve sonuçları standart motor ile karşılaştırmışlardır. Biyodizel olarak atık pişirme yağı ve macadamia yağı kullanmışlardır. İlk karışım %30 atık pişirme biyodizeli ile %70 dizelden, ikinci karışım %30 macadamia biyodizeli ile %70 dizelden, üçüncü karışım %10 macadamia biyodizeli, %20 atık pişirme biyodizeli ile %70 dizelden oluşmaktadır. Her üç biyodizel ile yapılan deneylerin sonuçlarına bakıldığında motor performansında kayda değer bir değişimin meydana gelmediğini gözlemlemişlerdir. İS, HC ve CO emisyonlarında azalma kaydederken, NO<sub>x</sub> emisyonlarında bir miktar artış olduğunu tespit etmişlerdir. Araştırmacılar, NO<sub>x</sub> emisyonlarının fazla olmasının biyodizelin neden olduğu yüksek alev sıcaklığı ve biyodizel içeriğindeki oksijen miktarından kaynaklandığını düşünmektedirler. HC emisyonlarının azalmasına, biyodizel kullanımında ateşleme gecikmesinin daha kısa olması ve biyodizelin oksijen içeriğinden dolayı tam yanmanın gerçekleşmesinin neden olduğu sonucuna varmışlardır. CO emisyonunun da oksijenin fazla olduğu durumda azalma gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Rajkumara ve Thangarajab (2019) biyodizel yakıt kullanarak yapmış oldukları deneysel çalışmada biyodizeli farklı yağlardan elde ederek ve biyodizel enjeksiyon parametrelerini değiştirerek NO<sub>x</sub> emisyonunu azaltmayı amaçlamışlardır. Biyodizel her ne kadar yenilenebilir ve sürdürülebilir bir alternatif yakıt olsa da NO<sub>x</sub> emisyonlarını arttırması en büyük problemlerden biridir. Dolayısıyla araştırmacılar bu soruna dikkat çekerek biyodizeli NO<sub>x</sub> parametrelerini azaltıcı şekilde kullanmaya ve motora uygulamaya odaklanmışlardır. Test yakıtını, karanja ve hindistan cevizi biyodizellerinin farklı oranlarını kullanarak oluşturmuşlardır. Deneysel çalışmalar, farklı yük ve hızlarda

gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre biyodizelin enjeksiyon parametrelerinin değiştirilmesi ile emisyon karakteristiklerinde olumlu değişimler meydana getirdiğini saptamışlardır.

Chen ve diğerleri (2018) dizel motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılan (%100) biyodizelin NO<sub>x</sub> emisyonu üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yapmış oldukları deneysel çalışmada dizel motora göre, biyodizel ile çalışan motorun yüksek yanma sıcaklığı meydana getirdiğini tespit etmişlerdir. Buna göre düşük ve orta hızlarda düşük yükler haricinde, biyodizelin açığa çıkardığı NO<sub>x</sub> emisyonunun daha fazla olduğu sonucuna varmışlardır.

## **2.2. Etanol**

Petrol türevli yakıtların tüketimini ve hava kirliliğini azaltmak amacıyla dizel yakıtla farklı oranlarda karıştırılarak kullanılan bir diğer yakıt ise etanoldür. Etanolün içten yanmalı motorlarda kullanımı ilk motorlara kadar dayanır. Otto 1877’de, Ford 1880’de yakıt olarak saf etanol kullanmışlardır. Birçok ülkede de 1900’lü yılların başında etanolün yakıt olarak kullanılmasıyla ilgili araştırmalar yapılmıştır. Son zamanlarda emisyon standartlarına getirilen katı kurallar sebebiyle alternatif yakıtlara yönelim artmıştır. Dolayısıyla etanolün yakıt olarak kullanımı yeniden söz konusu olmuştur (Türköz, 2012). Etanol şekerin fermantasyonu sonucu oluşan renksiz, saydam, hafif kokulu kimyasal bir maddedir. Mısır, buğday, şeker pancarı, şeker kamışı gibi tarımsal ürünlerden elde edilir (Can vd., 2005).

### **2.2.1. Etanolün yakıt özellikleri**

Tablo 2.6’da etanolün fiziksel ve kimyasal özellikleri görülmektedir. Etanolün alt ısı değerinin dizel yakıtı göre yaklaşık %40 daha az olması, etanolün kullanıldığı durumlarda özgül yakıt tüketimi karışımdaki etanol miktarına bağlı olarak artış göstermektedir. Dizel, kaynama noktaları farklı olan karmaşık yapıya sahip hidrokarbon moleküllerinden oluşur. Etanol ise aynı yapıdaki moleküllerden oluşan, tek sıcaklıkta kaynayan bir maddedir. Dolayısıyla alkoller daha temiz yanarlar. Ayrıca etanol, dizel yakıtına göre daha düşük setan sayısına sahiptir (Ayhan, 2006).

Etanolün dizel yakıt içerisindeki çözünürlüğü kısıtlı olduğundan dizel yakıt ile homojen bir karışım oluşturamaz. Etanolün dizel yakıttaki çözünürlüğü dizelin hidrokarbon yapısına bağlı olduğu gibi özellikle karışımın sıcaklığına bağlıdır. Yüksek ortam sıcaklığında (200°C) etanol motorin içerisinde rahatça çözünebilmektedir. Ancak düşük sıcaklıklarda (10°C altında) dizel ve etanol yakıt arasında faz farkı oluşmaktadır. Bu durum yanma esnasında problem teşkil edebilir. Ayrıca etanolün parlama noktası dizel yakıtına göre düşük olduğundan karışımın da parlama noktası düşer. Bu yüzden karışım yakıtının depolaması esnasında dikkatli olunmalıdır (Usta vd., 2005).

Tablo 2.6. Etanolün fiziksel ve kimyasal özellikleri (Ayhan, 2006).

Özellikler	Etanol
Kimyasal denklemi	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH
C/H oranı	0,333
Molekül ağırlığı	46,07
Özgül ağırlığı (g/cm <sup>3</sup> ) sıvı	0,79
Isıl değeri (MJ/kg)	26,9
(MJ/lt)	21,3
Stokiyometrik karışım hava/yakıt (kütlesel)	8,96
hava/yakıt (hacimsel)	14,3
Buharlaşma ısısı (MJ/kg)	0,856
Tutuşma sınırları % (hacimsel)	3,5 - 19
Hava fazlalık katsayısı λ	0,29 – 1,92
Adyabatik alev sıcaklığı (°C)	1924
Kaynama noktası (°C)	78,7
Donma noktası (°C)	-117,7
Kendi kendine tutuşma sıcaklığı (°C)	392
Oktan sayısı ROS (Araştırma oktan sayısı)	106

Dizel yakıtına etanolün ilave edilmesi ile karışım yakıtının viskozitesi, setan sayısı ve alt ısıl değeri düşmektedir. Bu değişimler, alkollerin kullanımıyla ilgili bazı zorluklar teşkil ettiğinden bu olumsuzlukların üstesinden gelmek için etanolün motora gönderilmesi ile ilgili bazı teknikler geliştirilmiştir. Genel olarak bu teknikler aşağıdaki gibi gruplandırılabilir (Ejder, 2007; Usta vd., 2005):

- Püskürtmeden önce alkol ve dizelin karıştırılması: Alkol ve dizel yakıtı karıştırılır ve yakıt enjektörü vasıtasıyla doğrudan silindire püskürtülür.

- Alkol fumigasyonu: Alkol yakıtı, karbüratör veya manifold enjeksiyonu kullanılarak manifoldun giriş havasına verilir.
- Alkol ve dizelin emülsiyonu: İki yakıt karışmadığında ayrışmayı önlemek için karışım içerisine katkı maddesi (çözücü) eklenir.
- Çift püskürtme sistemi: İki yakıtın silindire ayrı olarak püskürtülebilmesi için silindir kafasına yapılan tasarım değişikliğidir (Imran vd., 2013; Gomasta ve Mahla, 2012).

### **2.2.2. Etanolün yakıt olarak performansı ve emisyonlara etkisi**

Etanol yüksek buharlaşma ısısına sahip olduğundan soğuk havalarda motorun çalışmasını güçleştirmektedir (Ayhan, 2006). Etanolün alt ısıl değeri dizel yakıtla oranla daha düşük olduğundan genel olarak motorun güç ve tork değeri düşmekte, yakıt tüketimi ise artmaktadır (Aktaş vd., 2019). Diğer yandan etanolün, dizel yakıtla göre moleküler yapısının daha küçük olması, bünyesinde oksijen barındırması, kükürt ve ağır metaller içermemesi egzoz emisyonlarının iyi yönde değişmesini sağlamaktadır (Can vd., 2005).

Etanol ile ilgili çalışmalar incelendiğinde motor gücü ve momentinin bazı çalışmalarda (%5-%20 arası etanol oranlarında) hem karışım hem de fumigasyon uygulamasında standart motora göre arttığı ifade edilmektedir (Pradelle vd., 2019; Şahin vd., 2009). Bazı çalışmalarda ise hem karışım hem de fumigasyon uygulamasında motor gücü ve momentinde azalmaların olduğu belirtilmiştir (Khoobakhta vd., 2019; Aydın ve Ögüt, 2017; Ejder, 2007; Sezer, 2017; Usta vd., 2005; Şahin vd., 2009). Efektif verim ve özgül yakıt sarfiyatında da farklı çalışmalarda farklı sonuçların elde edildiği görülmektedir. Çalışmaların bir kısmında (%5-%45 arası etanol oranlarında) hem karışım hem de fumigasyon uygulamasında efektif verimin arttığı (Tutak vd., 2017; Shamun, 2018; Jamrozik, 2017; Ejder, 2007; Şahin vd., 2009), bazı çalışmalarda (%15'ten az etanol oranlarında ve fumigasyon modunda) ise efektif verimin azaldığı gözlemlenmiştir (Ghadikolaei vd., 2018; Şahin vd., 2009). Özgül yakıt sarfiyatının (%5-%20 arası etanol oranlarında) bazı çalışmalarda hem karışım hem de fumigasyon uygulamasında arttığı belirtilmiştir (Ghadikolaei vd., 2018; Khoobakhta vd., 2019; Pradelle vd., 2019; Ejder, 2007; Şahin vd., 2009). Şahin ve diğerleri (2009) ise farklı

oranlarda etanol fumigasyonu ile yapmış oldukları çalışmada özgül yakıt sarfiyatının azaldığını saptamışlardır. Emisyonlardaki değişimin de farklılıklar gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. NO<sub>x</sub> emisyonlarının bazı çalışmalarda (%5-%45 etanol oranlarında ve karışım modunda) arttığı (Tutak vd., 2017; Jamrozik, 2017; Usta vd., 2005), bazı çalışmalarda (%15-%30 etanol oranlarında ve hem karışım hem fumigasyon modunda) azaldığı görülmektedir (Shamun vd., 2018; Ghadikolaei vd., 2018; Sezer, 2017). HC, CO, CO<sub>2</sub> ve is emisyonlarının genel olarak iyileştiği ifade edilmektedir (Tutak vd., 2017; Aydın ve Öğüt, 2017; Jamrozik, 2017; Sezer, 2017; Usta vd., 2005). Bazı çalışmalarda (farklı etanol oranlarında ve hem karışım hem fumigasyon modunda) HC ve CO emisyonlarının kötüleşmesinin düşük yüklerde etanolün yanmayı kötüleştirici etkisi olduğundan kaynaklandığı ileri sürülmüştür (Tutak vd., 2017; Ghadikolaei vd., 2018; Shamun vd., 2018).

Şahin ve diğerleri (2009) ön yanma odalı ve turboşarlı bir dizel motorunda etanol fumigasyonunun motor performans ve egzoz emisyon parametrelerine etkilerini araştırmışlardır. Deneyleri %100, %75, %50 yük şartlarında ve değişik devir sayılarında gerçekleştirmişlerdir. Etanol oranını gaz kelebeği açıklığına göre ayarlayan bir sistem geliştirmişler ve etanol oranlarını bu şekilde belirlemişlerdir. Deney sonuçlarına göre etanol ilavesiyle NO emisyonlarının bir miktar azaldığını, %100 ve %75 yük şartlarında efektif gücün ve efektif verimin ise arttığını tespit etmişlerdir. Özgül yakıt sarfiyatının etanolün %6-10 oranlarında (%100 ve %75 yük şartlarında) bir miktar azaldığını; ancak %50 yük şartlarında etanolün ilavesiyle özgül yakıt sarfiyatının arttığını, efektif güç ve efektif verimin ise azaldığı gözlemlenmiştir.

Jamrozik (2017) doğrudan enjeksiyonlu bir dizel motorunda metanol-dizel ve etanol-dizel karışımlarının motorun performans ve emisyonlarını nasıl etkilediğini tespit etmek amacıyla deneysel çalışmalar yapmıştır. Karışımlardaki alkol oranı %0 ile %40 arasında değişmektedir. Dizel-etanol karışımları durumunda, tüm alkol oranlarında test motorunda iyileşmeler tespit etmiştir. Ortalama efektif basınç sabit kalırken motor veriminin arttığını; CO emisyonları azalırken, HC ve CO<sub>2</sub> emisyonlarının neredeyse hiç değişmeden kaldığını gözlemlenmiştir. Alkol ilavesinin, hem dizel-metanol hem de dizel-etanol karışımları ile beslenen motordan çıkan azot oksit (NO<sub>x</sub>) emisyonları üzerinde olumsuz bir etkisi olduğu sonucuna varmıştır.



Sezer (2017) dizel yakıtına etanol ve dietil eter katarak motor performans ve emisyonlarındaki değişimleri deneysel olarak incelemiştir. Deneyleri %15 etanol, %15 etanol - %2 dietil eter ve %15 etanol - %4 dietil eter içeren yakıt karışımları ve dizel yakıt kullanılarak; direkt enjeksiyonlu ve tek silindirli bir dizel motorunda, 1500 d/d'lık sabit devirde ve farklı yük oranlarında gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda etanol ve dietil eterin motorun püskürtme ve silindir basıncında ve silindir sıcaklığında düşüşe sebep olduğunu gözlemlemiştir. Etanol ve dietil eterin kullanılmasıyla hava fazlalık katsayısı artmış, egzoz gazı sıcaklığı ise düşmüştür. Etanol karışımının motor gücünde, %1,4 oranında azalmaya sebep olduğunu tespit etmiş ve bunun etanolün alt ısı değerinin düşük olmasından kaynaklandığını ileri sürmüştür. Motor gücündeki bu azalmanın önemli ölçüde olmamasının etanolün alt ısı değerinin düşük olmasından ve dolayısıyla yanmayı iyileştirici bir etkiye sebep olmasından kaynaklandığını ileri sürmüştür. Etanolün kullanılmasıyla CO, CO<sub>2</sub>, HC ve NO<sub>x</sub> emisyonlarında azalma gözlemlemiştir. Etanol ve dietil eter karışımlarının efektif verimde artış ve özgül yakıt sarfiyatında %8,5 oranında azalma sağladığını saptamıştır. Etanol ve dietil eter beraber kullanıldığında, NO<sub>x</sub> ve CO<sub>2</sub> emisyonlarında azalma olurken, CO ve HC emisyonlarında artış olduğunu gözlemlemiştir.

Buraya kadar biyodizel ve etanol ile ilgili çalışmalar ayrı ayrı verilmiştir. Bundan sonraki literatür çalışmaları biyodizel ve etanolün beraber kullanıldığı çalışmalardır.

Tutak ve diğerleri (2017) dizel-etanol ve biyodizel-etanol karışım yakıtlarının kullanıldığı direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda yanma proseslerinin karşılaştırmalı analizini yapmışlardır. Motor testlerini, 1500 d/dk'lık sabit bir dönme hızında çalıştırılan, silindir üstü doğal emişli olan bir sıkıştırma ateşlemeli motorda yapmışlardır. Dizel motorunun performansını, emisyonlarını ve yanma özelliklerini iyileştirmek için etanolü katkı maddesi olarak kullanmışlar ve sonuçları değerlendirmişlerdir. Buna göre dizel-etanol karışımı durumunda, karışımdaki etanol oranı %35 olduğunda en yüksek efektif verimi elde etmişlerdir. Biyodizel-etanol karışımı durumunda, etanol oranı %0 ve %45 aralığında değişirken efektif verim oranı %31 dolaylarında sabit kalmıştır. Her iki karışımdaki etanol oranı %35'e çıkarken HC ve NO<sub>x</sub> emisyonlarının arttığını saptamışlardır. En yüksek NO<sub>x</sub> emisyonunu %30 etanol-dizel karışımında elde etmişlerdir. CO ve CO<sub>2</sub> emisyonları her iki karışımda da

etanol oranı artarken sürekli olarak azalma göstermiştir. Ayrıca etanol ilavesiyle ateşleme gecikmesinin arttığını ve yanma süresinin azaldığını tespit etmişlerdir.

Ghadikolaei ve diğerleri (2018) dizel-biyodizel-etanol ile çalışan bir dizel motorunun etanolün karışım ve fumigasyon modundaki performans ve emisyonunu karşılaştırmalı olarak analiz etmişlerdir. Deneysel çalışmaları sabit bir motor yükü altında (tam torkun %50'si) ve 1400 d/d ile 2200 d/d arasında değişen motor devirlerinde yapmışlardır. Farklı yakıt modlarını karşılaştırmak için %80 dizel, %5 biyodizel ve %15 etanol (% hacimce) içeren sabit bir yakıt bileşimi kullanmışlardır. Deney sonuçlarına göre etanol fumigasyonunda, yakıtta etanolü karıştırarak koymaya göre motor devri arttığında efektif verimin azaldığı, özgül yakıt tüketiminin de arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Yine fumigasyon modu ile CO<sub>2</sub>'in az oranda, CO ve HC'nun fazla oranda arttığını, NO<sub>x</sub>'in az oranda ve NO'in ise fazla oranda azaldığını tespit etmişlerdir. İS emisyonunun STD (standart) motora göre genel olarak arttığı sonucuna ulaşmışlardır.

Khoobbakhta ve diğerleri (2019) bir dizel motorunda etanol-biyodizel-dizel karışımlarının motor performansına etkilerini tepki yüzey modelini kullanarak deneysel olarak incelemişlerdir. Dizel yakıtta karıştırılmış farklı biyodizel ve etanol oranlarının ve motor yükü ve motor devri gibi çeşitli değişkenlerin dizel motorunun performansına etkilerini değerlendirmişlerdir. Deney tasarımı, cevap yüzeyi yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, yakıt karışımlarındaki artan biyodizel ve etanol yüzdelerinin motor fren gücünü düşürdüğünü saptamışlardır. Karışımlardaki düşük hacimsel biyodizel ve etanol oranının ısı verimi arttırdığını, ancak artan biyodizel ve etanolün ısı veriminde bir azalmaya neden olduğunu tespit etmişlerdir. Motor fren gücünün en yüksek değerinin, saf dizel, %100 motor yükü (tam yük) ve 2800 d/d dönme hızı koşullarında meydana geldiğini; en yüksek ısı verimi değerinin D83B12E5 karışım yakıtında, %80 motor yükünde ve 1900 d/d dönüş hızında elde edildiğini gözlemlemişlerdir. Karışımlardaki etanol ve biyodizel oranlarının artmasıyla, özgül yakıt sarfiyatının arttığı sonucuna ulaşmışlar ve en düşük özgül yakıt tüketimini (156 g/kWh) tam yükte, 2453 d/d dönme hızında ve saf dizel yakıtında (B0E0D100) elde etmişlerdir.

Aydın ve Öğüt (2017) tek silindirli bir dizel motorunda biyodizel, dizel ve etanol kullanımlarının motor performans ve emisyonları üzerindeki etkilerini deneysel olarak

araştırmışlardır. Biyodizel olarak aspir yağı metil esteri kullanmışlar ve biyodizeli transesterifikasyon yöntemiyle üretmişlerdir. Deneysel çalışmalarda, B5M5D90, B2.5M2.5D95, B2.5M5D92.5 ve B5M2.5D92.5 (D: dizel yakıt, B: biyoetanol, M: aspir yağı metil esteri) formlarında dört farklı yakıt çeşidi kullanmışlardır. Elde edilen yakıtların yakıt özelliklerini, kinematik viskozitelerini, yoğunluklarını, su içeriklerini, pH seviyelerini, kalori değerlerini, parlama noktalarını ve bulutlanmalarını belirlemek için testler yapmışlardır. Elde edilen yakıt karışımlarını ve dizel yakıtı, doğrudan enjeksiyonlu yakıt sistemine sahip su soğutmalı, dört zamanlı, tek silindirli bir dizel motorunda kullanmışlardır. Deneyler sonucunda test motorunun performans özelliklerini ve egzoz emisyon değerlerini (CO, CO<sub>2</sub>, HC, O<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>) elde etmişlerdir. Deneyler sonrasında, performansa göre optimum motor yakıtının D100, emisyonlara göre ise B2.5M5D92.5 yakıtının en iyi olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Bunun nedeninin, B2.5M5D92.5 yakıtının setan sayısının diğer karışımlardan daha yüksek olmasından kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir. Yüksek setan sayısının motorun sessiz çalışmasını sağlarken, yanma veriminin artmasına ve motorun ilk hareketinin kolaylaşmasına sebep olduğu kanısına varmışlardır.

Pradelle ve diğerleri (2019) farklı oranlarda dizel-biyodizel-etanol karışimli yakıtlarla çalışan sıkıştırma ateşlemeli bir dizel motorunun performansını ve yanma özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Motor teslerini, B15 yakıtına %0 ile %20 arasında değişen oranlarda etanol ilave ederek elde ettikleri yakıtlar ile yapmışlardır. Bu farklı yakıt karışımlarını B7E0 (%7 biyodizel, %0 etanol ve %93 dizel karışımı) dizel yakıtı ile karşılaştırmışlardır. Etanol ilavesi ile ateşleme gecikmesinde bir artış, daha hızlı bir ısı salınımı ve maksimum basınçta bir düşüş gözlemlenmiştir. Yakıtta etanol ilave edilmesiyle fren gücünde iyileşmelerin olduğu tespit edilmiştir. Etanolün karışımdaki yoğunluğu her %5 oranında arttığında özgül yakıt tüketiminin %2 oranında arttığını tespit etmişlerdir. Bu durumun karışımın yoğunluğunun azalması ve ısı değerinin düşmesinden kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir. Ayrıca enjekte edilen yakıt hacminin düşmesi nedeniyle motor momentinde önemli bir azalma gözlemlenmiştir.

Shamun ve diğerleri (2018) sıkıştırma ateşlemeli bir dizel motorunda biyodizel, dizel ve etanolden oluşan karışım yakıtlarının kullanımı ile motor performans ve emisyonlarının değişimlerini deneysel olarak incelemişlerdir. Yakıtın içine oksijen ilave edilmesinin

motorlardaki is emisyonlarını sabit tutarken, CO<sub>2</sub> emisyonlarını azalttığını belirtmişlerdir. Bu amaçla yola çıkarak bu çalışmada, D68B17E15 ve D58B14E30 formlarında dizel, biyodizel ve etanolden oluşan yakıt karışımları kullanmışlardır. Araştırmacılar deneylerin sonucunda etanol konsantrasyonunun daha yüksek olduğu yakıtta ve yüksek yüklerde %52 oranında verim elde etmişlerdir (aynı şartlarda dizel ile çalışan motorda %48 oranında verim elde edilmiştir). Etanol konsantrasyonunun yüksek olduğu yakıt kullanıldığında NO<sub>x</sub> emisyonlarında ciddi oranda azalma tespit etmişlerdir. Düşük yüklerde etanol kullanılmasıyla, HC ve CO emisyonlarının dizel yakıtı göre daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır. Bunun sebebinin etanolün düşük yüklerde yanmayı kötüleştirici etkisi olduğundan kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir.

Ejder (2007) direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda dizel yakıtı ayrı ayrı etanol ve biyodizel ilavesinin motor performans karakteristiklerine etkilerini incelemiştir. Yapmış olduğu deneysel çalışmalar sonucu standart motora göre biyodizelin yüksek devirlerde motor momentini ve motor gücünü az miktarda azalttığını, B5 ve B10 yakıtlarının motor devri 1500 d/d'dan 1800 d/d'ya çıkarken özgül yakıt tüketimini %1,4 oranında azalttığını ve B10 karışımının toplam verimi %2 oranında arttırdığını gözlemlemiştir. Etanol ilavesiyle yapılan çalışmalar sonucunda ise, etanolün motor momentine ve gücüne olumsuz etki yaptığını, motor momentini %5,5, motor gücünü %9 oranında azalttığını tespit etmiştir. Bunun E15 karışımının alt ısı değerinin ve setan sayısının dizel yakıtı göre düşük olmasından kaynaklandığını ileri sürmüştür. Genel olarak etanolün özgül yakıt tüketimini arttırdığı sonucuna varmıştır. Bunun etanolün alt ısı değerinin düşük olmasından dolayı dizele etanol eklendiğinde aynı miktarda enerji elde etmek için daha fazla yakıtı ihtiyaç duyulmasının sebep olduğu sonucuna varmıştır. E15 karışımının motorun toplam verimini %4,5 oranında arttırdığını saptamıştır. Dizel motorun toplam veriminin yakıtların alt ısı değerlerine ve özgül yakıt tüketimine bağlı olduğunu belirtmiş ve motor verimindeki bu artışın yakıtı etanol eklendiğinde alt ısı değerindeki azalmanın yakıt tüketimindeki artıştan daha fazla olduğu ile açıklanabileceğini ileri sürmüştür. Sonuç olarak etanol ve biyodizelin motor performans parametrelerinde dizel yakıtı yakın değerler verdiklerini ve alternatif yakıt olarak kullanılabilirliklerini belirtmiştir.

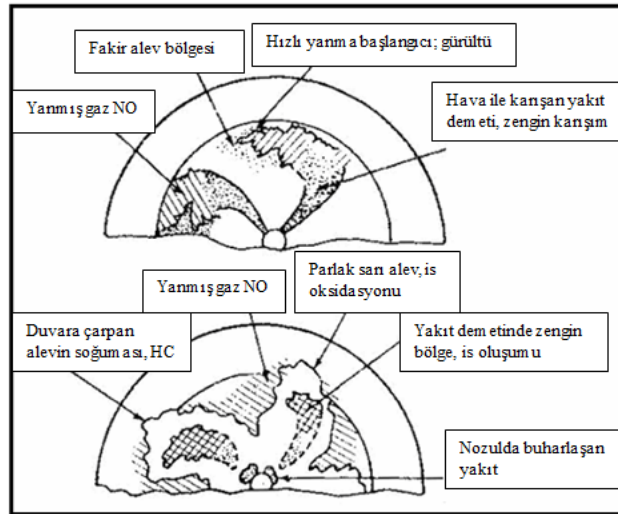
Usta ve diğeri (2005) turboşarjlı ve ön yanma odalı bir dizel motorunda biyodizel ve etanolün motor performans ve emisyonlara etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Etanolün kimyasal yapısı aynı iken, biyodizelin kimyasal yapısının elde edildiği yağın cinsine ve elde edilme yöntemine bağlı olarak değişiklik gösterdiğini belirtmişlerdir. Buna göre bu çalışmada, etanol (E15) ve aynı oranlarda iki farklı biyodizel yakıtın (%17,5 tütün tohumu yağı ve %17,5 ayçiçek + fındık yağı) motor performans ve emisyonlarına etkilerini standart motor ile karşılaştırarak incelemişlerdir. Dizel motorunda alternatif yakıtların kullanılmasıyla HC, is ve SO<sub>2</sub> emisyonlarında azalma görülürken, NO<sub>x</sub> emisyonlarında artış tespit etmişlerdir. Etanolün kullanılması motor gücünün azalmasına, biyodizel ilavesi ise gücün az miktarda artmasına neden olmuştur. Özellikle E15 yakıtı kullanıldığında güçte %15-20 oranlarında azalma gözlemlenmiştir. Etanolün alt ısıl değerinin, yoğunluğunun, vizkozitesinin ve setan sayısının dizel yakıtı göre düşük olmasının bu duruma sebep olduğunu ileri sürmüşlerdir.

## BÖLÜM 3. DİZEL MOTOR EMİSYONLARI, EGR VE AŞIRI DOLDURMA

### 3.1. Dizel Motor Emisyonları

Hava kirliliğine sebep olan başlıca faktörlerden biri taşıtların egzoz dumanıdır. Taşıtlardan kaynaklanan emisyonlar asit yağmurlarına, küresel ısınmaya, çeşitli solunum yolu rahatsızlıklarına ve başka sağlık problemlerine yol açmaktadır (Aydoğan, 2008; Pulkrabek, 2010). Geçmişten günümüze değin yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları sayesinde motor emisyonlarında büyük düşüşler sağlanmıştır. Ancak sürekli artan bir dünya nüfusu ve buna bağlı olarak artan taşıt sayısı emisyon sorununun uzun yıllar boyunca var olacağını göstermektedir (Pulkrabek, 2010).

Emisyonların genel olarak oluşma sebebi eksik yanma ve azotun parçalanmasıdır. Dizel motorlarında yakıtın silindire verilmesi yanma başlamadan hemen önce olduğu için, kritik noktalara yakıtın yayılması düzgün bir şekilde gerçekleşmez. Bu durum çeşitli emisyonların meydana gelmesine sebep olur. Şekil 3.1’de bir dizel motorunda is, HC ve NO emisyonlarının oluşumunda alevin etkisi görülmektedir (Aydoğan, 2008; Heywood, 1988).



Şekil 3.1. Dizel motorlarında yanma sırasında emisyonların oluşumu (Heywood, 1988).

NO<sub>x</sub> emisyonları sıcaklığın yüksek olduğu durumlarda yanmamış gazların bulunduğu kısımlarda meydana gelir. İis, yakıt buharının bulunduğu, yakıt demetinin merkezinde yoğun bir şekilde yanmamış yakıt içeren bölgede oluşur. Daha sonra is, alev bölgesindeki yanmamış oksijen ile oksitlenir. Hidrokarbonlar ve aldehitler alevin duvarlar tarafından söndürüldüğü yerde oluşurlar (Heywood, 1988).

Benzin motorlarında CO ve HC oluşumu daha fazla olmakla birlikte dizel motorlarında bu emisyonların oluşumu daha azdır. Ancak dizel motorlarında en önemli kirletici emisyonlar olan NO<sub>x</sub> emisyonlarının oluşumu fazladır. Dizel motorlarında genel olarak meydana gelen emisyonlar NO<sub>x</sub>, HC, CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> ve is emisyonlarıdır (Ayhan, 2009; Heywood, 1988).

### **3.1.1. Hidrokarbon emisyonu (HC)**

Hidrokarbon bileşikleri, yakıtın tam yanmaması veya tutuşmaması gibi durumlarda oluşurlar. Yanma odasının yakıtın tutuşamayacağı kadar dar bölgelerinde hava/yakıt karışımının birikmesi, kalıntıların yağ filmi gibi davranması, sıvı yakıtın silindirde kalması, karışımın subap yatak boşluklarına sızması hidrokarbonların oluşumuna neden olan mekanizmalardır. HC'lerin meydana gelmesinde rol oynayan en büyük faktörler yeterli oksijenin ve sıcaklığın olmamasıdır. Dolayısıyla hava fazlalık katsayısı 1'den küçük olduğunda tam yanma gerçekleşmemekte ve hidrokarbonlar oluşmaktadır (Ayhan, 2009; Yamık, 2002).

Dizel motorları hava fazlalığı ile çalıştıkları için HC emisyonu oluşum miktarı benzinli motorlara göre daha düşüktür. HC emisyonlarını etkileyen bir diğer parametre ise motor yüküdür. Motor tam yükte çalışırken kısmi yük veya boşta çalışmaya göre silindire daha fazla yakıt gönderilmekte ve sıcaklığın yükselmesine bağlı olarak reaksiyon hızı artmakta, dolayısıyla HC emisyonları azalmaktadır (Ayhan, 2009).

### **3.1.2. Karbon monoksit emisyonu (CO)**

Karbon monoksit emisyonu, tam yanmanın gerçekleşmediği durumlarda meydana gelir. Yanma odasında oksijenin yeterli miktarda bulunmaması ve gaz sıcaklığının düşük olması eksik yanmanın başlıca nedenleridir. CO emisyonu oluşumu direkt enjeksiyonlu

dizel motorlarında hava fazlalık katsayısı ile yakından ilişkilidir. Motorun fakir karışımlarda çalıştığı düşük yüklerde sıcaklık az olduğu için CO dönüşümü az oranda olmaktadır. Motor yüklendikçe sıcaklıklarda artış olmakta ve CO oksidasyonu hızlanmaktadır. Bu durum CO emisyonunun azalmasını sağlar. Fakat yükün artışı ile birlikte hava fazlalık katsayısının da artmasıyla oksijen yetersiz kaldığından ve reaksiyon için gerekli zamanın olmamasından dolayı CO oluşumu artmaktadır (Ayhan, 2009; Aydoğan, 2008). CO oluşum mekanizması denklem 3.1 ile gösterilmiştir (Aydoğan, 2008).



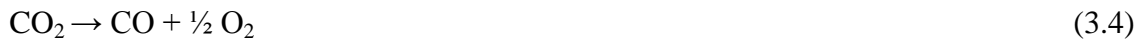
R radikal hidrokarbonu ifade eder. Yanma olayında bu şekilde oluşan CO oksitlenir ve bir kısmı CO<sub>2</sub>'e dönüşür. CO'in oksitlenme reaksiyonunun denklemi 3.2'de verilmiştir (Aydoğan, 2008). Yakıtın oksitlenmesi, oksijen yoğunluğuna, sıcaklığa ve reaksiyon için yeterli zamanın olmasına bağlıdır (Url-9).



Denklem 3.3'te yüksek alev sıcaklıklarında meydana gelen su gazı reaksiyonu verilmiştir. Sıcaklığın azaldığı durumlarda CO'in CO<sub>2</sub>'e dönüşümü gerçekleşir (Url-9).



Bir diğer CO oluşumu ise yanma sırasında sıcaklığa bağlı olarak alev cephesinde meydana gelir. Bu oluşum ancak yanma odası sıcaklığının düşürülmesi ile azaltılabilir. Denklem 3.4'te söz konusu oluşum görülmektedir (Url-9).



### 3.1.3. Karbondioksit emisyonu (CO<sub>2</sub>)

CO<sub>2</sub>, petrol kökenli her yakıtta olduğu gibi dizel motorlarında da dizel yakıtın normal yanması sonucu oluşan son yanma ürünüdür.



### 3.1.4. İs (Duman) emisyonu

İs emisyonu, içten yanmalı motorlarda oluşan emisyonların büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Yanmamış karbonlar sonucu is oluşur. Dizel motorlarında yakıt içerisinde var olan  $H_2$  bileşikleri hemen reaksiyona girmekte ve karbon (C), oksijenin yetersiz olduğu durumlarda yanamayarak is taneciklerine dönüşüp silindir dışına atılmaktadır (Yamık, 2002).

Direkt enjeksiyonlu dizel motorlarında is emisyonunun yoğun olduğu bölge, ortalama bölgesel eşdeğerlik oranının yüksek olduğu yakıt demetinin merkezidir. Yanmanın başlamasıyla is yoğunluğu hızla artar. Enjektör deliğinin yakınındaki yakıt demeti çekirdeğinde en çok görülen is emisyonu, yakıt demeti çekirdeğinden uzaklaştıkça azalır (Heywood, 1988).

### 3.1.5. Azot oksit emisyonu ( $NO_x$ )

$NO_x$  emisyonları, motorlarda yanma esnasında sıcaklığın yüksek olduğu durumlarda havada bulunan azotun ( $N_2$ ) oksijen ( $O_2$ ) ile tepkimeye girmesi sonucu meydana gelirler (Ayhan, 2009; Aydoğan, 2008). Taşıt kaynaklı azot oksit emisyonlarının içerisinde en yoğun şekilde %90 oranla NO, %5 oranında  $NO_2$ , diğer %5'lik kısımda ise  $N_2O$ ,  $N_2O_2$  ve  $N_2O_5$  bulunmaktadır (Ayhan, 2009).

Azot oksitlerin insan sağlığına ve çevreye olan zararları çok fazladır.  $NO_x$ 'ler kandaki hemoglobinle ve ciğerdeki nemle birleşerek nitrik asit meydana getirirler. Zamanla artan konsantrasyon, solunum yolu rahatsızlığı bulunanlar için tehdit oluşturmaktadır. Ayrıca azot oksitler ozon tabakasının zarar görmesine neden olmaktadır (Haşimoğlu vd., 2002; Ayhan, 2009).

NO oluşumuna neden olan üç mekanizma vardır. Isıl (Zeldovich) mekanizması, Ani (Fenimore) mekanizması ve yakıt esaslı mekanizma şeklindedir (Aydoğan, 2008).

Isıl (Zeldovich) mekanizması: Yüksek alev sıcaklıklarında yanma sırasında havada var olan oksijen atomları ile azot moleküllerinin reaksiyona girmesi sonucu NO meydana gelir. Dizel motorlarında yanmanın başladığı an ile maksimum basıncın elde edilmesinden hemen sonraki an arasında kalan zaman dilimi, NO oluşumunun kritik

periyodudur. Yanma devam ederken silindir basıncı yükseldiği için yanmış gazların sıcaklığı daha da artar ve NO oluşumu hızlanır, dolayısıyla karışımın yanmaya erken başlaması büyük önem taşımaktadır. Bir diğer Isıl NO oluşum nedeni de yakıt hava karışımıdır. Yakıt fazlalık katsayısı 0,85-1,1 değerleri arasındayken NO oluşumu en yüksek seviyeye ulaşmaktadır (Ayhan, 2009; Aydoğan, 2008).

Isıl mekanizmasının neden olduğu NO oluşumu 3.5, 3.6 ve 3.7 nolu denklemlerde görülmektedir (Rajkumara ve Thangarajab, 2019; Aydoğan, 2008; Tat, 2003);



Ani (Fenimore) mekanizması: Ani NO, havada bulunan molekül yapıdaki azotun serbest hidrokarbanlarla reaksiyona girmesi ile meydana gelmektedir. Bu oluşumda sıcaklığın etkisi fazla olmamakla birlikte HFK'nın etkisi büyüktür. Oksijen konsantrasyonunun yüksek oluşu, NO oluşumunu artırmaktadır (Ayhan, 2009; Aydoğan, 2008).

Yakıt esaslı mekanizma: Yakıt esaslı NO, yakıtta bulunan azotun oksitlenmesi ile meydana gelmektedir. Haya/yakıt oranına bağlı olarak oluşan yakıt esaslı NO, yakıtın içerisinde bulunan azotun yakıt alev bölgesine gelmeden siyanür grubu bileşiklere veya radikallere dönüşmesi ve sonrasında oksitlenmesi ile oluşur. Bu oluşum fakir ve stokiyometrik karışımlarda daha fazla olmaktadır. Sıcaklığa az oranda bağlıdır (Ayhan, 2009).

### **3.2. Egzoz Gazı Resirkülasyonu (EGR)**

Büyük yerleşim alanlarında ve şehir merkezlerinde küçük yerleşim birimlerine oranla taşıt sayılarındaki artış daha fazla olmaktadır. Bu da hava kirliliğini ve dolayısıyla insan sağlığını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu sebeple bilim insanları bu alandaki araştırmalarını yoğunlaştırmışlardır. Fosil kökenli yakıt kaynaklarının azalması ve

çevreye karşı oluşturdukları tehdit söz konusu olduğundan temiz enerji, temiz yakıt ve yanma prosesleri alanlarında fazla sayıda çalışma yapılmıştır (Uyumaz vd., 2017).

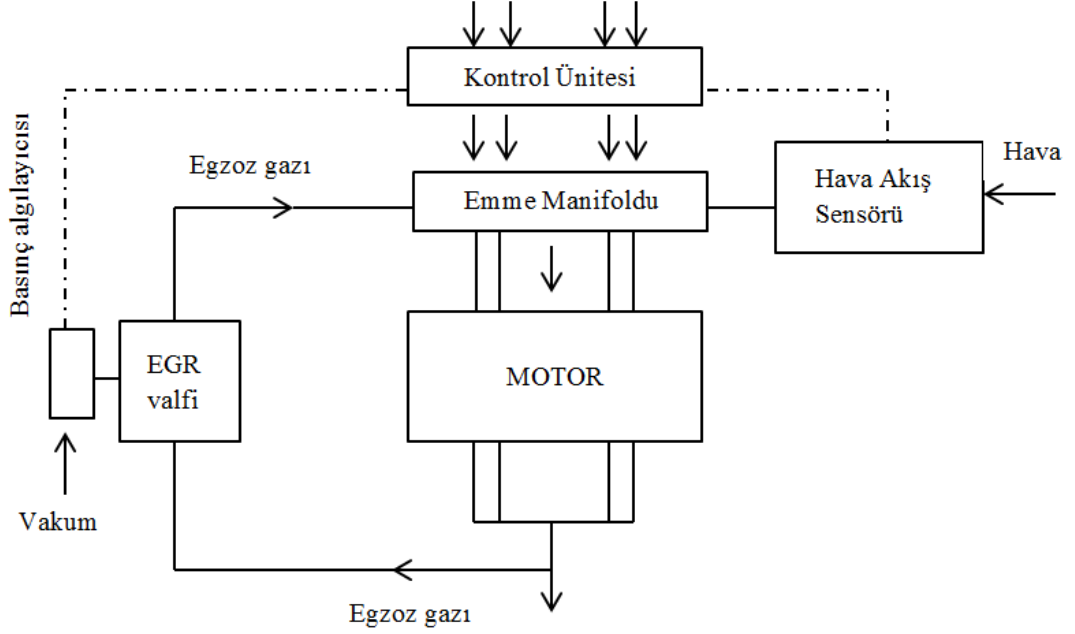
Geçmişten günümüze doğru motor emisyonları konusundaki farkındalığın dünya üzerinde nasıl geliştiğine değinmek gerekmektedir. 1900'lü yılların başında araç sayısının düşük olması sebebiyle motor emisyonları büyük bir sorun teşkil etmiyordu. Ancak 1940'lı yıllarda nüfusa bağlı olarak araç sayısındaki önlenemez artış sonucu hava kirliliği giderek yükseliş gösteren bir problem haline geldi. Özellikle Los Angeles bölgesinde ilk kez yaşanan kötü hava koşulları nedeniyle kirliliğin önemli bir sorun olduğu olgusu hızla yayıldı. Böylelikle 1970'lerde hava kirliliği birçok ülkede ve Amerika Birleşik Devletleri'nde başlıca bir sorun olarak kabul gördü ve bu konuyla ilgili çeşitli kanunlar yürürlüğe girdi. Bu kanunlar sayesinde egzoz emisyonlarına belli kısıtlamalar getirildi. 1980'lerde ve 1990'larda motor üretim süreçlerinde emisyonlar büyük oranda dikkate alınarak tasarım yapılmıştır. Motorların ürettiği emisyonlar günümüze kadar %90 oranında azaltılmış olsa da, emisyonlar 1940'lardan beri büyük bir çevresel problemdir (Pulkrabek, 2010).

Dizel motorlarından kaynaklanan en önemli kirletici emisyonlar azot oksitlerdir. HC, CO ve is miktarı dizel motorlarda fazla olmamakla birlikte çeşitli alternatif yakıtlarla da bu emisyonların oluşumları azaltılabilmektedir (Haşimoğlu vd., 2008; Behçet ve Oral, 2014; Keskin ve Ekşi, 2006; Manigandan vd., 2019; Nabi ve Rasul, 2018; Nabi ve Rasul, 2018; Aydın ve Öğüt, 2017; Usta vd., 2005; Ayhan vd., 2019; Karabaş, 2009). Dolayısıyla dizel motorlarında emisyon azaltma teknikleri NO<sub>x</sub> emisyonlarında yoğunlaşmaktadır. NO<sub>x</sub> emisyonlarının azaltılması için farklı teknikler geliştirilmiştir. Bunların başında egzoz gazı resirkülasyonu, seçici katalitik indirgeme (SCR), katalitik konvertör gelmektedir (Aydoğan, 2008).

EGR, egzoz gazının bir bölümünü tekrardan silindirlere vererek yanma sonrası meydana gelen sıcaklığı düşürmeye, dolayısıyla zararlı emisyonlar olan azot oksit gazlarını azaltmaya yarayan bir sistemdir. Bu sistem dizel ve benzin motorlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 3.2'de EGR'nin çalışma prensibi görülmektedir (Tok, 2010).

NO<sub>x</sub>, yanma sonrasında oluşan yüksek sıcaklık sebebiyle meydana gelir. EGR ile dışarı atılan egzozun bir kısmı soğutularak silindire geri verilir, böylece silindirdeki oksijen

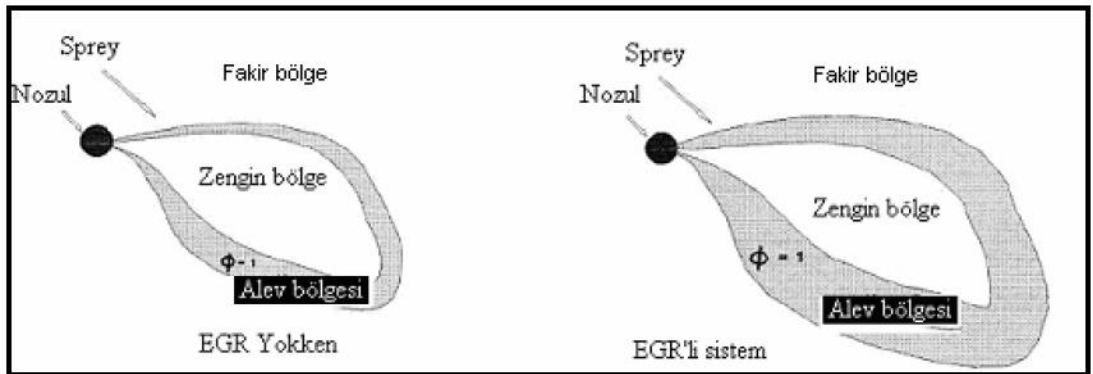
konsantrasyonu azaltılarak yanma sıcaklığının düşmesi sağlanır. Bu durum  $\text{NO}_x$  oluşumunu önlemeye yardımcı olur (Tok, 2010).



Şekil 3.2. EGR'nin çalışma prensibi (Tok, 2010).

$\text{NO}_x$  oluşumu son alev cephesindeki sıcak gaz bölgelerinde meydana gelir. Silindirdeki maksimum sıcaklık, maksimum silindir içi basıncın oluşmasından hemen sonra oluşur. Eğer yanma erken başlarsa, sıkıştırma zamanı devam ettiğinden dolayı karışımın sıcaklığı artar. Böylece  $\text{NO}_x$  oluşumu da hızlanmaktadır (İlkılıç vd., 2009).

Şekil 3.3'te bir dizel motorunda EGR sisteminin varlığında ve EGR sistemi olmadığında meydana gelen difüzyon alevi görülmektedir (Aydoğan, 2008).



Şekil 3.3. Dizel motorlarında EGR sistemine göre difüzyon alevinin durumu (Aydoğan, 2008).

EGR oranının artmasıyla  $NO_x$  azalır, ancak bu durum gücün bir miktar düşmesine yol açmaktadır. Ayrıca EGR arttıkça hava fazlalık katsayısı azalacağından yakıt tüketimi kötüleşmekte, is oluşumu artmaktadır. Bu olumsuzlukların önüne geçmek için EGR'yi belli bir oranın üzerinde vermemek gerekir (Haşimoğlu vd., 2002; Tok, 2010).

Egzoz gazı resirkülasyonunun uygulandığı çalışmalarda motor performansının ve HC, CO ve is emisyonlarının kötüleştiği;  $NO_x$  emisyonunun ise azaldığı görülmektedir (Haşimoğlu vd., 2002; Tok, 2010; He vd., 2018; Verma vd., 2019). Hem motor performansı hem de emisyonlar açısından optimum EGR oranının %5-%30 aralığında olduğu belirtilmiştir (Haşimoğlu vd., 2002; Tok, 2010; He vd., 2018; Verma vd., 2019).

Haşimoğlu ve diğerleri (2002) tek silindirli bir dizel motorunda motora egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) uygulayarak,  $NO_x$  emisyonlarının azaltılmasına yönelik deneysel çalışmalar yapmışlardır. Araştırmacılar, egzoz gazlarını belirli oranlarda (%10, %20 ve %30) silindire geri göndererek motor performans ve motor emisyonlarındaki değişimleri incelemişlerdir. Deneyler sonucunda motora EGR verilmesiyle  $NO_x$  emisyonunun oluşumunun azaldığını, diğer emisyon ve motor performans parametrelerinin, özellikle tam yük koşullarında, kötüleştiğini gözlemlemişlerdir. Hem motor performans parametreleri hem de emisyonlar açısından ideal EGR oranını %10 olarak tespit etmişler, EGR'nin %30'dan fazla verilmesinin motor performans parametrelerini daha fazla kötüleştireceğinden önermemişlerdir. EGR uygulanmasıyla karışımın yanma hızı azalacağından, silindir içindeki karışımın gereken süre içerisinde yanamayacağı ve bu durumun motor yakıt tüketimini kötüleştireceği sonucuna varmışlardır.

Tok (2010) yapmış olduğu çalışmada common rail yakıt püskürtme sistemine sahip bir dizel motorunda emme manifolduna EGR'nin farklı oranlarını (%10, %15, %20, %25, %30) vererek motor performans ve emisyonlarındaki değişimleri incelemiştir. Deneyler üç aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada egzoz gazları silindire kontrollü bir şekilde geri verilmiştir. Bunun sonucunda  $NO_x$  emisyonları ve motor performansında azalma görülürken; is, CO ve HC emisyonlarında artış gözlemlemiştir. İkinci aşamada motora dizel oksidasyon katalisti ilave etmiş ve deneyleri aynı koşullarda tekrarlamıştır. Üçüncü aşamada ise yakıt olarak dizele farklı oranlarda soya yağı metil esteri ekleyerek deneyleri aynı koşullar altında gerçekleştirmiştir. Soya yağı metil esteri ile yapılan

deneylerde EGR'nin motor performans ve emisyonlara etkisi dizel yakıttan elde edilen sonuçlara yakın çıkmıştır. EGR uygulaması ile zengin karışımın oluştuğunu, yanmanın kötüleştiğini belirtmiş ve buna bağlı olarak is, CO ve HC emisyonlarının arttığını tespit etmiştir. Biyodizel kullanımının, biyodizelin içeriğindeki oksijen oranı nedeniyle HC ve CO emisyonlarını iyileştirdiğini, NO<sub>x</sub> emisyonlarını ise kötüleştirdiğini saptamıştır. Ancak EGR'nin NO<sub>x</sub> emisyonlarını azaltma üzerindeki etkisinin biyodizel yakıtta dizel yakıtta göre daha fazla olduğu sonucuna varmıştır.

He ve diğerleri (2018) tek silindirli bir dizel motorunda dizel yakıtta farklı oranlarda alkol ekleyerek (%15 etanol, %15 bütanol ve %40 bütanol) ve motora %20, %30, %40 oranlarında EGR uygulayarak dizel motorunun yanma özelliklerini ve emisyonlarındaki değişimleri yüksek yük koşullarında deneysel olarak araştırmışlardır. Genel olarak orta seviyelerde alkol ve EGR oranlarının seçilmesinin motor performans ve emisyonları açısından daha iyi sonuçlar vereceği kanaatine varmışlardır. EGR uygulamasının NO<sub>x</sub> emisyonlarını azaltırken diğer emisyonları (CO ve HC) artırdığını, fakat aynı koşullarda yakıtta alkol ilave edilmesinin aynı emisyon değerlerini (CO ve HC) iyileştirdiğini tespit etmişlerdir. Bu durumun alkolün içeriğindeki oksijen miktarından kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir.

Verma ve diğerleri (2019) çift yakıtlı (dizel-biyogaz) bir dizel motorunda farklı EGR ve sıkıştırma oranlarının motor performans ve emisyonlarındaki etkilerini deneysel çalışmalar yaparak incelemişlerdir. İlk aşamada deneyleri uygun sıkıştırma oranının tespiti için yapmışlar ve motor performans ve emisyonlar açısından optimum sıkıştırma oranını (19,5) olarak tespit etmişlerdir. İkinci aşamada deneyleri bu sıkıştırma oranında (19,5) ve %5, %10, %15 EGR yüzdeleri ile yapmışlardır. Motora EGR verilmesiyle düşük yüklerde motor veriminde bir miktar artış ve NO<sub>x</sub> emisyonlarında azalma tespit etmişlerdir. Yüksek yüklerde ve artan EGR oranlarında ise motor veriminde azalmanın olduğunu gözlemlemişlerdir.

### **3.3. Aşırı Doldurma**

Petrol fiyatlarının önlenemez yükselişi ve çevre kirliliğinin artışı, araç motorlarının tasarımına yeni bir boyut getirmiştir. Artık araç motorları üretilirken çevre boyutu da etkili olmaktadır. Dizel motorlarında yanma odalarının geliştirilmesi, yeni püskürtme

sistemleri, ara soğutma ve aşırı doldurma sistemleri, motor gücünün ve veriminin artırılması açısından önem kazanmıştır (Özülkü, 2002).

Aşırı doldurma, bir dizel motorunun efektif gücünü artırmak için, silindir içerisine alınan havanın miktarının ve yoğunluğunun artırılması veya belli bir efektif güç için motorun ağırlığının ve hacminin düşürülmesidir (Özülkü, 2002; Çıbıkçı, 2017).

Bir motorun çıkış gücünü artırmanın en etkili yolu silindir içine verilecek yakıt-hava karışımının miktarının artırılmasıdır. Bunu gerçekleştirmenin iki farklı yolu; motor hacminin artırılması ve süperşarj veya turboşarj uygulanmasıdır (Çıbıkçı, 2017).

### **Motor hacminin artırılması:**

Hava yakıt oranını artırmak motor hacminin genişletilmesiyle yapılabilir. Ancak bu durum daha fazla güç elde etmek için daha fazla yakıt harcamak demektir. Bununla beraber motor hacminin büyütülmesiyle motorların ağırlığı artmakta ve sürtünme kayıpları fazla olmaktadır (Çıbıkçı, 2017).

### **Süperşarj:**

Süperşarj, motorların çıkış gücünün artırılması için uygulanan bir yöntemdir. Normal şartlarda içten yanmalı motorlarda pistonun hareketi ile silindir içerisine alınan hava sıkıştırılır ve bu sıkıştırılmış hava yanma sırasında kullanılır. Silindire alınan hava miktarı ne kadar fazlaysa o kadar fazla güç üretimi olur. Süperşarj da bu prensiple çalışır. Bu tekniğe göre, hava silindir içerisine alınmadan önce kompresör yardımı ile sıkıştırılır ve havanın basıncı yükselir. Bu sayede aynı hacim içerisine daha fazla hava alınmış olur. Bunun sonucunda daha fazla yakıtın yakılmasıyla motor hacmi aynı kalarak daha fazla güç üretilmiş olur (Çıbıkçı, 2017).

### **Turboşarj:**

Turboşarj, süperşarjın egzoz gazı ile çalışan halidir. Turboşarj gücünü egzoz gazının basıncından elde eder. Turboşarj sayesinde motora atmosfer basıncının üzerinde hava alınarak aynı motor hacminden daha fazla güç elde edilir. Türbin ve kompresör olarak iki pervanesi vardır. Türbin egzoz kısmında, kompresör ise emme kısmında bulunmaktadır. Türbin, egzoz gazının basıncıyla döner, bu şekilde aradaki bağlantı

milinin dönmesiyle de kompresör pervanesi döndürülür (Akden Turbo Teknik San. Ve Tic Ltd. Şti., 2019 (Url-10)).

Turboşarj sisteminin bulunduğu motor, daha küçük hacimden daha fazla güç elde edilmesine olanak sağladığı için verimli çalışır. Ayrıca turboşarj sistemi çevrecidir. Turboşarjın kullanılmasıyla egzoz emisyonlarında azalmalar kaydedilmiştir. Dizel motorlarında turboşarj ile birlikte hava fazlalık katsayısı arttığı, sıcaklıklar yükseldiği ve tutuşma gecikmesi azaldığı için HC, CO ve is emisyonlarında azalma olmaktadır. Fakat bu durum NO<sub>x</sub> emisyonlarının artmasına sebep olmaktadır. Ancak EGR sistemi ile NO<sub>x</sub> emisyonlarındaki bu artış düşürülebilmektedir (Özülkü, 2002; Çıbıkçı, 2017).





## **BÖLÜM 4. DENEY TASARIMI VE TAGUCHI YÖNTEMİ**

### **4.1. Deney Tasarımı**

Deney, bir sistem veya sürecin belirli bir kısmına ait ayrıntıları incelemek amacıyla belirli yöntem ve kurallara uygun olarak yapılan faaliyettir. Deneyler bir veya birden fazla soruya cevap aramak amacıyla yapılabilir. Yapılan deneyin sonucu bir sürecin gidişatının karar verilmesinde önem taşımaktadır. Deneyden elde edilen verilere göre bu sürece ya devam edilir ya da süreç değiştirilir (Çömlekçi 2003).

Deney tasarımı, hedef değişkeni üzerindeki değişkenliğin incelenip yorumlanabilmesi için proses üzerinde etkili olan faktörlerin sistematik olarak değiştirilmesini sağlayan bir yöntemdir. 1920'li yılların başında ünlü İngiliz istatistik bilimcisi Sir A. Ronald Fisher tarafından geliştirilen deney tasarımının ilk uygulama alanı tarımdır. Fisher, tarım alanlarındaki verimi artırmada aynı anda çeşitli parametrelerin etkili olduğunu fark etmiş ve bu parametrelerin (gübre, toprak çeşidi vb.) en iyi yarar sağladıkları değerleri tespit etmeye yönelik çalışmalar yapmıştır. Fisher, aynı zamanda deney verilerini analiz etmeye yarayan varyans analizini de (ANOVA) geliştiren kişidir. Deney tasarımı, tarım sektöründe edinilen başarılarından sonra, diğer sektörlerde de uygulanmaya başlanmıştır (Ünal, 2015; Şirvancı, 1997).

Deney tasarımı kalite mühendisliği alanında da pek çok fayda sağlamıştır. Kalite mühendisliğinin amacı, sonuç üzerinde etkili olan değişkenliğe mahal veren faktörlerin belirlenip giderilmesi sayesinde değişkenliğin minimuma indirilmesidir (Çömlekçi 2003; Şimşek, 2014).

Deney tasarımının en önemli amaçlarından biri çıktı üzerinde en etkili olan girdi faktörlerini tespit etmektir. Daha sonra tespit edilen bu faktörlerin, araştırmacıyı hedef değere ulaştıracak en iyi seviyeleri belirlenir. Son olarak kontrol edilemeyen girdi

faktörlerinin sonuç üzerindeki etkisinin az olması için kontrol edilebilen girdi faktörlerinin en iyi kombinasyonu yapılır (Şanyılmaz, 2006).

Deney tasarımı en önemli üç prensibe dayanır. Bunlar, rassallaştırma, tekrarlama ve bloklama. Rassallaştırma; deney tasarımındaki faktörlerin seviyelerinin rassal olarak atanmasını ve deneylerin rassal sıraya göre yapılmasını içerir. Tekrarlama; deneyler esnasında karşılaşılabilecek hataların etkilerini minimuma indirmek için deneylerin birden çok defa yapılması anlamına gelir. Bloklama; deneylerin, hassasiyeti güçlendirmek amacıyla belli bölümlere ayrılarak yapılmasıdır (Güneş, 2015).

Deney tasarımının belirli uygulama adımları vardır. Bunlar; problemin belirlenmesi, faktör ve seviyelerinin tespit edilmesi, hedef değişkeninin belirlenmesi, deney tasarımının seçilmesi, deneylerin gerçekleştirilmesi, verilerin analizi ve sonuçların değerlendirilmesidir (Şimşek, 2014).

Deney tasarım türleri genel olarak beş grupta incelenebilir;

#### **Tesadüf parselleri deney tasarımı:**

Deney tasarımının en basit halidir. Faktörler deney birimlerine rassal olarak yerleştirilir. Bu tasarımın kullanılabilmesi için deney malzemesinin homojen olması zorunludur. Örneğin; hayvanlar üzerinde bir deney gerçekleştiriliyorsa, bu hayvanların ırkları, yaşları ve cinsiyetleri aynı olmalıdır. Dolayısıyla bu tasarımın uygulama alanları oldukça kısıtlıdır (Özdamar, 2004).

#### **Tesadüf blokları deney tasarımı:**

Bu yöntem, deney malzemelerinin tümünün homojen olmadığı zamanlarda uygulanır. Heterojen deney malzemeleri üzerinde homojen bloklar meydana getirilerek, deney malzemelerinin bloklar içerisinde homojen kalmasına olanak verir (Şimşek, 2014).

#### **Latin karesi deney tasarımı:**

Deney malzemeleri farklılık gösterdiğinde bu yöntem kullanılır. Bu tasarımda deney sayısı faktör sayısının karesine eşittir. 5 ile 12 arasında faktör sayısına sahip tasarımlarda kullanılır (Şimşek, 2014).

### **Tam faktöriyel deney tasarımı:**

Bu yöntem faktör ve seviye sayılarının fazla olduğu deney tasarımlarında kullanılır. Her bir faktörün bütün seviyelerinin birbiriyle eşleşmesi ile oluşturulan kombinasyonlarının yapıldığı deney tasarımıdır. Örneğin, 6 faktörün 2 seviyesinin olduğu bir tasarımda yapılacak deney sayısı  $2^6 = 64$ 'tür. Bu yöntemin sağladığı en önemli fayda seçilen her faktörün hedef değişkeni üzerindeki etkisinin incelenbilmesidir. Ancak faktör ve seviye sayıları arttıkça deney sayısı da artacağı için zaman ve maliyet kayıplarına neden olan bir yöntemdir (Çiçek, 2018; Taylan, 2009).

### **Kısmi faktöriyel deney tasarımı:**

Tam faktöriyel deney tasarımının en büyük dezavantajı olan zaman ve maliyet kayıplarını azaltmak için geliştirilmiş bir yöntemdir. Asıl hedef deney sayısının azaltılmasıdır. Bunu yaparken faktör sayısından ziyade etkileşimlerin sayısının azaltılması gerekir. Bu yöntemin en önemli sorunu, deneylerin hepsinin yapılmamasından ötürü birtakım etkileşimlerin etkilerinin tespit edilememesidir (Çiçek, 2018; Taylan, 2009).

## **4.2. Taguchi Yöntemi**

### **4.2.1. Taguchi yönteminin gelişimi ve felsefesi**

Ürünlerin veya hizmetlerin düşük maliyetli, kaliteli ve güvenilir olması firmaların devamlılığı açısından önem arz etmektedir. Kalite mühendisliğinde bunu sağlamak için ürünlerin tasarım aşamasına yoğunlaşmak gerektiği belirtilmektedir. Bu, ürünler tasarlanırken kalitenin de tasarlanması anlamına gelir. Buna göre az maliyetli fakat yüksek kaliteli ürünlerin üretilmesi için istatistik metotları ve teknoloji, tasarım sırasında etkin bir biçimde uygulanır (Sağlam, 2016).

Kalite, bu zamana kadar çok farklı şekilde tanımlanmıştır. Genel olarak, müşteri tatmini ve sıfır hata olarak bilinir. Ancak kalitenin maliyet ile arasındaki ilişki çok net ifade edilememiştir. Japonya'da ürün ve proses geliştirmesinde önemli çalışmalar ortayan koyan Dr. Genichi Taguchi, kaliteye yeni bir boyut getirerek, kalite ile maliyet arasındaki ilişkiyi net bir şekilde açıklamaktadır. Taguchi'nin geliştirdiği anlayışa göre kalite, ürün veya hizmetin alıcıya ulaştıktan sonra toplumda oluşturduğu kayıptır.

Taguchi bu amaç doğrultusunda, kısmi faktöriyel deney planlarına ortogonal diziler ve robust tasarım kavramlarını ilave ederek yeni bir deney tasarım yöntemi geliştirmiştir (Şanyılmaz, 2006; Ünal, 2015).

Deney tasarımı, Sir Ronald Fisher tarafından 1920'li yıllarda ortaya konulmuş ve geliştirilmiştir. Ancak Taguchi, deney tasarımını varyasyonun azaltılması nedeniyle uygulayan ilk kişidir. Geleneksel deney tasarımını Taguchi deney tasarımından ayıran en önemli özellik; Taguchi'nin, deney tasarımının performans kriterini belirleyen Sinyal/Gürültü oranı adı verilen bir kriter belirlemiş olmasıdır (Şirvancı, 1997).

Taguchi deney tasarım yöntemi Japonya'da doğmuştur. Ancak İkinci Dünya Savaşı sonrasında yapılan Japon telefon projesinde bu deney tasarımının kullanılmasıyla diğer ülkeler de bu sistemden haberdar olmuştur. Projenin geleneksel metotlarla yapılmasıyla 20 yıl boyunca devam edeceği düşünülüyordu. Taguchi, deney tasarımında ortogonal dizilerin ve robust tasarımın kullanılmasını tavsiye ederek projenin 4 yılda tamamlanmasını sağlamıştır (Güneş, 2015). Tablo 4.1'de faktöriyel deney tasarımı ile Taguchi deney tasarımı kullanıldığında yapılacak deneylerin sayısı gösterilmiştir (Şanyılmaz, 2006).

Tablo 4.1. Faktöriyel tasarım ve Taguchi yönteminin karşılaştırılması (Şanyılmaz, 2006).

Faktör	Seviye	Deney sayıları	
		Faktöriyel tasarım	Taguchi yöntemi
2	2	4 ( $2^2$ )	4
3	2	8 ( $2^3$ )	4
4	2	16 ( $2^4$ )	8
7	2	128 ( $2^7$ )	8
15	2	32768 ( $2^{15}$ )	16
4	3	81 ( $3^4$ )	9

#### 4.2.2. Taguchi yönteminde kalite kontrol

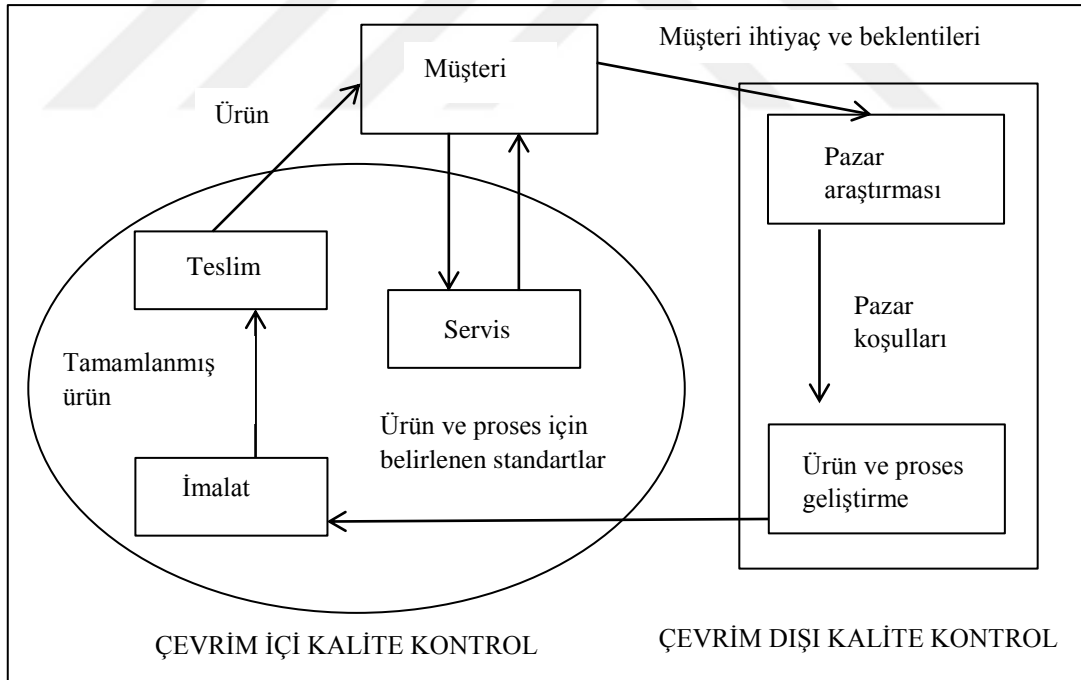
Taguchi, kaliteli bir ürün veya hizmetin ortaya konulabilmesi için yapılan çalışmalarını iki başlık altında toplamıştır. Bunlar, çevrim içi ve çevrim dışı kalite kontroldür. Şekil 4.1'de görülmektedir (Sünkür, 2016).

### Çevrim içi kalite kontrol:

Ürünün üretimi esnasında ve sonrasında yapılan kontrol işlemlerini kapsar. Ürünün üretimine başlanmasıyla çevrim içi kalite kontrol başlar.

### Çevrim dışı kalite kontrol:

Ürünün üretimine geçilmeden önce, tasarım aşamasında gerçekleştirilen işlemlerdir. Bu aşama, müşteri taleplerinin tespit edilmesini, bu talepleri karşılayacak ürün tasarımının ve üretimin gerçekleştirilmesi için gerekli prosedür ve ekipmanların geliştirilmesini içerir. Taguchi deney tasarım yöntemi çevrim dışı kalite kontrol aşamasına dahil olmaktadır. Çevrim dışı kalite kontrol, ürün ve proses tasarımı olarak iki gruba ayrılmaktadır. Ürün tasarımı, müşteri talepleri doğrultusunda yeni bir ürünün geliştirilmesidir. Proses tasarımı ise, ürünün tasarımı sırasındaki ihtiyaçları karşılayacak imalat prosesinin geliştirilmesidir (Güneş, 2015).



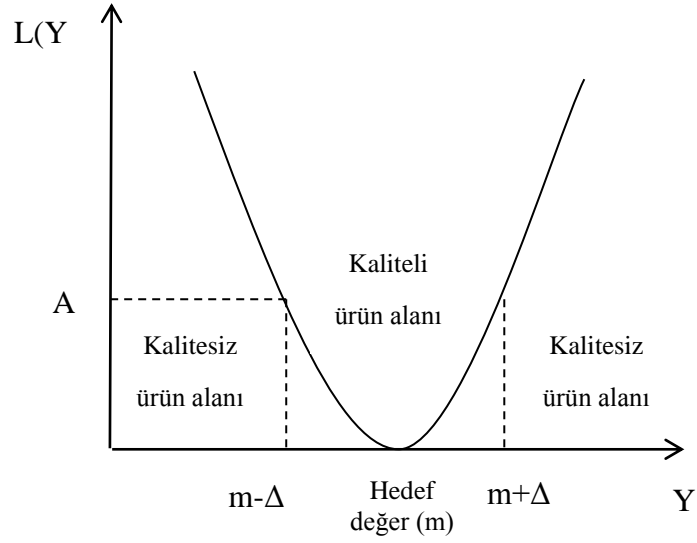
Şekil 4.1. Taguchi'nin üretim-kalite çemberi.

Ürün tasarımı ve proses tasarımı için aşağıda belirtilen yaklaşımlar ortaya konulmuştur:

- Sistem tasarımı: Prosesin ilk aşaması olan sistem tasarımı, ürün için gerekli olan yeni teknolojilerin geliştirilmesi aşamasıdır. Üretilecek ürünün pazarının belirlenmesi, ölçüm sistemlerinin ve üretim ekipmanlarının seçilmesi, mühendislik bilgilerinin toplanması bu aşamada gerçekleştirilir (Ross, 1988).
- Parametre tasarımı: Bu aşamanın amacı, ürün veya proses üzerinde değişkenlik oluşturan kontrol edilebilen faktörlerin kontrol edilemeyen faktörlere karşı optimum seviyeleri seçilerek ürün veya prosesteki değişkenliği minimuma indirmektir. Kalitenin yükseltilmesinde en önemli çalışmaların yapıldığı aşama parametre tasarımıdır (Ross, 1988).
- Tolerans tasarımı: Parametre tasarımında belirlenen hedef karakteristiğinin, toleranslarının ölçümünün ve iyileştirilmesinin yapıldığı aşamadır (Ross, 1988).

#### **4.2.3. Taguchi kayıp fonksiyonu**

Taguchi'nin kalite anlayışının temeli kayıp fonksiyonudur. Kayıp fonksiyonu, ürün üzerindeki kalitenin düşük olmasıyla oluşan müşteri memnuniyetsizliğinin derecesini tespit eden sürekli bir fonksiyondur (Ross, 1988). Kalite kontrolün geleneksel yönteminde üretim parçalarının hedef değerden ne kadar saptığına bakmadan, parçanın tanımlama sınırlarının içinde olup olmadığına bakılır. Parça sınırların dışında bir değer alıyorsa, yeniden işleme alınır veya hurdaya gönderilir; sınırların içindeyse, parçaya onay verilir. Taguchi bu durumun gerçeği yansıtmadığını düşünmüş ve yeni bir yöntem geliştirmiştir. Karesel kayıp fonksiyonu adı verilen kayıp fonksiyonunu ortaya koymuştur. Şekil 4.2'de kayıp fonksiyon grafiği verilmektedir. Dikey eksen parasal kaybı, yatay eksen ise hedef değerden sapma miktarını göstermektedir. Kayıp, parçanın müşteriye ulaştıktan sonraki tüm kaybın toplamıdır. Parçanın değeri hedeften saptıkça, kayıp sapmanın karesi oranında artmaktadır. Kayıp, denklem 4.1 ile ifade edilir (Şirvancı, 1997; İzgiz, 1999).



Şekil 4.2. Taguchi kayıp fonksiyon grafiği (İzgiz, 1999).

$$L(Y) = k(Y - m)^2 \quad (4.1)$$

Y : Değişkenin ölçülen değeri,

m : Hedef değer,

Δ : Tolerans,

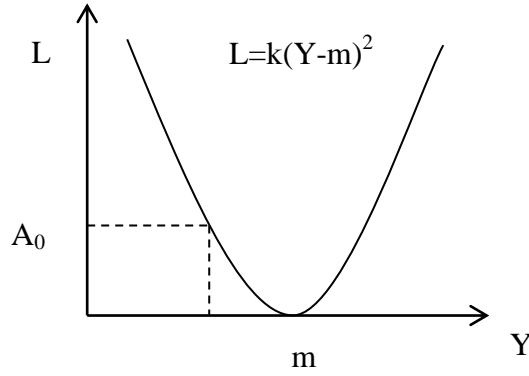
k : Sapmayı para birimine çeviren bir katsayı (İzgiz, 1999; Şirvancı, 1997).

Taguchi'nin geliştirdiği ve çalışmalarda sıklıkla kullanılan kayıp fonksiyonları aşağıdaki gibidir (İlgın ve Hasanoğlu, 2018).

#### **Hedef değer en iyi (Nominal the best):**

Denklem 4.2'de verilen kayıp fonksiyonunun temel halidir. Bu fonksiyonda Y için belli bir hedef değer vardır ve sapmalar iki yönlü olabilir (Ünal, 2015; İlgın ve Hasanoğlu, 2018). Şekil 4.3'te hedef değer en iyi kayıp fonksiyonunun grafiksel ifadesi verilmiştir.

$$L(Y) = k(Y - m)^2 \quad (4.2)$$

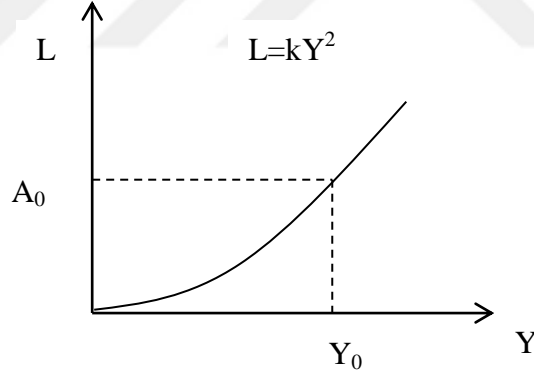


Şekil 4.3. Hedef değer en iyi kayıp fonksiyonunun grafiği (İzgiz, 1999).

**En küçük en iyi (Smaller the better):**

Denklem 4.3'te verilmiştir. Kalite değişkeni olan  $Y$ 'nin hedef değeri sıfırdır ve  $Y$ , negatif yönde bir sapma göstermez (Ünal, 2015; Ilgın ve Hasanoğlu, 2018). Şekil 4.4'te en küçük en iyi kayıp fonksiyonunun grafiksel ifadesi verilmiştir.

$$L(Y) = kY^2 \quad (4.3)$$



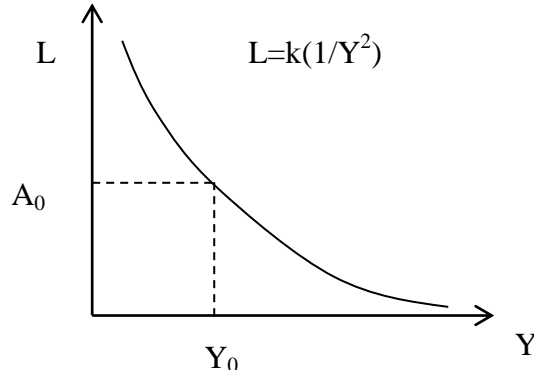
Şekil 4.4. En küçük en iyi kayıp fonksiyonunun grafiği (İzgiz, 1999).

**En büyük en iyi (Larger the better):**

Denklem 4.4'te görüldüğü gibi bu foksiyonda kalite değişkeni  $Y$ 'nin değeri sonsuzdur. Değerin büyümesi verimliliğin artacağını ifade eder (Ünal, 2015; Ilgın ve Hasanoğlu, 2018). Şekil 4.5'te en büyük en iyi kayıp fonksiyonunun grafiksel ifadesi verilmiştir.

$$L(Y) = k (1/Y^2) \quad (4.4)$$





Şekil 4.5. En büyük en iyi kayıp fonksiyonunun grafiği (İzgiz, 1999).

#### 4.2.4. Taguchi yönteminde performans karakteristiği ve performans istatistiği

Performans karakteristiği, diğer bir deyişle kalite değişkeni, ürün veya prosesin kalitesini ortaya koyan özelliktir. Bir ürün ve proses için birden fazla performans karakteristiği olabilir. Her bir karakteristik ürünün farklı bir özelliğini ifade eder. Bu özellikler seçilirken müşterinin üründen beklentileri ve istekleri göz önüne alınmalıdır. Taguchi'nin amacı, ürün karakteristiklerinin hedef değer etrafındaki değişkenliğini en aza indirmektir (Şimşek, 2014).

Taguchi faktörlerin performans karakteristiğinde meydana getirdiği etkiyi değerlendirmek için ortalama, standart sapma ve bunların yanında S/N (Sinyal/Gürültü) diye ifade edilen performans istatistiğini kullanır. S/N oranı, kontrollü bir şekilde incelenen performans karakteristiğinin, kontrol altına alınamayan fakat sonuca etkisi olan dışsal faktörlere karşı duyarlılığını belirler. Deneylerin hedefi genel olarak, en yüksek S/N oranına ulaşmaktır (Güneş, 2015; Ross, 1988).

Performansın ölçülmesi S/N oranı ile sağlanır. S/N oranı kalite değişkeninin değerlendirilmesini sağlamakta ve gürültü faktörlerinin performansa olan etkilerini gözler önüne sermektedir. S/N oranı kalite karakteristiğinin kararlılığının bir ölçütüdür. Yüksek S/N oranı daha az kayıp anlamına gelmektedir (İzgiz, 1999). Hedef değer en yüksek olması istenildiği durumlarda “en büyük en iyi”, en küçük olması istenildiğinde “en küçük en iyi” ve hedef değer nominal düzeyde olması talep edildiğinde “nominal en iyi” fonksiyonları kullanılmaktadır. Üç standart koşul dikkate alınarak Taguchi'nin önerdiği S/N oranları aşağıda verilmiştir:

### **En büyük en iyi (Larger the better):**

Hedef değerin istenilen değeri en büyük değeridir. Örneğin motor performansı, malzeme dayanıklılık değeri. Denklem 4.5 ile en büyük en iyi S/N oranı formülü belirtilmiştir (Şimşek, 2014; İzgiz, 1999).

$$S/N = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (4.5)$$

### **En Küçük en iyi (Smaller the better):**

Hedef değerin istenilen değeri en küçük değeridir. Örnek olarak motor emisyon değerleri, yüzey pürüzlülüğü verilebilir. Denklem 4.6 ile en küçük en iyi S/N oranı formülü belirtilmiştir (Şimşek, 2014; İzgiz, 1999).

$$S/N = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (4.6)$$

### **Hedef değer en iyi (Nominal the best):**

Hedef değerin belli bir değeri vardır ve amaç bu hedefe ulaşmaktır. Örnek olarak boyut kriterleri verilebilir. Denklem 4.7 ile hedef değer en iyi S/N oranı formülü belirtilmiştir (Şimşek, 2014; İzgiz, 1999).

$$S/N = 10 \log \left[ \frac{\bar{y}^2}{s^2} \right] \quad (4.7)$$

#### **4.2.5. Taguchi yönteminde parametre tasarımı**

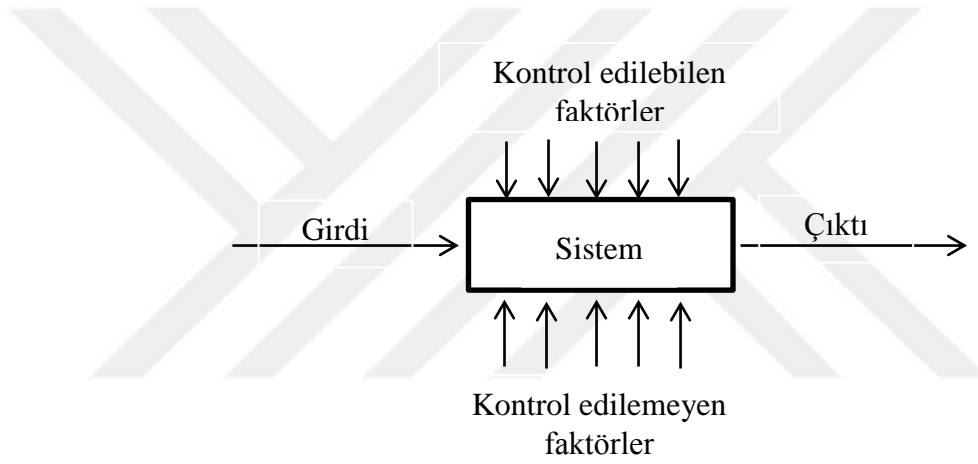
Belli bir problemin çözümü için deney yapılmasına karar verildiğinde öncelikle deney tasarımının oluşturulması gerekir. Bu aşamaya gelmeden önce problemin tanımı ve iyileştirilmesi istenen performans karakteristiği belirlenir ve sonrasında tasarım aşamasına geçilebilir. Bu aşama parametre tasarımı olarak da adlandırılır (Ross, 1988).

Parametre tasarımı, ürünün üretimi esnasında ortaya çıkabilecek değişkenliklerin ve kontrol edilemeyen faktörlerin etkisinin en aza indirilmesi için kullanılan bir yöntemdir. Parametre tasarımının amacı en genel ifade ile kalite değişkeninin (performans

karakteristiği) hedef değerini etkileyen ve hedef değeri optimum edebilecek faktör ve seviyelerin belirlenmesidir (Taguchi vd., 1999).

Parametre tasarımında önemli olan iki aşama vardır. Bunlar robust tasarım ve ortogonal dizilerdir.

Robust tasarım, ürün ve süreç tasarımında yeni teknolojilerin geliştirilmesi için uygulanan bir mühendislik optimizasyon yöntemidir (Taguchi vd., 1999). Bu tasarım sayesinde kontrol edilemeyen faktörlerin performans karakteristiği üzerinde sebep olduğu değişikliklerin en aza indirilmesi sağlanır (Şanyılmaz, 2006). Robust tasarım diyagramı Şekil 4.6'da verilmektedir.



Şekil 4.6. Robust tasarım diyagramı.

Robust tasarımdaki ilk aşama performans karakteristiğini etkileyen faktör ve (eğer varsa) faktörler arası etkileşimlerin ve bunların seviyelerinin belirlenmesidir. Çalışmada hangi faktörlerin araştırılacağı, ürün veya işlemin performans karakteristiğine bağlıdır. Bu karakteristiğin belirlenmesi esnasında müşterinin üründen ne beklediği önem arz etmektedir. Ürünün tasarımı ve geliştirilmesi aşamasında, performans karakteristiğinin müşterinin beklentisi doğrultusunda geliştirilmesi gerekmektedir. Denemelerde hangi faktörlerin inceleneceğini belirlemek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunların bir kısmı aşağıdaki gibidir (Ross, 1988);

- Beyin fırtınası
- Akış şeması (özellikle işlemler için)
- Sebep-sonuç diyagramları (Ross, 1988).

Bu yöntemler sayesinde ürün performans karakteristiğini etkileyen faktörler belirlenir. Bu faktörlerden bir kısmı kontrol edilebilen faktörler olmasına rağmen bir kısmı kontrol edilemeyen veya kontrol edilmesi zor olan faktörlerdir. Kontrol edilebilen faktörler; ürünün üretimi aşamasında üreticinin direkt olarak seçebildiği malzeme cinsi, parça boyutu, yakıt cinsi gibi faktörlerdir. Kontrol edilemeyen veya kontrol edilmesi zor ve maliyetli olan faktörler ise; sıcaklık, nem, rüzgar, gürültü gibi faktörler olarak gösterilebilir.

Kontrol edilebilen faktörlerin seçilmesinden sonra seviyelerinin belirlenmesi gereklidir. Bu aşamada seviyelere karar vermeden önce faktörlerin farklı seviyeleri test edilebilir. Bu yöntem doğru seviyelerin seçilmesini kolaylaştırmaktadır. Seviyeler seçilirken Taguchi tarafından eğer mümkünse 2 veya 3 seviye seçilmesi önerilmektedir. Çünkü bir deney tasarımındaki seviye sayısı doğrudan deney sayısını etkilemektedir. Deney sayısının artması istenmeyen bir durum olduğundan seviye sayısının artmasından kaçınılmaktadır (Şanyılmaz, 2006; Ross, 1988).

Robust tasarımdan sonra deneylerin hangi kombinasyonlara göre yapılacağını belirleyen ortogonal dizi seçimine geçilir. Taguchi deney tasarım yönteminde ortogonal özellikten yararlanılarak çok sayıda faktör ile az sayıda deney yapılması sağlanmıştır. Ortogonal özellik deneme sırasında bir faktörün seviyelerinin aynı sayıda (veya farklı sayıda) diğer faktörlerin farklı seviyeleri ile eşleştirilmesidir (İzgiz, 1999).

Ortogonal dizi seçiminde serbestlik derecesi önemlidir. Serbestlik derecesi; istatistikte bir istatistiği hesaplamak için kullanılan değerlerin değişken sayısını belirtir (Url-11). Serbestlik derecesinin belirlenmesi aşağıda verilen iki maddeye bağlıdır;

- İlgili faktör ve etkileşimlerin sayısı,
- İlgili faktörler için seviye sayısı (Ross, 1988).

Bu maddeler deneydeki toplam serbestlik derecesini belirler. Serbestlik derecesi denklem 4.8'de verildiği gibi her faktör için seviyenin bir eksigidir (Ross, 1988);

$$v_A = k_A - 1 \quad (4.8)$$

$v_A$  : A faktörünün serbestlik derecesi

$k_A$  : A faktörünün seviye sayısı

Denklem 4.9’da belirtildiği şekilde, etkileşimin serbestlik derecesi, etkileşen faktörlerin serbestlik derecelerinin çarpımına eşittir (Ross, 1988);

$$v_{AxB} = (v_A) \cdot (v_B) \quad (4.9)$$

$v_{AxB}$  : AB etkileşiminin serbestlik derecesi

$v_B$  : B faktörünün serbestlik derecesi

Deneyin toplam serbestlik derecesi 4.10 numaralı denklemde verildiği gibi tüm faktör ve etkileşimlerin serbestlik derecelerinin toplamıdır. Bu aynı zamanda toplam deney sayısının bir eksiğine eşittir (Ross, 1988);

$$v_{LN} = N - 1 \quad (4.10)$$

$v_{LN}$  : Tüm faktör ve etkileşimlerin serbestlik derecesi toplamı

$N$  : Toplam deney sayısı.

Faktörler, seviye sayıları ve serbestlik dereceleri belirlendiğinde Tablo 4.2’den uygun bir ortogonal dizi seçilir (Çeber, 2010).

Taguchi belli başlı ortogonal deney planlarını tablolar halinde sunmaktadır. Bu planlar standartlaştırılmıştır ve direkt olarak bir deney için kullanılabilirler.

Ortogonal diziler  $L_a(b^c)$  olarak ifade edilir. Burada “a” deney sayısını, “b” seviye sayısını, “c” ise faktör sayısını belirtmektedir. Ortogonal diziler 2 seviyeden 5 seviyeye kadar değişmektedir. En çok kullanılan 2 ve 3 seviyeli olanlarıdır. 2 seviyeli dizilere L4, L8, L12, L16; 3 seviyeli dizilere ise L9, L18, L36, L54 örnek verilebilir. Aynı deneyde farklı seviyelerde faktör kullanıldığında buna uygun olan ortogonal diziler de vardır. Örneğin; L16, L18, L54 gibi. Tablo 4.3’te  $L_4(2^3)$  ve Tablo 4.4’te  $L_9(3^4)$  ortogonal dizileri verilmiştir (Taguchi vd., 1999; Barker, 1990; Mori, 1995).

Tablo 4.2. Taguchi ortogonal dizi seçim tablosu (Çeber, 2010).

Faktör Sayısı	Seviye Sayısı							
	2	3	4	5				
P=2, S=2	L4	P=2, S=3	L9	P=2, S=4	L16	P=2, S=5	L25	
P=3, S=2		P=3, S=3		P=3, S=4		P=3, S=5		
P=4, S=2		P=4, S=3		P=4, S=4		P=4, S=5		
P=5, S=2	L8	P=5, S=3	L18	P=5, S=4	L32	P=5, S=5	L50	
P=6, S=2		P=6, S=3		P=6, S=4		P=6, S=5		
P=7, S=2		P=7, S=3		P=7, S=4		P=7, S=5		
P=8, S=2	L11	P=8, S=3	L27	P=8, S=4	L32	P=8, S=5	L50	
P=9, S=2		P=9, S=3		P=9, S=4		P=9, S=5		
P=10, S=2		P=10, S=3		P=10, S=4		P=10, S=5		
P=11, S=2	L16	P=11, S=3	L36	L36	L32	P=11, S=5	L50	
P=12, S=2		P=12, S=3				P=12, S=4		P=12, S=5
P=13, S=2		P=13, S=3				P=13, S=4		P=13, S=5
P=14, S=2	L16	P=14, S=3	L36	L36	L32	P=14, S=5	L50	
P=15, S=2		P=15, S=3				P=15, S=4		P=15, S=5
P=16, S=2		P=16, S=3				P=16, S=4		P=16, S=5
P=17, S=2	L16	P=17, S=3	L36	L36	L32	P=17, S=5	L50	
P=18, S=2		P=18, S=3				P=18, S=4		P=18, S=5
P=19, S=2		P=19, S=3				P=19, S=4		P=19, S=5
P=20, S=2	L16	P=20, S=3	L36	L36	L32	P=20, S=5	L50	
P=21, S=2		P=21, S=3				P=21, S=4		P=21, S=5
P=22, S=2		P=22, S=3				P=22, S=4		P=22, S=5
P=23, S=2	L16	P=23, S=3	L36	L36	L32	P=23, S=5	L50	
P=24, S=2		P=24, S=3				P=24, S=4		P=24, S=5
P=25, S=2		P=25, S=3				P=25, S=4		P=25, S=5
P=26, S=2	L16	P=26, S=3	L36	L36	L32	P=26, S=5	L50	
P=27, S=2		P=27, S=3				P=27, S=4		P=27, S=5
P=28, S=2		P=28, S=3				P=28, S=4		P=28, S=5
P=29, S=2	L16	P=29, S=3	L36	L36	L32	P=29, S=5	L50	
P=30, S=2		P=30, S=3				P=30, S=4		P=30, S=5
P=31, S=2		P=31, S=3				P=31, S=4		P=31, S=5

Ortogonal diziye karar verildikten sonra faktörlerin hangi sütunlara atanacağı konusu önem arz etmektedir. Faktörler sütunlara atanırken seviyelerinin değişimi en zor veya maliyetli olan faktör ilk sütuna atanmalıdır. Faktörlerin sütunlara atanmasında doğrusal grafikler ve üçgensel tablolar yöntemlerinin kullanılması önerilmektedir (Şanyılmaz, 2006);

Tablo 4.3.  $L_4(2^3)$  ortogonal dizisi.

Deneyler	Faktörler		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Tablo 4.4.  $L_9(3^4)$  ortogonal dizisi.

Deneyler	Faktörler			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

#### 4.2.6. Taguchi yönteminin uygulama adımları

Taguchi yönteminin doğru bir şekilde uygulanabilmesi için tüm aşamaların eksiksiz olarak takip edilmesini sağlayan aşağıdaki gibi sistematik bir yaklaşım geliştirilmiştir. Buna göre Taguchi yönteminde takip edilecek adımlar aşağıdaki gibi sıralanabilir (Sünkür, 2016; Bingöl, 2017; Güneş, 2015; Şimşek, 2014; Şanyılmaz, 2006).

##### **Problemin tanımlanması:**

Bir bilimsel çalışma yapılırken öncelikle problemin açık bir şekilde belirlenmesi gerekir. Bundan sonraki adımlarda yapılacak olan işlemler belirlenen problemin en iyileme çalışmalarını içerir.

##### **Performans karakteristiğinin belirlenmesi:**

Performans karakteristiği ürünün veya hizmetin kalitesinin ölçüldüğü özelliktir. Ürünün bu özelliği belirlenirken müşterinin üründen ne beklediği dikkate alınmalıdır. Bir ürün için performans karakteristiği bir veya birden çok olabilir.

##### **Performans karakteristiğini etkileyen faktörlerin listelenmesi:**

Öncelikle performans karakteristiğinin hedef değerden sapma sebepleri incelenir. Bu saptamalara yol açan kaynaklar faktör olarak adlandırılır. Sonuca etki eden faktörler

belirlenirken daha önceki bilgilerden, benzer konularda yapılan literatür çalışmalarından yararlanır.

### **Kontrol edilebilen faktörlerin belirlenmesi:**

Hedef değer üzerinde etkili olan faktörler listelenir. Bu faktörlerden bazıları kontrol edilebilen, bazıları ise kontrol edilemeyen faktörler olabilir. Müdahale edilip değiştirilebilen faktörler deney tasarımında kullanılmak üzere seçilir ve bu faktörler ile kontrol edilemeyen faktörlerin etkisi azaltılmaya çalışılır.

### **Faktör seviyelerinin seçilmesi:**

Faktörlerin hangi seviyelerde kullanılacağı sonuç üzerine direkt etki edeceği için çok önemlidir. Seviyelerin belirlenmesi sırasında en etkili seviyelerin seçilebilmesini kolaylaştıran hazırlık deneyleri yapılabilir.

### **Etkileşimlerin belirlenmesi:**

Bir faktörün sonuç üzerindeki etkisi başka bir faktöre bağlı ise bu duruma etkileşim adı verilir. Faktörler seçildikten sonra aralarında herhangi bir etkileşim olup olmadığına bakılır. Eğer etkileşim varsa, bu etkileşim faktörlerin bulunduğu tasarım matrisindeki bir sütuna yerleştirilir.

### **Deney tasarımının (ortogonal dizi) seçilmesi ve faktörlerin tasarım matrisine atanması:**

Faktör ve seviyelerine uygun ortogonal dizinin seçilmesi ve bu faktör ve seviyelerinin uygun bir şekilde tasarım matrisindeki sütunlara aktarılması bu aşamada gerçekleştirilir. Bunun sonucunda deney kombinasyonları belirlenmiş olur.

### **Deney uygulama planının oluşturulması:**

Deney kombinasyonları belirlendikten sonra deneylerin nasıl uygulanacağını tarif eden bir plan oluşturulur. Bu planın sistemli bir şekilde oluşturulması deneylerin yapılması esnasında karşılaşılan zaman kayıplarını azaltması açısından büyük önem taşımaktadır.



### **DeneYlerin yapılması ve performans karakteristiklerinin değerlerinin bulunması:**

DeneYler oluşturulan planlara göre tekrarlı bir şekilde yapılır. Her bir deney adımında elde edilen performans karakteristiği değeri veri tablosuna kaydedilir.

### **Performans karakteristiklerine uygun S/N oranlarının seçilmesi:**

DeneYlerden elde edilen verilerin analizi için her bir performans karakteristiğine uygun S/N oranları belirlenir.

### **Veri analizi yapılarak en iyi kombinasyonların belirlenmesi:**

DeneY verilerinin analizi yapılarak (El ile hesaplayarak veya Minitab programı ile) her bir performans karakteristiği için en iyi faktör kombinasyonları tespit edilir.

### **Varyans (ANOVA) analizinin yapılması:**

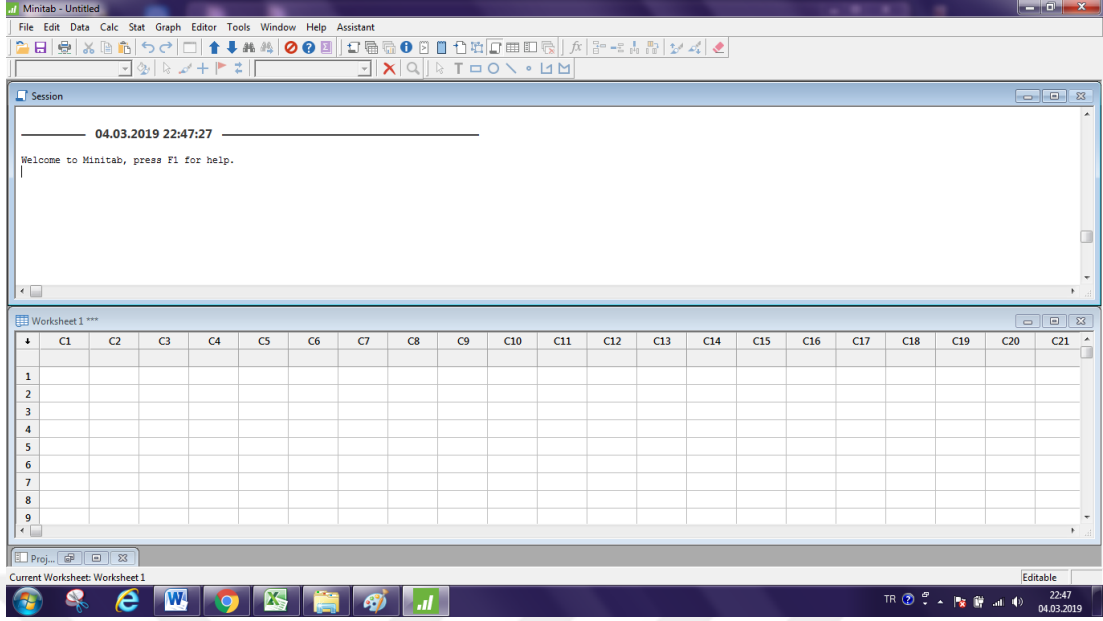
Faktörlerin performans karakteristiği üzerindeki etkilerinin yorumlanabilmesi için varyans analizi yapılır.

### **Doğrulama deneYlerinin yapılması:**

En son aşamada, belirlenen en iyi kombinasyonlara göre deneYler tekrarlanır. Elde edilen sonuçlar tahmin edilen güven aralığının içinde ise tespit edilen kombinasyonların doğru seçildiği anlaşılmış olur.

#### **4.2.7. Taguchi deney tasarım yönteminin Minitab programında uygulanması**

Taguchi deney tasarım yöntemi Minitab programı ile uygulanabilmektedir. Bu alışmada Minitab 17 programı kullanılmıştır. Minitab, excel mantığıyla çalışmakta, fakat excelden daha çabuk sonuçlar vermektedir. Minitab programı hem ortogonal dizinin seçilmesine, hem en iyi kombinasyonun belirlenmesine, hem de varyans analizinin yapılmasına olanak sağlamaktadır. Program ara yüzü şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Minitab 17 kullanıcı ara yüzü.

Literatürde motorlarla ilgili optimizasyon denemelerinde Taguchi istatistiksel deney tasarım yönteminin kullanıldığı bir çok çalışma mevcuttur (Ganapathy vd., 2009; Wu ve Wu, 2013; Lee vd., 2013; Wu vd., 2014; Balkı vd., 2016; Ansari vd., 2018; Ayhan vd., 2018; Ayhan, 2011). Bu çalışmalarda motor performans ve emisyonlarını etkileyen faktör ve seviyeleri belirlenmiş ve deney tasarımı Taguchi yöntemi ile yapılmıştır. Deneyler, Taguchi yöntemi ile oluşturulan ortogonal diziye göre gerçekleştirilmiş ve ilgili faktörlerin optimizasyonu yapılmıştır. Yapılan optimizasyonlar sayesinde motor performans ve emisyonlarında iyileşmelerin olduğu ifade edilmektedir.

Ayhan ve diğerleri (2018) tam yük şartlarında ve farklı devirlerde çalışan bir dizel motorunda Taguchi deneysel tasarım yöntemini kullanarak farklı oranlarda yakıt püskürtme avansı ve buhar enjeksiyonu değerlerinde motor performans ve emisyonlarının değişimlerini incelemiştir. Motor performansının ve NO<sub>x</sub> emisyonunun optimum olduğu faktör ve seviyeleri Taguchi yöntemi ile tespit etmişlerdir. Bu faktör seviyelerinde çalışan motorda standart motora oranla performans ve emisyonlarda önemli ölçüde iyileşmeler elde etmişlerdir.

Ayhan (2011) yapmış olduğu çalışmada, tütün tohumu yağı metil esterinin optimum yakıt özelliklerini tespit etmek için bazı parametreleri Taguchi yöntemi ile optimize etmiştir. Biyodizeli transesterifikasyon yöntemiyle üretmiştir. Kontrol edilebilen

faktörler olarak reaksiyon sıcaklığı, alkol/yağ mol oranı, katalizör tipi ve miktarının kullanıldığı ve bu faktörlerin farklı seviyelerinin seçildiği çalışmada tütün tohumu yağı metil esterinin vizkozitesinin optimizasyonunu yapmıştır. Taguchi deneysel tasarım yöntemi sayesinde az sayıda deney yaparak kısa sürede doğru sonuçlara ulaşmıştır.

Ganapathy ve diğerleri (2009) Taguchi yöntemini kullanarak Jatropha biyodizel motor modelinin performans optimizasyonunu yapmışlardır. Çalışmada en iyi motor tasarımını ve motorun optimum çalışma parametrelerini belirlemek için 10 adet kritik parametre seçmişlerdir. L16 ortogonal dizisini seçerek Taguchi deney tasarımı ve Lineer Grafik Teorisi yöntemlerini kullanmışlardır. Bu yöntemler sayesinde kısa zamanda optimum sonuçlara ulaşmışlardır.

Wu ve Wu (2013) tek silindirli bir dizel motorunda dizel/biyodizel karışımı ile H<sub>2</sub> ve EGR'nin farklı oranlarını uygulayarak motorun yanma özelliklerini araştırmışlardır. L9 ortogonal dizisine sahip Taguchi deney tasarım yöntemini kullandıkları çalışmada fren termal verimliliğini, fren özgül yakıt tüketimini, NO<sub>x</sub> ve duman emisyonlarını optimize etmek için en iyi biyodizel, H<sub>2</sub> ve EGR oranlarını belirlemişlerdir. Ayrıca yanma karakteristiklerinin ve emisyonlarının optimum kombinasyonları ile temel dizel motor koşullarını karşılamışlardır. Taguchi yönteminin kullanıldığı çalışmada, daha az sayıda deney yaparak zamandan %67 oranında tasarruf sağlamışlardır.

Lee ve diğerleri (2013) 2000 cc'lik sabit basınçlı püskürtme sistemi kullanılan ve arıtma cihazlı bir dizel motorunda yüksek verimli-düşük emisyonlu bir kojenerasyon sistemi geliştirmek için Taguchi deneysel tasarım yönteminden yararlanmışlardır. Testleri, dört farklı su akış hızında ve dört farklı elektriksel çıkış gücünde gerçekleştirmiş olup, optimum deney koşullarını Taguchi yöntemi ile tespit etmişlerdir. Daha sonra sonuçları varyans analizi ile test etmişlerdir. Genellikle bir kojenerasyon sistemi kurmak ve bu sistemin yüksek verimle çalışmasını sağlamak için optimum koşulları belirlemede yüksek maliyet ve zamana ihtiyaç duyulduğunu belirtmişler ve bu yöntem sayesinde en iyi deney koşulları saptanırken zaman ve maliyet açısından büyük oranda tasarruf edildiği sonucuna varmışlardır.

Wu ve diğerleri (2014) bir dizel motorunda farklı oranlarda LPG ve biyodizel kullanarak ve motora farklı oranlarda EGR uygulayarak Taguchi yöntemi ile yanma

karakteristiklerini incelemiş ve motorun optimum çalışma koşullarını tespit etmişlerdir. Motor 1500 d/d'da ve farklı yüklerde çalışırken en büyük yakıt tüketim süresini, en düşük duman ve NO<sub>x</sub> emisyonlarını elde etmek için az sayıda deney yaparak en uygun çalışma faktörlerini belirlemişlerdir.

Balkı ve diğerleri (2016) dört silindirli, dört zamanlı, hava soğutmalı bir benzin motorunda saf benzin ve metanol-etanol karışımlarının kullanılmasının motor performans ve egzoz emisyonları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışma faktörlerinin ateşleme zamanı, sıkıştırma oranı ve motor hızı olarak seçildiği çalışmada faktörlerin optimizasyonu için Taguchi deney tasarım yöntemini ve varyans analizini kullanmışlardır. Üçer seviyeli üç faktörün motor performans ve emisyonlarına olan etkilerini araştırmak için yapılan çalışmada L9 ortogonal dizisi kullanılmıştır. Optimize edilmiş motordan elde edilen performans değerlerini ve egzoz emisyon değerlerini temel motorun değerleri ile karşılaştırmışlardır. Doğrulama deneyi sonucunda Taguchi yöntemi sayesinde motor testi sayısı %89 oranında azaltılmış ve yapılan optimizasyon %95 güven aralığında gerçekleştirilmiştir. Optimize edilmiş motordan, temel motora kıyasla daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir.

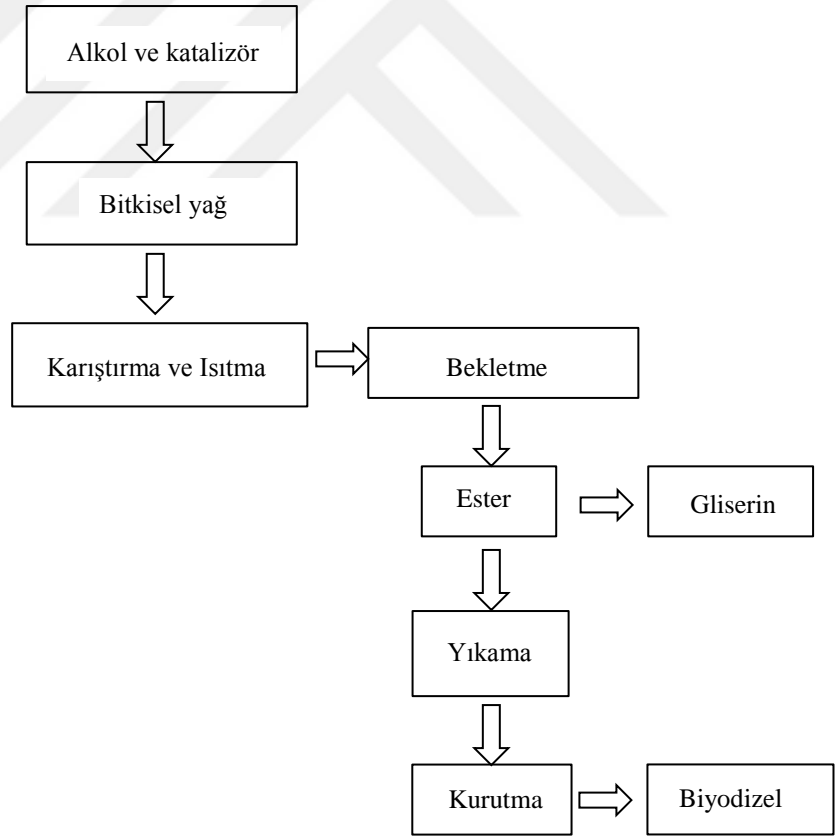
Ansari ve diğerleri (2018) Taguchi yöntemini kullanarak farklı polanga biyodizeli karışımları ile bir dizel motorunun performans ve emisyonlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada girdi parametrelerinin, en iyi motor performans ve emisyon değerlerini verecek şekilde optimize edilmesini sağlamışlardır.

## BÖLÜM 5. MATERYAL VE YÖNTEM

### 5.1. Materyal

#### 5.1.1. Biyodizel üretimi

Bu çalışma için mısır yağından biyodizel üretilmiştir. Şekil 5.1’de biyodizel üretim aşamaları verilmiştir.



Şekil 5.1. Biyodizelin transesterifikasyon yöntemiyle üretim şeması.

Transesterifikasyon işleminde 5 litre yağ için 1 litre metanol ve 1 litre yağ için 3,5 gram katalizör (sodyum hidroksit) kullanılmıştır. Katalizör bir karıştırıcı vasıtasıyla alkolde

çözdürülmüştür. Bu sırada mısır yağı, sıcaklığı 60°C’de sabit tutulan bir karıştırma kabında tutulmuştur. Daha sonra alkol/katalizör karışımı kapalı reaksiyon kaplarına aktarılmış ve üzerine reaksiyona gireceği mısır yağı eklenmiştir. Reaksiyon tamamlandıktan sonra daha ağır olup dibe çöken gliserin ortamdan uzaklaştırılmıştır. Elde edilen biyodizelin içerisindeki katalizör ve alkol atıklarının temizlenmesi için yakıt saf su ile karıştırılmıştır. İşlem tamamlandığında biyodizel ile saf su ayrıştırılmış ve biyodizelin içerisindeki su buharlaştırılmıştır.

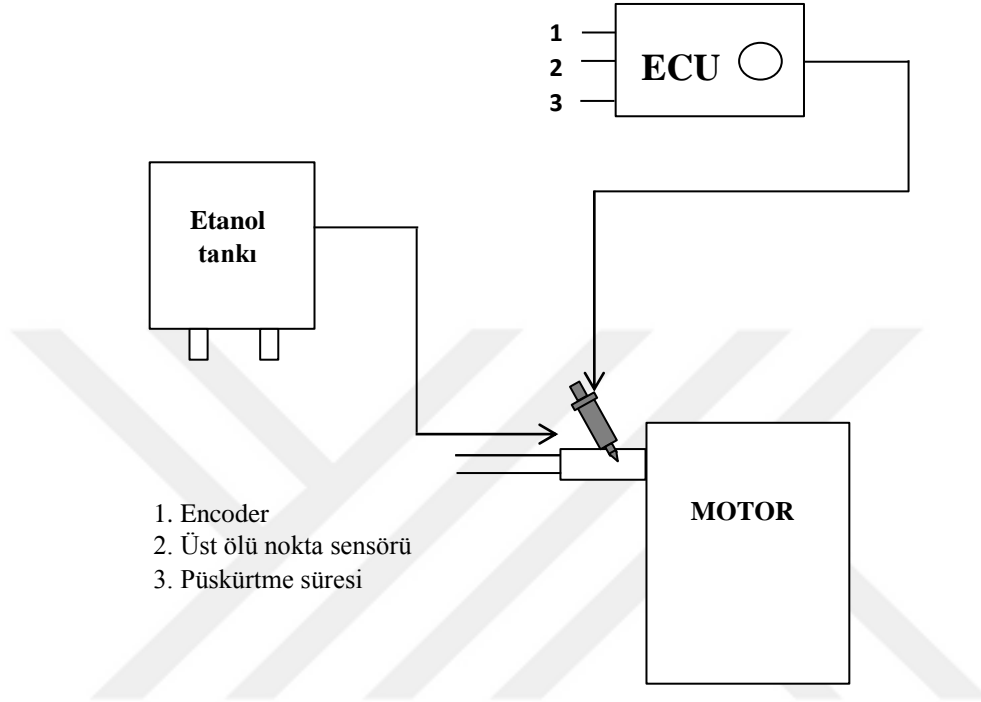
Deneysel çalışmalarda %10, %20, %50 oranlarında biyodizel yakıt kullanılmıştır. Biyodizel-dizel yakıt, deneyler öncesinde biyodizelin dizel yakıt ile kütleli oranda direkt olarak karıştırılmasıyla elde edilmiştir. Karışımda kullanılacak yakıt miktarları 0,1 gramlık hassasiyetle ölçüm yapan bir hassas terazi ile ölçülmüştür. Deneylerden önce her bir karışım yakıtı (B10, B20, B50) biyodizel ve dizel yakıtın miktarları dikkatlice ölçülerek oluşturulmuş ve ayrı ayrı depolanmışlardır. Karışım yakıtları deney düzeneğine herhangi bir donanım ilave edilmeden uygulanabilmiştir.

### **5.1.2. Etanol fumigasyonu**

Deneysel çalışmalar etanolsüz ve %10, %15, %20 oranlarında emme manifolduna etanol püskürtülerek yapılmıştır. Etanol miktarlarının ne kadar verileceğini tespit etmek için etanolün kullanıldığı deney adımları öncelikle etanolsüz olarak yapılmıştır. Burada elde edilen yakıt tüketim süresinden püskürtülecek etanolün kütle debisi ve miktarı hesaplanmıştır. Enjektörün püskürttüğü miktarın tespiti için hassas terazi kullanılmıştır. Etanolün püskürtülmesi için emme manifolduna ayrı bir enjektör yerleştirilmiştir. Elektrik kontrol ünitesi vasıtasıyla enjektöre etanol miktarının, püskürtülecek sürenin ve etanolün ne zaman püskürtüleceği bildirimini gerçekleştirilmiştir. Enjektör emme zamanında ÜÖN’den 5° sonra püskürtmeye başlamaktadır. Şekil 5.2’de deney sistemine eklenen etanol fumigasyon sistemi görülmektedir.

Enjektör parametrelerinin tespiti için bazı çalışmalar yapılmıştır. Öncelikle deney devirleri için (1600 d/d ve 2400 d/d) harcanan yakıt miktarları belirlenmiştir. Daha sonra bu yakıt miktarlarının istenilen oranlarını (%10, %15, %20) emme manifolduna püskürtmek için pompa, regülatör ve enjektör kütüğünün olduğu bir sistem kurulmuştur. Elektrik kontrol ünitesi vasıtasıyla enjektörün açma gecikmesi süresinden başlayarak

belli bir pals (500 kez) uygulanmıştır. Uygulanan her bir mili saniye için 500 palsta püskürtülen yakıt miktarları 0,01 gram hassas terazi ile tayin edilmiştir. Son olarak motorun 1600 ve 2400 devilerinde püskürtülen yakıt miktarlarının istenilen oranlarına karşılık gelen, uygulanması gereken pals genliği tespit edilmiştir.



Şekil 5.2. Etanol fumigasyonun yapıldığı sistem.

### 5.1.3. Deneysel çalışmalarda kullanılan yakıtların özellikleri

Deneysel çalışmalarda yakıt olarak Shell marka eurodizel yakıtı, bu çalışma için laboratuvar ortamında üretilen mısır yağı metil esteri ve etanol kullanılmıştır. Tablo 5.1’de deneysel çalışmalarda kullanılan yakıtların özellikleri verilmiştir.

Tablo 5.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan yakıtların özellikleri.

Özellikler	Dizel	Biyodizel (Mısır yağı metil esteri, [82])	Etanol
Kinematik viskozite, mm <sup>2</sup> /s (40°C’de)	2,5-3,5	4,3	1,1
Alt ısı değeri, kJ/kg	42640	39576	27423
Yoğunluk, kg/L (15°C’de)	0,82-0,86	0,87-0,88	0,78-0,79
Parlama noktası (°C)	>55	>100	425
Setan sayısı	49	>55	11

#### 5.1.4. EGR sistemi

Şekil 5.4'te deney düzeneğine kurulan EGR sistemi görülmektedir. Motorda yanma sonucu oluşan egzoz gazlarının bir kısmının emme manifolduna geri gönderilmesi için boru bağlantısı yapılmıştır. Bu hat üzerine, egzoz manifoldundan çıkan egzoz gazlarının soğutulmasını sağlayan EGR soğutucusu ve EGR oranının ayarlanmasını sağlayan çok turlu vana konumlandırılmıştır. Egzoz manifoldundan çıkan egzoz gazlarının bir kısmı soğutulmuş olarak emme manifolduna ve oradan silindirlere geri gönderilmiştir. EGR soğutucusu çıkışından sonra devam eden egzoz gazlarının bir kısmı emisyon ölçüm cihazına ayrı bir hat ile aktarılmıştır. Burada egzoz gazı, emisyon ölçümü için çeşitli işlemlerden sonra filtrelerden geçirilmiş ve içerisindeki CO<sub>2</sub> oranı ölçülmüştür.

EGR oranlarını belirlemek için manuel olarak kontrol edilen bir vana sisteme ilave edilmiştir. Deneysel çalışmada EGR vanasının ayarlanması ile istenilen EGR oranları verilmiştir. Deneysel çalışmalar EGR'siz ve %10, %15, %20 EGR oranlarında gerçekleştirilmiştir. EGR uygulaması sonucu elde edilen taze dolgu, EGR ile emme havasına gönderilen egzoz gazları ve taze havanın karışımından oluşmaktadır. Emme hattına gönderilen egzoz gazı miktarının hesaplanmasında 5.1 ile gösterilen denklem kullanılmıştır. Buna göre, EGR'nin uygulandığı deney adımları öncelikle EGR'siz olarak gerçekleştirilmiştir. Buradaki CO<sub>2</sub> miktarları emisyon cihazı ile ölçülmüştür. Daha sonra hangi oranda EGR verilecekse denklem 5.1 vasıtasıyla bu oran belirlenmiştir.

$$EGR(\%) = \frac{[(CO_2)_{emme\ manifoldu} - (CO_2)_{\text{çevre}}]}{[(CO_2)_{egzoz\ manifoldu}]} \times 100 \quad (5.1)$$

#### 5.1.5. Aşırı doldurma sistemi

Şekil 5.4'te deney düzeneğine eklenen aşırı doldurma sistemi görülmektedir. Aşırı doldurma ile, havanın motor silindirine daha yoğun bir şekilde gönderilmesi sağlanmıştır. Aşırı doldurma sistemi, elektrik motoru ve kompresörden oluşmaktadır. Kompresör elektrik motoru ile tahrik edilmektedir. Elektrik motorunun devri invertör ile ayarlanarak istenilen devir ve buna bağlı olarak istenilen basınç ayarlanmaktadır.



Böylece elde edilen basınçlı hava emme manifolduna gönderilerek silindir içerisine daha fazla hava alınmış olur.

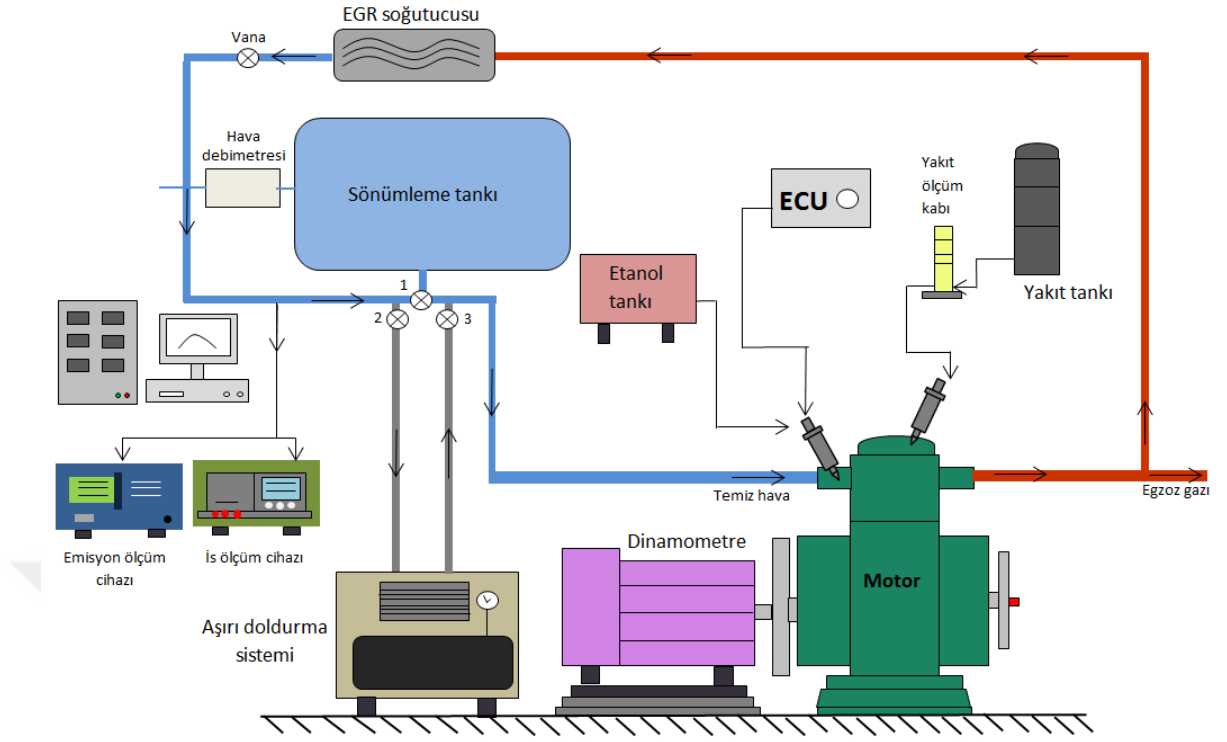
Deneysel çalışmalar aşırı doldurma olmadan ve 1,1 bar aşırı doldurma basıncında yapılmıştır. İstenilen basınç bir manometre vasıtasıyla ayarlanmıştır. Aşırı doldurma sistemini istenildiği zaman devreye alıp istenildiği zaman devre dışı bırakabilmek için sönümleme tankı ile emme manifoldu arasına Şekil 5.4'te görüldüğü gibi bir vana (1 nolu vana) konumlandırılmıştır. Aşırı doldurma sistemi devreye alınmak istendiğinde bu vana kapatılmış ve emme manifolduna direkt hava geçişi kesilmiştir. Bu sırada 2 ve 3 nolu vanalar açılmaktadır. Böylece sönümleme tankından alınan havanın aşırı doldurma sisteminden geçtikten sonra emme manifolduna gönderilmesi sağlanmıştır.

#### 5.1.6. Deney düzeneği

Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği deney düzeneği Şekil 5.3'te, şematik görünüm ise Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.3. Deney düzeneği.



Şekil 5.4. Deney düzeneğinin şematik görünümü.

### 5.1.6.1. Deney motoru

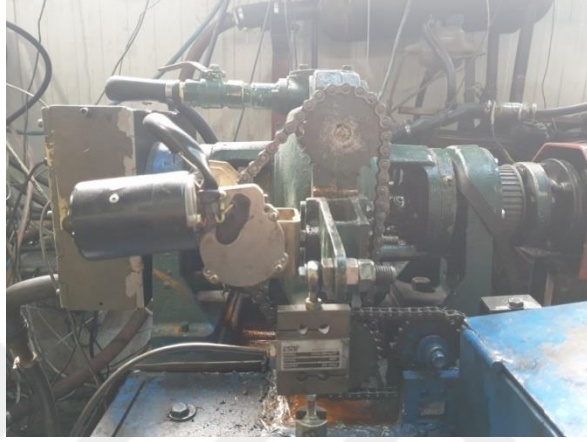
Deneylerde su soğutmalı, tek silindirli, direkt enjeksiyonlu, Süper Star marka bir dizel motor kullanılmıştır. Tablo 5.2’de deney motorunun teknik özellikleri verilmiştir.

Tablo 5.2. Deney motorunun teknik özellikleri.

Motor Tipi	Süper Star
Piston Çapı [mm]	108
Strok [mm]	100
Silindir Sayısı	1
Strok Hacmi [dm <sup>3</sup> ]	0,92
Güç, 2200 d/d, [kW]	13
Enjektör Açma Basıncı [bar]	225
Püskürtme Avansı [Krank Açısı]	29
Sıkıştırma Oranı	17
Maksimum Devir [d/d]	2500
Soğutma Tipi	Su
Püskürtme Tipi	Direkt Enjeksiyon
Piston Tipi	Çanak Piston

### 5.1.6.2. Dinamometre

Deneysel çalışmalar sırasında motoru yüklemek için 50 kg yük tutma kapasiteli hidrolik bir dinamometre kullanılmıştır. Dinamometrenin koluna motorun ürettiği gücü tespit etmek için 0,1 kg hassasiyetle çalışan S tipi Loadcell bağlanmıştır. Deneyler öncesinde Loadcell'in kalibrasyonu yapılmıştır. Şekil 5.5'te dinamometre görülmektedir.



Şekil 5.5. Dinamometre.

### 5.1.6.3. Yakıt sarfiyatının ölçülmesi

Deneyler sırasında her bir adımda yakıt sarfiyatının ölçülebilmesi için 25 ve 50 cm<sup>3</sup>'lük ölçüm haznesi olan yakıt ölçer kullanılmıştır. Yakıt ölçümü hacimsel olarak ve bir kronometre vasıtasıyla yapılmıştır. Şekil 5.6'da yakıt tankı ve hacimsel yakıt ölçme kabı görülmektedir.



Şekil 5.6. Yakıt tankı ve yakıt ölçme kabı.

#### 5.1.6.4. Sıcaklık ölçümleri

Deneysel çalışmada ortam sıcaklığı, egzoz gazı sıcaklığı ve soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklıkları NiCr-Ni tipi termokupullar kullanılarak ölçülebilmektedir. Bu termokupullar göstergelere bağlanmıştır. Şekil 5.7’de sıcaklık göstergesi ve gösterge paneli verilmektedir.



Şekil 5.7. Gösterge paneli ve sıcaklık göstergesi.

#### 5.1.6.5. Emisyon ölçümleri

Deneysel çalışmalarda emisyonların ölçülebilmesi için Bosh BAE 060 marka bir egzoz emisyon ölçüm cihazı kullanılmıştır. Emisyon ölçüm sistemi Şekil 5.8’de görülmektedir. Bu cihaz sayesinde NO, HC, CO<sub>2</sub> ve CO emisyonlarının egzozdaki miktarları yüzde (%) ve ppm olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.8. Emisyon ölçüm sistemi.

İs (duman koyuluğu) emisyonlarının ölçümü için Şekil 5.9’da verilen Bosh BAE 070 marka bir cihaz kullanılmıştır. Cihaz, is ölçümünü yüzde ve K faktörü şeklinde yapmaktadır. Deneylere başlamadan önce her iki cihazın da kalibrasyonları yapılmıştır.



Şekil 5.9. İş emisyonu ölçüm sistemi.

## 5.2. Yöntem (Taguchi Deney Tasarım Yöntemi)

### 5.2.1. Problemin tanımlanması

İçten yanmalı motorlarda petrol kaynaklı yakıtlara bağımlı olmak, çevre kirliliği ile yakıt kaynaklarının gitgide azalması şeklinde problemlere yol açmaktadır. Bu da araştırmacıları alternatif yakıt kullanımına yönlendirmiştir. Diğer taraftan oksijen içerikli yakıtların kullanılması bazı emisyonların oluşumunu azaltırken, NO<sub>x</sub> emisyonlarını arttırmaktadır. Bu çalışmanın amacı motor performans parametreleri ile emisyon karakteristiklerinin optimum değerlerini araştırmaya yönelik deneysel çalışma yapmaktır.

Deneysel çalışmalarda en doğru sonuçlara ulaşmak için tam faktöriyel deneylerin yapılması gerekmektedir. Ancak tam faktöriyel deneyler, özellikle faktör ve seviye sayıları fazla olduğunda, uzun süren çalışmalara yol açmaktadır. Bu durum zaman ve maliyet kayıplarına neden olmaktadır. Bu sebeple bu çalışmada, sonuca daha kısa ve güvenilir bir şekilde ulaşmak için Taguchi istatistiksel deney tasarım yöntemi kullanılmıştır.

### 5.2.2. Performans karakteristiklerinin belirlenmesi

Bu çalışmanın amacı motor performans ve emisyonlarının iyileştirilmesidir. Dolayısıyla performans karakteristikleri motor performans ve emisyon parametreleridir. Motor performansını değerlendirebilmek için çeşitli parametrelerin incelenip yorumlanması gerekmektedir. Bu çalışmada döndürme momenti (Nm), efektif güç (kW), özgül yakıt

sarfıyatı (ÖYS, g/kWh) ve efektif verim (%) performans karakteristikleri olarak incelenmiştir. Bu parametrelerin değerleri deneylerden alınan verilerin hesaplanmasıyla belirlenmiştir. Egzoz emisyon karakteristikleri açısından NO, HC, CO<sub>2</sub>, CO ve is emisyonları incelenmiştir. Bu emisyonların değerleri emisyon ölçüm cihazlarından direkt olarak alınabilmektedir.

### **5.2.3. Performans karakteristiklerine etki eden faktörlerin listelenmesi**

Araştırmacılar, dizel motorların performans ve emisyonlarını iyileştirmek için optimum çalışma koşullarının belirlenmesinde çeşitli yöntemler denemektedirler. Bunlardan bazıları alternatif yakıtların kullanılması, emisyon azaltma tekniklerinin uygulanması, yakıt püskürtme zamanının ve sıkıştırma oranının değiştirilmesi, uygun motor hızı ve yüklerinin belirlenmesi vb. yöntemlerdir. Bu yöntemler sayesinde dizel motorlarının çalışma performanslarını ve emisyonlarını iyileştirmeye yönelik çalışmalar yapılmakta ve olumlu sonuçlar elde edilebilmektedir. Dizel motorlarının performans ve emisyonlarını etkileyen faktörler genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Devir sayısı
- Yük
- Sıkıştırma oranı
- Püskürtme avansı
- Ortam şartları (sıcaklık, basınç vb.)
- Alternatif yakıtlar
- Yakıt katkıları
- Emisyon azaltma teknikleri (EGR, SCR, Katalitik konvertör vb.)
- Aşırı doldurma sistemleri

### **5.2.4. Kontrol edilebilen faktörlerin belirlenmesi**

Bu çalışmada farklı alternatif yakıtların dizel yakıtına ilavesi, emisyon azaltma tekniklerinin uygulanması, motorun değişik yük ve hız şartlarında çalıştırılması ile dizel motorunun performans ve emisyonlarını etkileyen optimum çalışma koşullarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Faktörlerin belirlenmesinde literatür taraması yapılmış ve hem motor performansının hem de emisyonların iyileştirilmesinde etkin rol oynayacak

faktörler seçilmiştir. Literatürde dizel motorlarında biyodizel, etanol, EGR ve aşırı doldurmanın farklı şekillerde kullanıldığı birçok çalışma olmakla beraber bu dört faktörün farklı oranlarda birlikte kullanıldığı ve farklı yük ile devir koşullarını da ekleyerek Taguchi ile optimizasyon yapıldığı çalışmalara rastlanmamıştır. Bu doğrultuda çalışmada belirlenen faktörler; biyodizel, etanol, EGR, aşırı doldurma, yük ve motor devridir.

Motor performans ve emisyon karakteristiklerinde etkili olan ortam sıcaklığı, motor yağ sıcaklığı ve nem gibi faktörlerin kontrol edilmesi zor ve maliyetli olduğundan, bu faktörler gürültü faktörleri olarak tanımlanmış ve optimizasyon aşamasında ele alınmamışlardır. Kontrol edilemeyen fakat sonuç üzerinde etkiye sahip olan bu faktörlerin deneyler boyunca yaklaşık değerlerde kalmasına özen gösterilmiştir.

#### 5.2.5. Faktör seviyelerinin belirlenmesi

Faktör düzeylerinin belirlenmesinde literatür çalışmalarından ve edinilen tecrübelerden yararlanılmıştır. Literatürde alternatif yakıtlar ile yapılan çalışmalar incelenmiş ve performans karakteristiklerine etki eden dizel yakıtı eklenecek en etkili yakıt oranları belirlenmiştir. Bu tezin deneysel çalışmasına geçilmeden önce aynı motorda biyodizel, etanol, EGR ve aşırı doldurma ile ayrı ayrı deneyler yapılmıştır. Bu deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre etkili faktör seviyeleri belirlenmiştir. Literatürden ve deneylerden elde edilen veriler karşılaştırılmış ve bu tez çalışmasının faktör seviyelerine karar verilmiştir. Tablo 5.3'te seçilen faktör ve seviyeleri tablosu sunulmuştur.

Tablo 5.3. Faktör ve seviyeleri.

Sembol	Faktör	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
A	Yük, %	%40	%60	%80	%100
B	Biyodizel, %	B0	B10	B20	B50
C	Etanol, %	E0	E10	E15	E20
D	EGR, %	EGR0	EGR10	EGR15	EGR20
E	Devir, d/d	1600	2400		
F	Aşırı Doldurma, bar	AD0	AD 1,1 bar		

### 5.2.6. Etkileşimlerin belirlenmesi

Yapılan denemeler neticesinde sonuç üzerinde belirgin bir etkisi olan herhangi bir faktörler arası etkileşime rastlanmamıştır.

### 5.2.7. Deney tasarımının (ortogonal dizi) seçilmesi ve faktörlerin tasarım matrisine atanması

Bu çalışmada Taguchi deney tasarım yöntemi Minitab programı vasıtasıyla uygulanmıştır. Deney kombinasyonlarının belirlenmesi için Minitab programında 'Create Taguchi Design' menüsü vasıtasıyla seçilen faktör ve seviyelerine uygun bir ortogonal dizi oluşturulmuştur. Çalışmada, 4 faktör 4 seviyeli, 2 faktör ise 2 seviyeli olarak belirlendiği için Minitab programı bu faktör ve seviyelerine uygun L16(4<sup>4</sup>)(2<sup>2</sup>) ortogonal dizisini oluşturmuştur. Tablo 5.4'te oluşturulan ortogonal dizi verilmiştir.

Tablo 5.4. Ortogonal dizi.

Deney No	Faktörler					
	A	B	C	D	E	F
1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	1	2
3	1	3	3	3	2	1
4	1	4	4	4	2	2
5	2	1	2	3	2	2
6	2	2	1	4	2	1
7	2	3	4	1	1	2
8	2	4	3	2	1	1
9	3	1	3	4	1	2
10	3	2	4	3	1	1
11	3	3	1	2	2	2
12	3	4	2	1	2	1
13	4	1	4	2	2	1
14	4	2	3	1	2	2
15	4	3	2	4	1	1
16	4	4	1	3	1	2



### **5.2.8. Deneý uygulama planının oluřturulması**

Deneý tasarımı oluşturulduktan sonra deneýlerin hangi sıraya göre ve nasıl yapılacağı kararlaştırılmıştır. Genellikle deneý adımlarının sırasının rassal olarak belirlenmesi önerilmektedir. Ancak bu çalışmada faktörleri değiştirmenin zor olacağı durumlarda birbirine yakın faktör seviyeleri içeren adımların art arda yapılması planlanmıştır. Diđer yandan deneýlerden elde edilen sonuçların varyans analizi ile sağlıklı bir Őekilde yorumlanabilmesi için aynı performans karakteristiği değerinin aynı deneý adımı için birden fazla yapılması gerekir. Buna göre 16 deneýin 3 tekrarlı olarak ve adımların mümkün olduğunca birbirini tekrar etmeyeceği Őekilde yapılmasına karar verilmiştir.

### **5.2.9. Deneýlerin yapılması ve performans karakteristiklerinin deđerlerinin bulunması**

Deneý motoru çalıştırılmadan önce motorun subap ve püskürtme basıncı ayarları yapılmıştır. Optimum püskürtme avansı değerini için standart motorda farklı açılarda deneýler yapılmış ve optimum değer (29° KMA) seçilmiştir. Deneýlerin tümü bu avansta gerçekleştirilmiştir. Motorun soğutma suyu ve yağlama yağı miktarı kontrol edilip gerekli ilaveler yapılmıştır.

Deneý motorundan veri almaya başlamadan önce motorun yađ sıcaklığının 75 °C'yi aşması beklenmiştir. Motor kararlı hale geldiğinde öncelikle lambda ayarı ayapılmıştır. Daha sonra ölçümler gerçekleştirilmiştir. Sođutma suyu çıkış sıcaklığı 85 °C'de sabit tutulmuştur. Su debisi rotametre ile llmřtir.

Deneýler, öncelikle standart değerlerin tespit edilmesi amacıyla standart motorda (dizel yakıt ile) yapılmıştır. Ardından her bir faktörün etkisini belirlemek ve karşılaştırma yapabilmek amacıyla aşağıda belirtilen Őekilde n deneýler yapılmıştır;

1.Aşama: Belirlenen dört yük değerinde (%100, %80, %60, %40), 1200 d/d – 2400 d/d devir aralığında ve her bir biyodizel yakıt (B0, B10, B20, B50) için tekrarlanarak yapılmıştır.

2.Aşama: %100, %80, %60, %40 yük Şartlarında, 1200 d/d – 2400 d/d devir aralığında ve her bir etanol yakıt (E0, E10, E15, E20) için tekrarlanarak yapılmıştır.

3.Aşama: %100, %80, %60, %40 yük şartlarında, 1200 d/d – 2400 d/d devir aralığında ve her bir EGR oranı (EGR0, EGR10, EGR15, EGR20) için tekrarlanarak yapılmıştır.

4.Aşama: %100, %80, %60, %40 yük şartlarında, 1200 d/d – 2400 d/d devir aralığında ve her bir aşırı doldurma oranı (AD0, AD 1,1 bar) için tekrarlanarak yapılmıştır.

Yukarıdaki gibi tarama deneylerinin yapılması karşılaştırmaların yapılabilmesini sağlamıştır. Asıl deneyler, Taguchi deney tasarım yöntemi ile belirlenen ortogonal dizideki kombinasyonlara göre yapılmıştır. Deney adımları (kombinasyonları) Tablo 5.5'te ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tablo 5.5. Deney kombinasyonları.

Deney No	Faktörler					
	A	B	C	D	E	F
1	40%	B0	E0	EGR0	1600	AD0
2	40%	B10	E10	EGR10	1600	AD 1,1bar
3	40%	B20	E15	EGR15	2400	AD0
4	40%	B50	E20	EGR20	2400	AD 1,1bar
5	60%	B0	E10	EGR15	2400	AD 1,1bar
6	60%	B10	E0	EGR20	2400	AD0
7	60%	B20	E20	EGR0	1600	AD 1,1bar
8	60%	B50	E15	EGR10	1600	AD0
9	80%	B0	E15	EGR20	1600	AD 1,1bar
10	80%	B10	E20	EGR15	1600	AD0
11	80%	B20	E0	EGR10	2400	AD 1,1bar
12	80%	B50	E10	EGR0	2400	AD0
13	100%	B0	E20	EGR10	2400	AD0
14	100%	B10	E15	EGR0	2400	AD 1,1bar
15	100%	B20	E10	EGR20	1600	AD0
16	100%	B50	E0	EGR15	1600	AD 1,1bar

Bu tabloya göre 16 deney 3 tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Her bir deney adımında motor devri, dinamometre yükü, yakıt tüketimi, motor yağı sıcaklığı, hava debisi, ortam sıcaklığı ve nemi, soğutma suyu giriş-çıkış sıcaklıkları, eşanjör su giriş-çıkış sıcaklıkları, motor gövde sıcaklığı, egzoz gazı sıcaklığı ve NO, HC, CO<sub>2</sub>, CO, is emisyonları ölçülmüştür. Motor testlerinde ölçülen bazı parametreler ve ölçüm

cihazlarının özellikleri Tablo 5.6’da verilmiştir. Ölçülen bu değerlerden motor performans ve emisyon karakteristiklerinin değerleri tespit edilmiştir. Motor performans değerlerinin hesaplanmasında kullanılan formüller 5.2, 5.3, 5.4 ve 5.5 denklemleri ile verilmiştir.

Tablo 5.6. Ölçülen parametreler ve ölçüm cihazlarının özellikleri.

Ölçülen parametreler	Birim	Ölçüm aralığı	Ölçme aleti	Ölçüm hassasiyeti
Motor Devri	dev/dak	0–9999	Dijital takometre	1 dev/dak
Egzoz sıcaklığı	°C	0–1000	Ni-Cr-Ni	1 °C
Fren terazi kuvveti	Kg	0–100	Su freni	0,1 Kg
Karbon monoksit (CO)	%	% 0–15,0	Bosh BAE 060	% ± 0,055
Karbondioksit (CO <sub>2</sub> )	%	% 0–20,0	Bosh BAE 060	% 0,5–5
Hidrokarbon (HC), ppm	ppm	0–20000	Bosh BAE 060	±12 ppm
Azot oksit (NO), ppm	ppm	0–2000	Bosh BAE 060	± 5 ppm
İs emisyonu	%	0–99	Bosh BAE 070	%1

### 5.2.9.1. Döndürme momenti

Bu çalışmada, motor döndürme momenti hidrolik bir dinamometreden ölçülen yük değeri ile hesaplanmıştır. Döndürme momenti hesabında kullanılan formül 5.2’de verilmiştir (Ayhan, 2009);

$$M_d = F \cdot L \quad (5.2)$$

$M_d$ : Döndürme momenti (Nm),

$F$  : Fren terazi kuvveti (N),

$L$  : Moment kolu uzunluğu (m) (Ayhan, 2009).

### 5.2.9.2. Efektif güç

Motorun ürettiği güç döndürme momenti ve açısal hızın çarpımıyla elde edilir. Efektif güç formülü 5.3’te gösterildiği gibidir (Ayhan, 2009);

$$P_e = \frac{2\pi \cdot F \cdot L \cdot n}{60000} \quad (5.3)$$

$P_e$ : Efektif güç (kW),

$n$  : Motor devri (d/d) (Ayhan, 2009).

### 5.2.9.3. Özgül yakıt sarfiyatı

Özgül yakıt sarfiyatı, birim zamanda birim güç başına harcanan yakıt miktarıdır. Harcanan yakıtın miktarını hacimsel olarak ölçmek mümkündür. Motorun  $\Delta t$  (s) zaman aralığında tükettiği yakıt hacmi  $\Delta V$  (cm<sup>3</sup>) olsun. Kullanılan yakıtın yoğunluğu  $\rho_y$  (g/cm<sup>3</sup>) ise, özgül yakıt sarfiyatı 5.4 denklemindeki gibi hesaplanır (Ayhan, 2009);

$$b_e = \frac{3600 \cdot \Delta V \cdot \rho_y}{P_e \cdot \Delta t} = \frac{3600 \cdot \dot{m}_y}{P_e} \quad (5.4)$$

$b_e$  : Özgül yakıt sarfiyatı (g/kWh),

$\dot{m}_y$ : Kütlesel yakıt debisi (g/s),

$\rho_y$  : Yakıt yoğunluğu (g/cm<sup>3</sup>),

$\Delta V$  : Tüketilen yakıt hacmi (cm<sup>3</sup>),

$\Delta t$  : Yakıt tüketim süresi (s) (Ayhan, 2009).

### 5.2.9.4. Efektif verim

Efektif verim, motor milinden alınan gücün yakıt ile motora verilmiş olan enerjiye oranıdır. Denklem 5.5'teki gibi ifade edilir (Ayhan, 2009);

$$\eta_e = \frac{P_e}{\dot{m}_y \cdot H_u} \quad (5.5)$$

$\dot{m}_y$ : Kütlesel yakıt debisi (g/s),

$H_u$ : Yakıtın alt ısıl değeri (kJ/Kg),

$P_e$  : Efektif güç (kW) (Ayhan, 2009).

### 5.2.9.5. Belirsizlik analizi

Deneysel çalışmalar esnasında ne kadar dikkatli olunursa olunsun deney sonuçlarında ölçüm sistemlerinden kaynaklanan bazı hatalar olabilir. Bu hataların tespit edilmesi ve azaltılması büyük önem taşımaktadır. Deneysel verilerin hata analiz yöntemlerinden biri de belirsizlik analizidir. Belirsizlik analizine göre; R sistemde ölçülmesi gereken büyüklük olsun. Bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişken de  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  olsun. Bu durumda R, denklem 5.6 ile ifade edilebilir (Genceli, 2015):

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (5.6)$$

Her bir bağımsız değişkene ait hata oranları ise  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$  ve R büyüklüğünün hata oranı  $w_R$ , denklem 5.7 ile gösterilir:

$$w_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.7)$$

Deneysel sonucu hesaplanan büyüklüklerin belirsizlik analizi sonuçları Tablo 5.7’de verilmiştir. Belirsizlik analizi %40-B0-E0-EGR0-1600-AD 1,1 bar koşullarında çalışan motordan alınan veriler için yapılmıştır.

Tablo 5.7. Belirsizlik analizi tablosu.

Hesaplanan büyüklük	Birim	Değer	Belirsizlik (%)
Döndürme momenti, $M_d$	Nm	0,1658	1
Efektif güç, $P_e$	kW	0,02792	1
ÖYS, $b_e$	g/kWh	4,524	1,41
Efektif verim		0,00373	1,41

### 5.2.10. Performans karakteristiklerine uygun S/N oranlarının seçilmesi

Minitab üzerinde yapılacak olan analizlere başlamadan önce hesaplanan motor performans parametreleri ve sonuçlardan direkt olarak elde edilen emisyon değerlerinin S/N oranları belirlenmiştir. Döndürme momenti, efektif güç ve efektif verimin istenilen değerleri en yüksek değerleri olduğu için Taguchi’nin önerdiği ‘en büyük en iyi’

formülü kullanılmıştır. Özgül yakıt sarfiyatı, NO, HC, CO<sub>2</sub>, CO ve is emisyonları için istenilen değerler en düşük değerler olduğu için ‘en küçük en iyi’ formülü kullanılmıştır. S/N oranlarının formülleri Tablo 5.8’de verilmiştir.

Tablo 5.8. S/N oranlarının hesaplanmasında kullanılan formüller.

En büyük en iyi	En küçük en iyi
$S/N = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right]$	$S/N = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right]$

### 5.2.11. Veri analizi yapılarak en iyi kombinasyonların belirlenmesi

Bu aşamada, daha önce Minitab programında oluşturulan ortogonal dizinin her bir satırının sonuna, analizi yapılacak performans karakteristiğinin deneylerden alınan değeri (motor performansları için hesaplandıktan sonraki değerleri) girilmiştir. Deneyler 3 tekrarlı yapıldığından her bir performans karakteristiği için 3’er adet değer vardır. Bu değerlerin sisteme girilmesinin ardından ‘Analyze Taguchi Design’ menüsü yardımıyla uygun S/N oranı belirlenerek analiz yapılmıştır. Minitab’ın oluşturduğu grafikler vasıtasıyla en iyi kombinasyonlar saptanmıştır. Bu işlemler tekrarlanarak her bir performans karakteristiği için ayrı ayrı en iyi kombinasyonlar tespit edilmiştir.

### 5.2.12. Varyans analizi

En iyi kombinasyonlar belirlendikten sonra her bir faktörün ilgili kalite değişkenine etkisinin oranını saptamak için varyans analizi yapılmıştır. Varyans analizi Minitab programında ‘Fit General Linear Model’ menüsü yardımıyla yapılmıştır.

Minitab programından elde edilen verilerin doğruluğu excel tablosu yardımıyla el ile hesaplanarak da test edilmiştir. Hesaplama kullanılan formüller 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 ve 5.12 denklemlerinde verilmiştir (İzgiz, 1999).

$$SS_T = \left[ \sum_{i=1}^N (S/N)_i^2 \right] - \frac{T^2}{N} \quad (5.8)$$

$$SS_A = \left[ \sum_{i=1}^{K_A} \left( \frac{A_i^2}{n_{Ai}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} \quad (5.9)$$

$$v_{\text{total}} = N - 1 \quad (5.10)$$

$$V_{\text{faktor}} = \frac{SS_{\text{faktor}}}{\vartheta_{\text{faktor}}} \quad (5.11)$$

$$F_{\text{faktor}} = \frac{V_{\text{faktor}}}{V_{\text{error}}} \quad (5.12)$$

$SS_T$  toplam değişkenliğe sahip olan karelerin toplamını,  $N$  toplam deney sayısını,  $SS_A$ ,  $A$  faktörüne bağlı karelerin toplamını,  $K_A$  ise  $A$  faktörü için seviye sayısını belirtir.  $A_i$ ,  $A$  faktörünün toplam seviyesinin toplamını,  $n_{Ai}$  ise  $A$  faktörünün seviyesinin toplamıdır.  $T$ , deneylerin toplam S/N oranının toplamını,  $v$  ise serbestlik derecelerini ifade eder.  $V_{\text{faktor}}$ , faktörün varyansını,  $SS_{\text{faktor}}$ , faktörün karelerinin toplamını ve  $F_{\text{faktor}}$ , faktörün  $F$  oranını belirtir (İzgiz, 1999).

### 5.2.13. Doğrulama deneylerinin yapılması

Taguchi deneysel tasarım yöntemi ile yapılan optimizasyon sonucunda performans karakteristiklerinin ayrı ayrı en iyi kombinasyonları bulunmuştur. Bu kombinasyonların doğruluğunu test etmek için en iyi moment, en iyi güç ve en iyi NO kombinasyonlarına sahip deneyler aynı koşullar altında 3 tekrarlı olarak yapılmıştır.

## **BÖLÜM 6. ARAŞTIRMA BULGULARI**

Bu çalışmada, farklı yakıt karışımları, EGR ve aşırı doldurma uygulanan direkt enjeksiyonlu ve tek silindirli bir dizel motorunda performans ve emisyon parametrelerini optimize etmek için Taguchi yöntemi kullanılarak deneysel inceleme yapılmıştır.

Deneylelerden elde edilen veriler Minitab programında analiz edilmiş ve en iyi kombinasyonlar tespit edilmiştir. Daha sonra faktörlerin performans karakteristikleri üzerindeki etkilerini saptayabilmek için Minitab programında varyans analizi yapılmıştır.

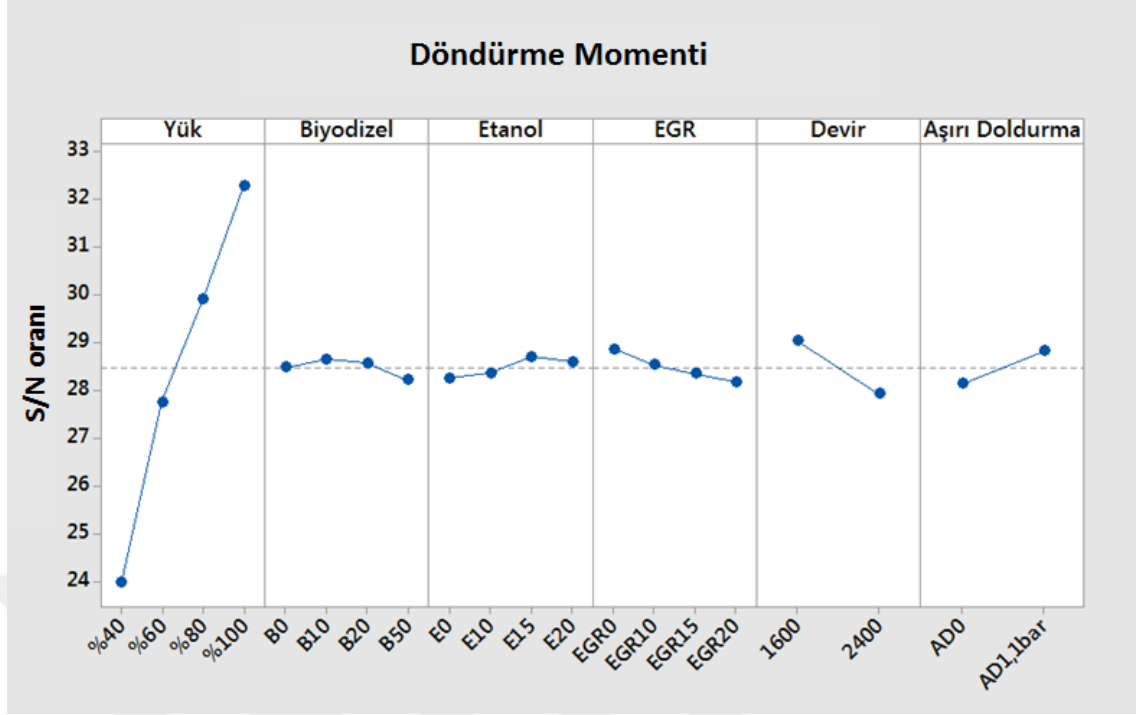
### **6.1. Motor Performans Karakteristikleri İçin Optimum Deney Kombinasyonlarının Belirlenmesi**

#### **6.1.1. Döndürme momenti ve efektif güç**

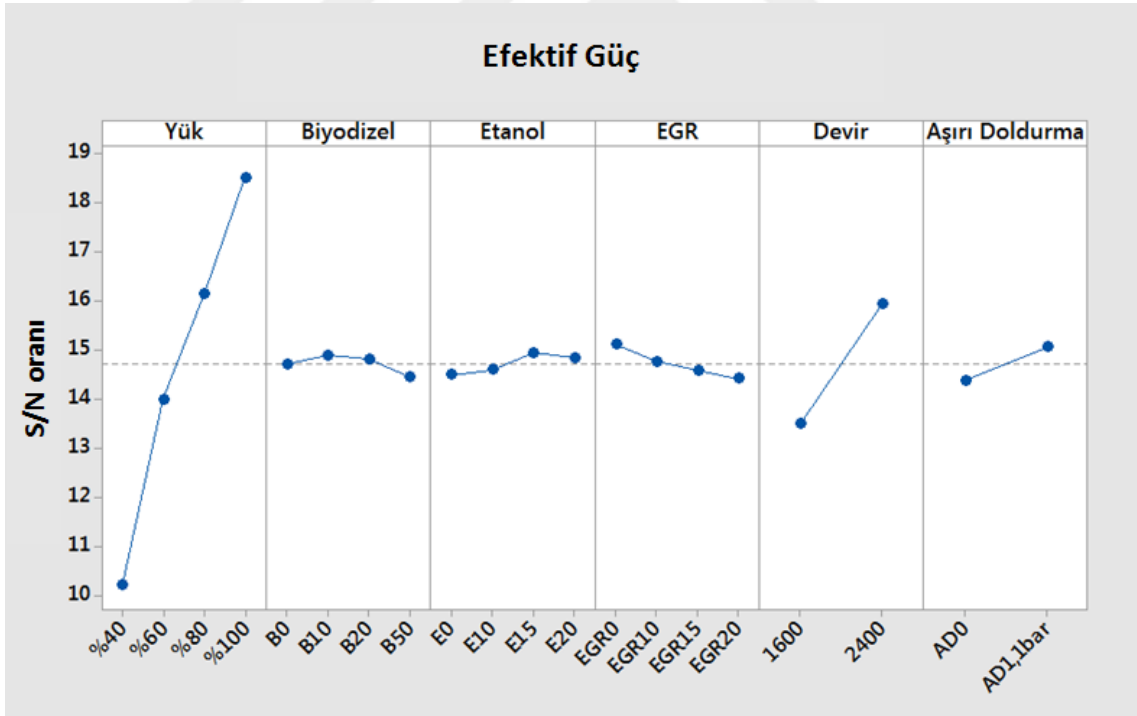
Şekil 6.1’de motor momentine etki eden faktör ve seviyelerinin değişimleri görülmektedir. Momenti maksimum yapan değer tam yükte (%100), B10 biyodizel karışımında, E15 etanol oranında, EGR uygulanmadığında (EGR0), 1600 d/d’da, ve 1,1 bar aşırı doldurma basıncında (AD 1,1 bar) elde edilmiştir. En iyi kombinasyon A4-B2-C3-D1-E1-F2’dir.

Şekil 6.2’de motor efektif gücüne etki eden faktör ve seviyelerinin değişimleri görülmektedir. Efektif gücün optimum değeri tam yükte (%100), B10 biyodizel karışımında, E15 etanol oranında, EGR uygulanmadığında (EGR0), 1600 d/d’da, ve 1,1 bar aşırı doldurma basıncında (AD 1,1 bar) elde edilmiştir. En iyi kombinasyon A4-B2-C3-D1-E2-F2’dir.





Şekil 6.1. Döndürme momenti için faktör seviyeleri S/N değerleri.



Şekil 6.2. Efektif güç için faktör seviyeleri S/N değerleri.

Yük, biyodizel, etanol, aşırı doldurma ve EGR'nin motor efektif güç ve momentinde meydana getirdiği değişimler benzer seyretnmektedir.

Yükün artması ile moment ve dolayısıyla efektif gücün artması beklenen bir durumdur. Bu durumda moment ve efektif gücün en yüksek olduğu değerler tam yük koşullarında elde edilmiştir.

Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de B0, B10, B20 ve B50 yakıtlarıyla yapılan testlerde momentin ve efektif gücün değişimleri incelendiğinde en iyi moment ve efektif güç değerlerinin B10 ve B20 yakıtlarında elde edildiği görülmektedir. B50 yakıtında ise diğer tüm yakıtlara göre kötüleşme meydana gelmiştir. B10 ve B20 yakıtları kullanıldığında moment ve efektif güçte meydana gelen iyileşmelerin sebebinin dizel yakıtı göre biyodizelin oksijence zengin içeriğe sahip olmasından ileri geldiği düşünülmektedir. Yakıt içerisindeki oksijen miktarı arttıkça yanma verimi iyileşmekte ve motor döndürme momenti artmaktadır. B50 yakıtınının kullanılmasıyla momentin azalmasının biyodizelin dizel yakıtı göre düşük alt ısıl değere sahip olması ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Dolayısıyla B50 karışım yakıtının alt ısıl değeri dizel yakıtı oranla az olmakta ve sisteme verilen enerji miktarı azalmaktadır. Bu durum da momentin azalmasına sebebiyet vermektedir. B50 yakıtında momentin azalmasının diğer bir sebebi, biyodizel yakıtlarının dizel yakıtı göre daha yüksek viskoziteye ve yoğunluğa sahip olmasıdır. Özellikle yüksek devirlerde sürtünmeler sebebiyle yakıtın pompayı doldurma gecikmesi biyodizelde dizel yakıtı oranla yüksektir (Behçet ve Oral, 2014). Literatürde en iyi sonuçların alındığı biyodizel oranının %10 ve %20 arasında olduğu görülmektedir (Manigandan vd., 2019; Usta vd., 2005; Ayhan vd., 2019; Karabaş, 2009).

Farklı oranlardaki etanol fumigasyonunun moment ve efektif güce olan etkisi için Şekil 6.1 ve Şekil 6.2 incelendiğinde, dizel yakıtı %10, %15 ve %20 oranlarında etanol verilmesinin dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında moment ve gücü olumlu etkilediği sonucuna varılmıştır. Etanolün dizel yakıtı göre daha düşük alt ısıl değerinin olmasına rağmen, sahip olduğu yüksek oksijen içeriği sayesinde daha iyi bir yanma meydana getirdiği ve dolayısıyla bu durumun momenti arttırdığı düşünülmektedir. Aynı zamanda etanolün buharlaşma ısısından dolayı emme manifoldunu soğuttuğu için volümetrik verim artmaktadır. En iyi moment ve efektif güç değerleri %15 etanol oranında elde edilmiştir. Bu çalışmada dizel yakıtı verilen en yüksek etanol oranı %20 olarak belirlenmiştir. Ancak etanolün dizel yakıtına %20’den fazla verildiği durumda karışım

yakıtının alt ısı değeri çok düşük olacağından momentin azalacağı düşünülmektedir. Literatürde motor performansı için optimum etanol oranının %5 ve %15 oranları arasında olması gerektiği önerilmektedir (Ghadikolaei vd., 2018; Sezer, 2017; Usta vd., 2005; Aktaş vd., 2019).

Motora EGR uygulanması ile dolgu içerisindeki oksijen miktarının ve yanma hızının azalmasından ötürü motor performansı kötüleşmektedir. Analiz sonuçlarına bakıldığında EGR'nin tüm oranlarında moment ve efektif gücün azaldığı görülmektedir.

Genel olarak atmosferik motorlarda momentin en yüksek olduğu devir karakteristik eğrilerden bilindiği üzere orta bir devirdir. Şekil 6.1'de görüldüğü gibi deney motorunda en yüksek moment 1600 d/d'da elde edilmiştir. Bu devirden sonra devir arttıkça moment azalır. Bunun nedeni silindire girecek karışım miktarının azalması ve artan sürtünme kayıplarıdır. Diğer yandan efektif güç moment arttıkça artar, ancak efektif güç momente bağlı olduğu gibi motor devrine de bağlıdır. Devir arttıkça çevrim sayısındaki artmaya bağlı olarak efektif güç artmaktadır.

Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'de görüldüğü gibi en iyi moment ve efektif güç değerleri 1,1 bar aşırı doldurma basıncında elde edilmiştir. Aşırı doldurma uygulaması sayesinde, motora yüksek basınçta hava gönderimi ile volümetrik verim artışı sağlanmış ve dolayısıyla moment ve efektif güçte olumlu yönde bir değişim gözlenmiştir.

Tablo 6.1 ve Tablo 6.2 incelendiğinde varyans analizi sonuçlarına göre faktörlerin moment ve efektif güç üzerindeki etkileri görülmektedir. Motor yükü ve motor devri moment ve efektif güç üzerinde %95 güven aralığında etkilidir. Biyodizel, etanol, EGR ve aşırı doldurmanın ise moment ve efektif güç üzerinde daha az etkili oldukları anlaşılmaktadır.

Tablo 6.1. Döndürme momenti için varyans analizi.

Faktörler	Serbestlik Derecesi, DF	Kareler Toplamı, SS	Kareler Ortalaması, MS	F- Value	P- Value
A – Yük, %	3	148,792	49,5975	2877,16*	0,014
B – Biyodizel, %	3	0,447	0,149	8,64	0,244
C – Etanol, %	3	0,509	0,1695	9,84	0,229
D – EGR, %	3	1,046	0,3486	20,22	0,162
E – Devir, d/d	1	4,803	4,8028	278,61*	0,038
F – Aşırı Doldurma, bar	1	1,826	1,826	105,92	0,062
Hata	1	0,017	0,0172		
Toplam	15	157,44			

\*%95 güven aralığı, \*\*%99 güven aralığı, \*\*\*%99,99 güven aralığı.

Tablo 6.2. Efektif güç için varyans analizi.

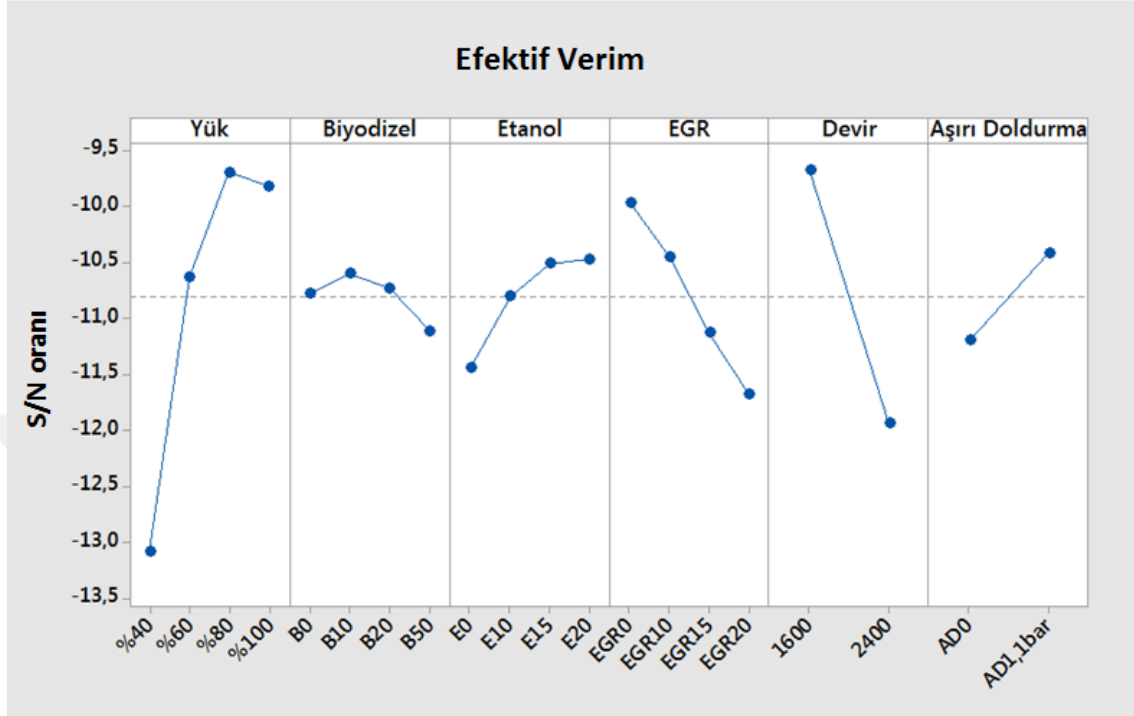
Faktörler	Serbestlik Derecesi, DF	Kareler Toplamı, SS	Kareler Ortalaması, MS	F- Value	P- Value
A – Yük, %	3	148,792	49,5975	2877,16*	0,014
B – Biyodizel, %	3	0,447	0,149	8,64	0,244
C – Etanol, %	3	0,509	0,1695	9,84	0,229
D – EGR, %	3	1,046	0,3486	20,22	0,162
E – Devir, d/d	1	23,543	23,543	1365,74*	0,017
F – Aşırı Doldurma, bar	1	1,826	1,826	105,92	0,062
Hata	1	0,017	0,0172		
Toplam	15	176,18			

\*%95 güven aralığı, \*\*%99 güven aralığı, \*\*\*%99,99 güven aralığı.

### 6.1.2. Efektif verim

Şekil 6.3'te motor efektif verimine etki eden faktör ve seviyelerinin değişimleri görülmektedir. Efektif verimin optimum değeri %80 yükte, B10 biyodizel karışımında, E20 etanol oranında, EGR uygulanmadığında (EGR0), 1600 d/d'da, ve 1,1 bar aşırı

doldurma basıncında (AD 1,1 bar) elde edilmiştir. En iyi kombinasyon A3-B2-C4-D1-E1-F2'dir.



Şekil 6.3. Efektif verim için faktör seviyeleri S/N değerleri.

Efektif verimin yük ile değişimi için Şekil 6.3 incelendiğinde %40 yük koşulundan %80 yük koşuluna kadar verimin arttığı söylenebilir. En yüksek efektif verim %80 yük değerinde elde edilmiştir. Tam yük koşulunda efektif verim %80 yük değerine göre bir miktar azalmıştır. Bu azalmanın sebebi motor tam yük koşullarında çalıştığında daha yüksek sürtünme kayıpları meydana gelmektedir. Dolayısıyla tam yük koşullarına gelindiğinde motor veriminde %80 yük koşuluna göre azalma kaydedilmektedir.

Şekil 6.3'te biyodizel kullanımı ile efektif verimin değişimi görülmektedir. Dizel yakıtı göre B10 yakıtında verimin bir miktar iyileştiği, bundan sonra yakıt içindeki biyodizel oranı arttıkça verimin dizel yakıtı göre kötüleştiği görülmektedir. Dolayısıyla B10 biyodizel karışım yakıtında optimum verim elde edilmiştir. Biyodizelin bünyesinde yaklaşık %11 oranında oksijen bulunması yanmayı iyileştirici bir etki yapmaktadır. Ancak biyodizelin dizel yakıtı göre daha düşük alt ısıl değere sahip olması, yakıt içerisindeki biyodizel oranı arttıkça karışım yakıtının da alt ısıl değerinin düşmesine

sebeptir. Karışımın alt ısı değeri düştükçe enerji girişi az olmakta, dolayısıyla verim düşmektedir.

Etanol fumigasyonunun efektif verime etkisi Şekil 6.3'te verilmiştir. Motora etanol püskürtüldüğünde ve püskürtülen etanol oranı arttıkça verim iyileşmektedir. Optimum efektif verim E20 etanol oranında elde edilmiştir. Etanol oranının artmasıyla efektif verimin artmasının, etanolün volümetrik verimi iyileştirmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Volümetrik verim arttıkça yanma verimi artar.

EGR'nin devreye girmesiyle efektif verimin kötüleştiği Şekil 6.3'te görülmektedir. EGR ile silindire tekrar alınan egzoz gazları ortamın oksijen konsantrasyonunu düşürdüğünden yanma kalitesi azalmaktadır. Bu durumda elde edilen verim de düşmektedir. Dolayısıyla en iyi efektif verim motora EGR uygulanmadığında elde edilmiştir.

Efektif verimin devir ile değişimi Şekil 6.3'te verilmiştir. Motor yüksek devirlerde çalıştığında motordan alınan efektif verimin azaldığı ifade edilebilir. Dolayısıyla 1600 d/d'da daha yüksek bir verim elde edilmiştir.

Aşırı doldurma motor performansını artıran bir uygulamadır. Aşırı doldurma ile silindire daha fazla hava alınmakta, dolayısıyla sıkıştırılan havanın basıncı artmaktadır. Bu durumda aynı hacimden daha fazla performans elde edilir. Buna istinaden efektif verimin optimum değeri 1,1 bar aşırı doldurma basıncında elde edilmiştir.

Tablo 6.3 incelendiğinde varyans analizi sonuçlarına göre faktörlerin efektif verim üzerindeki etkileri görülmektedir. Motor devri efektif verim üzerinde %95 güven aralığında etkili iken; yük, biyodizel, etanol, EGR ve aşırı doldurma efektif verim üzerinde daha az etkilidir.

Tablo 6.3. Efektif verim için varyans analizi.

Faktörler	Serbestlik Derecesi, DF	Kareler Toplamı, SS	Kareler Ortalaması, MS	F- Value	P- Value
A – Yük, %	3	29,6353	9,8784	139,25	0,062
B – Biyodizel, %	3	0,5670	0,1890	2,66	0,417
C – Etanol, %	3	2,4072	0,8024	11,31	0,214
D – EGR, %	3	6,8259	2,2753	32,07	0,129
E – Devir, d/d	1	20,4059	20,4059	287,64*	0,037
F – Aşırı Doldurma, bar	1	2,4479	2,4479	34,51	0,107
Hata	1	0,0709	0,0709		
Toplam	15	62,3602			

\*%95 güven aralığı, \*\*%99 güven aralığı, \*\*\*%99,99 güven aralığı.

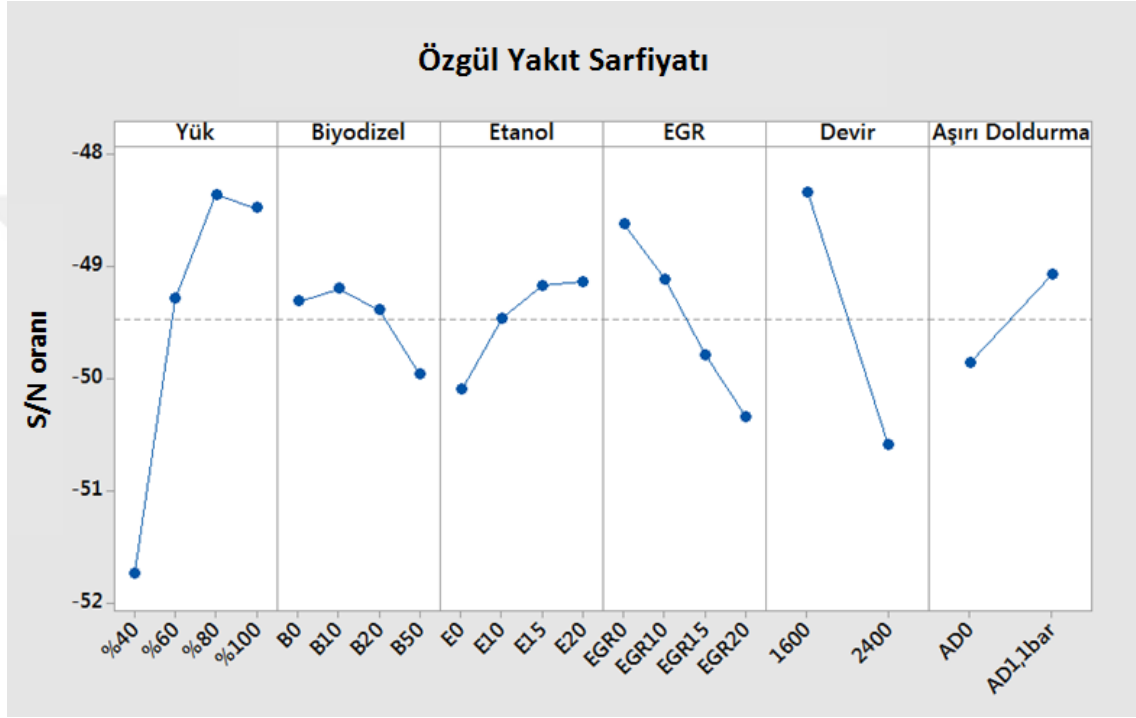
### 6.1.3. Özgül yakıt sarfiyatı (ÖYS)

Şekil 6.4'te motor özgül yakıt sarfiyatına etki eden faktör ve seviyelerinin değişimleri görülmektedir. Özgül yakıt sarfiyatının optimum değeri %80 yükte, B10 biyodizel karışımında, E20 etanol oranında, EGR uygulanmadığında (EGR0), 1600 d/d'da, ve 1,1 bar aşırı doldurma basıncında (AD 1,1 bar) elde edilmiştir. En iyi kombinasyon A3-B2-C4-D1-E1-F2'dir.

Şekil 6.4'te özgül yakıt sarfiyatının yük ile değişimi incelendiğinde en düşük yakıt tüketimi %80 yük değerinde elde edilmiştir. Tam yük koşullarında motorun sürtünme kayıpları artacağından daha fazla yakıt harcanmaktadır.

Biyodizel kullanımıyla özgül yakıt sarfiyatında meydana gelen değişim Şekil 6.4'te görülmektedir. En düşük özgül yakıt sarfiyatı B10 yakıtında elde edilmiştir. %10 biyodizel içeren yakıtta özgül yakıt sarfiyatının bir miktar düşmesi, biyodizelin oksijen içeriğinden dolayı yanma kalitesinin artması ile açıklanabilir. %10 biyodizel oranından sonra, biyodizelin karışım içerisindeki yüzdesi ile orantılı olarak özgül yakıt sarfiyatı dizel yakıtına göre artmaktadır. B20 ve B50 yakıtlarındaki bu artış, biyodizelin enerji içeriğinin dizel yakıtına oranla düşük olmasından ileri geldiği düşünülmektedir. Biyodizelin oksijen içeriği fazla olsa da alt ısı değerinin düşük olması, özellikle

biyodizelin yüksek oranlarında yanma verimini artırmada yeterli olmadığı tahmin edilmektedir. Ayrıca Özsezen ve Çanakçı (2009) dizele göre biyodizel yoğunluğunun fazla olmasının, püskürtülen yakıt miktarının fazla çıkmasına neden olduğunu ifade etmektedirler. Bunun sebebinin hacimsel olarak aynı miktarda yakıt püskürtülmesine rağmen kütleli olarak ele alındığında daha fazla yakıt verildiği ile ilgili olduğu belirtilmektedirler.



Şekil 6.4. Özgül yakıt sarfıyatı için faktör seviyeleri S/N değerleri.

Şekil 6.4'te özgül yakıt sarfıyatının etanol fumigasyonu ile değişimi görülmektedir. Etanol ile özgül yakıt sarfıyatının değişimi incelendiğinde püskürtülen etanol oranı arttıkça özgül yakıt sarfıyatının azaldığı anlaşılmaktadır. Dolayısıyla en düşük özgül yakıt sarfıyatı E20 etanol oranında elde edilmiştir.

Motora EGR uygulandığında ve EGR oranı arttıkça özgül yakıt sarfıyatının kötüleştiği görülmektedir. Artan EGR oranı karışımın fakirleşmesine ve yanmanın kötüleşmesine yol açmaktadır. Ayrıca EGR uygulaması ile yanma sonu oluşan ısının bir bölümü egzoz gazları tarafından soğurulduğundan açığa çıkan maksimum ısı miktarı azalmakta, ve bu durumda özgül yakıt sarfıyatı artmaktadır.



Şekil 6.4'te görüldüğü gibi 1600 d/d'da 2400 d/d'ya göre özgül yakıt sarfiyatı daha azdır. Devir arttıkça aynı hacimdeki yakıtın tüketim süresinin azalmasına ve dolayısıyla daha fazla yakıtın tüketilmesine bağlı olarak özgül yakıt sarfiyatı artmaktadır.

Özgül yakıt sarfiyatının optimum değeri aşırı doldurma uygulaması ile elde edilmiştir. Aşırı doldurma sistemi ile silindire atmosferik basıncın üzerinde hava verildiğinden daha küçük hacimli motordan daha fazla güç elde edilir. Bu durum özgül yakıt sarfiyatını iyi yönde etkilemektedir. Dolayısıyla özgül yakıt sarfiyatı 1,1 bar aşırı doldurma basıncında daha az olmaktadır.

Tablo 6.4 incelendiğinde varyans analizi sonuçlarına göre faktörlerin özgül yakıt sarfiyatı üzerindeki etkileri görülmektedir. Motor devri özgül yakıt sarfiyatı üzerinde %95 güven aralığında etkili iken; yük, biyodizel, etanol, EGR ve aşırı doldurma özgül yakıt sarfiyatı üzerinde daha az etkilidir.

Tablo 6.4. Özgül yakıt sarfiyatı için varyans analizi.

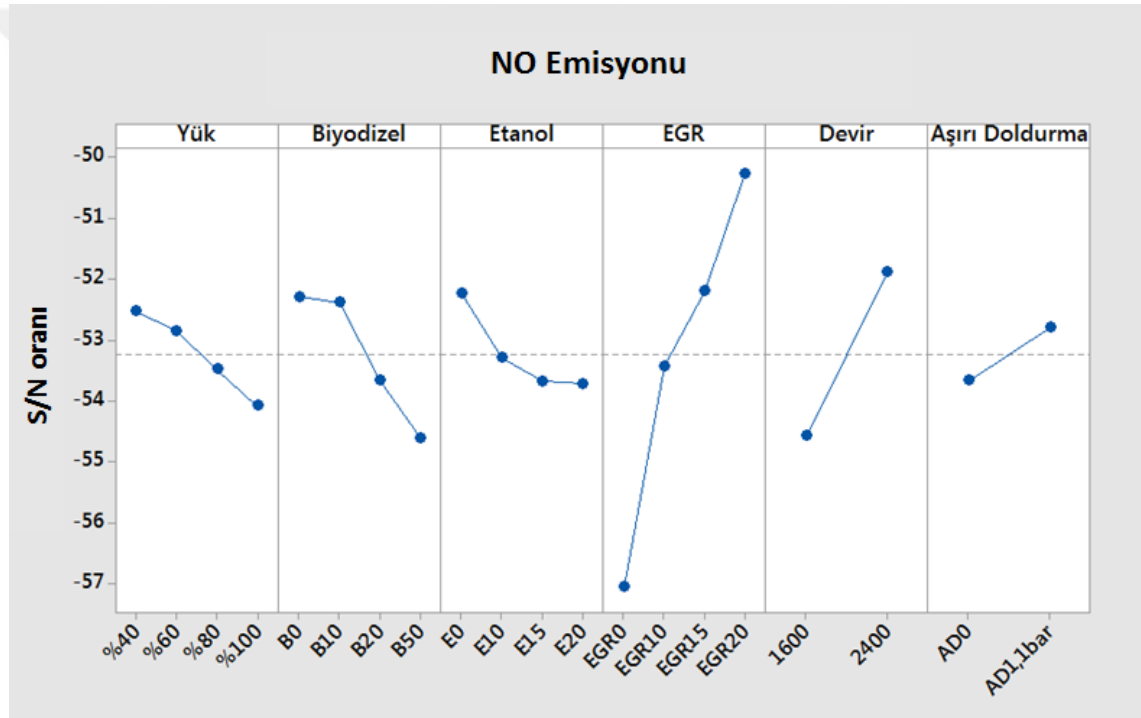
Faktörler	Serbestlik Derecesi, DF	Kareler Toplamı, SS	Kareler Ortalaması, MS	F-Value	P-Value
A – Yük, %	3	29,6308	9,8769	139,35	0,062
B – Biyodizel, %	3	1,3932	0,4644	6,55	0,278
C – Etanol, %	3	2,3887	0,7962	11,23	0,215
D – EGR, %	3	6,8271	2,2757	32,11	0,129
E – Devir, d/d	1	20,3882	20,3882	287,65*	0,037
F – Aşırı Doldurma, bar	1	2,4474	2,4474	34,53	0,107
Hata	1	0,0709	0,0709		
Toplam	15	63,1461			

\*%95 güven aralığı, \*\*%99 güven aralığı, \*\*\*%99,99 güven aralığı.

## 6.2. Motor Emisyon Karakteristikleri İçin Optimum Deney Kombinasyonlarının Belirlenmesi

### 6.2.1. NO emisyonları

Şekil 6.5'te NO emisyonlarına etki eden faktör ve seviyelerinin değişimleri görülmektedir. NO emisyonunun optimum değeri %40 yükte, dizel yakıtında (B0), etanol uygulanmadığında (E0), %20 EGR oranında (EGR20), 2400 d/d'da, ve 1,1 bar aşırı doldurma basıncında (AD 1,1 bar) elde edilmiştir. En iyi kombinasyon A1-B1-C1-D4-E2-F2'dir.



Şekil 6.5. NO emisyonu için faktör seviyeleri S/N değerleri.

Standart dizel motorunda motor yüklendikçe yanma sonu sıcaklıkları artacağı için NO oluşumu hızlanmaktadır. Motorda karışım yakıtları kullanıldığında da durum benzer şekilde seyretmektedir. Şekil 6.5'te görüldüğü gibi yük arttıkça NO oluşumu artmaktadır. Dolayısıyla en düşük NO emisyonu %40 yük değerinde elde edilmiştir.

NO emisyonları, yüksek sıcaklıklarda oksijen ile azotun reaksiyona girmesi sonucu oluşmaktadır. Şekil 6.5'te görüldüğü gibi en düşük NO emisyonu dizel yakıt kullanımında tespit edilmiştir. NO emisyonu karışımdaki biyodizel yüzdesinin

artmasıyla artış göstermiştir. Bu durumun, biyodizelin bünyesindeki oksijenin, yakıt demetinin çevresindeki bölgesel oksijen yoğunluğunu artırması sonucu yanma odasındaki bölgesel ısı çıkış hızı ve sıcaklığının artmasıyla ilgili olduğu düşünülmektedir.

Azot oksitler, yüksek sıcaklıkta ve önemli miktardaki hava ile yanma değişim alanlarında üretilir. Bu alanlardaki azot oksit oluşumu, yanma işleminin ilk aşamasındaki serbest oksijene ve maksimum sıcaklığa bağlıdır. En fazla NO emisyonu miktarı, yanma veriminin en yüksek olduğu yüksek hava fazlalık katsayısına sahip egzoz gazında görülür. Dizel motorları yüksek hava fazlalık katsayısı ile çalıştıkları için NO emisyonları bu motorlarda daha fazla görülür (Jamrozik, 2017).

Şekil 6.5'te görüldüğü gibi en düşük NO miktarı etanol olmadığında elde edilmiştir. Yakıt içerisindeki alkol oranına bağlı olarak NO emisyonları artmaktadır. Dizel-etanol yakıtının yüksek yanma hızından dolayı karışımın yanması için daha fazla havaya ihtiyaç duyulur. Dolayısıyla egzozda daha fazla NO emisyonu gözlenir.

Şekil 6.5'te görüldüğü gibi NO emisyonları verilen EGR oranının artmasıyla düşüş göstermektedir. Egzoz gazları geri dönüştürüldüğünde yanma sonucu açığa çıkan ısının bir kısmını soğurdukları için yanma odasındaki maksimum sıcaklık düşmekte ve bu durum azot oksit oluşumunu azaltmaktadır. Ayrıca yanma hızının yavaşlaması maksimum ısının oluştuğu noktanın gecikmesine sebep olurken maksimum silindir sıcaklığının azalmasına yol açmaktadır. Bu durum NO emisyonlarının daha da düşmesine neden olmaktadır.

Egzoz gazları silindir içine geri verildiğinde yanma odasındaki asal gaz yoğunluğu büyük oranda artmaktadır ve buna bağlı olarak alev sıcaklığında azalma meydana gelir. Ayrıca taze dolgudaki oksijen yoğunluğu azalır ve azot oksidin oksijen ile reaksiyona girebilmesi için ortamda yeterli oksijen bulunmadığından NO oluşumu azalır (Tok, 2010).

Yüksek devirlerde yanmanın kötüleşmesi ve avansın yeterli gelmemesi sonucu NO emisyonlarının oluşumunun azaldığı bilinmektedir. Bu çalışmada, motor deneyleri iki farklı devir hızında gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla 1600 d/d ve 2400 d/d ile yapılan

deney sonuçları karşılaştırılacak olursa Şekil 6.5'te belirtildiği gibi yüksek devirde (2400 d/d) daha düşük NO emisyonu tespit edilmiştir.

Aşırı doldurma sonucu NO emisyonlarının azaldığı Şekil 6.5'te görülmektedir. NO emisyonlarındaki bu azalış, silindire daha fazla hava gönderilmesiyle motordan daha fazla güç elde edileceği için, birim güç başına NO emisyon oluşumunun azalmasıyla açıklanabilmektedir.

Tablo 6.5 incelendiğinde varyans analizi sonuçlarına göre faktörlerin NO emisyonu üzerindeki etkileri görülmektedir. EGR ve motor devrinin NO emisyonu üzerinde diğer faktörlere göre daha etkili oldukları ifade edilebilir. Diğer faktörler de az miktarda da olsa NO emisyonu üzerinde etkilidir.

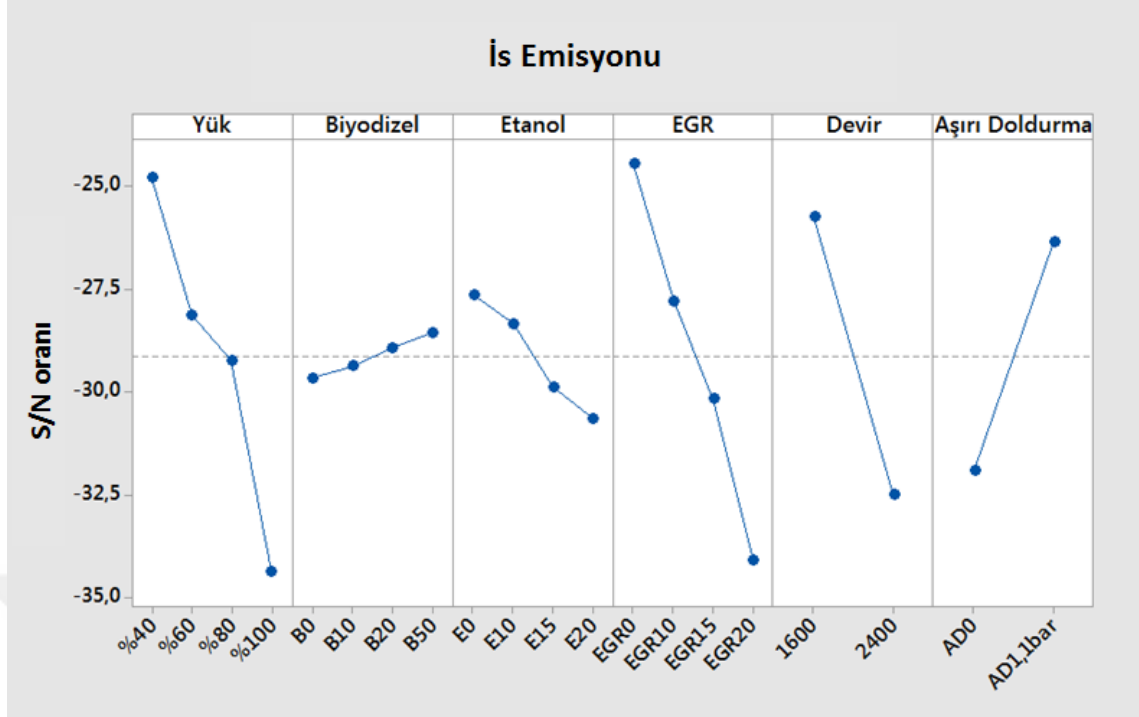
Tablo 6.5. NO emisyonu için varyans analizi.

Faktörler	Serbestlik Derecesi, DF	Kareler Toplamı, SS	Kareler Ortalaması, MS	F- Value	P- Value
A – Yük, %	3	5,673	1,891	0,18	0,901
B – Biyodizel, %	3	14,704	4,901	0,46	0,762
C – Etanol, %	3	5,671	1,89	0,18	0,901
D – EGR, %	3	97,971	32,657	3,08	0,391
E – Devir, d/d	1	28,806	28,806	2,72	0,347
F – Aşırı Doldurma, bar	1	3,001	3,001	0,28	0,689
Hata	1	10,589	10,589		
Toplam	15	166,415			

\*%95 güven aralığı, \*\*%99 güven aralığı, \*\*\*%99,99 güven aralığı.

### 6.2.2. İş emisyonları

Şekil 6.6'da iş emisyonlarına etki eden faktör ve seviyelerinin değişimleri görülmektedir. İş emisyonunun optimum değeri %40 yükte, B50 biyodizel karışımında, etanol uygulanmadığında (E0), EGR uygulanmadığında (EGR0), 1600 d/d'da, ve 1,1 bar aşırı doldurma basıncında (AD 1,1 bar) elde edilmiştir. En iyi kombinasyon A1-B4-C1-D1-E1-F2'dir.



Şekil 6.6. İş emisyonu için faktör seviyeleri S/N değerleri.

Şekil 6.6 incelendiğinde iş emisyonlarının yük ile değişimi görülmektedir. Yükün artmasıyla iş emisyonları artış göstermiştir. Dizel motorlarında motorun yük durumuna göre değişen hava fazlalık katsayısına (HFK) bağlı olarak iş emisyonu miktarı da değişmektedir. Motor yüklendikçe yanma odasına daha fazla yakıt gönderildiğinden, yanma odasında bulunan iş partikülleri yeterli sıcaklık, oksijen ve zaman bulamadıklarında yanmadan egzozdan dışarı atılırlar.

Dizel motorları benzin motorlarına göre daha yüksek hava fazlalık katsayısı ile çalışmaktadır. Buna rağmen dizel motorlarında motorun çalışma koşullarına bağlı olarak iş emisyonları oluşmaktadır. Bu duruma yakıt/hava karışımının silindir içerisinde iyi bir şekilde karışmaması ve bazı bölgelerde zengin karışımın oluşmasının neden olduğu bilinmektedir (Ayhan vd., 2019). Şekil 6.6 incelendiğinde biyodizel karışım yakıtının kullanılması ile standart duruma göre iş emisyonlarında bir miktar azalma tespit edilmiştir. Bu azalmalar, yakıt içerisindeki biyodizel oranının artmasına paralel olarak devam etmiştir. Biyodizel içeriğindeki oksijen oranı karışımın fakirleşmesine neden olacağından iş emisyonlarında bu şekilde bir değişim gözlemlendiği düşünülmektedir.

Şekil 6.6'ya bakıldığında yakıtta etanol katkısının is emisyonlarını artırdığı ifade edilebilir. Artan etanol oranıyla beraber is emisyonlarının artışı paralellik göstermektedir. Is emisyonlarının oluşmasında önemli olan etkenlerden biri karbon ve hidrojen atomlarının oksitlenmesi için yeterli oksijen miktarı ile birlikte gerekli sıcaklık şartının sağlanamamasıdır. Etanolün alt ısıl değerinin dizel ve biyodizel karışım yakıtına göre az olması silindir sıcaklığını düşüreceğinden, bu durumun is oluşum mekanizmasını hızlandırdığı düşünülmektedir.

NO emisyonlarının azaltılmasında etkili olan EGR uygulaması is emisyonları için aynı etkiyi yapmaz. Şekil 6.6'da belirtildiği gibi is emisyonları motora EGR verilmesiyle ve EGR oranının artmasıyla beraber artış göstermiştir. Optimum is emisyonu EGR'nin verilmediği koşulda elde edilmiştir. EGR'nin silindir içerisindeki oksijen konsantrasyonunu azaltması ve alev sıcaklığını düşürmesi sonucu is emisyonları artmaktadır.

Şekil 6.6'da is emisyonunun 1600 d/d'da daha az olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin yüksek devirlere çıkıldıkça, yakıtın silindir içinde hava ile zamanında karışamaması ve buharlaşmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Dolayısıyla is emisyonları yüksek devirde daha fazla oluşmuştur.

Aşırı doldurma ile is emisyonlarındaki değişim Şekil 6.6'da görülmektedir. Is emisyonları aşırı doldurma uygulaması ile azalmıştır. Dizel motorlarında aşırı doldurma ile silindire fazla hava verilmesiyle hava fazlalık katsayısındaki değişimin, is emisyonlarının değişmesindeki en önemli etken olduğu düşünülmektedir. Motorun bütün çalışma koşullarında (farklı yük ve farklı devirlerde) aşırı doldurma ile silindirlere daha fazla hava verildiğinden ve buna paralel olarak silindirlere daha fazla yakıt gönderildiğinden yanma iyileşmekte ve dolayısıyla is emisyonları azalmaktadır.

Tablo 6.6 incelendiğinde varyans analizi sonuçlarına göre faktörlerin is emisyonu üzerindeki etkileri görülmektedir. Motor devri ve aşırı doldurmanın is emisyonu üzerinde diğer faktörlere göre daha etkili oldukları görülmektedir. Yük ve EGR, biyodizel ve etanole göre is emisyonu üzerinde daha etkilidir, ancak biyodizel ve etanol de is emisyonu üzerinde az miktarda etkilidir.

Tablo 6.6. İS emisyonu için varyans analizi.

Faktörler	Serbestlik Derecesi, DF	Kareler Toplamı, SS	Kareler Ortalaması, MS	F- Value	P- Value
A – Yük, %	3	189,31	63,103	1,85	0,485
B – Biyodizel, %	3	2,825	0,942	0,03	0,991
C – Etanol, %	3	22,783	7,594	0,22	0,876
D – EGR, %	3	197,225	65,742	1,92	0,477
E – Devir, d/d	1	181,836	181,836	5,32	0,26
F – Aşırı Doldurma, bar	1	123,691	123,691	3,62	0,308
Hata	1	34,196	34,196		
Toplam	15	751,867			

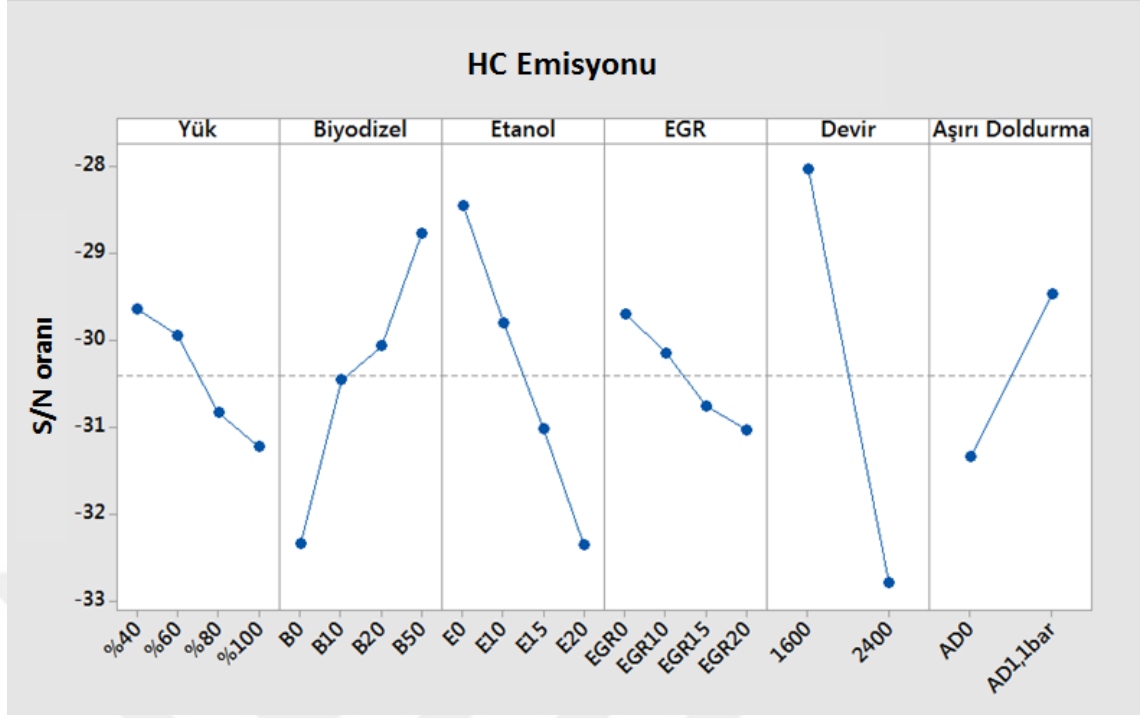
\*%95 güven aralığı, \*\*%99 güven aralığı, \*\*\*%99,99 güven aralığı.

### 6.2.3. HC emisyonları

Şekil 6.7’de HC emisyonlarına etki eden faktör ve seviyelerinin değişimleri görülmektedir. HC emisyonunun optimum değeri %40 yükte, B50 biyodizel karışımında, etanol uygulanmadığında (E0), EGR uygulanmadığında (EGR0), 1600 d/d’da, ve 1,1 bar aşırı doldurma basıncında (AD 1,1 bar) elde edilmiştir. En iyi kombinasyon A1-B4-C1-D1-E1-F2’dir.

Motor yükündeki değişime bağlı olarak Şekil 6.7’de HC emisyonlarının değişimi görülmektedir. Buna göre en düşük HC emisyon miktarı %40 yük şartlarında elde edilmiştir. Yükün artmasıyla beraber HC emisyonları da artmaktadır.

HC emisyon değerlerinin dizel, B10, B20 ve B50 yakıtlarındaki değişimi Şekil 6.7’de görülmektedir. Biyodizel karışımları kullanıldığında standart duruma göre HC emisyon değerlerinde düşüş gözlemlenmektedir. HC emisyonunun oluşma nedenlerinden biri yetersiz oksijen miktarı olduğundan, biyodizel karışımlarının kullanılmasıyla oksijen konsantrasyonunun yükselmesi ve yanma veriminin artması ile HC emisyonları azalmaktadır. Ayrıca biyodizelin setan sayısının dizel yakıtı göre yüksek olması, standart duruma göre ve karışımdaki biyodizel oranının artmasıyla HC emisyonlarının azalmasını sağlayacağı düşünülmektedir.



Şekil 6.7. HC emisyonu için faktör seviyeleri S/N değerleri.

Şekil 6.7’de görüldüğü gibi yakıtta etanol ilave edildiğinde HC emisyonları artış göstermektedir. Tutak ve diğerleri (2017) alkolle karıştırılmış yakıtların bazı durumlarda biraz daha yüksek HC emisyonları gösterdiğini ifade etmektedir. Bunun nedeni alkollerin daha uzun ateşleme gecikmesine ve karışım yakıtlarının ayrışmasına yol açan düşük setan sayılarına sahip olmasıdır. Ayrıca, HC emisyonlarının temel olarak silindir çeperi gibi düşük sıcaklık bölgelerinde oluştuğunu belirtmektedir. Bu doğrultuda HC emisyonlarının etanol yüzdesine paralel olarak artması, etanolün alt ısı değerin az olmasından kaynaklı silindir içindeki sıcaklığın lokal olarak düşmesiyle açıklanabilmektedir.

EGR uygulamasının HC emisyonlarında meydana getirdiği değişim Şekil 6.7’de görülmektedir. EGR verilmesiyle ve EGR oranı arttıkça HC emisyonları artmaktadır. Bu duruma, motora EGR verildiğinde yanmanın kötüleşmesi sebep olmaktadır. Yanma kötüleştiğinde yanmamış hidrokarbonlar birikmektedir.

Şekil 6.7’ye bakıldığında HC emisyonlarının optimum değeri 1600 d/d’da elde edilmiştir. 2400 d/d’da daha yüksek HC emisyonu tespit edilmiştir.



HC emisyonlarının aşırı doldurma ile değişimi Şekil 6.7’de görülmektedir. Aşırı doldurma durumunda standart duruma göre HC emisyonu daha düşük ölçülmüştür. HC emisyonunun optimum değeri 1,1 bar aşırı doldurma basıncında elde edilmiştir. Dizel motorlarında HC emisyonlarının, yakıtın buharlaşması sonucu ve yakıt demeti içinde bölgesel olarak fakir karışımların olduğu yerlerde meydana geldiği bilinmektedir. Motora aşırı doldurma uygulandığında yanmanın başlangıç sıcaklığının yükselmesi ve normal emişli dizel motora göre yakıt/hava oranının azalması ile oksidasyon reaksiyonları hızlanır. Bu da iyi bir yanma sağlayarak HC emisyonlarının azalmasına sebep olmaktadır.

Tablo 6.7 incelendiğinde varyans analizi sonuçlarına göre faktörlerin HC emisyonu üzerindeki etkileri görülmektedir. Motor devrinin HC emisyonu üzerindeki etkisi diğer faktörlere göre fazladır. Biyodizel, etanol ve aşırı doldurma da yük ve EGR’ye göre HC emisyonuna daha fazla etki etmektedir; ancak yük ve EGR de az miktarda da olsa HC emisyonları üzerinde etkilidir.

Tablo 6.7. HC emisyonu için varyans analizi.

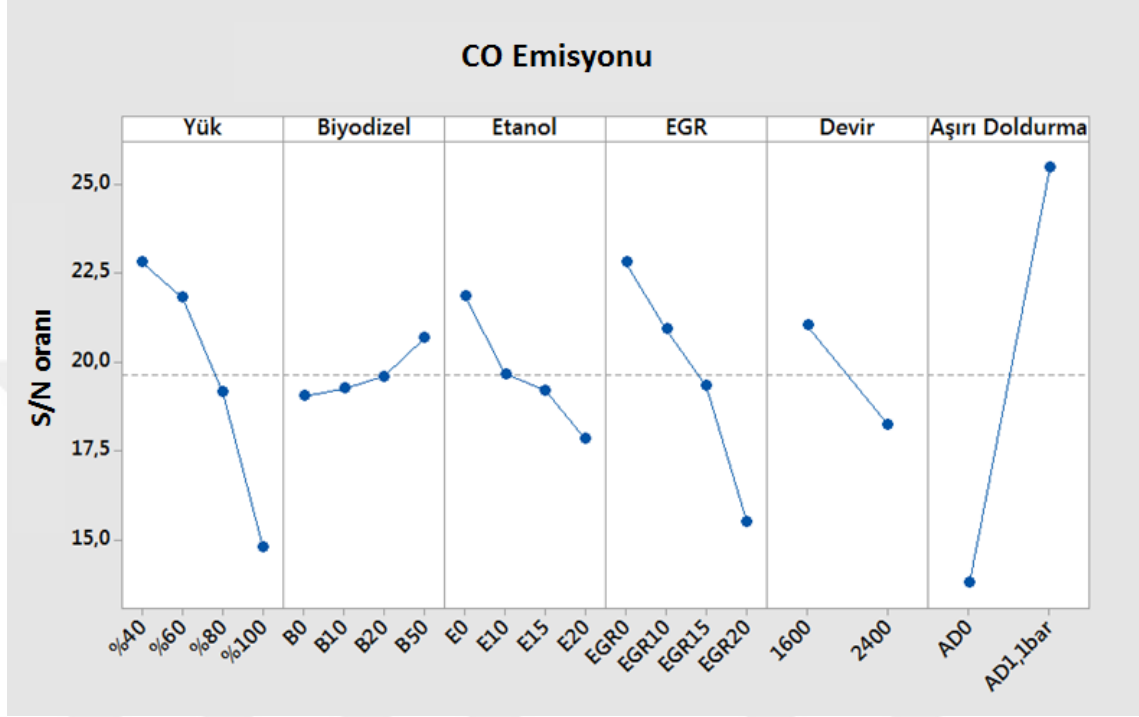
Faktörler	Serbestlik Derecesi, DF	Kareler Toplamı, SS	Kareler Ortalaması, MS	F-Value	P-Value
A – Yük, %	3	6,552	2,184	0,92	0,627
B – Biyodizel, %	3	26,131	8,71	3,65	0,363
C – Etanol, %	3	33,531	11,177	4,69	0,324
D – EGR, %	3	4,319	1,44	0,6	0,712
E – Devir, d/d	1	90,696	90,696	38,04	0,102
F – Aşırı Doldurma, bar	1	14,06	14,06	5,9	0,249
Hata	1	2,384	2,384		
Toplam	15	177,673			

\*%95 güven aralığı, \*\*%99 güven aralığı, \*\*\*%99,99 güven aralığı.

#### 6.2.4. CO emisyonları

Şekil 6.8’de CO emisyonlarına etki eden faktör ve seviyelerinin değişimleri görülmektedir. CO emisyonunun optimum değeri %40 yükte, B50 biyodizel

karışımında, etanol uygulanmadığında (E0), EGR uygulanmadığında (EGR0), 1600 d/d'da, ve 1,1 bar aşırı doldurma basıncında (AD 1,1 bar) elde edilmiştir. En iyi kombinasyon A1-B4-C1-D1-E1-F2'dir.



Şekil 6.8. CO emisyonu için faktör seviyeleri S/N değerleri.

Motor yükündeki değişim ile CO emisyonlarının değişimi Şekil 6.8'de verilmiştir. En düşük CO emisyonu miktarı %40 motor yükünde elde edilmiştir. Motor yükü arttıkça CO emisyon değerleri yükselmiştir.

CO emisyonunun oluşmasındaki en önemli etken yanma odasındaki oksijen yetersizliğidir. Oksijen miktarı, yanma odasının genelinde yetersiz olabileceği gibi, yanma odasının sadece belirli bölgelerinde de yetersiz olabilir. Böyle durumlarda CO emisyonlarında artış görülmektedir (Özülkü, 2002). Şekil 6.8'de görüldüğü gibi CO emisyonları biyodizel karışımları kullanıldığında standart duruma göre azalma göstermektedir. Maksimum azalma B50 yakıtında tespit edilmiştir. CO emisyonları kısmi eksik yanma ürünü olduklarından, bu emisyonların biyodizel kullanımında azalmasının nedeni yakıtın oksijen miktarının artması ile motorun daha fakir karışımlarda çalışması olduğu tahmin edilmektedir.

Şekil 6.8’de yakıtta etanol eklendiğinde CO emisyonlarında meydana gelen değişim görülmektedir. Etanol oranı arttıkça CO emisyonları da artmaktadır. CO emisyonları düşük silindir içi sıcaklıklarında ve oksijenin az olduğu durumlarda elde edilir. Yakıttaki oksijen konsantrasyonunun artmasıyla CO oluşumunun azaldığı bilinmektedir. Etanolün verilmesiyle oksijenin artması ve dolayısıyla egzoz gazındaki CO miktarının azalması beklenmektedir. Fakat CO emisyonu etanol ilavesiyle artmıştır. Bu duruma etanolün alt ısıl değerinin dizel yakıtta ve biyodizel karışım yakıtlarına göre düşük olmasının sebep olduğu düşünülmektedir.

Şekil 6.8’e bakıldığında CO emisyonunun EGR oranları ile değişimi görülmektedir. EGR uygulanmadığı durumlarda en az CO emisyonu elde edilmiş, EGR oranı arttıkça CO emisyonları da artmıştır. EGR ile silindirlere geri gönderilen egzoz gazları dolgu içerisindeki oksijen miktarını düşürdüğünden yanma kötüleşmekte ve buna bağlı olarak CO emisyonları artış göstermektedir.

CO emisyonu miktarının 2400 d/d’ya göre 1600 d/d’da daha az olduğu Şekil 6.8’de görülmektedir. Devir artışına bağlı olarak CO emisyonları artış göstermiştir.

Dizel motorlarında aşırı doldurma sistemlerinin uygulanması ile silindire daha fazla hava gönderildiğinden standart motora göre hava fazlalık katsayısı artmaktadır. Dolayısıyla Şekil 6.8’de görüldüğü gibi aşırı doldurma uygulandığında CO emisyonu değerlerinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

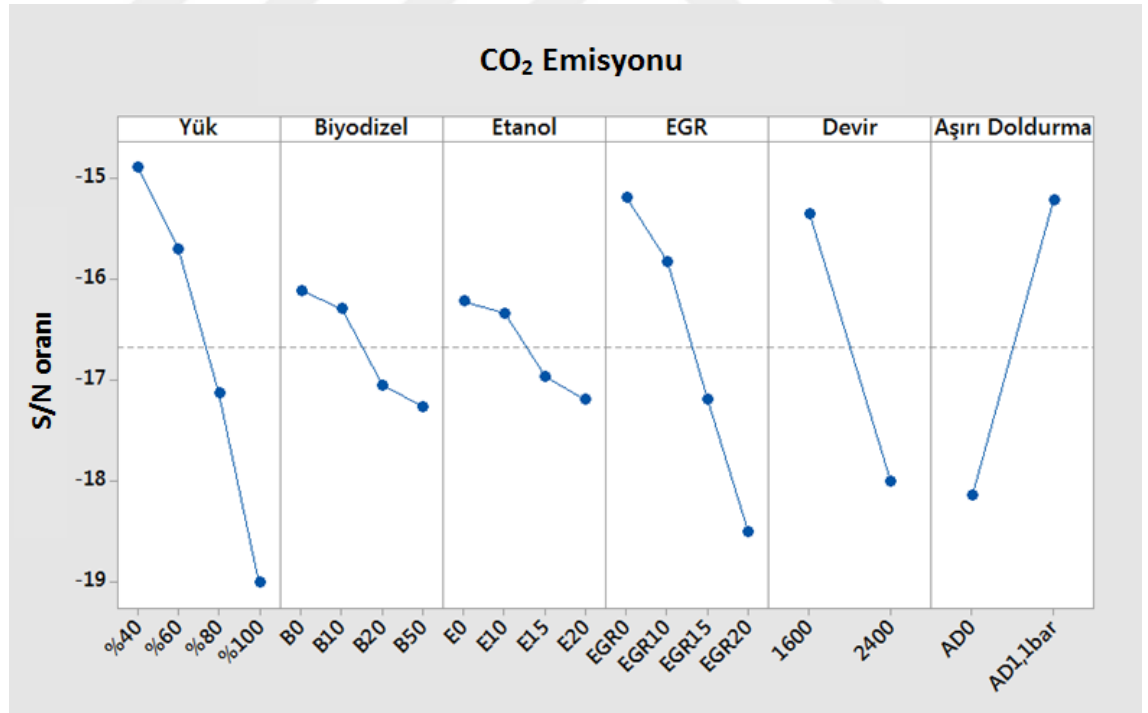
Tablo 6.8 incelendiğinde varyans analizi sonuçlarına göre faktörlerin CO emisyonu üzerindeki etkileri görülmektedir. Aşırı doldurmanın CO emisyonu üzerindeki etkisi diğer faktörlere göre fazladır. Yük, devir ve EGR de biyodizel ve etanole göre CO emisyonuna daha fazla etki etmektedir, ancak biyodizel ve etanol de CO emisyonu üzerinde etkilidir.

Tablo 6.8. CO emisyonu için varyans analizi.

Faktörler	Serbestlik Derecesi, DF	Kareler Toplamı, SS	Kareler Ortalaması, MS	F-Value	P-Value
A – Yük, %	3	154,508	51,503	12,73	0,202
B – Biyodizel, %	3	6,334	2,111	0,52	0,74
C – Etanol, %	3	33,671	11,224	2,78	0,409
D – EGR, %	3	114,619	38,206	9,45	0,234
E – Devir, d/d	1	31,017	31,017	7,67	0,221
F – Aşırı Doldurma, bar	1	547,153	547,153	135,28	0,055
Hata	1	4,044	4,044		
Toplam	15	891,346			

\*%95 güven aralığı, \*\*%99 güven aralığı, \*\*\*%99,99 güven aralığı.

### 6.2.5. CO<sub>2</sub> emisyonları



Şekil 6.9. CO<sub>2</sub> emisyonu için faktör seviyeleri S/N değerleri.

Şekil 6.9'da CO<sub>2</sub> emisyonlarına etki eden faktör ve seviyelerinin değişimleri görülmektedir. CO<sub>2</sub> emisyonunun optimum değeri %40 yükte, dizel yakıtında (B0),

etanol uygulanmadığında (E0), EGR uygulanmadığında (EGR0), 1600 d/d'da, ve 1,1 bar aşırı doldurma basıncında (AD 1,1 bar) elde edilmiştir. En iyi kombinasyon A1-B1-C1-D1-E1-F2'dir.

Şekil 6.9 incelendiğinde CO<sub>2</sub> emisyonlarının yük, biyodizel, etanol, EGR, devir ve aşırı doldurma ile değişimi görülmektedir. Yük arttıkça egzoz gazında ölçülen CO<sub>2</sub> miktarı artmaktadır. Biyodizel, etanol ve EGR oranlarının artmasıyla yine benzer şekilde CO<sub>2</sub> emisyonları artış göstermektedir. CO<sub>2</sub> emisyonunun 2400 d/d'da 1600 d/d'ya göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Aşırı doldurma uygulaması ile CO<sub>2</sub> emisyonlarının iyileştiği görülmektedir.

Tablo 6.9 incelendiğinde varyans analizi sonuçlarına göre faktörlerin CO<sub>2</sub> emisyonu üzerindeki etkileri görülmektedir. Devir ve aşırı doldurmanın CO<sub>2</sub> emisyonu üzerindeki etkileri diğer faktörlere göre fazladır. Yük ve EGR de biyodizel ve etanole göre CO<sub>2</sub> emisyonuna daha fazla etki etmektedir; ancak biyodizel ve etanol de CO<sub>2</sub> emisyonu üzerinde etkilidir.

Tablo 6.9. CO<sub>2</sub> emisyonu için varyans analizi.

Faktörler	Serbestlik Derecesi, DF	Kareler Toplamı, SS	Kareler Ortalaması, MS	F-Value	P-Value
A – Yük, %	3	39,301	13,1002	11,22	0,215
B – Biyodizel, %	3	3,813	1,2711	1,09	0,591
C – Etanol, %	3	2,709	0,9029	0,77	0,662
D – EGR, %	3	26,188	8,7292	7,48	0,261
E – Devir, d/d	1	27,974	27,974	23,96	0,128
F – Aşırı Doldurma, bar	1	34,257	34,2573	29,35	0,116
Hata	1	1,167	1,1674		
Toplam	15	135,409			

\*%95 güven aralığı, \*\*%99 güven aralığı, \*\*\*%99,99 güven aralığı.

### **6.3. Doğrulama Deneylerinin Sonuçları**

Doğrulama deneyleri en iyi moment, en iyi güç ve en iyi NO kombinasyonları için yapılmıştır.

#### **En iyi moment:**

En iyi moment, %100-B10-E15-EGR0-1600d/d-AD1,1bar kombinasyonunda elde edilmiştir. Bu kombinasyon ortogonal dizideki deney adımlarında mevcut değildir. Doğrulama deneylerinin yapılmasıyla bu kombinasyon sonucu elde edilen ortalama moment değeri 51,68 Nm'dir. Standart motorda ( %100-B0-E0-EGR0-1600d/d-AD0) elde edilen moment değeri ortalaması 44,16 Nm'dir. Standart motor ile Taguchi optimizasyonu sonucu elde edilen değerler karşılaştırıldığında Taguchi optimizasyonu sonucu %17,02'lik bir iyileşme elde edilmiştir.

#### **En iyi efektif güç:**

En iyi efektif güç, %100-B10-E15-EGR0-2400d/d-AD1,1bar kombinasyonunda elde edilmiştir. Bu kombinasyon ortogonal dizi tablosundaki deney adımlarında mevcuttur. İlk deney sonuçlarına göre bu kombinasyonda elde edilen efektif gücün ortalama değeri 11,07 kW'tır. Aynı kombinasyona ait doğrulama deneyleri sonucu elde edilen ortalama efektif güç değeri 11,12 kW'tır. Standart motorda (%100-B0-E0-EGR0-2400d/d-AD0) elde edilen ortalama efektif güç değeri 10,28 kW'tır. Standart motor ile Taguchi optimizasyonu sonucu elde edilen değerler karşılaştırıldığında Taguchi optimizasyonu sonucu %8,17'lik iyileşme sağlanmıştır.

#### **En iyi NO:**

En iyi NO, %40-B0-E0-EGR20-2400d/d-AD1,1bar kombinasyonunda elde edilmiştir. Bu kombinasyon ortogonal dizideki deney adımlarında mevcut değildir. Doğrulama deneylerinin yapılmasıyla bu kombinasyon sonucu elde edilen ortalama NO değeri 68 ppm'dir. Standart motorda (%40-B0-E0-EGR0-2400d/d-AD0) elde edilen NO değeri ortalaması 413 ppm'dir. Standart motor ile Taguchi optimizasyonu sonucu elde edilen değerler karşılaştırıldığında Taguchi optimizasyonu sonucu %83,53'lük iyileşme sağlanmıştır.

## BÖLÜM 7. GENEL DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, motor performans parametreleri ve emisyon karakteristiklerinin optimizasyonu üzerinde durulmuştur. Bu amaç doğrultusunda, bir dizel motoruna farklı yakıtlar eklenerek ve motora EGR ve aşırı doldurmanın farklı oranları uygulanarak deneysel çalışmalar yapılmış, performans ve emisyonlar açısından en iyi kombinasyonlar Taguchi yöntemi ile tespit edilmiştir. Motor performans parametreleri olarak döndürme momenti, efektif güç, özgül yakıt sarfıyatı ve efektif verimin; emisyon karakteristikleri olarak ise NO, HC, CO, CO<sub>2</sub> ve is emisyonlarının optimizasyonları yapılmıştır. Kontrol edilebilen faktörler olarak yük, devir, biyodizel, etanol, EGR ve aşırı doldurmanın seçildiği çalışmada faktörlerin performans karakteristikleri üzerindeki etkilerini tespit etmek için varyans analizi yapılmıştır.

Döndürme momentinin maksimum değeri tam yükte, B10 yakıtında, E15 etanol oranında, EGR uygulanmadığında, 1600 d/d'da ve 1,1 bar aşırı doldurma basıncında elde edilmiştir. Efektif gücün optimum değeri ise tam yükte, B10 yakıtında, E15 etanol oranında, EGR uygulanmadığında, 2400 d/d'da ve 1,1 bar aşırı doldurma basıncında elde edilmiştir. B10 karışım yakıtında ve %15 etanol fumigasyonunda en iyi momentin ve buna bağlı olarak gücün elde edilmesinin, biyodizelin ve etanolün içeriğindeki oksijen miktarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Biyodizel ve etanolün artan oranlarında momentin azalmasının sebebi ise her ikisinin de alt ısıl değerlerinin dizel yakıtı göre düşük olması ve dolayısıyla sisteme verilen enerjinin daha az olmasıdır. Motora EGR uygulandığında ise dolgu içerisindeki oksijen miktarı azaldığından ve dolayısıyla yanma kötüleştiğinden moment ve efektif güç azalmaktadır.

Varyans analizi sonuçlarına göre faktörlerin moment ve efektif güç üzerindeki etkileri tespit edilmiştir. Motor yükü ve motor devri moment ve efektif güç üzerinde %95 güven aralığında etkilidir. Biyodizel, etanol, EGR ve aşırı doldurmanın ise moment ve efektif güç üzerinde daha az etkili olduğu tespit edilmiştir.

Efektif verim ve özgül yakıt sarfiyatının en iyi değerleri %80 yükte, B10 yakıtında, E20 etanol oranında, EGR uygulanmadığında, 1600 d/d'da, ve 1,1 bar aşırı doldurma basıncında elde edilmiştir. B10 biyodizel yakıtında optimum efektif verim ve özgül yakıt sarfiyatının elde edilmesi biyodizelin oksijen içeriği ile açıklanabilmektedir. B10'dan sonra biyodizelin artan oranlarında efektif verim ve özgül yakıt sarfiyatı bir miktar kötüleşmiştir. Bu duruma biyodizelin alt ısıl değerinin dizel yakıtına göre düşük olmasının sebebiyet verdiği düşünülmektedir. Etanol verilmeye başlandığında ve artan etanol oranıyla özgül yakıt sarfiyatı ve efektif verim iyileşmiştir. EGR uygulandığında ise yanma kötüleştiğinden efektif güç ve özgül yakıt sarfiyatı azalmaktadır.

Varyans analizi ile faktörlerin efektif verim ve özgül yakıt sarfiyatı üzerindeki etkileri saptanmıştır. Motor devri efektif verim ve özgül yakıt sarfiyatı üzerinde %95 güven aralığında etkili iken; yük, biyodizel, etanol, EGR ve aşırı doldurmanın efektif verim üzerinde daha az etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

NO emisyonlarının optimum değeri %40 yükte, dizel yakıtında (B0), etanol uygulanmadığında (E0), EGR20 oranında, 2400 d/d'da, ve 1,1 bar aşırı doldurma basıncında elde edilmiştir. Karışım yakıtlarında NO emisyonunun daha yüksek olmasının çalışma sıcaklığının daha fazla olmasından ve biyodizel içerisindeki oksijen miktarından kaynaklandığı düşünülmektedir (Behçet ve Oral, 2014). Azot oksit emisyonlarını azaltma yöntemlerinden biri olan motora EGR uygulaması ile NO emisyonlarında kayda değer azalmalar tespit edilmiştir.

Varyans analizi sayesinde faktörlerin NO emisyonu üzerindeki etkileri incelenmiştir. EGR ve motor devrinin NO emisyonu üzerinde diğer faktörlere göre daha etkili oldukları saptanmıştır.

HC, CO ve is emisyonlarının en iyi değerleri %40 yükte, B50 biyodizel karışımında, etanol uygulanmadığında (E0), EGR uygulanmadığında (EGR0), 1600 d/d'da, ve 1,1 bar aşırı doldurma basıncında elde edilmiştir. Biyodizelin yakıt içerisindeki oranı arttıkça HC, CO ve is emisyonlarında olumlu değişimler gözlenmiştir. Genel olarak biyodizelin oksijen içeriğinden dolayı yanma veriminin artmasıyla HC, CO ve is emisyonları azalmaktadır. Etanol kullanımında ise HC, CO ve is emisyonlarında artmaların meydana gelmesi etanolün özellikle düşük yüklerde yanmayı kötüleştirici



etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Artan EGR oranıyla da HC, CO ve is emisyonlarının kötüleştiği tespit edilmiştir.

Varyans analizi ile faktörlerin HC, CO ve is emisyonları üzerindeki etkileri tespit edilmiştir. Motor devrinin HC emisyonu üzerindeki etkisi diğer faktörlere göre fazladır. Biyodizel, etanol ve aşırı doldurma da yük ve EGR'ye göre HC emisyonuna daha fazla etki etmektedir. Aşırı doldurmanın CO emisyonu üzerindeki etkisi diğer faktörlere oldukça göre fazladır. Yük, devir ve EGR de biyodizel ve etanole göre CO emisyonuna daha fazla etki etmektedir. Motor devri ve aşırı doldurmanın is emisyonu üzerinde diğer faktörlere göre daha etkili oldukları saptanmıştır. Yük ve EGR ise, biyodizel ve etanole göre is emisyonu üzerinde daha etkilidir.

CO<sub>2</sub> emisyonlarının optimum değeri %40 yükte, dizel yakıtında (B0), etanol uygulanmadığında (E0), EGR uygulanmadığında (EGR0), 1600 d/d'da, ve 1,1 bar aşırı doldurma basıncında tespit edilmiştir. CO<sub>2</sub> emisyonları diğer emisyonlar (HC, CO ve is emisyonları) ile biyodizel faktörü haricinde yakın değişimler göstermiştir. Yakıt olarak biyodizel-dizel karışımları kullanıldığında karışım içerisindeki oksijen miktarının artması sonucu CO<sub>2</sub> emisyonlarının arttığı düşünülmektedir.

Varyans analizi ile faktörlerin CO<sub>2</sub> emisyonu üzerindeki etkileri saptanmıştır. Devir ve aşırı doldurmanın CO<sub>2</sub> emisyonu üzerindeki etkisi diğer faktörlere göre oldukça fazladır. Yük ve EGR de biyodizel ve etanole göre CO<sub>2</sub> emisyonuna daha fazla etki etmektedir.

Motor performansı açısından düşünüldüğünde en iyi kombinasyonun A4-B2-C3-D1-E1-F2 olduğuna karar verilmiştir. Bu kombinasyona göre performansın optimum değerleri için faktör seviyeleri tam (%100) yük, B10 yakıtı, E15 etanol oranı, EGR0, 1600 d/d ve 1,1 bar aşırı doldurma basıncı olarak seçilebilir. Emisyonlar açısından değerlendirildiğinde en iyi kombinasyonun A1-B2-C1-D2-E1-F2 olduğu tespit edilmiştir. Buna göre en iyi emisyon değerlerini elde etmek için kontrol faktörlerinin seviyeleri %40 yük, B20 yakıtı, E0 etanol oranı, EGR10, 1600 d/d ve 1,1 bar aşırı doldurma basıncı şeklinde belirlenebilir.

Bu çalışmada, L16 ortogonal deney planı kullanılarak 6 adet farklı seviyelerdeki faktörün optimizasyonu yapılmıştır. Bu çalışmanın geliştirilmesi açısından bu faktörlerin hedef değişkenleri üzerindeki etkilerini daha ayrıntılı inceleyebilmek için faktör seviyeleri de artırılarak farklı ortogonal deney planlarında yeni çalışmaların yapılması önerilmektedir.



## KAYNAKLAR

- Aksoy, A.S. (2015). *Kimyasal Rafinasyonun Mısır Yağının Bazı Element İçerikleri ile Bazı Kalite Özelliklerine Etkileri*. Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ.
- Aktaş, F., Karaaslan, S., Kılıç, M., Yücel, N. (2019). Farklı Oranlarda Etanol ve Metanol Katkısının Tam Yük Altında Dört Silindirli Dizel Bir Motorun Performans ve Emisyon Değerlerine Olan Etkilerinin Sayısal Olarak İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi*, ISSN: 2147-9429.
- Alibaş, K., Ulusoy, Y. (1995). *Bitkisel Yağların Dizel Motorlarında Yakıt Olarak Kullanım Olanakları*. Tarımsal Mekanizasyon 16. Ulusal Kongresi, Bursa, s. 147-156.
- Alkaya, B., ve Yıldırım, M.A. (2000). Taşıt Kaynaklı Kirleticilerin Azaltılma Yöntemleri. *Ekoloji*, 34: pp. 16-20.
- Altıparmak, D., Keskin, A., Gürü, M. (2007). Alternative Fuel Properties of Tall Oil Fatty Acid Methyl Ester-Diesel-Diesel Fuel Blends. *Bioresource Technolog*, 98, pp. 241-246.
- Al-Widyan, M., Tashtoush, G., Abu-Qudais, M. (2002). Utilization of Ethyl Ester Waste Vegetable Oils as Fuel in Diesel Engines. *Fuel Processing Technology*, Vol. 76, pp. 91-103.
- Ansari, N.A., Sharma, A., Singh, Y. (2018). Performance and Emission Analysis of A Diesel Engine Implementing Polanga Biodiesel and Optimization Using Taguchi Method. *Process Safety and Environmental Protection*, 120, pp.146–154.
- Arslan, M., Alibaş, K. (2015). Laboratuvar Ölçekli Biyodizel Üretim Tesisinin Projelendirilerek İmal Edilmesi ve Bu Tesiste Çeşitli Bitkisel Yağ Kaynaklarından Biyodizel Üretimi. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, Cilt 29, Sayı 1, s. 107-113.
- Aydın, F., Ögüt, H. (2017). Effects of Using Ethanol-Biodiesel-Diesel Fuel in Single Cylinder Diesel Engine to Engine Performance and Emissions. *Renewable Energy*, 103, pp. 688-694.
- Aydoğan, B. (2008). *Biyodizel Kullanılan Dizel Motorlarda NO<sub>x</sub> Emisyonlarının ve NO<sub>x</sub> Emisyonları Azaltma Yöntemlerinin İncelenmesi*. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Denizli.
- Ayhan, V. (2006). *Metanol-Benzin Karışımlarının Mgo-ZrO<sub>2</sub> Termal Bariyer Çemberli Bir Motorda Performans ve Emisyonlara Etkisi*. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.

- Ayhan, V. (2009). *Bir Dizel Motoruna Buhar Enjeksiyonunun  $NO_x$  ve  $\dot{I}s$  Emisyonlarına Etkisinin Araştırılması*. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Sakarya.
- Ayhan, V. (2011). Application of Taguchi Methods to Investigate Factors Affecting the Kinematic Viscosity of Methyl Ester of Tobacco Seed Oil. *Asian Journal of Chemistry*, Vol. 23, No. 2, s. 740-744.
- Ayhan, V., Cesur, İ., Parlak, A., Boru, B. (2008). *Bir Dizel Motoruna Buhar Enjeksiyonunun Performansa ve  $NO_x$  Emisyonlarına Etkilerinin Araştırılması*. Uluslararası 10. Yanma Sempozyumu, 9-10 Ekim, Sakarya.
- Ayhan, V., Özsert, İ., Çay, Y., Çoban, A., Cesur, İ. (2018). DI Bir Dizel Motorunda Optimum Buhar Püskürtme Oranı ve Yakıt Püskürtme Zamanının Taguchi Metodu ile Deneysel Olarak Belirlenmesi. *Journal of New Results in Engineering and Natural Science*, No:8, s. 128-136.
- Ayhan, V., Tunca, S., Cesur, İ., Özsert, İ., Ergen, G. (2019). Ayçiçek Yağı Metil Ester Karışımlarının DI Bir Dizel Motorunun Performans ve Emisyonlarına Etkisi. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 7-1, s. 67-73.
- Balkı M., Sayın C., Sarıkaya M. (2016). Optimization of The Operating Parameters Based on Taguchi Method in An SI Engine Used Pure Gasoline, Ethanol and Methanol. *Fuel*, 180, pp. 630–637.
- Barker, T.B. (1990). *Engineering Quality by Design*. Marcel Dekker Inc. ASQC Quality Press, TS156.B3748, New York, USA.
- Behçet, R., Oral, F. (2014). Dizel Motor Performans ve Emisyonları Üzerindeki Biyodizel-Dizel Karışım Yakıtların Etkisi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1), s. 15-23.
- Bingöl, M.Z. (2017). *Sifcon ile Üretilen Yol Betonlarının Eğilme Ve Basınç Dayanımının Taguchi Metodu ile Optimizasyonu*. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum.
- Can, Ö., Çelikten, İ., Usta, N. (2005). Etanol Karışımlı Motorin Yakıtın Diesel Motoru Egzoz Emisyonlarına Etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Sayı 2, Cilt 11, s. 219-224.
- Chen, H., Xie, B., Ma, J., Chen, Y. (2018).  $NO_x$  Emission of Biodiesel Compared to Diesel: Higher Or Lower? *Applied Thermal Engineering*, 137, pp. 584–593.
- Connemann, J., Fischer, J. (2000). *Biodiesel World 2000*. International Congress and Expo Lipids, Fats, and Oils, sayfa 4, Würzburg, 8-10 Ekim, Almanya.
- Çakmak, A., Bilgin, A. (2017). Bir Dizel Motorda Mısır Yağı Biyodizeli Kullanımının Termodinamik Analizi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, GU J Sci, Part C, 5(2): s. 87-97.
- Çeber, Y. (2010). *Hata Türü ve Etkileri Analizi Yönteminin (FMEA) Üretim Sektöründe Uygulanması*. Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Toplam Kalite Yönetimi Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.

- Çelikten, İ., Arslan, M.A. (2008). Dizel Yakıtı, Kanola Yağı ve Soya Yağı Metil Esterlerinin Direkt Püskürtmeli Bir Dizel Motorunda Performans ve Emisyonlarına Etkilerinin İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi*, Cilt 23, No 4, s. 829-836.
- Çıbıkcı, K.Ç. (2017). *Motorlarda Turboşarj Sisteminin Analizi*. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum.
- Çiçek, Y.Z. (2018). *Deney Tasarımı Yöntemleri ile Kalite Hatalarının Minimizasyonu*. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri.
- Çömlekçi, N. (2003). *Deney Tasarımı İlke ve Teknikleri*. Alfa yayınları, İstanbul.
- Doğan, S. (2017). *Kamışın Pirolyzi ve Pirolyz Ürünlerinin Değerlendirilebilirliğinin Araştırılması*. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fenbilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Afyonkarahisar.
- Dorado, M.P., Ballesteros, E., Arnal, J.M., Gomez, J., Lopez, F.J. (2003). Exhaust Emissions from A Diesel Engine Fueled with Transesterified Waste Olive Oil. *Fuel*, Vol. 82, pp. 1311-1315.
- Durmuş, B., Koçer, N.N. (2017). Türkiye’de Yetişen Yağlı Tohumlardan Biyodizel Üretim Potansiyelinin İncelenmesi. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, Cilt 7, Sayı 2.
- Efe, Ş., Ceviz, M.A., Temur, H. (2018). Comparative Engine Characteristics of Biodiesels From Hazelnut, Corn, Soybean, Canola and Sunflower Oils on DI Diesel Engine. *Renewable Energy*, 119, pp. 142-151.
- Ejder, S.B. (2007). *Etanol - Dizel, Biyodizel - Dizel Yakıt Karışımlarının Kullanımının Motor Performansına Etkilerinin Deneysel Araştırılması*. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Ekinci, E.K., Gündüz, G., Oktar, N. (2015). Biyodizel Yan Ürünü Gliserinin Esterleşme ve Asetilasyonu ile Değerli Kimyasalların Üretimi. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, Cilt 30, No 3, s. 443-450.
- Ercan, L. (2014). *Biyolojik Temelli Sürfaktanlarla Mikroemülsiyon Hazırlama*. Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi. Edirne.
- Ganapathy, T., Murugesan, K., Gakkhar, R.P. (2009). Performance Optimization of Jatropha Biodiesel Engine Model Using Taguchi Approach. *Applied Energy*, 86, pp. 2476–2486.
- Genceli, O.F. (2015). *Ölçme Tekniği*. Birsan Yayınevi, İstanbul.
- Ghadikolaei, M.A., Cheung, C.S., Yung, K.F. (2018). Comparison Between Blended Mode and Fumigation Mode on Combustion, Performance And Emissions of A Diesel Engine Fueled with Ternary Fuel (Diesel-Biodiesel-Ethanol) Based on Engine Speed. *Journal of the Energy Institute*.
- Gomasta, S., Mahla, S.K. (2012). An Experimental Investigation of Ethanol Blended Diesel Fuel on Engine Performance and Emission of A Diesel Engine. *Int. J. Emerg. Technol.* 3 (1), pp. 74-79.

- Güneş, S. (2015). *Honlama Prosesinde Yüzey Kalitesini Etkileyen Parametrelerin Taguchi Metodu ile Optimizasyonu*. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Haşimoğlu, C., İçingür, Y., Ögüt, H. (2002). Dizel Motorlarında Egzoz Gazları Resirkülasyonunun (EGR) Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarına Etkisinin Deneysel Analizi. *Turkish J. Eng. Env. Sci.*, 26, s. 127-135.
- Haşimoğlu, C. (2005). *Düşük Isı Kayıplı Bir Dizel Motorunda Biyodizel Kullanımının Performans ve Emisyon Parametrelerine Etkisi*. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Sakarya.
- Haşimoğlu, C., İçingür, Y., Özsert, İ. (2008). Turbo Şarjlı Bir Dizel Motorda Yakıt Olarak Biyodizel Kullanılmasının Motor Performans ve Egzoz Emisyonlarına Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 23, No 1, s. 207-213.
- He, T., Chen, Z., Zhu, L., Zhang, Q. (2018). The Influence of Alcohol Additives and EGR on The Combustion and Emission Characteristics of Diesel Engine under High-Load Condition. *Applied Thermal Engineering*, 140, s. 363–372.
- Heywood J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. Mc Graw-Hill Book Company, Singapore, 930s.
- İlgin, M.A., Hasanoğlu, S. (2018). Evaluation of Maintenance Policies Using Taguchi Loss Functions and Analytical Hierarchy Process. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Sayı 14, s. 198-203.
- Imran, A., Varman, M., Masjuki, H.H., Kalam, M.A. (2013). Review on Alcohol Fumigation on Diesel Engine: A Viable Alternative Dual Fuel Technology for Satisfactory Engine Performance and Reduction of Environment Concerning Emission. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 26, s. 739-751.
- İçingür, Y., Haşimoğlu, C., Salman, S. (2003). Effect of Comprex Supercharging on Diesel Emissions. *Energy Conversion and Management*, Vol. 44, pp. 1745-1753.
- İçingür, Y., Yanık, H. (2003). Metil ve Etil Esterin Dizel Yakıtı Olarak Kullanılma İmkanlarının Araştırılması, *Politeknik Dergisi*, cilt 6, sayı 2, s.459-464.
- İlkılıç, C., Behçet, R., Aydın, S., Aydın, H. (2009). *Dizel Motorlarında Azot Oksitlerin Oluşumu ve Kontrol Yöntemleri*. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük.
- İzgiz, S. (1999). *Deney Tasarımı ve Taguchi Metodu - Ürün ve Proseslerin Optimizasyonu*. Kocaeli.
- Jamrozik, A. (2017). The Effect of The Alcohol Content in The Fuel Mixture on The Performance and Emissions of A Direct Injection Diesel Engine Fueled with Diesel-Methanol and Diesel-Ethanol Blends. *Energy Conversion and Management*, 148, s. 461–476.
- Karabaş, H. (2009). *Tütün Tohumu Yağı Metil Esterinin Dizel Motorlarında Yakıt Olarak Kullanılma İmkanlarının Araştırılması*. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Sakarya.

- Karaca, E., Aytaç, S. (2007). Yağ Bitkilerinde Yağ Asitleri Kompozisyonu Üzerine Etki Eden Faktörler. *OMÜ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 22(1), s.123-131.
- Karaosmanoğlu, F., Cıgızoğlu, K., Tüter, M., Ertekin, S. (1996). Investigation of The Refining Step of Biodiesel Production. *Energy and Fuel*, Vol. 10, pp. 890-895.
- Karaosmanoğlu, F. (2002). Türkiye İçin Çevre Dostu Yenilenebilir Bir Yakıt Adayı: Biyomotorin. *Ekojenerasyon Dünyası-Kojenerasyon Dergisi*, ICCI 2002 Özel Sayısı, İstanbul, 10, s. 50-56.
- Keskin, A., Ekşi, K. (2006). Dizel Motorlarda Mısır Yağı Biyodizelinin Yakıt Olarak Kullanımının Motor Performans ve Emisyonuna Etkisi. *C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 2.1, s. 49-55.
- Khoobbakhta, G., Karimib, M., Kheiralipourc, K. (2019). Effects Of Biodiesel-Ethanol-Diesel Blends on The Performance Indicators of A Diesel Engine: A Study by Response Surface Modeling. *Applied Thermal Engineering*, 148, s. 1385–1394.
- Kılınçlı, Ö. (2011). *Biodiesel Production*, Ege University Graduate School of Natural and Applied Sciences. Department of Chemistry, Master of Science Thesis, İzmir.
- Koç, Ö. (2010). *Dizel Motorlarda Biyodizel Kullanımının Motora Etkilerinin Dizel Yakıtı İle Deneysel Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi*. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya.
- Lee, D.H., Park, J.S, Ryu, M.R., Park, J.H. (2013). Development of A Highly Efficient Low-Emission Diesel Engine-Powered Co-Generation System and Its Optimization Using Taguchi Method. *Applied Thermal Engineering*, 50, s. 491-495.
- Manigandan, S., Gunasekar, P., Devipriya, J., Nithya, S. (2019). Emission and Injection Characteristics of Corn Biodiesel Blends in Diesel Engine. *Fuel*, 235, s. 723–735.
- Monyem, A. (1998). *The Effect of Biodiesel Oxidation on Engine Performance and Emissions*. PhD. Thesis, Iowa State University, USA.
- Monyem, A., Gerpen, J. (2001). The Effect of Biodiesel Oxidation on Engine Performance and Emissions. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 20, pp. 317-325.
- Mori, T. (1995). *Taguchi Techniques*. Prentice Hall PTR, TR222.M6713, New Jersey, USA.
- Nabi, M.N., Rasul, M.G. (2018). Influence of Second Generation Biodiesel on Engine Performance, Emissions, Energy and Exergy Parameters. *Energy Conversion and Management*, 169, pp. 326–333.
- Oğuz, H. (2004). *Tarım Kesiminde Yaygın Olarak Kullanılan Dizel Motorlarında Fındık Yağı Biyodizelinin Yakıt Olarak Kullanım İmkanlarının İncelenmesi*. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Konya.
- Öğüt, H. ve Oğuz, H. (2006). *Üçüncü Milenyum Yakıtı Biyodizel*. 2.Baskı, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, s. 1- 25.
- Öz, A., Kapar, H. (2007). *Mısırın Yağ İçeriği ve Yağ Sanayi Açısından Önemi*. 1. Ulusal Yağlı Tohumlu Bitkiler ve Biyodizel Sempozyumu, 28-31 Mayıs, Samsun.

- Özdamar, K. (2004). *İstatistiksel Paket Programlar ile Veri Analizi 1*. 5.Baskı, Kaan Kitabevi, s. 528-536.
- Özsezen, A.N., Çanakçı, M. (2009). Biyodizel ve Karışımlarının Kullanıldığı Bir Dizel Motorda Performans ve Emisyon Analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 15, Sayı 2, s. 173-180.
- Özülkü, M. (2002). *Aşırı Doldurulmuş Dizel Bir Motorda Ara Soğutmanın (Aftercooling) Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarına Etkisinin Deneysel Analizi*. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Pradelle, F., Braga, S.L., Martins, A.R.F.A., Turkovics, F., Pradelle, R.N.C. (2019). Performance and Combustion Characteristics of A Compression Ignition Engine Running on Diesel-Biodiesel Ethanol (DBE) Blends - Potential as Diesel Fuel Substitute on An Euro III Engine. *Renewable Energy*, 136, s. 586-598.
- Pulkrabek, W.W. (2010). *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. Prentice Hall, New Jersey.
- Rajkumara, S., Thangarajab, J. (2019). Effect of Biodiesel, Biodiesel Binary Blends. Hydrogenated Biodiesel and Injection Parameters on NO<sub>x</sub> and Soot Emissions in A Turbocharged Diesel Engine. *Fuel*, 240, s. 101-118.
- Rao, P., Gopalakrishnan, K. (1991). Vegetable Oils and Their Methylesters as Fuels for Diesel Engines. *Indian Journal of Technology*, Vol. 29(6), pp. 292-297.
- Ross, P.J. (1988). *Taguchi Techniques for Quality Engineering*. McGraw-Hill Publishing Company, TS156.R67, New York, USA.
- Sağlam, M. (2016). *Taguchi Deney Tasarım Yöntemi Kullanılarak Sementasyon Çeliğinin Teğetsel Silindirik Taşlama Yöntemi İle İşlenmesinde Kesme Parametrelerinin Araştırılması*. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
- Shamun, S., Belgiorno, G., Blasiob, G., Beatriceb, C., Tunéra, M., Tunestala, P. (2018). Performance and Emissions of Diesel-Biodiesel-Ethanol Blends in A Light Duty Compression Ignition Engine. *Applied Thermal Engineering*, 145, pp. 444-452.
- Sezer, İ. (2017). Dizel Yakıtına Etanol ve Dietil Eter Katılmasının Motor Performansı ve Emisyonlara Etkilerinin Deneysel İncelenmesi. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 37, 1, s. 61-68.
- Srivastava, A., Prasad, R. (2000). Triglycerides-based Diesel Fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 4, pp. 111-113.
- Sümer, G.Ç. (2014). Hava Kirliliği Kontrolü: Türkiye’de Hava Kirliliğini Önlemeye Yönelik Yasal Düzenlemelerin ve Örgütlenmelerin İncelenmesi. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, Sayı 13, SSN 1307-9832.
- Sünkür, E. (2016). *Ekstrüzyon İşleminde Proses Parametrelerinin Etkisinin Sonlu Elemanlar İle Analizi Ve Taguchi Yöntemi İle Optimizasyonu*. Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Diyarbakır.
- Şahin, S. (2001). Türkiye’de Mısır Ekim Alanlarının Dağılışı ve Mısır Üretimi. G.Ü., *Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi*, Cilt 21, Sayı 1, s. 73-90.



- Şahin, Z., Durgun, O., Kurt, M. (2009). Turboşarjlı Ön Yanma Odalı Bir Dizel Motorunda Etanol Fumigasyonunun Deneysel İncelenmesi. *TUBAV Bilim Dergisi*, Cilt:2, Sayı:4, s. 446-461.
- Şanyılmaz, M. (2006). *Deney Tasarımı ve Kalite Geliştirme Faaliyetlerinde Taguchi Yöntemi ile Bir Uygulama*. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya.
- Şimşek, B. (2014). *Hazır Betonun Optimal Karışım Oranlarının Belirlenmesi İçin Bir Çok Yannıtlı Modelleme ve Eniyileme Uygulaması: Topsis Tabanlı Taguchi Yaklaşımı İle Cevap Yüzey Yöntem*. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Ankara.
- Şirvancı, M. (1997). *Kalite İçin Deney Tasarımı*. Literatür Yayınları, 1. Basım, İstanbul.
- Taguchi, G., Chowdhury, S., Taguchi, S. (1999). *Robust Engineering*. McGraw-Hill Publishing Company, TS156.T335, New York, USA.
- Tat, M.E. (2003). *Investigation of Oxides of Nitrogen Emissions From Biodiesel-Fueled Engine*. Ph. D. Iowa State University, 41.
- Taylan, D. (2009). *Taguchi Deney Tasarımı Uygulaması*. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- Tok, A. (2010). *Egzoz Gazı Resirkülasyonunun (EGR) Motor Performansı Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi*. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Bursa.
- Tutak, W., Jamrozik, A., Pyrc, M., Sobiepanski, M. (2017). A Comparative Study of Co-Combustion Process of Diesel-Ethanol and Biodiesel-Ethanol Blends in The Direct Injection Diesel Engine. *Applied Thermal Engineering*, 117, pp. 155–163.
- Türköz, N. (2012). *Etanol-Benzin Karışımlarının Motor Performansı ve Emisyonlarına Etkisi*. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bursa.
- Usta, N., Can, Ö., Özgürk, E. (2005). Alternatif Dizel Motor Yakıtı Olarak Biyodizel ve Etanolün Karşılaştırılması. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Sayı:3, Denizli.
- Uyumaz, A., Boz, F., Yılmaz, E., Solmaz, H., Polat, S. (2017). Taşıt Egzoz Emisyonlarını Azaltma Yöntemlerindeki Gelişmeler. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Özel Sayı 1: s. 15-24.
- Ünal, Z. (2015). *Tedarikçi Seçiminde Bulanık Ahp ve Taguchi Kayıp Fonksiyonunun Kullanımı: Bir Otel İşletmesinde Uygulama*. Akdeniz Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ekonometri Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Antalya.
- Verma, S., Das, L.M., Kaushik, S.C., Bhatti, S.S. (2019). The Effects of Compression Ratio and EGR on The Performance and Emission Characteristics of Diesel-Biogas Dual Fuel Engine. *Applied Thermal Engineering*, 150, pp. 1090–1103.
- Wu, H., Wu, Z. (2013). Using Taguchi Method on Combustion Performance of A Diesel Engine with Diesel/Biodiesel Blend and Port-inducting H<sub>2</sub>. *Applied Energy*, 104, pp. 362–370.

- Wu, Z.Y., Wu, H.W., Hung, C.H. (2014). Applying Taguchi Method to Combustion Characteristics and Optimal Factors Determination in Diesel/Biodiesel Engines with Port-Injecting LPG. *Fuel*, 117, pp. 8–14.
- Yamık, H. (2002). *Dizel Motorlarında Alternatif Yakıt Olarak Yağ Esterlerinin Kullanılma İmkânlarının Araştırılması*. Gazi Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara.
- Url-1<<http://www.petder.org.tr/Uploads/Document/c7f1909e-7c4d-4009-a6ccce201287f7d7.pdf?v-636709747071199016>> erişim tarihi 01.05.2019.
- Url-2<[http://www.tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt\\_=1051](http://www.tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt_=1051)> erişim tarihi 01.05.2019.
- Url3<<https://www.fmo.org.tr/wpcontent/uploads/2011/07/AmerikaBirle%C5%9FikDevletleri%E2%80%99nde-%C3%87evre-Kirlili%C4%9FiYasas%C4%B1.pdf>> erişim tarihi 19.04.2019
- Url-4<<https://www.eea.europa.eu/tr/themes/air/intro>> erişim tarihi 19.04.2019.
- Url-5<[http://www.yegm.gov.tr/yenilenebilir/biyokutle\\_enerjisi.aspx](http://www.yegm.gov.tr/yenilenebilir/biyokutle_enerjisi.aspx)> erişim tarihi 07.04.2019.
- Url-6<<https://www.ultraenerji.com/biyoyakit/biyodizelin-faydalari-nelerdir.html>> erişim tarihi 13.04.2019.
- Url-7<<https://www.foodelphi.com/bitkisel-yag-hammaddeleri/>> erişim tarihi 07.04.2019.
- Url-8<<https://obdplus.com.tr/blog/7101-euro-emisyon-standartlari.html>> erişim tarihi 23.04.2019.
- Url-9<<http://www.yildiz.edu.tr/~sandalci/dersnotu/TC/TC3.pdf>> erişim tarihi 14.04.2019.
- Url10<[http://www.turboakden.com/web\\_15009\\_1/entitalfocus.aspx?primary\\_id=1317&type=373&target=categorial1&detail=single&sp\\_table=&sp\\_primary=&sp\\_table\\_extra=&openfrom=sortial](http://www.turboakden.com/web_15009_1/entitalfocus.aspx?primary_id=1317&type=373&target=categorial1&detail=single&sp_table=&sp_primary=&sp_table_extra=&openfrom=sortial)> erişim tarihi 02.04.2019.
- Url-11<<http://istatistiknotlarim.blogspot.com/p/istatistik-sozlugu.html>> erişim tarihi 18.04.2019. 54

## ÖZGEÇMİŞ

Çiçek Çangal, 02.12.1992'de Edirne'de doğdu. İlkokul eğitimini Edirne'de, ortaokul ve lise eğitimini Kırklareli'de tamamladı. 2010 yılında Babaeski Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2010 yılında başladığı Karabük Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü'nü 2015 yılında bitirdi. 2016 yılında Sakarya Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. Yüksek lisans eğitimine devam ederken 2016-2017 yılları arasında Hamidiye Makine / Kocaeli'de Proje Mühendisi olarak çalıştı. 2017 yılında Ataçelik Yapı Üretim A.Ş. / Sakarya'da Üretim Planlama Sorumlusu olarak çalışmaya başladı ve halen bu şirkette çalışmaya devam etmektedir.