



**TARSUS**  
ÜNİVERSİTESİ

**T.C.**

**TARSUS ÜNİVERSİTESİ**

**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**YAKITLARA BOR TÜREVİ İLAVESİNİN YANMA  
KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİLERİNİN FARKLI YAKMA  
SİSTEMLERİNDE İNCELENMESİ**

**TAHİR AYAZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TARSUS – 2022**

**T.C.**  
**TARSUS ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**  
**OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**YAKITLARA BOR TÜREVİ İLAVESİNİN YANMA  
KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİLERİNİN FARKLI YAKMA  
SİSTEMLERİNDE İNCELENMESİ**

**TAHİR AYAZ**

**Danışman: DOÇ. DR. AHMET ALPER YONTAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TARSUS – 2022**

**Tarsus Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürlüğüne;**

Bu çalışma, jüri tarafından Otomotiv Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Başkan:** Doç. Dr. Serhat KARYEYEN

**Üye:** Doç. Dr. Ahmet Alper YONTAR  
(Danışman)

**Üye:** Doç. Dr. Ata HANLAR

Yukarıdaki Jüri kararı Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ...../...../2022 tarih ve ...../..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

**ONAY**

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim elemanlarına ait olduklarını onaylarım.  
.../.../2022

Prof. Dr. Osman Murat ÖZKENDİR  
Enstitü Müdürü

**NOT:** Bu tezde kullanılan ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu'ndaki hükümlere tabidir.

## ETİK BEYANI

Tarsus Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde ve ortaya çıkan sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim. .../ ... / 20...

İMZA

Tahir AYZ

## ÖZET

# YAKITLARA BOR TÜREVİ İLAVESİNİN YANMA KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİLERİNİN FARKLI YAKMA SİSTEMLERİNDE İNCELENMESİ

TAHİR AYAZ

**Yüksek Lisans, Otomotiv Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**Danışman: Doç Dr. Ahmet Alper YONTAR**

**Haziran 2022, 110 sayfa**

Bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında ülkemiz adına stratejik öneme sahip bor katkılı yakıtların yanma karakteristikleri ve yanma sonu açığa çıkan emisyon oluşum davranışları farklı tipte yakıcılarda deneysel olarak araştırılmıştır. Meker-Fisher bekinde ön karışımli yanma ve difüzyon yanma olarak iki farklı durumda deneyler yapılmıştır. Saf yakıtlar olarak LPG (Sıvılaştırılmış Petrol Gazı), benzin ve trietil borat (TEB) yakıtları kullanılmıştır. Benzin yakıtına TEB ilavesi yapılarak LPG ile Meker-Fisher beki test düzeneğinde yanma karakteristikleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Deneysel çalışmada bor türevi olan TEB üç farklı yakıcı sistemde ve farklı karışım oranlarında incelenmiştir.

Damlacık yanma deneysel test sonuçlarında %0 yakıt damlacığı sarıdan kırmızıya doğru spektral değişim, %100 TEB yakıt damlacığı yeşil ve sarı ışıklı alev oluşumu sergilemiştir. %100 TEB yakıtının %0 TEB yakıtına göre damlacık çapının zamana bağlı değişimi daha kısa sürede, alev üstü sıcaklığı daha yüksek, yanma süresi daha kısa sürede ve tutuşma gecikmesi daha kısa sürede gerçekleştiği gözlenmiştir. Kanal yanma deneysel test sonuçlarında %100 TEB yakıtı yüksek alev üstü sıcaklıkta, daha kısa sürede ve daha hızlı bir şekilde yanma eğilimi göstermiştir.

Meker-Fisher bekinde deneysel test sonuçlarında ön karışımli alevlerde %15 ve %20 TEB yakıtında maksimum alev üstü sıcaklıklar gözlemlenmiştir. Ön karışımli alevlerde bütün debi şartlarında %10 TEB yakıtı %0 TEB yakıtına göre ani alev üstü sıcaklık artışı sergilemiştir. Difüzyon alevlerde ve ön karışımli alevlerde 1.5 lt/dk debiden 7.5 lt/dk debiye doğru ilerledikçe alev kopmaları, alev salınımı ve mikro patlamalarda artışlar görülmüştür. Emisyon oluşum davranışında TEB katkısı arttıkça CO ve H<sub>2</sub> emisyonlarında düşüş

gözlemlenmiştir. Ön karışımli alevlerde yapılan deneylerde LPG'nin debi miktarı arttıkça alev koni açısı azalmış ve TEB katkısının artması ile alev boyu artış göstermiştir. Difüzyon alevlerinde TEB katkısı ve debi miktarının artması sonucu alev yayılımı artmıştır.

Trietil borat (TEB)'ın katkılı ya da ana yakıt olarak alternatif yakıtlarda kullanımını yakma sistemlerinde kullanımının uygun olduğunu deneylerden elde edilen sonuçlar göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yanma, Trietil Borat, Alternatif Yakıtlar, Benzin, Bor, Meker-Fisher Beki

## **ABSTRACT**

# **INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF BORON DERIVATIVE INTEGRATION TO FUEL ON COMBUSTION CHARACTERISTICS IN DIFFERENT COMBUSTION SYSTEMS**

**TAHIR AYAZ**

**Master Thesis, Department of Automotive Engineering**

**Supervisor: Assoc. Prof. Ahmet Alper YONTAR**

**June 2022, 110 pages**

At the scope of this master's thesis, the combustion characteristics of boron integrated fuels, which are strategically important for our country, and the emission formation behaviors after combustion were investigated experimentally in different types of combustors. Experiments were carried out in the Meker-Fisher burner in two different operation conditions as premixed combustion and diffusion combustion. LPG (Liquefied Petroleum Gas), gasoline and triethyl borate (TEB) fuels were used as pure fuels. By adding TEB to gasoline fuel, combustion characteristics were tried to be determined in LPG and Meker-Fisher burner test setup. In the experimental study, TEB, a boron derivative, was investigated in three different combustor systems and at different mixing ratios.

In the droplet combustion experimental test results, 0% fuel droplet showed spectral change from yellow to red, 100% TEB fuel droplet showed green and yellow glowing flame formation. It has been observed that the time-dependent change of droplet diameter in 100% TEB fuel compared to 0% TEB fuel occurs in a shorter time, the flame temperature is higher, the burning time is shorter, and the ignition delay is shorter. In the channel combustion experimental test results, 100% TEB fuel showed a tendency to burn at high temperature above the flame, in a shorter time and faster.

In the experimental test results of Meker-Fisher burner, maximum over-flame temperatures were observed in 15% and 20% TEB fuel in premixed flames. In premixed flames, 10% TEB fuel showed a sudden increase in temperature above the flame compared to 0% TEB fuel at all flow conditions. As diffusion flames and premixed flames progress from 1.5 lt/min flow rate to 7.5 lt/min flow rate, flame breakdowns, flame emission, and raises in micro-explosion were observed. As TEB contribution increased in emission

formation behavior, a decrease was detected in CO and H<sub>2</sub> emissions. In the experiments performed on premixed flames, as the flow rate of LPG soared, the flame cone angle decreased and the flame length increased with the raise of TEB additive. Flame propagation swelled as a result of TEB contribution and soar in flow rate in diffusion flames.

The results obtained from the experiments showed that the use of triethyl borate (TEB) in alternative fuels as an additive or main fuel is suitable for use in combustion systems.

**Keywords:** Combustion, Triethyl Borate, Alternative Fuel, Gasoline, Boron, Meker-Fisher Burner

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının gerçekleşmesinde, ilk andan son ana kadar bize her konuda desteğini esirgemeyen, akademik anlamda yol gösterici, engin bilgi ve tecrübeleriyle akademik çalışmalarında hedeflerime adım adım ulaşmamı sağlayan danışman hocam Doç. Dr. Ahmet Alper YONTAR'a sonsuz teşekkür ederim. Yüksek lisans sürecim boyunca laboratuvar çalışmalarım içerisinde çevre uygulamaları kısmında bana destek olan, bu konu hakkında bilgi ve becerilerini benimle paylaşan Doç. Dr. Deniz ÜSTÜN'e teşekkürlerimi sunarım. Tarsus Üniversitesi Yanma Laboratuvarı'nda yapılan çalışmalarda teknik yönlendirmeleriyle çalışmamın ilerlemesinde desteklerini esirgemeyen Teknisyen Güngör PEKDEMİR'e teşekkür ederim. Çalışmalarımızı ortak bir laboratuvar ortamında gerçekleştirdiğimiz, sevincimde ve hüznümde yanımda olan CORET (Combustion Research Team) üyelerine teşekkür ederim. Hayatımın her anının önemli bir parçası olarak desteklerini esirgemeyen babam İsa AYZ, annem Ayşe AYZ ve kardeşim Berna AYZ'a sonsuz teşekkür ederim.

Bu yüksek lisans tez çalışması TÜBİTAK 3501 – 120M844, BAP MF.21.005 ve BAP MF.20.001 numaralı projeler kapsamında desteklenmiştir.

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
ÖNSÖZ .....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
KISALTMALAR.....	viii
TABLolar LİSTESİ .....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	x
EKLER LİSTESİ.....	xii
GİRİŞ.....	1

### BİRİNCİ BÖLÜM GENEL BİLGİLER

1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	3
1.2. Elemental Borun Önemi .....	4
1.3. Literatür .....	9

### İKİNCİ BÖLÜM YANMA

2.1. Yanmanın Temelleri .....	16
2.2. Yanma Reaksiyonuna Etki Eden Parametreler .....	17
2.3. Yakıtlar ve Yanma .....	17
2.4. Yanma Teorisi.....	20
2.5. Alev ve Alev Yapısı.....	26
2.6. Alev Hızının Temelleri ve Ölçümleri .....	32
2.6.1. Alev Açısı Yöntemi.....	34
2.6.2. Alev Alanı Yöntemi .....	36
2.6.3. Alev Boyu .....	37
2.7. Alev Teorisi .....	38

### ÜÇÜNCÜ BÖLÜM MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Test Yakıtları .....	40
3.1.1. Trietil Borat .....	40
3.1.2. Benzin.....	41
3.1.3. LPG (Bütan-Propan Gazı).....	42

3.2. Deneylerde Kullanılan Cihazlar.....	43
3.2.1. Emisyon Test Cihazı .....	43
3.2.2. Enjektör Test Cihazı.....	44
3.2.3. Enjektör .....	45
3.2.4. Ultrasonik Temizleme Cihazı.....	46
3.2.5. Yakıt Pompası .....	46
3.2.6. Ateşleme Bobini.....	48
3.2.7. Akü Şarj Güç Kaynağı .....	49
3.2.8. Meker-Fisher Beki.....	49
3.2.9. Yüksek Hızlı Kamera .....	51
3.2.10. Termal Kamera.....	52
3.2.11. Mikropipet.....	53
3.2.12. Gaz Akış Debimetresi .....	54
3.2.13. Gaz Karışım Odası .....	54
3.3. Test Sistemleri .....	55
3.3.1. Damlacık Test Düzeneği .....	55
3.3.2. Kanal Yanma Test Düzeneği.....	58
3.3.3. Meker-Fisher Beki Deney Test Düzeneği.....	59

## **DÖRDÜNCÜ BÖLÜM**

### **BULGULAR**

4.1. Damlacık Deneyleri Test Sonuçları.....	63
4.2. Kanal Yanma Deneylerinin Test Sonuçları .....	74
4.3. Meker-Fisher Beki Deney Test Sonuçları.....	77
<b>SONUÇLAR ve TARTIŞMA .....</b>	<b>91</b>
<b>KAYNAKÇA.....</b>	<b>94</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>100</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>108</b>

## KISALTMALAR

**B:** Bor

**B<sub>4</sub>H<sub>10</sub>Na<sub>2</sub>O<sub>12</sub>:** Boraks Pentahidrat

**C:** Karbon

**C<sub>6</sub>H<sub>15</sub>BO<sub>3</sub>:** Trietil Borat

**CH<sub>4</sub>:** Metan

**CO:** Karbonmonoksit

**CO<sub>2</sub>:** Karbondioksit

**EES:** Avrupa Emisyon Standartları

**H<sub>2</sub>O:** Su

**H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:** Hidrojen Peroksit

**H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>:** Borik Asit

**HC:** Hidrokarbon

**HFCs:** Hidroflorür Karbonlar

**HO<sub>2</sub>:** Hidroperoksil

**LPG:** Sıvılaştırılmış Petrol Gazı

**N<sub>2</sub>:** Azot

**N<sub>2</sub>O:** Azot Protoksit

**Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:** Susuz Boraks

**NO<sub>x</sub>:** Azot Oksit

**O<sub>2</sub>:** Oksijen

**PFCs:** Perfloro Karbonlar

**RP:** Roket Yakıtı

**SF<sub>6</sub>:** Sülfürhekza Florid

**SiC:** Silüsyum Karbür

**TEB:** Trietil Borat

## TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
<b>Tablo 1.1.</b> Bor Elementinin Özellikleri.....	4
<b>Tablo 2.1.</b> Yakıt Bileşenlerinin Elementer Yapıları .....	19
<b>Tablo 3.1.</b> Yakıtlara Ait Spesifik Özellikler .....	43
<b>Tablo 3.2.</b> Yakıt Pompasından Alınan Hacimsel ve Kütlesel Ölçümler.....	47
<b>Tablo 3.3.</b> Meker-Fisher Beki Testlerinde Hazırlanacak Karışım Oranları.....	60

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Doğada Bulunan Saf Haldeki Bor Elementi .....	5
Şekil 1.2. Dünyadaki Bor Rezervi Dağılım Oranları .....	5
Şekil 1.3. Türkiye Bor Madeni Haritası .....	6
Şekil 1.4. Yakıtların Hacimsel ve Gravimetrik Isıl Değerleri .....	8
Şekil 2.1. Reaksiyon Koordinatı .....	25
Şekil 2.2. Alevin Genel Yapısı .....	27
Şekil 2.3. Ön Karışım Alevde Dış Koni Görüntüsü.....	27
Şekil 2.4. Yakıcı Alevin Genel Görünümü .....	28
Şekil 2.5. Ön Karışım ve Difüzyon Alevi Gösterimi .....	30
Şekil 2.6. Difüzyon ve Ön Karışım Yanmanın Deneysel Görüntüsü .....	31
Şekil 2.7. Alev Sıcaklığının Yüzeysel Dağılımı.....	32
Şekil 2.8. Laminer Alev Hızı Tanımlaması.....	34
Şekil 2.9. Ön Karışım Yanmada Alev Açısı .....	35
Şekil 2.10. Alev Açısı Ölçümü.....	35
Şekil 2.11. Alev İlerleyiş Bölgesi.....	36
Şekil 2.12. Alev Alanı Bölgesi .....	37
Şekil 2.13. Alev Boyu Ölçümü .....	37
Şekil 3.1. TEB'in İskelet Yapısı.....	40
Şekil 3.2. TEB Yakıtı .....	41
Şekil 3.3. Benzinin İskelet Yapısı .....	41
Şekil 3.4. Benzin Yakıtı .....	42
Şekil 3.5. Emisyon Test Cihazı .....	43
Şekil 3.6. Enjektör Test Cihazı.....	45
Şekil 3.7. Benzin Enjektörü.....	45
Şekil 3.8. Ultrasonik Temizleme Cihazı .....	46
Şekil 3.9. Benzin Yakıt Pompası.....	46
Şekil 3.10. Ateşleme Bobini.....	48
Şekil 3.11. Akü Şarj Güç Kaynağı .....	49
Şekil 3.12. Bunsen Beki, Teclu Beki, Meker Fisher Beki ve Ocak Tipi Bek Düzeneği .....	50
Şekil 3.13. Meker-Fisher Beki .....	50
Şekil 3.14. Yüksek hızlı kamera.....	51
Şekil 3.15. Meker-Fisher Beki Test Düzeneğinde Termal Kameradan Alınan Görüntü ....	52
Şekil 3.16. Termal Kamera.....	53
Şekil 3.17. 0.1-10 µl Mikropipet .....	54
Şekil 3.18. Gaz Akış Debimetresi .....	54
Şekil 3.19. Gaz Karışım Odası .....	55
Şekil 3.20. Damlacık Test Düzeneğinin Deneysel Kurulum Şeması .....	56
Şekil 3.21. Damlacık Deneyi Test Düzeneği .....	57
Şekil 3.22. Yanma ve Damlacık Ayrışması İçin Damlacık Görüntü İşleme Şeması .....	57
Şekil 3.23. Kanal Yanma Test Düzeneğinin Deneysel Kurulum Şeması .....	59
Şekil 3.24. Meker-Fisher Bekinin Deneysel Test Düzeneği Şematik Gösterimi .....	61
Şekil 4.1. %0 TEB Yakıtının Zamana Bağlı Gelişim Süreci .....	65
Şekil 4.2. %100 TEB Yakıtının Zamana Bağlı Gelişim Süreci .....	66
Şekil 4.3. %90 TEB Yakıtının Zamana Bağlı Gelişim Süreci .....	67
Şekil 4.4. %50 TEB Yakıtının Zamana Bağlı Gelişim Süreci .....	68
Şekil 4.5. %10 TEB Yakıtının Zamana Bağlı Gelişim Süreci .....	69

<b>Şekil 4.6.</b> Normalize Edilmiş Damlacık Çapının Karesinin Normalize Edilmiş Zamana Göre Değişimi .....	70
<b>Şekil 4.7.</b> Saf ve Karışımli Damlacık Yakıtlarının Alev Üstü Sıcaklıklarının Değişimi ....	72
<b>Şekil 4.8.</b> Saf ve Karışımli Damlacık Yakıtlarının Tutuşma Gecikmesi Süresi .....	73
<b>Şekil 4.9.</b> Saf ve Karışımli Damlacık Yakıtlarının Yanma Süresi .....	74
<b>Şekil 4.10.</b> %0 TEB Yakıtının Kanal Yanma Alanında Zamana Bağlı Alev İlerleyişi .....	75
<b>Şekil 4.11.</b> %5 TEB Yakıtının Kanal Yanma Alanında Zamana Bağlı Alev İlerleyişi .....	75
<b>Şekil 4.12.</b> %100 TEB Yakıtın Kanal Yanma Alanında Zamana Bağlı Alev İlerleyişi.....	76
<b>Şekil 4.13.</b> Kanal Yanmada Saf ve Karışımli Yakıtların Alev Üstü Sıcaklıkları.....	76
<b>Şekil 4.14.</b> Kanal Yanmada Saf ve Karışımli Yakıtların Alev İlerleyiş Hızı.....	77
<b>Şekil 4.15.</b> Debi Değişimleri için Ön Karışımli Yanma Maksimum Alev Üstü Sıcaklıkları .....	79
<b>Şekil 4.16.</b> Debi Değişimleri için Difüzyon Yanma Maksimum Alev Üstü Sıcaklıkları ...	80
<b>Şekil 4.17.</b> %0 TEB ile Ön Karışımli Yanmada Alev Üstü Sıcaklık Değişimi .....	81
<b>Şekil 4.18.</b> %10 TEB ile Ön Karışımli Yanmada Alev Üstü Sıcaklık Değişimi .....	81
<b>Şekil 4.19.</b> Meker-Fisher Bekinde 1,5 lt/dk Debide Ön Karışımli Yanma .....	82
<b>Şekil 4.20.</b> Meker-Fisher Bekinde 4.5 lt/dk Debide Ön Karışımli Yanma .....	83
<b>Şekil 4.21.</b> Meker-Fisher Bekinde 7.5 lt/dk Debide Ön Karışımli Yanma .....	83
<b>Şekil 4.22.</b> Ön Karışımli Yanmada %0 TEB Yakıtı ile Emisyon Ölçüm Sonuçları .....	84
<b>Şekil 4.23.</b> Ön Karışımli Yanmada %10 TEB Yakıtı ile Emisyon Ölçüm Sonuçları .....	85
<b>Şekil 4.24.</b> Ön Karışımli Yanmada %20 TEB Yakıtı ile Emisyon Ölçüm Sonuçları .....	86
<b>Şekil 4.25.</b> Meker-Fisher Bekinde 1.5 lt/dk Debide Difüzyon Yanma .....	86
<b>Şekil 4.26.</b> Meker-Fisher Bekinde 4.5 lt/dk Debide Difüzyon Yanma .....	87
<b>Şekil 4.27.</b> Meker-Fisher Bekinde 7.5 lt/dk Debide Difüzyon Yanma .....	88
<b>Şekil 4.28.</b> Alev Koni Açısının Debiye Bağlı Değişimi.....	88
<b>Şekil 4.29.</b> Alev Boyunun TEB Katkısına Göre Değişimi.....	89
<b>Şekil 4.30.</b> Alev Alanının TEB Katkısına Göre Değişimi .....	90

## EKLER LİSTESİ

	Sayfa
<b>Ek-1.</b> Damlacık Yanma Test Kodu .....	100
<b>Ek-2.</b> Maksimum Sıcaklık Test Kodu.....	102



## GİRİŞ

Enerji, ülkelerin ekonomik ve sosyal anlamda kalkınmasını sağlayan en önemli unsurdur. Günümüzde ülkelerin ekonomik ve sosyal kalkınma planlarında kolay elde edilebilen, ucuz ve temiz bir enerji kaynağı tercih edilmesi gerekir. Bu amaçla yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında etkin ve ucuz maliyetli enerji üretim teknolojilerinin geliştirilmesine yönelik birçok bilimsel araştırma çalışması devam etmektedir. Dünya nüfusunun artması ile sanayi ve endüstri alanlarında birçok gelişme yaşanmış bu durum da fosil yakıtların kullanımının artmasına neden olmuştur. Fosil yakıtların ilerleyen süreçte azalmasından, ekonomik maliyetlerinin artmasından, çevreye ve insan sağlığına vermiş olduğu zararlardan dolayı insanlığın fosil yakıtlardan alternatif yakıtlara geçişini teşvik etmektedir. Bu yüzden ülkelerin, enerji ihtiyaçlarını yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlayarak dışarıya bağımlılıklarını azaltmaları ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını yaygınlaştırarak çevreye verilen zararın en aza indirilmesini sağlamaları gerekir. Özellikle fosil yakıtların kullanımı sonucunda atmosferde sera gazlarının giderek birikmesi sonucu Dünya'nın sıcaklığı yükselmiş bu da beraberinde küresel ısınmaya neden olmuştur. Küresel ısınma da iklim değişikliklerine neden olmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının üretimi ve kullanımı konusunda araştırma çalışmalarına yön vererek sera etkisine neden olan kirletici gaz oluşumlarını azaltmak mümkündür. Yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıtlara nazaran dünyamız açısından temiz ve çevreci bir enerji kaynağıdır (Öztürk,2021:11). Dünyada enerji ihtiyacının büyük çoğunluğu fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Geleneksel yakıt olarak bilinen fosil yakıtların başlıca kullanımını %26 oranında ulaşım sektörüdür. Fosil yakıtların yanması sonucu çevreye zararlı olan ve Kyoto protokolünde de yer alan sera gazı bileşikleri; (CO<sub>2</sub>) Karbondioksit, (CH<sub>4</sub>) Metan, (N<sub>2</sub>O) Nitröz Oksit, (HFC<sub>s</sub>) Hidroflorür Karbonlar, (PFC<sub>s</sub>) Perfloro Karbonlar, (SF<sub>6</sub>) Sülfürhekza Florid oluşmaktadır (Mutlu vd.,2018:240-244). Sera gazı etkisini oluşturan bu emisyonların salınımını önlemek amacıyla fosil yakıtlardan alternatif yakıtlara geçiş yapılması gerekir. İçten yanmalı motorlardaki egzoz emisyonu salınımlarının önüne geçilebilmesi için Avrupa Egzoz Emisyon Standartları (EES) tarafından katı yasal düzenlemeler yapılmıştır. Daralan emisyon toleransları karşısında yakma sistemlerinin kontrolü için ek maliyetler gerekmektedir. Bu hususta yakma sistemi üreticilerini ekipmanların pahalılığından ve kontrolü zor sistemlerden dolayı alternatif yakıt arayışına zorlamaktadır. Bu yasal düzenlemeler çerçevesinde egzoz emisyonlarının azalması için

alternatif yakıt temelli çalışmalara yön vermek gerekmektedir. Yakma sistemlerinde minimum emisyon ve maksimum performans ilkesi ile hareket edilerek her geçen gün alternatif yakıtlar üzerine yapılan çalışmalar artmaktadır. Alternatif yakıtların yesi olan yeni nesil bor türevi yakıtlar, hem çevresel olumsuzlukları önlemesi hem de ülkemiz açısından stratejik enerji kaynağı olması açısından payı büyüktür.

Bu tez kapsamında ülkemiz açısından alternatif yakıtlar adına büyük pay sahibi olan bor elementinin yakma sistemlerinde ek yakıt kullanımı ile araştırma ve geliştirme faaliyetlerine yn verilmiştir. Borun yüksek enerjitik özelliğe sahip olması alternatif yakıt uygulamalarında gelişim göstermesini sağlamıştır. Bu yüksek lisans tezi kapsamında bor türevi olan TEB yakıtının saf ve karışımlı halde farklı yakma sistemlerinde araştırma çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Tez içeriğinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde tezin amacı ve kapsamı, elemental borun önemi ve literatür kısmı yer almaktadır. İkinci bölümde yanma, yanma teorisi, alev ve alev yapısını içeren bilgilendirmeler bulunmaktadır. nc bölümde materyal ve metot, tez kapsamında kullanılan yakıtlar ve deneysel test düzenekleri hakkında açıklamalar yapılmıştır. Son bölümde ise deneysel çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar geniş kapsamlı bir Şekilde değerlendirilmiştir.

## BİRİNCİ BÖLÜM

### GENEL BİLGİLER

Bu bölümde tezin amacı ve kapsamı, elemental borun önemi ve literatür hakkında bilgilendirmeler yer almaktadır.

#### 1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı

Yakma sistemlerinde enerji verimliliğinin artırılması ve düşük emisyonlu sistemlere geçilmesi Ar-Ge çalışmaları gerçekleştirilerek hedeflenmektedir. Her geçen gün fosil yakıtlara olan ilginin artması hava kirliliğini, iklim değişikliğini ve sera etkisini de beraberinde getirmiştir. Ancak nüfusun artması enerji talebindeki artışa neden olmuştur. Enerji talebindeki artışlarda çevresel sorunlara yol açmıştır (Kelen,2014:80-87). Bu durum karşısında yüksek enerjilik özelliğe sahip bor elementi çok yönlü kullanım içeren bir alternatif enerji kaynağıdır. Bor, ülkemizin ekonomik ve stratejik açıdan jeopolitik konumunda temel odak haline gelmiştir. Dünyada bulunan bor enerji kaynağının büyük bir kısmı ülkemiz sınırları içerisinde yer almaktadır. Ayrıca dünyada bilinen bor rezervinin %72.8'i ülkemizde bulunmaktadır. Bor ülkemizde savunma sanayi, temizlik ürünleri, lojistik ve endüstri gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Ülkemizde bulunan alternatif enerji kaynaklarından biri olan bor elementi savunma sanayinde kullanımı ile stratejik öneme sahiptir. Bor elementi yakma sistemlerinde katkı maddesi olarak kullanılmakta ve enerji verimliliğinin artmasına neden olan bir madendir. Diğer enerji kaynaklarına göre bor elementinin üstünlükleri; yüksek enerji içeriğine sahip olması ve oksijen ile yanma reaksiyonları sonucunda karbon kaynaklı emisyon oluşumunu azaltmasıdır. Bor, moleküler fazda emisyon oluşumunu minimuma indirmeye ve kolay parçalanabilme özelliğine sahiptir. Bor elementinin yüksek kimyasal enerjiye sahip olması, emisyon oluşumunu azaltması ve ülkemizde rezervinin fazla olması nedeniyle yakma sistemlerinde kullanımı avantajlıdır (Ediz ve Özdağ,2001:133-151). Bu tez çalışmasında bor elementinin yüksek enerji potansiyeli önem arz etmektedir. Borun enerji yoğunluğunun yüksek olması sebebiyle saf ya da karışımli yakıt olarak kullanımı yakma sistemlerinde gerçekleştirilecek olan çalışmalara kaynak olacaktır. Katkı maddesi veya saf halde kullanılan bor elementi yakma sistemlerinin verimliliğini arttırmaktadır. Bu tezin genel kapsamında benzin yakıtına farklı oranlarda TEB ilave edilerek yanma davranışları ve emisyon oluşumları deneysel olarak incelenmiştir. Saf benzin ve saf TEB yakıtının farklı oranlardaki karışımlarının damlacık yanma test düzeneği,

kanal yanma test düzeneği ve Meker-Fisher beki test düzeneğinde yakma işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasının amaç ve kapsamı; enerji ihtiyacının her geçen gün artması ve bu enerji ihtiyacının karşılanabilmesi için alternatif yakıtlarda araştırma ve geliştirme faaliyetlerine katkı sunmaktır. Ülkemiz için alternatif yakıtlar çerçevesinde payı büyük olan bor elementinin yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmasından dolayı yakma sistemlerinde yanma davranışı ve emisyon oluşumu araştırılmıştır.

## 1.2. Elemental Borun Önemi

Bor doğada serbest bir element olarak değil, diğer elementlerle bileşik yapmış halde bulunur. Bu bileşikleri de en fazla sodyum ve kalsiyum ile yapmaktadır. Bileşiklerin sodyum kökenli olanlarına boraks, kalsiyum kökenli olanlarına kolemanit, sodyum ve kalsiyum kökenli olanlarına da uleksit denir. Elemental bor, periyodik tablodaki B simgesi ile ifade edilir.

**Tablo 1.1.** Bor Elementinin Özellikleri

Atom Ağırlığı	10.811 g/mol
Atom numarası	5
Ergime Noktası	2473 K
Kaynama Noktası	2773 K
Yoğunluğu	2.34 g/cm <sup>3</sup>
Oksidasyon Sayısı	3
Elektro Negatifliği	2.0
İyonlaşma Enerjisi	191 kcal/g atom
Sertlik	9.3 Mohs
Atom Yarıçapı	0.98
Füzyon Isısı	5.3 kcal/g atom
Buharlaşma Isısı	128 kcal/g atom
Kristal Yapısı	Rombohedral

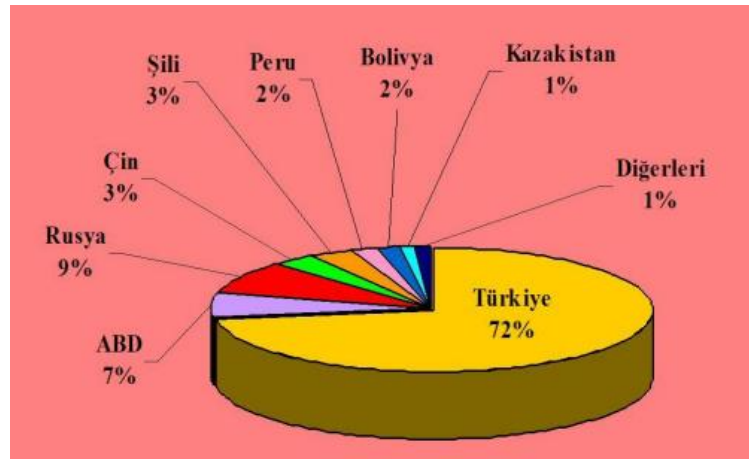
**Kaynak:** Kılıçaslan ve Aktürk,2020a:23.



**Şekil 1.1.** Doğada Bulunan Saf Haldeki Bor Elementi

**Kaynak:** Güney ve Gökmen,2019:499-503.

Bor elementi B simgesi, atom ağırlığı 10 ve atom numarası 5 olarak periyodik tabloda 3A grubunda yer almaktadır. Aynı zamanda yarı metal ve yarı iletken özelliğe sahiptir. Doğada bulunan bor elementinin B<sup>10</sup> ve B<sup>11</sup> olarak iki ayrı kararlı izotopu bulunmaktadır. Bor elementi çeşitli metal ve ametal elementlerle bileşik oluşturabilmektedir. Oluşan bileşiklerin her biri farklı yapıda özellikler gösterebilmektedir. Bor, bileşik oluşumunu sağladığı sürece metal dışı bileşik gibi davranmaktadır. Saf borun elektrik iletkenliği vardır ve kristalize bor ise elmasa benzer görünümüyle elmasın sertliğine yakın bir sertlik yapısına sahiptir (Etimaden,2006:a.g.i.s).



**Şekil 1.2.** Dünyadaki Bor Rezervi Dağılım Oranları

**Kaynak:** Yenmez,2009:59-94.

Türkiye, mevcut rezervleri ile dünyanın en zengin bor kaynaklarına sahip ülkesidir. Ülkemizde bor yataklarının bulunduğu bölgeler; Eskişehir-Kırka, Bursa-Kestelek, Kütahya-Emet, Balıkesir-Bigadiç'te bulunmaktadır. Bor rezervi bakımından Türkiye'yi Rusya ve ABD izlemektedir. Dünya bor rezervlerinin %72.8'ine sahip olan Türkiye, dünyada toplam

bor üretiminde pazar payının %35'ini oluşturmaktadır. Türkiye dışındaki ülkelerde bulunan bor rezervleri 60-70 yıllık üretim potansiyeline sahipken, ülkemizdeki rezervler en az 500 yıl boyunca tüm dünyanın bor ihtiyacını karşılayabilecek potansiyele sahiptir. Alternatif ve yeni nesil enerji kaynaklarından olan bor yakıtının önemi, ülkemizin ekonomik, stratejik ve jeopolitik konumunun ana odağı haline gelmesinde yatmaktadır.



**Şekil 1.3.** Türkiye Bor Madeni Haritası

**Kaynak:** MTA,2010,Starbor Borun Kısa Tarihçesi:a.g.i.s.

Sanayileşmenin ülkelerin kalkınmasında çok önemli bir rolü vardır. Sanayileşmenin gelişiminde ülkelerin enerjiye, madenlere ve hammaddeye ihtiyacı vardır. Sanayi ve endüstriyel üretimde çok yaygın olarak kullanılan önemli hammaddelere stratejik maddeler adı verilir. Günümüzde tüm dünyada sanayi ve endüstride teknolojik gelişmelere bağlı olarak kullanım ihtiyacı artan başlıca hammaddeler bor mineralleridir.

Sanayi ve endüstrinin ana girdi malzemesi olarak bilinen bor mineralleri, doğadaki tüm canlıların yaşamlarını sürdürebilmeleri için vazgeçilmez mineral kaynağıdır. Doğada tanımlanan yaklaşık 230 farklı bor minerali vardır. Bor doğada saf halde değildir. Çünkü oksijenle tepkimeye girmesi sonucu doğada oksit formda bulunmaktadır (Kılıçaslan ve Aktürk,2020b:15-22).

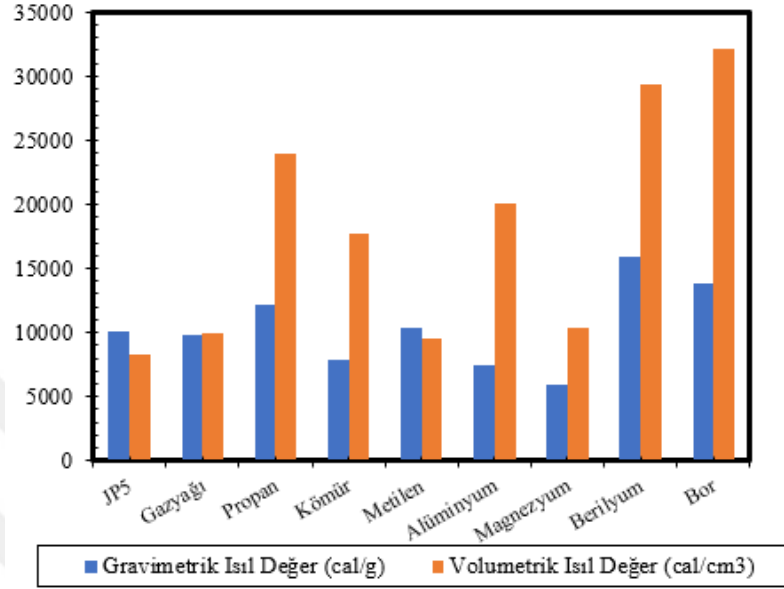
Bor enerji kaynağının verimli kullanılabilmesi için araştırma geliştirme faaliyetleri, bilimsel toplantılar ve sanayi-endüstri ilişkileri önemlidir. Bor elementinin katkıları,

sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynağı olarak ülkemiz için önemli bir konuma sahiptir. Ayrıca endüstriyel sistemlerde bor kullanımının çevreye ve doğal yaşama sunduğu katkılar da kaçınlmazdır. Bor katkı ya da ana malzeme olarak kullanıldığında sistem verimliliğini arttırıcı yönde etki etmektedir. Borun endüstriyel sistemlerde kimyasal etkisi sebebiyle verimliliği düşürmesine rağmen oksijenle reaksiyonu sonucu yanma reaksiyonlarının gerçekleşmesinde karbon kaynaklı emisyon oluşumunu azaltması ve bilinen fosil yakıtlardan daha yüksek enerji içeriğine sahip olması nedeniyle kullanımı büyük önem arz etmektedir. Borun ilginç bir özelliği ise oksijenle reaksiyona girip yanması sonucunda spektral türde yeşil bir aleve sahip olmasıdır. Bu bağlamda alev oluşum bölgesinde moleküler yapıda emisyon oluşumu meydana gelmektedir. Moleküler yapıya sahip emisyonların kontrolünü ya da kimyasal açıdan indirgenmesini sağlamak daha kolaydır. Emisyon kontrolünün sağlanmasında bu durumun önemi büyüktür. Yanma davranışındaki karşılaşılan problem ise bor ve türevi yakıtların yanması sırasında parçacığın etrafındaki camsı tabaka yapının oluşumudur. Bu tabaka yapısı borun oksijenle reaksiyona girmesine engel teşkil ederek alevin sönmesine neden olmaktadır.

Yanma reaksiyonlarında yeni nesil alternatif yakıtların kimyasal yapısında oksijen içerikli hidrokarbonların kullanılması, hidrokarbon yakıtlara nazaran emisyon oluşumunda önemli bir azalma sunmaktadır. Oksijen içerikli hidrokarbon yakıtlarının eksik yanması, hidrokarbon yakıtının yanması ve hidrokarbon yakıtının ara ürünlerinin yanması çevre kirliliğine ve emisyon oluşumuna neden olarak insan sağlığını olumsuz etkilemektedir. Oksijen içeren hidrokarbon yakıtları kimyasal yapısından dolayı düşük ısı değere sahiptir. Bu nedenle oksijen içeren hidrokarbon yakıtlara yönelim azalmaktadır. Aynı seviyedeki oksijen içeren hidrokarbon yakıtların oksijen içermeyen hidrokarbon yakıtlara göre enerji tüketimi iki kat daha fazladır. Enerji tüketiminin artması emisyon oluşumuna ve maliyetlerin artmasına yol açmaktadır. Bu aşamada ise yeni nesil oksijen içerikli bor türevi yakıtlara yönelim çok iyi bir çözüm kaynağı sunmaktadır. Emisyon salınımı açısından yeni nesil bor türevi yakıtların kullanımını yaygınlaştırma çabaları diğer yandan savunma sanayi kısmında da önemli faydalar sağlamaktadır.

Savunma sanayi açısından bakıldığında elemental borun füze tahrik sistemlerinde, serbest hava akış alanında yanma için gerekli oksitleyici tabakayı sağlamasına izin vererek füze menzil kabiliyetini arttırıcı etkiye sahiptir. Çünkü borun enerjistik malzeme yapısında metal yakıt katkı maddesi kullanımı mevcuttur (Besser ve Strecker,1993:133-178). Metallerin yüksek enerji yoğunluklarına sahip olması yanma entalpileri ve bunların

oksidasyonu kaynaklı yanma ürünlerinin yeni teknolojik gelişmeler sayesinde geri dönüşümünü mümkün kılmaktadır (Shkolnikov vd.,2011:4611-4623). Bu nedenle, sıvı yakıtlar başta olmak üzere patlayıcılarda ve katkı yakıt maddelerinde borun kullanımı avantajlı hale gelmektedir.



**Şekil 1.4.** Yakıtların Hacimsel ve Gravimetrik Isıl Değerleri

**Kaynak:** Karmakar vd., 2013:3004-3014.

Şekil 1.4’de hacimsel ve gravimetrik ısı değer grafiğini incelediğimizde, berilyum en yüksek gravimetrik ısı değere sahipken oldukça toksik yapısı nedeniyle kullanımı bakımından güvensizdir. Bor elementi magnezyum ve alüminyum gibi geleneksel metal yakıtlarla kıyaslandığında, borun yanma ısısı diğer metal yakıtlara göre daha yüksek değerdedir (Liu vd.,2016:1-7). Bununla birlikte bor hem ateşleme hem de yanma sırasındaki düşük reaksiyon hızından dolayı itki sistemlerinde istenilen seviyede bir potansiyele sahip değildir. Bor elementi, uzay teknolojisinde yüksek itki gerektiren füze sistemlerinde kullanılmaktadır. Gravimetrik ve volümetrik enerji yoğunluğu yüksek olan boru, yakıt eklentisi olarak kullanılmak mümkündür. Nano boyuttaki metal tozlar çok küçük boyuttaki partiküllere göre büyük birim yüzey alanına ve düşük tutuşma sıcaklığına sahiptir. Bor Şekil 1.4’de yer alan alüminyum, magnezyum ve berilyum gibi yakıtlarla karışımı sağlanıp katkı maddesi olarak kullanılabilir (Yeh ve Kuo,1996a:511-541).

### 1.3. Literatür

Bilimsel literatürde yer alan çalışmalarda elementsel bor ve bor türevi katkıli yakıtların yakma sistemlerinde yanması üzerine yapılan çalışma sayısı oldukça sınırlıdır.

Yeni nesil oksijen içerikli yakıtların kullanımında bor katkıli yakıtların ayrı bir önemi vardır. Benzinin oksidasyon ısısı  $34 \text{ kJ/m}^3$  iken borun oksidasyon ısısı  $138 \text{ kJ/m}^3$ 'tür (Jain vd.,2011:67-73). Elemental borun hacimsel enerji yoğunluğu çok yüksektir. Katı yakıt uygulamalarında temel enerji kaynağı olarak bor elementi kullanılabilir (Yeh ve Kuo,1996b:511-541). Ama borun saf halde yanması çok zordur. Elemental borun saf halde oksijenle tepkimeye girmesinde yanma verimliliği %70 civarında kalmaktadır (Liang vd.,2017:292-300). Bundan dolayı, yanma sırasında bor oksit tabakası madde yüzeyini kaplayarak alevin ve oksijenin dağılımını engellemektedir (Dreizin vd.,1999:272-290). Magnezyum ve alüminyum gibi elementler borun yanma verimini arttırmaktadır. Elemental bor, enerjistik malzeme uygulamalarında magnezyum diborür ve alüminyum diborür ile birlikte kullanılmaktadır (Foelsche vd.,1999:32-58; Zhou vd.,1999:227-243). Bor türevi olan TEB yüksek hidrojen içeriğine sahiptir. Yüksek hidrojen içeriğine sahip olan TEB, oksidasyon kalitesini arttırarak oksijen ve borun sahip olduğu yüksek kimyasal enerjinin yakma sistemlerinde kullanılmasında fayda sağlamaktadır (Young vd.,2009:322-333). Bu nedenle enerjistik malzeme özelliğine sahip borun temiz oksidasyonu ile yüksek sıcaklıklara çıkılabilmektedir.

Bor ve bor türevi yakıtların yanması ve tez kapsamında uygulanacak yakma yöntemleri ile ilgili literatür çalışmaları aşağıda verilmiştir.

Doğu ve arkadaşları boraks pentahidratı ( $\text{B}_4\text{H}_{10}\text{Na}_2\text{O}_{12}$ ), susuz boraksı ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) ve borik asidi ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) benzin yakıtı içerisine karıştırıp çözdürerek bor katkıli benzin yakıtı elde etmişlerdir. Bor katkıli benzin yakıtını içten yanmalı motor test düzeneğinde kullanmışlardır. Motor test düzeneğinde deneysel ölçümler sonucunda borik asit benzin karışımında; özgül yakıt sarfiyatında %15.2 oranında, HC emisyonlarının oluşumu %2.7 oranında ve  $\text{NO}_x$  emisyonlarında %18.3 oranında azalış olduğu tespit edilmiştir (Doğu vd.,2020:1-20).

Blackham ve arkadaşları Meker-Fisher brülöründe 5-10 mm boyuttaki kömür parçacıklarının oksidasyon oranlarını atmosferik ortamda incelemişlerdir. Kömürleri Meker-Fisher brülöründe ısıtarak istenilen sıcaklık seviyesine getirmişlerdir. Altı adet kömür tipinde partiküllerin kütlelerini ve oksidasyon oranı değişimlerini Meker-Fisher brülörü

kullanarak gözlemlemişlerdir. Partiküllerin kütlesi geçen zamana nispetle azalmıştır. Parçacık etrafında kül katmanlarının yoğun bir şekilde oluşumunu sağlamışlardır. Kömür parçacıklarının aynı boyutlardaki diğer parçacıklara göre kinetik reaksiyon ve oksidasyon hızlarını karşılaştırdıklarında uyum içinde olduklarını tespit etmişlerdir (Blackham vd.,1994:602-612).

Mason ve arkadaşları, büyük ölçekli biyokütle yakıtının partikül alevi üzerinde yanma davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmalarda Meker-Fisher brülöründe çam, okaliptüs ve söğüt içeren üç adet biyokütle yakıtını kullanmışlardır. 3 mm'ye kadar en-boy ölçütüne sahip biyokütle yakıtlarının partikül soğutma işlemlerini su ile sağlamışlardır. Sonrasında Meker-Fisher brülöründe biyokütle yanmasını gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca ateşleme gecikmesi ve yanma süresini görüntülemek için yüksek hızlı görüntü yakalama tekniğini kullanmışlardır. Meker-Fisher brülöründe kullanılan üç adet biyokütle yakıtından yüksek nem içeriğine sahip olan biyokütle yakıtın tutuşma gecikmesi süresinin yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir (Mason vd.,2015:21-30).

Jones ve arkadaşları biyokütle yanmasında potasyumun ısıl ve katalitik davranışını araştırmışlardır. Biyokütle parçacıklarının yanmasını statik biyokütle parçacığı ve dinamik biyokütle parçacığı olarak ikiye ayırmışlardır. Statik biyokütle parçacıklarını Meker-Fisher brülöründe, hareketli biyokütle parçacıklarını ise Bunsen tipi düz alevli brülörde yakmışlardır. Deney koşullarında stokiyometrik şartlarda doğalgaz kullanılarak 1500 K sıcaklığa kadar partiküllerin yanma sıcaklıklarını yükseltmişlerdir. Meker-Fisher brülöründeki deneylerde monokromatör ızgarası üzerinde yanan parçacıklarda potasyum emisyonunun oluşumu 766.5 nm dalga boyuna sahip monokromatör giriş deliğine odaklayarak ölçüm yapmışlardır. Bunsen tipi düz alevli brülörün Meker-Fisher brülörüne kıyasla çok hızlı ısınma değerine sahip olduğunu görmüşlerdir. Biyokütle yakıtlarının yanması sırasında ısıl ve katalitik etkisinin buharlaşma ve oksidasyon süreçlerinde azaldığını göstermişlerdir (Jones vd.,2007:1955-1963).

Hayhurst ve Telford; hidrojen, oksijen ve nitrojenin yakıtça zengin ön karışımli laminer alevlerde difüzyonel hidrojen kaybı etkilerini Meker-Fisher tipi yakıcıda deneysel olarak çalışmışlardır. Meker-Fisher tipi yakıcının çıkış çapı 10 mm'dir. Ayrıca bu çalışma ile ilgili matematiksel denklem de geliştirmişlerdir. Hidrojenin difüzyon kaybında etkili olan faktörler; farklı kesit alanı ve değişim hızına bağlı alev dağılımı katsayıları olduğunu tespit etmişlerdir. Bir sonraki süreçte deneysel çalışmalarda, hidrojen difüzyon kaybının en aza

indirilmesi için ön karışımli alevlerde brülör tasarımlarında kolaylık sağlamışlardır. Meker-Fisher tipi yakıcıda yanma işleminin gerçekleştirilmesinde; hacimsel akış hızının artırılmasıyla difüzyonel hidrojen kaybını en aza indirmişlerdir (Hayhurt ve Telford,1970:303-312).

Kashir ve arkadaşları alev jetinin analizini sayısal olarak analiz etmişlerdir. Çalışmalarda k-ε türbülans modellemesi ve görüntü işleme tekniklerini kullanarak deneysel bir kod geliştirmişlerdir. Yakıtların hacimsel bileşimleri %33 H<sub>2</sub>, %22.1 CH<sub>4</sub> ve %44.7 N<sub>2</sub> şeklindedir. Sayısal analiz çalışmalarından elde edilen sonuçların deneysel çalışmalar ile uyum içinde olduğunu göstermişlerdir. Metan yakıtı yerine propan yakıtını kullanmışlardır. Propan yakıtının hacimsel yakıt miktarını sabit tutarak H<sub>2</sub> yakıtının hacimsel içeriğini %33.2'den %73.2'ye çıkarmışlardır. Hidrojenin hacimsel yakıt miktarının artış göstermesi alev boyunu yükseltmiştir. Ayrıca H<sub>2</sub> yakıtı ilavesi CO emisyonlarında artış göstermiştir (Kashir vd.,2015:6243-6258).

Shinomori ve arkadaşları NO<sub>x</sub> emisyonunu düşürücü ve sıvı yakıcı özelliğe sahip brülörde, yanma davranışının emisyon üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sıvı yakıcı özelliğe sahip brülörde yanmış gaz resirkülasyonunu sağlayan sirkülasyon bölgesinin tasarımını yapmışlardır. Brülörde yanmış gazlar resirkülasyon gaz oluşum seviyesinin hacimsel olarak %50 seviyelere kadar çıktığını belirlemişlerdir. Deneysel çalışma sonucunda; stokiyometrik şartlarda NO<sub>x</sub> emisyonlarını 108 ppm'den 22 ppm'e düşürmüşlerdir. Mavi alev oluşumunu ise hava fazlalık katsayısının 1,6 değerine çıkması ile gözlemlemişlerdir. Aynı zamanda mavi alev oluşumu sırasında NO<sub>x</sub> emisyonlarını 22 ppm'den 16 ppm'e düşürmüşlerdir (Shinomori vd.,2011:2735-2742).

Mikro kanal yanmada alev yanıcılığının standart yanıcılık sınırını nasıl genişlettiği ve mikro kanal yanmayı nasıl mümkün kıldığı önemli bir durum teşkil etmektedir. Mikro kanalın geleneksel gaz yakıt yandıktan sonra sönme durumuna göre hidrolik çapının daha küçük olması mikro kanal yanma araştırmalarını daha da zorlaştırmıştır. Alevlenebilirlik ve alev kararsızlığı üzerindeki faktörleri araştırmak için yoğun çalışmalar yapılmıştır. Farklı çaplı tüplerde yanma üzerine araştırmalar yapılmıştır. Kanal çapı, alev alma sınırı olarak tanımlanan belirli bir kritik değerden daha küçük olduğunda alevin dairesel bir tüp içinde yayılmadığını fark etmişlerdir. Zha ve arkadaşlarının yapmış oldukları mikro kanal çalışmasında önceden karıştırılmış metan (CH<sub>4</sub>) ve havanın yanıcılık sınırlarını incelemişlerdir. Kanal yüksekliğinin azalmasıyla yanıcılık sınırlarının azaldığını tespit

etmişlerdir (Zha vd.,2017:4814-4821). Weigand ve arkadaşları, aynı çalışmanın farklı ekivalans oranları altında alev davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda farklı ekivalans oranlarında alev davranışının farklı olduğunu kanıtlamışlardır (Weigand vd.,2006:225-236). Vetliky ve arkadaşları tarafından sayısal bir çalışma yapılmıştır. Yakıt/hava oranı, giriş hızı, giriş yakıt dağılımı ve giriş girdabının yanma kararlılığı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bütün parametrelerin alev stabilizasyonu üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir (Vetlicky ve Chladek,2012:925-926). Maruta ve arkadaşları düz mikro tüplerde tekrarlayan sönme davranışını ve tutuşan alev kararsızlığını incelemişlerdir. Mikro kanaldaki alev kararsızlığının temel olarak çok hızlı ısı kaybından kaynaklandığını bulmuşlardır (Maruta vd.,2004:516-523).

Mansouri, mikro kanallarda yanmada duvar geometrisinin değişimi, duvarın sıcaklığı ve reaksiyon mekanizmalarının etkilerini araştırmışlardır. Mikro yapıda termo fotovoltaik sistemin çıkış gücü mikro kanal test düzeneği geometrisine ve küçük boyuttaki alevin kararlılığına bağlı olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada kullanılan dalgalı duvar geometrisi mikro yanmanın tasarımı açısından etkilidir. Çünkü dalgalı duvarlar ısı transfer özelliklerini yüzeysel olarak iyileştirmiştir. Metan-havanın ön karışımli alevlerinde iki boyutlu sayısal simülasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. Dalgalı mikro kanal test düzeneğinde akış yönüne doğru duvarı ısıtma işlemi yapmışlardır. Mikro kanal parametreleri; yükseklik 600 µm, karışım hızı 1 m/s ve ekivalans oranı stokiyometrik şartlardadır. Alevin yeri dalgalı duvar geometrisinde daha belirgindir. Dalga sayısı arttıkça alev mikro kanal çıkışına doğru daha düzgün bir şekilde hareket etmiştir. Maksimum sıcaklıklara çıkıldıkça alev mikro kanal girişine doğru hareket edip alev sıcaklığını düşürmüşlerdir. Duvar sıcaklığının yüksek olduğu bölgelerde ısı salınımında azalma görmüşlerdir. Isı salınımındaki bu etki ile alev sıcaklığını da azaltmışlardır (Mansouri,2019:198).

Shen ve arkadaşları, kanallarda hidrojen hava karışımının ön karışımli alevde kanal en-boy oranı yayılımını deneysel ve sayısal metotlarla incelemişlerdir. Çalışmalarda Schlieren sistemi ve basınç sensörünü, alev oluşum şekillerini ve basınç değişimini yakalamak için kullanmışlardır. Alev hızlarının ve basınç oluşumlarının, alev dalgalanmalarının ölçüm sonuçları ile uyumlu olduğunu görmüşlerdir. Kanal en-boy oranı etkisini; alevin şekil değişimi, alev yayılması ve basınç artışını sayısal modelleme yaklaşımı ile çalışmışlardır. Sayısal modelleme çalışmasında daha düşük en-boy oranına sahip kanal geometrisindeki analiz sonuçları daha iyi performans göstermiştir (Shen vd.,2021:606-615).

Fan ve arkadaşları çok ince yapılı kuvars kanallarda ölçüm sistemi ve alevin görüntülemesini geliştirmek için 0.7 mm, 1 mm ve 1.5 mm kanal derinliğine sahip üç farklı yakıcıda deneysel çalışmalar yapmışlardır. Deneysel çalışmalardaki üç farklı yakıcıda ön karışimli metan/hava karışımında alev yayılımını ve sönme sınırını gözlemlemişlerdir. Farklı ekivalans oranlarında ve karışım hızlarında yanıcılık sınırlarını ölçmüşlerdir. Deneysel çalışma sonucunda, mikro kanallarda sönme sınırının araştırılması için optik yapılı mikro yakıcıyı geliştirmişlerdir. Çok ince yapılı kanallarda alev sınırlarının daralması ile daha yüksek duvar sıcaklıklarına çıkıldığını görmüşlerdir. Kanaldaki duvar sıcaklığı alevin sönme sınırına bağlı olduğunu tespit etmişlerdir. Bundan dolayı kanal derinliğinin 0.7 mm'den küçük olduğu durumlarda duvar sıcaklığının 800 °C üzerinde uygun olduğunu bulgulamışlardır (Fan vd.,2019:3083-3090).

Xiang ve arkadaşları iç çapları özdeş üç farklı kuvars tüpünden Y şeklinde mikro yakıcı tasarlamışlardır. Ön karışimli hidrojen/hava ve ön karışimsız hidrojen/hava karışım alevinin yayılım davranışını, akış hızını ve yakıt/hava oranı kriterlerini deneysel çalışma yaparak değerlendirmişlerdir. Alevin sönmesi ve tutuşması sırasında altı farklı modda gözlemleri gerçekleştirmişlerdir. Karışımın yüksek hızda gerçekleşmesinin alevin yayılımını yukarı doğru çektiğini ve alevin yayılımı sırasında gürültü emisyonunun oluştuğunu göstermişlerdir. Deneysel çalışma sonuçlarında, karışım oranının artması ile alev yayılımının arttığını gözlemlemişlerdir. Ön karışimsız mikro yanmada alevin dinamik yapısının; karışım içeriğine, ısı yayılım oranına, akış hızına ve hava/yakıt oranına büyük ölçüde etkisinin olduğunu tespit etmişlerdir (Xiang vd.,2019:315-322).

Faik ve Zhang damlacık boyutu gelişimini ve damlacık boyutuna karşılık gelen alev boyutlarını incelemek için arkadan ışıkla aydınlatılan görüntüleme tekniğini kullanmışlardır. Damlacık yanma özellikleri %0.7, %10, %20 ve %30 oranında dizel/biyodizel karışimli yakıt katkıları, saf dizel (D100) ve saf biyodizel (B100) için incelemişlerdir. Damlacık boyutunun gelişimini MATLAB programında damlacık alanı kodu kullanılarak görüntü işleme yöntemiyle tespit etmişlerdir. Dizel yakıtının biyodizelle kullanımında yakıt tüketim miktarında azalma olduğunu tespit etmişlerdir. %0.7 ve %20 katkılı biyodizel karışımları diğer damlacıklara göre daha uzun süre yanmıştır. Saf yakıtlara kıyasla dizel/biyodizel yakıt karışımlarında damlacık büyümesinin meydana geldiğini fark etmişlerdir. Biyodizel miktarının artması karışımdaki damlacık büyümesini en kısa sürede oluşturduğunu fark etmişlerdir (Faik ve Zhang,2018:89-109).

Javed ve arkadaşları, alüminyum nanoparçacıkların eklenmesi ile heptan damlacıklarının yüksek sıcaklıkta kendiliğinden tutuşması ve yanma özelliklerini deneysel çalışma ile araştırmışlardır. Çalışmalarda saf heptan ve alüminyum-heptan karışımı yakıtların damlacık yanmasını dik boyutta bir ipe asarak yanma özelliklerini incelemişlerdir. Saf heptan damlacıklarının ve alüminyum-heptan damlacıklarının düşük sıcaklıkta tutuşma gecikmesi süresi azalmıştır. Düşük sıcaklıklarda (600-700 °C) heptan yakıt damlacığına %0.5 oranında alüminyum nanopartiküllerin eklenmesi ile tutuşma gecikmesi süresinin azaldığını tespit etmişlerdir. Heptan yakıtına %2.5 ve %5 oranında alüminyum nanopartiküllerinin eklenmesi tutuşma gecikmesi süresini arttırmıştır. Alüminyum nanopartikülün %2.5 ve %5'lik eklenmesi ile damlacık yapısında kabarcık oluşumu ve damlacık dağılması nedeniyle damlacık çapında önemli ölçüde azalma görmüşlerdir. Saf heptana katkı olarak alüminyum nanopartikül eklentisinde, alüminyuma ait ayrı bir alev oluşumu gözlemlenmemişlerdir (Javed vd.,2013:170-183).

Shang ve arkadaşları n-oktan, n-dodekan, n-tetradekan ve n-hekzadekan yakıtlarının normal yerçekimi şartları altında ve oda sıcaklığında yanma özelliklerini araştırmak için deneysel çalışma yapmışlardır. Damlacık askı sistemine asılarak küresel alevin zaman içerisindeki gelişimi ve görüntü işleme cihazlarını kullanarak deneysel sonuçları elde etmişlerdir. n-Alkan damlacıklarının tek bileşenli halde yanarken damlacık şekli tüm yanma süresi boyunca yarı küresel oluşumu sergilediğini gözlemlenmiştir. Çok bileşenli yakıt damlacıklarında yapılan testlerde damlacık çapında mikropatlama ve dalgalanma etkisinin fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Damlacık testlerinde çok bileşenli yakıt damlacıklarında karışım oranı, ısı özellikleri, mikropatlayıcı ve yoğunluğun yanma karakteristiği açısından önemli olduğunu bulgulamışlardır (Shang vd.,2020:16613-16623).

Yadav ve arkadaşları damlacık yanmasında anlık yanma hızını hesaplamak için kızılötesi termografi tabanlı bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada damlacık etrafındaki parçacıkların dağılımını incelemek için 4.25 µm dalga boyuna sahip bant geçirgen filtrelili kızıl ötesi kamera kullanmışlardır. Kızılötesi kameradan aldıkları görüntülerle çalışmanın sonuçlarını doğruladıktan sonra alüminyum oksit nanopartikülleri, metanol nanoakışkanın damlacık yanmasının karakteristik yapısını incelemek için uygulamışlardır. Çalışmanın genel sonuçları; alüminyum oksit nanoparçacıklarının düşük kütlelerde mikropatlama etkisi göstermediğini kanıtlamıştır. Alüminyum oksit nanopartikülleri kütleli artış ile yanma hızını arttırıcı yönde etki etmişlerdir (Yadav vd.,2021:105054).

Meng ve arkadaşları, havacılık yakıtı RP-3, biyodizel ve etanolün karışımı damlacıklardaki tutuşması, yanması ve mikropatlamalar üzerine deneysel araştırma yapmışlardır. Saf yakıtların içerisine havacılık yakıtı RP-3, biyodizel ve etanol yakıtı ilave yakıtlarından 9 farklı karışım yakıtı elde etmişlerdir. Taşınabilir damlacık test düzeneği üzerindeki damlacık askısına yakıtlar asılarak deneysel çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Güç kaynağı vasıtasıyla led ışık kaynağını damlacık üzerine yansıtılmışlardır. Yüksek sıcaklığa dayanıklı damlacık tel askısı ile ısı plakasının arasındaki mesafe 2 mm olacak şekilde yerleştirmişlerdir. Isı plakasının ısınması ile damlacığın yanmasını tek lensli refleks kamera ve yüksek hızlı kamera kullanarak damlacık yüzeyindeki değişimleri görselleştirmişlerdir. Tek lensli refleks kameradan alınan görüntüleri Adobe Premiere Pro yazılımında renkli görüntüleme tekniği ile işlemişlerdir. Farklı karışım oranlarındaki damlacıkların yanma süresinin saf yakıtlara göre daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Damlacıkların yanma sırasında gerçekleşen püskürtme, genişleme ve mikro patlamaların karışım halindeki damlacıkların yanmasını hızlandırdığını bulgulamışlardır. 6Biyodizel-1RP3-3Etanol karışımı yakıt damlacığının mikro patlamalara yatkın olduğunu tespit etmişlerdir. Biyodizel ve etanol karışımına ilave yakıt olarak havacılık yakıtı RP-3 eklentisi ile mikro patlamaların yoğunluklarını azaltmışlardır (Meng vd.,2020:115649).

Sun ve arkadaşları polietilen damlacık yanmasında mikro yerçekimi deneylerini uzay aracındaki erimiş termoplastiklerin yanma davranışını ve oluşabilecek yangın tehlikelerini araştırmak için yapmışlardır. Deneyleri yer çekimi seviyesinin  $10^{-3}$ - $10^{-4}$  g yerçekimi seviyesinde 3.6 saniye yanma süresince damlacık kulesi test düzeneğinde gerçekleştirmişlerdir. Yaklaşık 3 mm çapında üretilen damlacıkların yanmış haldeki polietilen tüpünde ayrıldıklarını görmüşlerdir. Damlacık kulesi test odasında led ışık paneli, yüksek hızlı kamera, polietilen tüpünü kullanmışlardır. Damlacık, polietilen tüpü içerisinde yanarak serbest düşmeye başladığında mikro yerçekimi ortamına 10-35 cm/s başlangıç hızı ile girdiğini gözlemlemişlerdir. Hareketli damlacıklarda köpürme olayını ve kuyruklu yıldız şeklinde alev oluşumunu yanma sırasında görüntü alarak kaydetmişlerdir. Polietilen damlacığının  $d^2$  yasasına göre uyumlu olduğunu ifade etmişlerdir. Kuyruklu yıldız alevinden içeri püskürtülen yakıtın toplam kütle kaybının yaklaşık 1/4'ü olduğunu tahmin eden bir gazlaştırma verimliliğini elde etmişlerdir (Sun vd.,2020:18-26).

## İKİNCİ BÖLÜM

### YANMA

Bu bölümde yanma, yanma teorisi, emisyonlar, alev ve alev yapısı hakkında genel bilgiler verilmiştir.

#### 2.1. Yanmanın Temelleri

Enerji tüketimindeki artışlar fosil yakıtlardan alternatif yakıtlara geçiş sürecine neden olmaktadır. Yanma biliminin amacı da kaynakları verimli kullanmanın yollarını geliştirerek yakma sisteminin performansını artırıp emisyonların salımını azaltmaktır. Yeryüzünde yaşayan insan ve diğer canlı organizmalar için sürdürülebilir gelecek adına yanma bilimi ve mühendisliği uygulamaları sürekli gelişim arz etmektedir. Yakıtların yanma reaksiyonlarının gerçekleşmesi ile ürünlerde oluşan emisyonların temelinde hidrojen, karbon, oksijen, azot, kükürt gibi atomlar yer almaktadır. Temelde yanma olayının gerçekleşmesi için yanıcı madde, ısı ve oksijen ortamının sağlanması gerekir. Yanma ortam şartlarına ve yakıcıya bağlı olarak değişken koşullar gösterebilmektedir. Bir maddenin hızlı oksidasyon süreci olan yanma için yakıtın, oksitleyicinin ve reaksiyon şartlarının sağlanması gereklidir (Yangaz,2018:1). Kimyasal açıdan reaksiyonlar çift yönlü yapıda olmayan tepkimeler içerir. Kimyasal reaksiyonlara en iyi örnek demirin oksitlenmesi sonucu paslanmasıdır. Yanmanın gerçekleşmesi için yakıtın kimyasal tepkimeye girip ortama ısı salımını olması gerekmektedir. Yanma reaksiyonları ekzotermiktir. Ekzotermik yanma reaksiyonlarında, ürünler tarafından ısı oluşumu yakma sisteminin gücünü de ortaya çıkarır.

İçten yanmalı motorlarda yanma odasındaki bujinin ateşlemesi veya enjektörün püskürtmesi sonucu yanma işlemi gerçekleşmektedir. Yanma işlemi gerçekleştiğinde motorun harekete geçmesinden itibaren yanma reaksiyonlarının dolaylı yoldan birer çıktısı olan motor torku ve güç parametreleri meydana gelmektedir. İçten yanmalı motorlarda yanma reaksiyonu temel anlamda iyileştirilerek; yakıt tüketimi ve emisyon oluşumunda iyileştirmelere gidilerek motor performansını artırıcı gelişmeler sağlanmıştır. Motor verimliliği bakımından dizel ve benzinli motorun çalışmasında; yanma odası içerisinde yanmanın gerçekleşmesinde ön-karışimli yanma ve difüzyon yanma şeklinde iki farklı yanma tipi meydana gelmektedir.

## 2.2. Yanma Reaksiyonuna Etki Eden Parametreler

Yanmanın birinci koşulu olan yakıt hava karışımının düşük yakıt miktarında ve tutuşma bölgesinde yanıcı karışımı sürekli olarak oluşturabilmesidir. Yanıcı karışımın gaz fazında olduğu yakma sistemlerinde bu sürecin homojen yanma formunda olması gerekir. Moleküler seviyede karışım için sıvı ve katı yakıtların yanıcılık faktörü, yakıtın yanmadan önce gaz fazına geçmesini gerektirir. Bu yanma tipi ise heterojen yanmanın belirleyiciliğini gösterir. Yakma sisteminin en zor ve pahalı olduğu aşama yanıcı karışımın oluşum sürecidir. Sıvı yakıtların uygun bir şekilde yanması, ön ısıtma bölgesinden sonra yakıtın atomizasyonu ve buharlaşmasını gerektirir. Katı yakıtların yanmasını iyileştirmek için yakıtın parçalanması, kurutulması ve uçuculara gazlaştırma işleminin yapılması gerekir (İlbaş ve Karyeyen,2012:171-176).

Yanıcı karışımın sıcaklığı, tutuşma sıcaklığı üzerinde olup yanma reaksiyonu başlatılır. Bu tanım tutuşmayı tanımlar. Yanma sonu açığa çıkan ısı, alev sıcaklığının üzerinde ise yeni oluşum sağlayan yakıt ile havanın karışımında sürekli tutuşmayı sağlar. Tutuşma süresi yakıtın bileşimine, moleküler yapısına, reaksiyon hızına, ortam şartlarına, karışım oranına, yakıt parçacığının ısı aktarımına, ön ısıtma bölgesine, atomizasyon ve brülörün özelliklerine bağlıdır. Bu nedenle yanma konusunda sıcaklık ölçüm çalışmaları yapılırken ortaya çıkan zorluklar kaçınılmazdır (Neuber vd.,1998:198-211).

Yanma davranışı, yanma odasında ya da brülör üzerindeki ortamda alev varlığının davranışdır. Yakıtın ya da yakıt hava karışımının yanarak ısıya dönüştüğü kısım yanma odasıdır. Bütün karışımların tutuşma ve yakma süreçlerinin yanma ile ilişkili olması alev yapısının oldukça karmaşık olduğunu gösterir. Alevin karışım odası içerisindeki dolgunluğu, ısıtma yüzeylerinin arasındaki alev temasının engellenmesi ve yakıt hava karışımının kararlı yapıda olması beklenir. Bundan dolayı, yakma sistemlerinin tasarımında göz önünde bulundurulacak parametreler; yakıtın türü ve yakıtın spesifik özellikleridir. Yanma odasındaki dolgunun yanma sürecine etkisi yakıtın spesifik özelliklerine göre iyi bilinmesi gereklidir.

## 2.3. Yakıtlar ve Yanma

Yakma sistemlerinin değerlendirmesini doğru bir şekilde yapmak için yanma parametrelerinin uygun koşullarda sağlanması gerekir. Yanma parametreleri açısından sıcaklık ve gazın bileşiminin önemi nedeniyle termodinamiğin kimyasal kısmını ilgilendiren bir durum söz konusudur. Yanma reaksiyonlarında açığa çıkan ısı, ürün sıcaklığının yükseltilmesi yönünden adyabatik alev sıcaklığına direkt etki etmektedir. Bundan dolayı

maddelerin oksijenle uygun tutuşma sıcaklığı altında kimyasal reaksiyona girmesi özellikle azotoksit ve karbonmonoksit oluşumları açısından önemlidir. Yanma reaksiyonlarının meydana gelmesi sonucunda ürünlerle birlikte kimyasal enerji ısı enerjisine dönüşür (Heywood,2018:1).

Yanmanın kimyasal reaksiyon kısmındaki önemli tanımlamaları da bulunmaktadır. Bu tanım; ısı oluşumu ya da ısı ve ışımının beraber oluşumunu sağlayan hızlı oksidasyon tepkimeleridir. Bir diğer tanım ise ısı oluşumunun az olması sonucunda hiç ışımaya yapmayan yavaş oksidasyon tepkimeleridir. Bu tanımlamalar çerçevesinde, yanmanın kimyasal açıdan önemli olması, yakıtın kimyasal bağlarla depoladığı enerjinin ısı enerjisine dönüşüp açığa çıkan enerjiyi kullanılabilir hale getirmesidir. (Yahya ve Doğu,2016:1-3).

Yanmanın kimyasal enerjiye dönüşümünde reaksiyonun oksitleyici ile gerçekleşmesi enerjinin açığa çıkmasını sağlar. Hidrojen ve karbon atomunun farklı bileşim yapıları itibariyle benzin içerisinde parafinik hidrokarbon, naftanik hidrokarbon, benzenik hidrokarbon ve etilenik hidrokarbon yapılarını barındırırlar. Benzin ham petrolünün çok yüksek sıcaklık seviyelerinde (yaklaşık 4500 K) ısıtılması, hidrokarbon parçalanmasında daha küçük yapıda oluşan hidrokarbonların yakıt üretim prosesinde üretilmesine kriting denir. Benzin yakıtının en önemli özelliği vuruntuya karşı gösterdiği dirençtir. Vuruntu direncini sağlayan temel etmen ise oktan sayısıdır. Oktan sayısının elde edilmesi için benzindeki benzenik hidrokarbon oranı önemlidir. Benzin kalitesini belirleyen unsurlar; benzenik hidrokarbon oranının yüksek olması ve parafinik hidrokarbon sayısının düşük olmasıdır. Vuruntu direnci yüksek olan bir yakıtın oktan sayısı yüksek olmaktadır. Yakıtın vuruntu direncinin artması ile motorun sıkıştırma oranı da artmaktadır. Benzin yakıtına vuruntuyu arttırmak için kurşun tetraetil, monometil anilin, demir pentakarbonil gibi maddeler ilave edilmektedir. Benzinin içerisine korozif ve aşınmayı önleyici olarak deterjan, pas önleyici ve fosfor bulunduran maddeler de bulunmaktadır (Yontar,2016a;32).

Yanma sonrası açığa çıkan egzoz emisyonlarındaki kirleticiler karbonmonoksit (CO), karbondioksit (CO<sub>2</sub>), hidrokarbon (HC), azotoksit (NO<sub>x</sub>), is ve küldür.

CO<sub>2</sub> emisyonları, küresel ısınma ve sera gazının meydana gelmesinde etkilidir. Sera etkisine atmosferde biriken CO<sub>2</sub> gazı neden olmaktadır. Atmosferde biriken CO<sub>2</sub> gazı güneşten gelen ışınları yerküreye hapsederek yerkürenin soğumasına izin vermez böylece sıcaklığın yükselmesine ve bunun sonucunda iklim değişikliğine yol açar.

Yakma sistemindeki CO emisyonlarının artmasındaki temel nedenler; yanma odasındaki karışımın homojenitesi ve oksijenin yetersizliğidir. Buna bağlı olarak CO oluşumu hava/yakıt oranının bir fonksiyonudur. CO emisyonları kokusuz ve zehirleyici özelliktedir. Bu özelliğinden dolayı fazla solunumu ölümcül etkilere neden olmaktadır.

Hidrokarbon emisyonları, yakıt içeriğindeki alt moleküler bileşiklerden oluşmaktadır. Yakma sistemi içerisindeki yanmayan hidrokarbonlar emisyon oluşumunun artmasına neden olmaktadır. Yakma sistemlerinde HC emisyonu, alev oluşumu sırasında yanmayan yakıtlardır. Zengin yakıt-hava karışımında karbon ve hidrojenin reaksiyona girmesiyle oksijenin yetersizliğinden dolayı ürünlerde HC ve CO emisyonlarının artışı görülür. HC emisyonunun artışına yanmanın kötüleşme durumu da etki etmektedir.

Atmosferde havanın %78'ini N<sub>2</sub> oluşmaktadır. NO<sub>x</sub> emisyonunun oluşumu yanma sıcaklığı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Serbest halde bulunan N<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub>'nin ortam şartlarında sıcaklığı artar, bu durum reaksiyona giren NO, NO<sub>2</sub> gibi yapıların oluşmasına sebep olur. Sıcaklık ve NO<sub>x</sub> emisyonundaki artışa ortamdaki oksijen seviyesi de aynı yönde etki eder. Geleneksel ve yeni nesil yakıtların karışımında yapılan hesaplamalarda karbon, hidrojen, oksijen, azot ve bor yakıtına ait elementlerin mol kütlelerinin bilinmesi gerekir (Yontar,2016b:55-56). Tez kapsamındaki kullanılacak olan yakıtların elementer yapıları, mol kütleleri ve simgeleri Tablo 2.1'de yer almaktadır.

**Tablo 2.1.** Yakıt Bileşenlerinin Elementer Yapıları

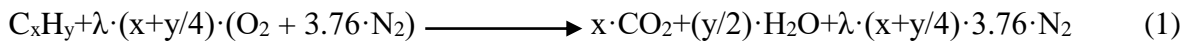
Element	Simge	Mol kütlesi
C	Karbon	12.011
H	Hidrojen	1.00784
O	Oksijen	15.999
N	Azot	14.0067
B	Bor	10.811

**Kaynak:** Element Simgesi,2022:a.g.i.s.

## 2.4. Yanma Teorisi

Fosil yakıtlar genel olarak doğada bulunan hidrojen ve karbon atomlarından oluşur. Yanma, yakıtın bulunduğu faz içerisindeki durumdan farklı olarak daima gaz fazında olmaktadır. Örneğin, yanmakta olan yakıt sıvı ise sıcaklığın artması ile gaz fazına geçiş sağlanır. Gaz fazında oksijenle reaksiyona girerek yanma olayı gerçekleşir. Yakıtların yanması gereği içerisinde barındırdıkları elementlerin hem kendi arasında hem de oksijenle olan etkileşiminde yanma reaksiyonunun gerçekleşmesini sağlar.

Yanma denkleminin hidrokarbon yakıtlarında yaygın kullanımı aşağıdaki gibidir:



Yakıtların yanması için gerekli oksijenin sağlanmasında hava kullanılır. Atmosferde bulunan havanın kuru haldeki hacimsel bileşimlerini; %20.94 O<sub>2</sub>, %78.08 N<sub>2</sub>, %0.93 Ar, %0.03 CO<sub>2</sub>, %0.02 diğer gazlar oluşturmaktadır. Atmosferde sürekli olarak su buharı ve diğer gaz bileşenleri bulunmaktadır. Yanma olayına etki etmeyen gazlar ise hava içerisinde oksijen dışında kalan gazlardır. Bundan dolayı yanma reaksiyonlarının stokiyometrik hesaplamalarında havada bulunan inert gazların birçoğu N<sub>2</sub> olarak kabul edilmektedir. Genel çerçevede yanma reaksiyonlarında havanın hacimsel olarak %21 O<sub>2</sub> ve %79 N<sub>2</sub> olarak hesaplamalarda kullanılır. Oksijen doğrudan yanma reaksiyonuna girer. Azot ise emisyon oluşumu sağlayarak tepkime sonunda baca gazı olarak geçiş yapar. Yanma reaksiyonun gerçekleşmesi için ihtiyaç duyulan oksijen miktarına stokiyometrik oksijen adı verilir. Stokiyometrik oksijen miktarının hesaplanmasında, yakıt içerisinde bulunan karbon ve hidrojen atomlarının bileşimi göz önüne alınarak yanma için gerekli minimum oksijen miktarı hesaplanır.

Hava-Yakıt oranı hesaplamalarındaki stokiyometrik hava; yakıtın yanması için gerekli oksijen miktarı kadar minimum havanın reaksiyona girmesi ile oluşur. Ancak uygulamada ise tam yanma şeklinde yanmanın meydana gelmesi ve hava miktarının hesaplanan değerden fazla olması gerekir. Yanmanın hava fazlalık katsayısı ile ilişkisinden bahsedilebilir. Hava fazlalık katsayısı teoremi, gerçek hava miktarının teorik hava miktarına oranıdır. Hava fazlalık katsayısı lambda ( $\lambda$ ) ile ifade edilir. Yakma sistemlerinin tümünde yanmanın oluşumu, yakıt ve oksitleyicinin reaksiyonuna bağlı olarak değişmektedir.

$$\lambda = \frac{(H/Y)_g}{(H/Y)_t} \quad (2)$$

H: Havanın kütlesi

Y: Yakıtın kütlesi

$\Phi$ = Eşdeğerlik Oranı

$$\Phi=1/\lambda \quad (3)$$

$\lambda=1$  Teorik Tam Yanma, Stokiyometrik Karışım

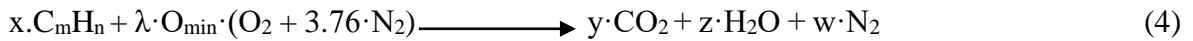
$\lambda<1$  Eksik Yanma, Zengin Karışım

$\lambda>1$  Tam Yanma, Fakir Karışım

Stokiyometrik şartlarda hava fazlalık katsayısı değerinin 1 olması teorik tam yanma olarak adlandırılır. Hava fazlalık katsayısı değerinin 1'den büyük olması ve yüksek miktarda havanın karışım odası içerisine girmesinden dolayı bu karışım fakir karışım ismini alır. Zengin karışımda ise hava fazlalık katsayısı değeri 1'den küçük olmalıdır. Hava fazlalık katsayısı değerinin 1'den küçük olması havanın az miktarda, yakıtın ise fazla miktarda karışım odasına alınmasıdır. Eksik yanma ürünlerinin oluşumu zengin karışımli yanma reaksiyonlarında görülmektedir.

Yanma çeşitlerini yakıt-hava karışımı sonucu yakıtın yanmasına kütleli, hacimsel ve molar değişim durumlarına göre genel olarak 4 grupta inceleyeceğiz. Bunlar; teorik tam yanma, eksik yanma, kısmi eksik yanma ve tam yanma olarak adlandırılır.

Teorik tam yanmada, yakıt moleküllerinin hava ile reaksiyona girmesi sonucu stokiyometrik yanma ürünleri oluşur. Stokiyometrik yanma ürünlerinde ise CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O ve N<sub>2</sub> şeklindedir. Teorik tam yanmanın gerçekleşmesi için gerekli olan hava miktarına teorik hava miktarı denir. Yanma tepkimeleri içerisinde gerçek hava miktarının teorik hava miktarına oranına hava fazlalık katsayısı denir. Lambda değerinin 1.00 olduğu durum teorik tam yanma için geçerlidir.



Tam yanmada, gerçek hava miktarının teorik hava miktarından fazla olması yani hava fazlalık katsayısı değerinin 1.00'den büyük olması gerekir. Tam yanma ürünleri içerisinde teorik tam yanmaya ek olarak O<sub>2</sub> oluşur.



Eksik yanma olayının gerçekleşmesi durumunda, yanmanın tam olarak gerçekleşmemesi nedeniyle yanma ürünleri içerisinde CO gibi eksik yanma ürünlerinin oluşumu gözlemlenir. Bundan dolayı hava fazlalık katsayısı 1.00'den küçüktür. Eksik yanma sonucu enerji kaybı oluşumunun önüne geçilmesi için yanmanın tam olarak gerçekleşmesi durumu göz önünde bulundurulmalıdır. Bunun önüne geçmek için ise teorik hava miktarından daha fazla miktarda havanın yakma sistemi içerisine gönderilmesi gerekir. Eksik yanma oluşumunun dezavantajları arasında yanma veriminin düşmesi, CO ve HC emisyonu oluşumunun artması ile yakıt sarfiyatı bulunmaktadır.



Kısmi eksik yanma, hava fazlalık katsayısı değerinin etkisinin göz ardı edilmesiyle yakma sistemi içerisinde karbondioksit ve su moleküllerinin ısıl ayrışımı sonucu CO, OH ve H gibi eksik yanma ürünlerini oluşturan yanma çeşididir. Moleküllerin sıcaklığının aniden düşmesi yeniden birleşme reaksiyonu tepkimelerinin oluşumuna gerekli zamanı bırakmaz ve reaksiyon içerisinde emisyon donma oluşumu meydana gelir. Bu nedenle yakma sistemi çalışırken eksik yanma ürünlerinin oluştuğu görülür.



Hidrokarbon yakıtlarının çeşitleri; parafinler, olefinler, asetilen, aromatikler ve alkoller şeklindedir. Kısmi eksik yanma reaksiyonları hidrokarbon yakıtlarının kimyasal yapıda bir araya gelerek farklı özellikte birçok yakıtın meydana gelmesini sağlar. Bu durum yanma davranışındaki yanma sonrası etkileri incelemeye yardımcı olmaktadır (Yontar,2016c:30).

Reaksiyon şartları gerçekleştikten sonra ortaya çıkan yüksek ısı salınımı ve emisyon oluşumu yanma teorisi ile açıklanmaktadır. Diğer yandan kimyasal reaksiyonların yanında akış teorisini de kapsamaktadır. Buna istinaden yanma olayı, fiziksel süreçlerin yanında kütle ve enerjinin taşınımına da dayanır. Isıl enerji iletimin kimyasal bileşenlerdeki difüzyonu ile gaz akış tepkimelerinin ekzotermik olarak kimyasal enerjinin serbest bırakılmasından dolayı ortaya çıkar. Kimyasal reaksiyon içerisindeki yanma reaksiyon mekanizmalarının tam olarak gerçekleşmesi için reaksiyon ortamı; yakıt ve oksitleyici adı verilen iki unsuru içermelidir. Yanma tepkimeleri kimyasal reaksiyonlar sonucu gerçekleşmektedir. Kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesi için yakıt ve oksitleyiciye ihtiyaç vardır. Bütün kimyasal reaksiyonlarda tepkime hızı, sistemin bulunduğu ortamın koşullarına göre değişim göstermektedir.

Yanma fiziğinin temelinde kütle ve enerji aktarımı vardır. Termal ısı transferi, yanma tepkimesinin ekzotermik reaksiyonu ile emisyon oluşumu sırasındaki kimyasal ayrışmalardan kaynaklanmaktadır.

Bir reaksiyonun sıcaklığa olan bağıllığı hız sabitini de kapsamaktadır. Bu durum basitçe Arrhenius formunda açıklanabilir.

$$k=A_e \cdot \exp(-E/RT) \quad (8)$$

$A_e$  terimi, bir moleküldeki kimyasal bağın yeniden düzenlenebilir hız faktörüdür.  $E_A$ , aktivasyon enerjisidir. Aktivasyon enerjisi, kimyasal tepkimenin reaksiyon şartlarının gerçekleşmesi durumunda aşılması gereken enerji miktarıdır.  $R$ , evrensel gaz sabitidir.  $T$  değeri ise reaksiyonun gerçekleşme hız sabitinin sıcaklığını kapsamaktadır.

Kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesi genel olarak tepkime hızının ölçüsüne ve ortamın bulunduğu şartlara bağlıdır. Reaksiyon şartlarının önemi; reaksiyona giren maddenin karışım konsantrasyonu, sıcaklık ve radyasyon etkisi, katalizör veya inhibitör varlığıdır. Reaksiyonun hızının belirlenmesinde, oluşan ürünün ya da maddenin konsantrasyonu bakımından reaksiyon karışım konsantrasyonundaki artma ve azalma hızı önemli rol oynar. Kimyasal reaksiyonun gerçekleşmesinde yanmanın etkili olması üç farklı zamana bağlıdır. Bunlar; akış süresi, reaksiyon süresi ve difüzyon yanma süresidir (Peleg vd.,2012: 830-851).

Yanma teorisi; termodinamik, ısı ve kütle transferi, kimyasal kinetik ve akışkanlar mekaniği gibi yan dallara da dayanmaktadır.

Termodinamiğin yanma üzerindeki etkisi; ısı, iş, sıcaklık ve enerji konuları arasındaki bağıntılar ile ilgilenecek gerekli teorik bilginin uygulanabilirliğini arttırıcı yönde olmaktadır. Sistem ve ortam faktörleri arasındaki sıcaklık farkından ortaya çıkan enerji akışına ısı, basınç farkından ortaya çıkan enerji akışına da iş denir. Bir sistemden madde girişi ve çıkışının termodinamik yasalarına göre hesaplanabilir olması gereklidir. İçten yanmalı motorlardaki yanma odasında yakıtın püskürtülmesi veya ateşlemesi sonucu krank piston biyel mekanizması hareketinin araç tekerleklerine kadar iletimi termodinamik bilimiyle ilişkilidir. Öte yandan kimyasal dengenin reaksiyona giren yakıt ve oksitleyiciler yardımıyla ürünlerin oluşmasında termodinamik yasaları etkilidir.

Geniş bir alana sahip olan yanma bilimi, yakıtların akış teorilerinin incelenmesi için akışkanlar mekaniğine ihtiyaç duymaktadır. Ortam şartları göz önünde bulundurularak

akışkanın yapısının iyi bilinmesi şarttır. Yakıt pompasından çekilen yakıtın yakıt boru hattından enjektör uç kısmına kadar püskürtmesinin sağlanması akışkanlar mekaniğini ilgilendiren kısımdır. Diğer yandan Meker-Fisher bekinde LPG yanmaya devam ederken TEB katkılı yakıtın enjektörden püskürtülmesi sonucu sıvı yakıtın LPG tarafından taşınımı sayesinde Meker-Fisher beki üzerinde yanma olayının farklı bir hal alması da akışkan yapıların hız ve basınç içeren teoremlerini kapsamaktadır.

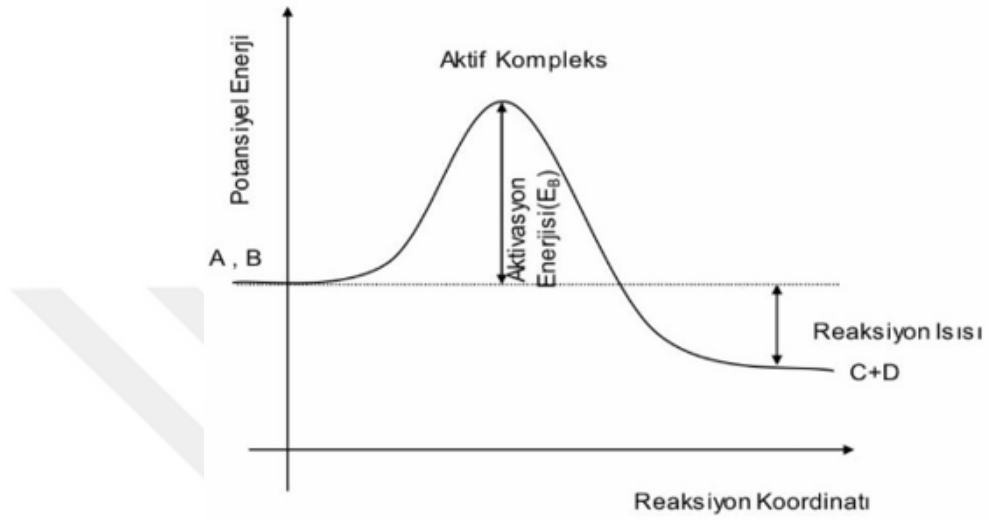
Yakma sisteminde, bek malzemesi yüzeyindeki ısının iletimi için sistem şartlarının uygunluğu sağlanmalıdır. Bek üzerindeki yakma işlemi ısı ve kütle transferi ile gerçekleşir. Bunun sonucunda yüksek sıcaklıklar ve emisyonlar oluşur. Oluşan emisyonlar ısı salınımı üzerinde artışa neden olmaktadır.

Kimyasal reaksiyonların gerçekleşme hızına dair reaksiyon mekanizmasını kimyasal kinetik incelemektedir. Oksitlenme reaksiyonları yavaş yürüyen reaksiyon mekanizmasında yer almaktadır. Patlamalar ve yanma reaksiyonları hızlı gerçekleşen reaksiyon mekanizmalarıdır. Mesela demirin paslanması yavaş yürüyen reaksiyon mekanizmasına,  $H_2$  ve  $O_2$ 'nin yanma reaksiyonuna girmesi ise hızlı gerçekleşen reaksiyon mekanizmasına örnektir. Genel çerçevede kimyasal kinetik; reaksiyon hızını, reaksiyon hızını etkileyen faktörleri, reaksiyon mekanizmasını, reaksiyon-zaman ilişkisini, reaksiyonun durumunu değiştiren şartları ele almaktadır. Kimyasal reaksiyonların çoğunda reaktant yapısında bulunan ürünlerin oluşum adımları birden fazla tepkime çerçevesinde gerçekleşmektedir. Reaksiyon son adımda dengeye gelmişse kimyasal kinetik süreç bitmiştir. Reaksiyonların gerçekleşmesi sırasında arka arkaya basit reaksiyon dizileri oluşur. Reaksiyon dizilerinin sıralanması reaksiyon mekanizmasını vermektedir.

Genel reaksiyon mekanizmasında gözükmeyen fakat reaksiyon sırasında oluşum gösterip sonrasında ise daha hızlı yürüyen bir reaksiyon tarafından tüketilen maddelere ara ürün denir. Kimyasal kinetikte moleküler düzeydeki elementler hiçbir zaman ara ürün oluşturamaz. Çarpışmaların gerçekleştiği reaksiyonlarda çok küçük yapıları ürün oluşumu etkin çarpışmaya işaret eder. Etkin çarpışmada reaksiyona girenler birbirine doğru yaklaşırken ara kısımda oluşan elektronların itme kuvvetini yenmelidir. Çarpışmanın sağlanmasında ise yeterli kinetik enerji ve reaksiyondaki geometrik yapıların uygun açıda olması gerekmektedir. Reaksiyona girenler yeteri kadar kinetik enerjiye sahip olmayan moleküllerin itme kuvvetlerini yenemezlerse ürün oluşmaz. Ürünlerin oluşum şartları; yeteri

kadar yüksek kinetik enerji, uygun molekül açısı ve uygun açının bulunduğu yönden çarpışmalardır.

Reaksiyona girenlerin etkin çarpışmasında ürün oluşumundan önce çok kısa süreliğine aktifleşmiş kompleks yapı oluşumu görülür. Aktifleşmiş kompleksin enerjisi girenlerin ve ürünlerin enerjisinden daha büyüktür.



Şekil 2.1. Reaksiyon Koordinatı

**Kaynak:** Elbasuney,2019:721-729.

Bir reaksiyonun aktivasyon enerjisi artarsa reaksiyon yavaş yürür. Çünkü, moleküllerin enerjisi aktivasyon enerjisinden küçüktür. Reaksiyonun sıcaklığını arttırıldığında ileri ve geri reaksiyon adım hızları da artmaktadır. Reaksiyon hızı, birim zamanda girenlerin ya da ürünlerin değişimidir. Tepkimeye giren maddelerin yapısı, fiziksel hal, boyut, konsantrasyon, sıcaklık, katalizör ve basınç reaksiyon hızını etkileyen faktörlerdendir. Kimyasal kinetik-yanma ilişkisinde yakıtın yanması sonucunda yanma reaksiyonu üzerindeki etkisini yorumlamak gerekir. Aynı zamanda reaksiyon şartlarının gerçekleşmesi karışım oranını ve denklem şartlarını belirlemede yardımcı olmaktadır.

## 2.5. Alev ve Alev Yapısı

Yanmadaki fiziksel süreçler kütle ve enerji aktarımı ile ilgilidir. Isı enerjisinin iletimi, kimyasal bileşen difüzyonu ve gaz akışının kimyasal reaksiyona girmesinden açığa çıkar. Kimyasal reaksiyonlar yakıcı ve oksidant olmak üzere iki unsuru ele alır.

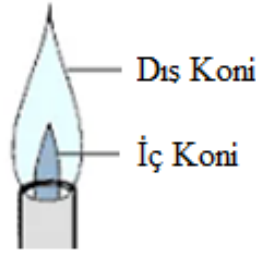
Yanmanın olduğu bölgenin bilinmesi için iki tip olaydan bahsedilir. Bunlardan birincisi geçiş bölgesi boyunca basınç oluşumu ve yoğunluğun arttığı vuruntular, diğeri ise geçiş bölgesi boyunca basınç oluşumu ve yoğunluğun azaldığı deflegrasyonların yapısının yanma dalgası ve alev üzerindeki durumudur.

Gazın bir tüp içerisine konup reaksiyonun belli bir yerden başlaması tüp içindeki yanma dalgasını meydana getirir. Yanma dalgalarının genel adına alev denir. Alevin oluşum bölgesi ışık içeren reaksiyon bölgesi, ekzotermik bir reaksiyon sonucu kendi kendine ilerleyerek meydana gelir. Alev cephesini terkeden yanmış gazın hızı, başlangıçtaki reaktant gazın hızına göre daha yüksektir. Bir diğer etken olarak alev cephesini terkeden yanmış gazın düşük yoğunluğu ve basıncıdır. Boyutsal olarak aynı tüp içerisindeki hatta, reaktant gazın alev cephesine doğru ilerleyişi sabit hızdaysa alevin sabit boyutta olduğunu görürüz. Alev yayılım hızında, karışımın fiziksel ve kimyasal özelliği ile ortamdaki türbülansın şiddeti etkilidir. Yanmanın herhangi bir noktadan kütleli akış ile başlaması, kütleli akış debisini kütleli debiye eşitleyen kararlı bir alev davranışını sergiler.

Yanmanın ana esasında, yakıt ve yakıcı karışımının moleküler seviyede olması gerekmektedir. Bu durum türbülanslı yanma olayında yakıt ve yakıcının türbülanslı karışıma bağlılığını gösterir. Geniş aralıkta iç kısımdan dış kısma doğru akışın gerçekleşmesinde farklı büyüklükteki Eddy yapıları etkilidir. Bununla birlikte Eddy'ler ara yüzeylerdeki gerinim ve kayma teorisine dayalı karışım oluşumunu sağlar. Karışımındaki Eddy yapılarındaki parçalanmaların giderek artması esnasında oluşan küçük boyuttaki Eddy'lerin gerinim ve kayma hızı artar. Gerinim ve kayma hızının artması reaksiyona giren yakıt ve havanın yanmaya başlamadan önce ara yüzeydeki kontrasyon gradyanlarındaki yükseliştir. Böylece moleküller arasındaki difüzyonun oluşumu da artar. Yanmanın sağlanmasındaki temel durum moleküler seviyede yakıcı ve yakıtın yanmasıdır. Yanma sonrasında ise küçük Eddy yapıları arasında ara yüzey bölgeleri oluşur.

Alevin reaksiyona girmesi sonucu yanmış gazlar oluşmaktadır. Alevin yanmasında yanıcı olarak gaz fazındaki yakıt, diğer yandan da yakıcı olarak oksijen varlığı etkilidir. Azot, CO<sub>2</sub> ve diğer yanıcı gazların yanma tepkimesine katılmaması yakıtın oksijenle

reaksiyonunu zorlaştırır. Sürekli formda oluşan yanma reaksiyonunda, alev içerisinde ısı ve kütle transferini aynı anda gerçekleştirir.

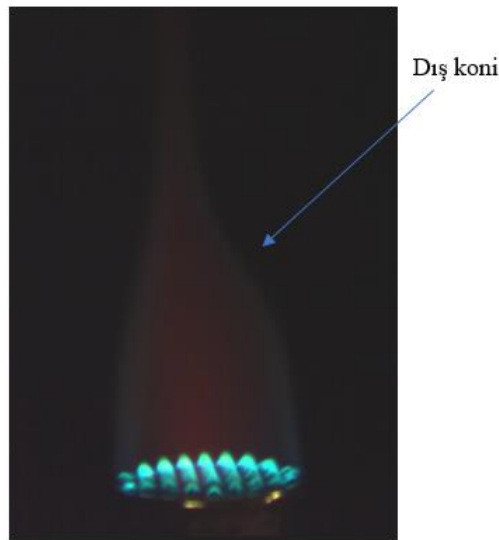


**Şekil 2.2.** Alevin Genel Yapısı

**Kaynak:** The Editors of Encyclopaedia, 'Bunsen burner', 2022:a.g.i.s.

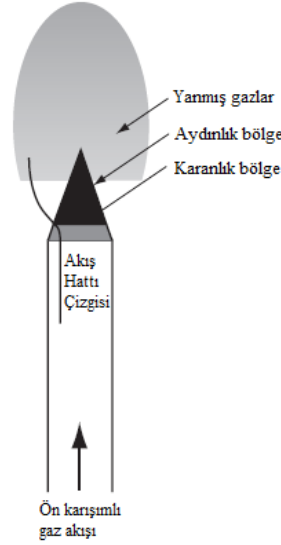
Dış koni, yanmış gazlar ve atmosfer arasında ortaya çıkan difüzyon alevinden oluşur. Reaksiyon süresince birçok yakma sisteminde reaksiyonun başlayıp tutuşması ile yanmanın başlamasına kadar geçen zaman tutuşma gecikmesi olarak ifade edilmektedir. Soğuk alev, tutuşma gecikmesi öncesi safhada meydana gelmektedir. Soğuk alevler genel olarak girenlerin etkin olduğu fakat ürün dönüşümünün az olduğu alevlerdir. Aynı zamanda reaksiyonun tamamlandığı alev tipidir.

İç koni alevi yakıtça zengin gazlardan oluşmaktadır. İç koni alevi boyunca sıcaklığın artması ile ürün konsantrasyonunda artışlar görülür. Buna karşın, yakıt moleküllerinin yanma tepkimesine girmesiyle de moleküler derişiminde azalmalar meydana gelmektedir.



**Şekil 2.3.** Ön Karışım Alevde Dış Koni Görüntüsü

Meker-Fisher bekinde ön karışimli alevden alınan görüntülerde bek parçasının üst kısmında delik sayısının fazla olmasından dolayı deneysel çalışma kapsamında iç koni oluşumu görülmemektedir.



**Şekil 2.4.** Yakıcı Alevin Genel Görünümü

**Kaynak:** Glassman vd.,2018a:151-152.

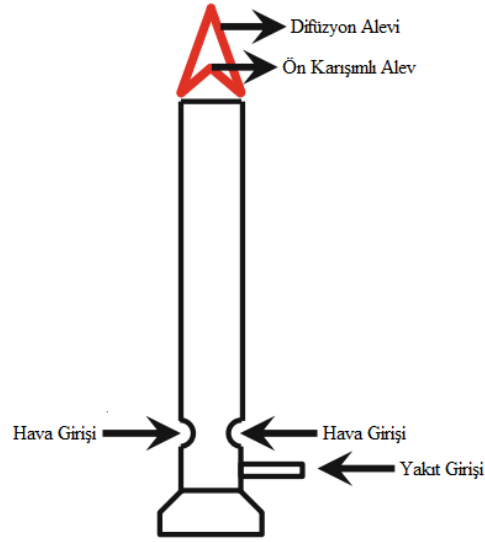
Yakıcı alevin genel yapısını incelersek yakıt ve hava, yakıcı hattı üzerinden yukarı doğru akarken homojen karışım halindedir. LPG'den çıkan akış hızı laminer boyuttadır. Yakıcı hattı duvarı üzerindeki akış hızı düşüktür. Akış hızının düşük olması alevi stabilize etmede yardımcı olur. Alev stabilizasyonu etkisi ısı kaybında önemlidir. Şekil 2.4'deki yakıcı alevin genel görünümünde karanlık bölge, ısı salınımının ve reaksiyon şartlarının gerçekleştiği kısımdır. Karanlık bölge, aydınlık bölge alanına girmeden önce yanmamış ön karışimli gazlardır. Aydınlık bölge üzerindeki sıcaklık spesifik olarak en yüksek değerdedir. Aslında aydınlık bölge bakımından reaksiyonun gerçekleşmesi ve ısı salınımının çoğu bu bölgede olur. Yakıt-hava oranına bağlı olarak aydınlık bölgenin rengi değişmektedir. Fakir karışimli yakıtların hidrokarbon-hava karışımında uyarılmış haldeki CH radikallerinden dolayı koyu mor ışınım ortaya çıkmaktadır. Karışım yakıtça zengin olduğunda ortaya çıkan yeşil ışınım, uyarılmış haldeki C<sub>2</sub> molekül yapılarından kaynaklanır. Yüksek sıcaklıktaki yanmış gazlar, genel olarak CO<sub>2</sub> ve su buharının yayılımından kaynaklanan koyu kırmızimsı alev rengindedir. Zengin karışımın daha da artması halinde alev rengi yoğun sarı renkte ışınım gösterir. Alev yayılımının sürekli olması katı karbon parçacıklarının miktarına bağlıdır. Karbon içermeyen mekanizmalarda hidrojen-hava karışımı alevi neredeyse görünmez durumdadır. Hidrokarbon oksidasyon mekanizmalarının temeline dayanarak alevi

üç bölgeye ayırmak mümkündür. Bunlar ön ısıtma bölgesi, reaksiyon bölgesi, rekombinasyon bölgesidir. Reaksiyonun gerçekleşmesi yönünden ara ürünler, CO ve H<sub>2</sub>'nin tüketildiği bölgede oluşmaktadır. Metan gibi çok kararlı bir yapıya sahip molekülün alev içerisinde kalma süresi çok kısadır. Metan alevinin oluşumunda emisyon oluşumu ve ısı ayrışmalar görülebilir ya da hiç görülmez. Ancak, doymuş hidrokarbon yapılarından birçoğunun oluşumunda önemli azalmalar görülür. Reaksiyon bölgesinden ayrılan yakıtlar esas alınarak olefin, hidrojen ve alt hidrokarbonlar meydana gelir. Yüksek alev sıcaklıklarında yanma hızına bağlı olarak doymuş hidrokarbonların artması gerekir. Reaksiyon bölgesinin alev bölgesi boyunca değişimi, yanmamış gazın alev bölgesine taşınımıyla akışı ve yüksek sıcaklık reaksiyon bölgesinden gelen radikallerin taşınmasıyla belirlenmektedir. Bu eğilimde hidrojen atomunun difüzyonu hakimdir. Düşük sıcaklıktaki ön karışım ısıtma bölgesinde önemli miktarda HO<sub>2</sub> yapılı moleküller oluşur. Ön ısıtma bölgesindeki sıcaklıkların düşük olması reaksiyon içerisindeki HO<sub>2</sub> yapılı radikallerin ilerleyişini kolaylaştırır. Bu sıcaklık değerlerinde zincir dallanma yapılarını görmek mümkün değildir. HO<sub>2</sub>'den sonra oluşması istenen bileşik hidrojen peroksittir. Hidrojen peroksit (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), ön ısıtma bölgesindeki yüksek sıcaklıktaki OH radikallerinin oluşturduğu reaksiyon bölgesine taşınır (Glassman vd.,2018b:151-153).

Reaksiyon bölgesinin ilk bölümünde O ve H'nin geniş kapsamlı konsantrasyonu nedeniyle yakıtın kütlece azalması beklenir. Reaksiyon bölgesinin son kısmı, ara yakıt moleküllerinin tüketildiği ve CO'nin CO<sub>2</sub>'e dönüştüğü bölgedir. Rekombinasyon bölgesi, yanmış gaz veya alev sonrası bölgeye karşılık gelir. Rekombinasyon reaksiyonları ekzotermik reaksiyonlardır. Buna rağmen yeniden birleşen radikaller yüksek konsantrasyona sahiptir.

Reaksiyon sisteminde bir yanma dalgasının ses hızından büyük hıza ulaşmasına ya da yüksek hızda bir dalgaya dönüşümüne detonasyon denir. Detonasyon dalgalarının reaksiyonu başlatması için basıncın çok yüksek seviyede olması veya şok dalgasının ilerlemeye başlaması gerekir. Şokun arka kısmındaki reaksiyon bölgesindeki enerji şoka yardımcı olarak şokun ilerleyişini sağlar. Yanma bölgesinde detonasyon ve deflegrasyon denilen iki tip olaydan bahsetmek mümkündür. Detonasyonlar, yanma bölgesi boyunca basınç ve yoğunluğun artmasıdır. Deflegrasyonlar, geçiş bölgesi boyunca oluşan basınç ve yoğunluğun azalmasıdır. Alev cephesini terk eden yanmış bir gazın belirleyici özelliği; girenlere göre daha yüksek hıza, düşük basınca ve yoğunluğa sahip olmasıdır. Alev tipleri, laminar alevler ve türbülanslı alevler olmak üzere ikiye ayrılır. Laminar ve türbülanslı

alevler de kendi içinde ön karışımli alevler ve difüzyon alevleri olmak üzere iki kısımda incelenmektedir.



**Şekil 2.5.** Ön Karışımli ve Difüzyon Alevi Gösterimi

**Kaynak:** Zhang,2017a:5.

Ön karışımli alevler, yakıt ve oksidantın herhangi bir bölgede karışıp yanmanın meydana gelmesini içerir. Reaksiyona giren gazların mükemmel bir şekilde karışım oluşumu sergilemesinden dolayı ortaya çıkan alev yapısına ön-karışımli alev denir. Yakıt ve oksitleyicinin karışımı Meker-Fisher beki içerisine gönderilmektedir. Meker-Fisher bekinde alevin oluşması için ateşleyici kaynak tarafından ön karışımli yanma reaksiyonu başlatılır. Alev cephesinin ön karışımli reaksiyon bölgesinde yanmış gazların etkisi ile iletimle ısı transferi gerçekleşir. Reaksiyon bölgesinin oluşması için yakıt ve oksidant karışmalıdır. Reaksiyon ürünlerinin bulunduğu yer alev cephesinin ön kısmıdır. Yanma sisteminde reaksiyonların gerçekleşmesi için ısı ve kimyasal reaksiyon özellikleri önemlidir. Eğer yakıtın ve oksitleyicinin akış hızı yanma hızına eşitse alev stabil yapıdadır. Difüzyon alevlerde yanma işlemi sırasında yanabilir karışımın oluşabilmesi için yakıt ve oksidantın yerleri ayrıdır. Karışım odası içerisinden sadece yakıt çıkışı yapılmaktadır. Yani ilk olarak ayrı ayrı akış gösteren iki gazın oluşumu esnasında orta yüzeyde beliren alevdir. Meker-Fisher bekinde bu durum hava giriş bölgesi kapatılarak difüzyon yanma reaksiyonu gerçekleştirilmektedir. Yakıt ve oksidantın görüldüğü bölgeye sınır bölge denmektedir. Sınır bölgede yanma gerçekleşmeden önce kimyasal reaksiyon çok hızlıdır. Reaksiyona giren yakıtın ve oksidantın yerlerinin ayrı olması reaksiyon ürünleri oluşum bölgesi sınırlarının kenar kısımlarına yayılmıştır. Difüzyon yanmada alev yayılımı, alev tepmesine karşı yanma

sisteminin güvenilirliği ve yanma davranışının kararlı yapısından dolayı önemlidir. Mum alevi difüzyon yanmaya örnektir.

Bek üzerinde atmosferik ortam şartlarında gerçekleşen ve stabil davranış gösteren aleve laminer alev denir. Laminer alevin yanma hızı yavaştır. Çünkü laminer alevin oluştuğu reaksiyon bölgesi ince kesitli bir yapıya sahiptir.

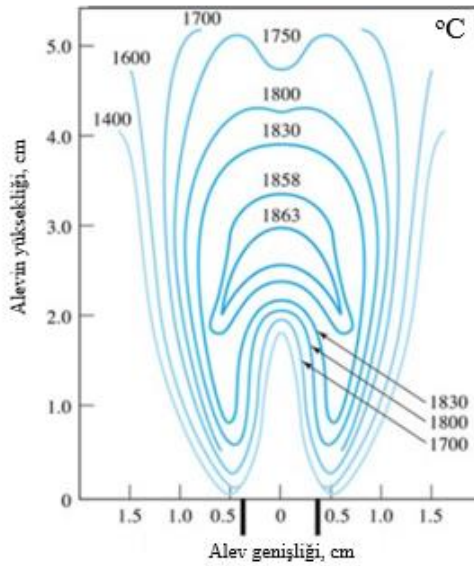


**Şekil 2.6.** Difüzyon ve Ön Karışımli Yanmanın Deneysel Görüntüsü

Ön karışımli ve difüzyon alevlerinde sistemin akış özellikleri önem arz etmektedir. Türbülanslı ya da laminer akış bölgesi alev davranışını belirlemektedir. Akışın laminer ya da türbülanslı koşulda olması yüzey sürtünmesi ve ısı transfer oluşumunu etkiler. Bu noktada ısı salınımından emisyon oluşum sürecine kadar birçok bölgede farklı davranışlar sergilenir. Ön karışımli ve difüzyon alevinin yapısı yakma sistemlerinde etkilidir. Türbülanslı akım yakma sistemlerinde akışa ait alev davranışının incelenmesinde yardımcı olmaktadır. Üç boyutlu ve zamana bağlı türbülanslı akımlarda farklı değişkenlikler söz konusu olabilmektedir. Alev stabilizasyonunu normal şartlar incelemek yerine yüksek türbülans şartlarında incelemek alevin yorumlanması konusunda ivme kazandırmaktadır. Yüksek türbülans, alev bölgesinde yüksek ısı transferine ve sürtünme kayıplarının oluşmasını sağlar. Türbülanslı alev yapısının istendiği diğer alev tipi difüzyon alevleridir. Türbülanslı alevlerin yanma koşullarında belirlenen akış bölgelerinin alevin yerine ve tipine göre farklılık arz etmektedir.

Yanma sisteminde yakıcılarda alev yapısını incelemek istersek, alev yüzeysel dağılımına bakılmalıdır. Ön karışımli alevlerde hava ve yakıtın aynı bölgeden karışımı ve difüzyon alevinin ise farklı bölgelerden karışımı sağlanmaktadır. Bu alev tiplerinde karışım

oranına göre alev yüksekliğini görmek mümkündür. Alev yapısının yatay ve dikey bölgelerinde yüzeysel sıcaklık değişimleri görülmektedir. Alevin en üst bölgesinde zengin hava-yakıt karışımı hakimdir. Zengin yakıt hava karışımı ile fakir yakıt hava karışımı bölgeleri arasında olan alev cephesinde stokiyometrik şartlarda yanma gerçekleşmektedir. Sıcaklık değerinin en yüksek olduğu alevin en üst bölgesinde yakıt/hava karışım oranı 1'den küçüktür. Yakıt-hava karışım değerinin 1'den büyük olduğu alev alt bölgesidir. Alev alt bölgesinde sıcaklık düşük seviyededir.



**Şekil 2.7.** Alev Sıcaklığının Yüzeysel Dağılımı

**Kaynak:** Prof. Dr. Bilsen Beşergil, Atomik Spektroskopi; Alev, Absorbsiyon, Fluoresans (alev, absorpsiyon, fluoresans) blog sayfası:a.g.i.s.

Alev yapılarındaki karışım oranına göre değişimler sıcaklık ve alevin boyunu etkilemektedir. Alevi aydınlık bölge, karanlık bölge ve yanmış gazlar olarak bölgelere ayırdığımızda ısı salınımı, alev yayılımı ve emisyon salınımı faktörlerinin etkileri incelenebilmektedir.

## 2.6. Alev Hızının Temelleri ve Ölçümleri

Alev ekzotermi gösteren ve ışığa sergileyen bir reaksiyon bölgesine verilen addır. Diğer bir ifade ile alev, yanma hızı denilen karakteristik hızın stajyoner bir hızla ilerleme durumudur. Alevin iç yapısını incelediğimizde, alev boyunca sıcaklıkta kademeli bir artış görülmektedir. Sıcaklık artışı ürün konsantrasyonlarındaki artıştan kaynaklanmaktadır. Buna karşılık alev boyunca yakıt moleküllerinin miktarında bir azalma görülmektedir.

Ön karışimli alevlerde yanma hızı ve adyabatik alev sıcaklığı ölçülebilir. Alevin yanma hızı, düşük basınç ve yüksek sıcaklıkla artmaktadır. Yanma hızı, teorik tam yanma koşullarına yakın bölgede en yüksek değerdedir. Alevin yerini bulmak için alev hızının alev cephesine dik bileşeninin yanma hızına eşit olduğu noktanın tespit edilmesi gereklidir.

Alevin kararlı yapısı akış hızı sınırlarına bağlıdır. Alev tepmesi, yanma hızının gaz akış hızını geçerek yakma sisteminde bek içerisine doğru ilerlemesidir. Alevin yükselmesi için alev hızı arttırılmalı ve alev cephesindeki soğuk kenarlardan uzaklaşma sağlanmalıdır. Bekten alevin uzaklaşması durumunda karışım fakirleşir, yanma hızı düşer. Bu nedenle alevin yükselişi devam ederse alev yapısının davranışı kararsızlaşır. Karışımın yakıt miktarı alevin davranışını belirlemek açısından önemlidir. Çok zengin karışım içerisinde gaz akışı yüksektir. Atmosferik hava ile karışımın teorik tam yanma koşullarına yaklaşması beklenir.

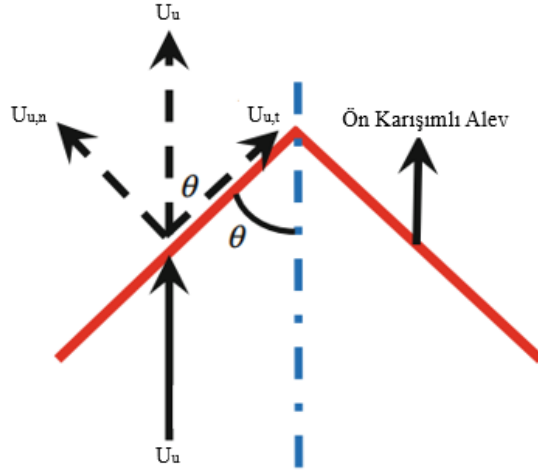
Kritik bek çapına soğuma çapı denir. Soğuma çapı basınçla ters orantılıdır. Difüzyon ve ısı iletim hızı da basınçla ters orantılıdır. Yanma hızındaki artış, küçük soğuma çapından kaynaklıdır. Türbülanslı akışta alev kenarları bekin kenarlarından uzaklaşarak daha fazla yayılım göstermektedir. Tutuşma noktası, ön ısıtma bölgesi ile reaksiyon bölgesi arasındaki geçiştir. Tutuşma noktasından sonra reaksiyon yüksek hıza ulaşır.

Laminer alev hızlarını üç farklı kategoride incelemek mümkündür. Bu kategoriler şunlardır:

- Termal teoriler,
- Difüzyon teorileri,
- Kapsamlı teoriler.

Ön karışimli laminer alevin yanma hızının önemini anlamak için yapılan çalışmalardaki temel zorlukların nedeni alev yapısının stabil olmamasından kaynaklanmaktadır. Alevin yukarı doğru yayılım şeklinin kavisli olması halinde akış düzgün yapıda değildir. Bu nedenle anlık alev hızından bahsedilebilir. Anlık akış çizgilerinin yer aldığı şekilde yukarı akışlı alevin yanmamış karışımının alev cephesine ( $U_u$ ) yanmamış alev hızıyla ve yanmamış alev açısıyla yaklaşır. Alev reaksiyonunun gerçekleşmesi ile alev yapısı ayrışmaya uğramaktadır. Alev yapısı ayrışmaya uğradıktan sonra yanmış karışım alevi ile alev bölgesini terk etmektedir. Bu sebeple alevin akış bölgesini geçerken kütleli akının değeri normal yönde, hız sürekliliği ise teğetsel yönde olmalıdır.

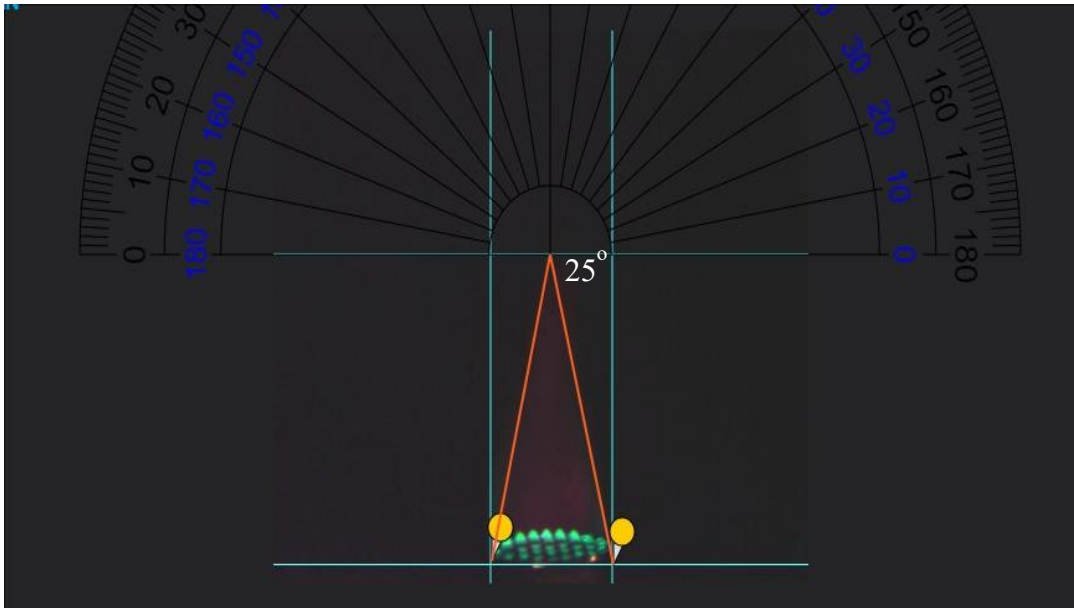




**Şekil 2.9.** Ön Karışımli Yanmada Alev Açısı

**Kaynak:** Zhang,2017b:5.

Alev açısının ölçümü, Ginifab görüntü işleme programında işlenerek elde edilmiştir. Meker-Fisher beki konfigürasyonunda alev açısı, dış konideki alevin yapısına göre değerlendirilecektir. Bek alevinin üst kısmında dış koni alevi etkindir. Dış koni alevinin sıcaklığı etkilemesi ile brülör kenarlarına doğru ısı kaybı oluşur. Alev açısı ölçümünde bekin kenar kısımlarından alevin uç kısmına doğru çizgi çekilmiştir. Meker-Fisher beki üst bölgesinin çap değerinin 40 mm ölçüde olmasına dikkat edilmiştir.



**Şekil 2.10.** Alev Açısı Ölçümü

## 2.6.2. Alev Alanı Yöntemi

Alev alanı, bek alevinin yayılım gösterdiği alev bölgesinin alanıdır. Alev yüzeyinde alev alanı teorik hesaplamada aşağıda verilmiştir.

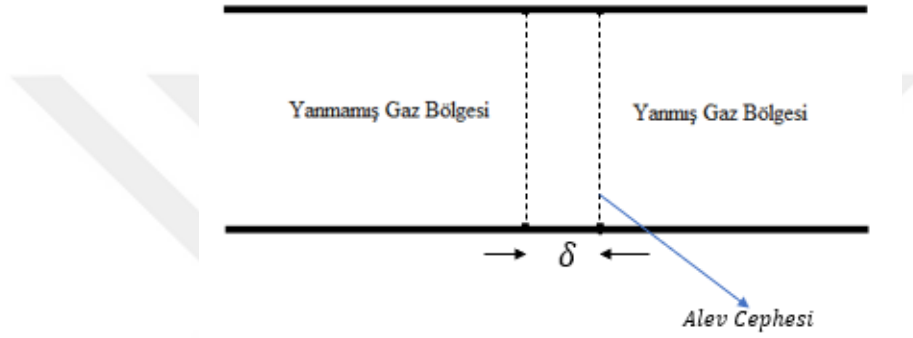
$$Q = \rho_0 \cdot s_L \cdot A \quad (10)$$

Q = Hacimsel debi

A = Alev alanı

$s_L$  = Laminer alev hızı

$\rho_0$  = Yanmamış gaz yoğunluğu



Şekil 2.11. Alev İlerleyiş Bölgesi

Yanmış ve yanmamış gazlar arasında alevin ilerleyişinde alev yayılımını incelemek için süreklilik, momentum, enerji ve hal denklem takımları sırasıyla aşağıda yazılmıştır.

$$\rho_1 \cdot u_1 = \rho_2 \cdot u_2 \quad (11)$$

$$P_1 + \rho_1 \cdot u_1^2 = P_2 + \rho_2 \cdot u_2^2 \quad (12)$$

$$C_p \cdot T_1 + \frac{1}{2} \cdot u_1^2 + q = C_p \cdot T_2 + \frac{1}{2} \cdot u_2^2 \quad (13)$$

$$P_1 = \rho_1 \cdot R_1 \cdot T_1 \quad (14)$$

$$P_2 = \rho_2 \cdot R_2 \cdot T_2 \quad (15)$$

Alev alanı bölgesi Adobe Photoshop CS6 programında renk ayrışımı yöntemiyle hesaplanmıştır. Alev alanı hesabında Meker-Fisher beki üst kısmındaki çap değerinin 40 mm ölçüsünde olmasına dikkat edilmiştir.

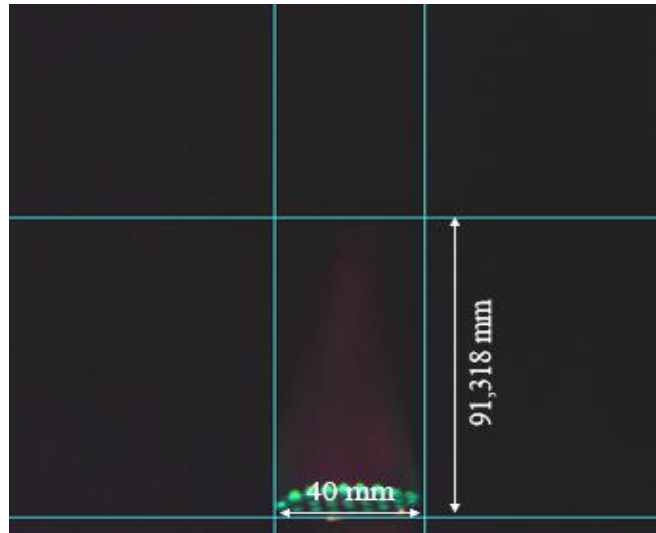


Şekil 2.12. Alev Alanı Bölgesi

### 2.6.3. Alev Boyu

Meker-Fisher beki kullanımına göre deneysel çalışmada alev boyunun ölçümü gerçekleştirilmiştir. Alev boyunun tanımı, alev bölgesinin tabanından alev uç kısmına kadar olan mesafedir. Gaz akış debisi ve yakıtın ısı salınım oranı alev boyunun değişimini etkilemektedir. Çünkü alevin yakıt deliğinden çıktığı anda karışım odasında hava ile reaksiyonu gerçekleşmektedir. Bek üzerinde yakıtın yanması sırasında, yakıt hızı debiye bağlı olarak alev boyunda değişim gösterecektir.

Meker-Fisher beki yanma deneylerinde yüksek hızlı kameradan alınan görüntülerde her bir debi için alev boyu ölçümü yapılmıştır. Yüksek hızlı kameranın görüntü alanına giren alev boylarının ölçümü gerçekleştirilmiştir. Saf ve karışımli yakıtlarda alev boy ölçümü alınmıştır. Alev boyu ölçümleri ön karışımli yanmada saf yakıtın yanması sırasında yapılmıştır. Ayrıca alevin stabil yapıda olması alev açısı ölçümü sırasında ölçüm doğruluğunu arttırmaktadır.



Şekil 2.13. Alev Boyu Ölçümü

## 2.7. Alev Teorisi

Alev üzerine yapılan çalışmalarda ortaya atılan teoriler alevin oluşmunun anlaşılması açısından önemlidir. Bir alevde yüksek sıcaklık seviyesinde reaksiyon bölgesinde su buharı varsa; CO ve O<sub>2</sub> reaksiyonlarını hızlandırmada hidroksi radikalleri aktif yer alır. Alev teorisi için en yaygın kullanılan yaklaşımlar; Mallard ve Le Chatelier, Semenov, Zeldovich ve Frank Kamenetskii ilkeleridir.

Sıcaklığın artması reaksiyonun ısıl ayrışmasına neden olur. Bu nedenle alev yarıçapının küçük olması düşük sıcaklıkta yanma gerçekleşmesini mümkün kılmakla birlikte alev boyunun uzamasına neden olur. Kimyasal reaksiyonlar alev yarıçapının boyutu ile doğru orantılı olarak daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşebilmektedir. Genel olarak ön karışimli hidrokarbon alevlerinde alev hızı yaklaşık 40 cm/s'dir. Laminer yanma hızı, termal yayılımın karekökü ve reaksiyon hız sabitinin çarpımıdır. Tanımlamada laminer akış koşulları altında düzlemsel bir yanmamış gazın yayılım hızı referans alınır. Burada laminer yanma hızını değerlendirirken başlangıç sıcaklığından bağımsız olarak değerlendirmek gerekir. Birinci dereceden reaksiyonlarda bu durumun geçerliliği vardır. Ön ısıtma bölgesindeki alevin kalınlığı, gazın termal yayılımı ve yanma hızı ile ters orantılıdır. Zel'dovich ve Frank Kamenetskii teorisine göre hızlı reaksiyon bölgesindeki yanmış gaz sıcaklığı ve ön ısıtma bölgesindeki yanmış gaz sıcaklığı reaktif olmayan bir akış alanı ile sınırlıdır. Hızlı reaksiyon bölgesinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonların aktivasyon enerjisi artarsa, reaksiyon bölgesinin uzunluğu ön ısıtma bölgesine göre daralmaktadır. Ayrıca reaksiyon bölgesinde sıcaklık değişimi de azalmaktadır (Griffiths ve Bernard,1995:61)

Mallard ve Le Chatelier ilkesine göre ısıl teoride tabakaların arasında ısı transferi gerçekleşirken alevin yayılımı kontrol edilebilmektedir. Bu teori enerjinin korunumu yasasının temelidir. Aynı zamanda bu teori iki tabaka halinde alevin oluşmasını ve tabakalar arasında ateşleme sürecinin meydana geldiğini anlatmaktadır. İlerleyen süreçte araştırmacıların termal teori üzerine yaptıkları çalışmalarda, tüm alev teorilerine nazaran Zel'dovich ve Frank-Kamenetskii'nin çalışmalarına mutabık kalınmıştır. Semenov bu çalışmayı inceledikten sonra gerekli detaylandırmaları yapmıştır. Mallard ve Le Chatelier teorisinde olduğu gibi Semenov bir ateşleme sıcaklığı varsayımı yapmıştır. Ancak elde edilen denklemin daha etkin kullanılabilmesi için yapılan yaklaşımlarla bu teori ortadan kaldırılmıştır. Teorinin ortadan kaldırılmasının sebebi; reaksiyon mekanizmasının sadece

termal mekanizma tarafından kontrol edilmemesi gerçeğidir. Ayrıca radikaller gibi aktif ürünlerin difüzyonu ile de ilgilenir. Düşük atomik ve moleküler kütleli parçacıklar sistemde geriye doğru yayılarak yeni reaksiyonların oluşmasına neden olabilir. Parçacıkların difüzyon teorisi ilk olarak 1934'te Lewis ve von Elbe tarafından geliştirilmiştir. Tanford ve Pease bu teoriyi daha da ileri götürmüşler ve termal teoride radikallerin difüzyon faktörünün etkisinin sıcaklık gradyan faktöründen daha önemli olduğunu göstermişlerdir. Termal teori yaklaşımında; daha yüksek ortam sıcaklığı, daha yüksek bir son reaksiyon sıcaklığı ve daha yüksek bir reaksiyon hızı oluşmaktadır. Benzer şekilde difüzyon teorisinde; daha yüksek sıcaklık, daha fazla radikalın daha fazla ayrılmasına ve geriye doğru yayılması alev hızının artmasına neden olur. Semenov'un bu teorisi Mallard ve Le Chatelier'in ateşleme sıcaklığı varsayımına benzemektedir. Bu teorinin reaksiyon kinetiğine etki eden faydalarından birisi radikaller gibi aktif ürünlerin difüzyonunu da kapsamaktadır. Tanford ve Pease termal difüzyon teoreminde ilerlemeler kaydederek radikal difüzyon faktörünün etkisini sıcaklık gradyan faktöründen daha kayda değer olduğunu ifade etmişlerdir. Termal teoride daha yüksek ortam sıcaklığı, reaksiyon sonu sıcaklığın maksimum ve reaksiyon hızının yüksek olması istenmektedir. Bu şartlar alev hızını arttırıcı etki oluşturmaktadır (Özener,2006:8-9).

Laminer alev yayılımının çözümlemesinde ısının serbest bırakılması, iletimi ve reaksiyon bölgesindeki kimyasal türlerin değişimini içeren akışkanlar dinamiği temel denklemleri kullanılabilir. Burada yaklaşımı destekleyen Mallard ve Le Chatelier, Semenov teorisi geniş çaplı bir gelişim göstermiştir. Mallard ve Le Chatelier teoreminin laminer alev yayılımının anlaşılması ve yakma sistemlerinin gelişimi üzerindeki etkisi büyüktür.

## ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

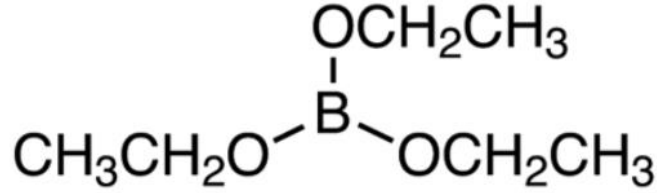
### MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, tez çalışmasında kullanılan benzin ve TEB yakıtlarına ait kimyasal özellikler ve tezin kapsamında uygulanacak olan yöntemler yer almaktadır.

#### 3.1. Test Yakıtları

##### 3.1.1. Trietil Borat

TEB'in kapalı formülü  $C_6H_{15}BO_3$  olarak tanımlanmıştır. Trialkilboranlar genel olarak katı yapıdadır, oksijene daha az duyarlı ve su ile reaktif değildir. Triorganoboranlar, inert bir atmosferde ortam sıcaklığında sürekli olarak saklanır ve yüksek sıcaklıkta ısıl ayrışmalar meydana gelir. Bu ayrışmalar sonucunda TEB ürünü ortaya çıkar. TEB'in pirolizinden uzun bir süre sonra  $100\text{ }^\circ\text{C}$ 'de tri-n-bütil borandan bütün oluşumu gözlemlenir. Alkilboranlar, trihalidler gibi su, alkol ve alkol oksitler ile reaksiyona girerek eterleri parçalar. Eterlerin parçalanması ile bor türevleri oluşur. Organoboranların çeşitli reaksiyonlarının oluşmasında, petrol türevi yakıt endüstrisinde uygulamaları mevcuttur. Organoboranların oluşumunu ve yeniden üretiminin sağlanması ekipman maliyetleri nedeniyle ekonomik olarak elverişsizdir. Trialkilboranların amin kompleksleri, dizel yakıtta setan oranını arttırmak için katkı maddesi olarak ilave edilir. Amin kompleksleri yakıt içerisinde çamurlaşma etkisini ortadan kaldırmaktadır (Brotherton vd.,2000: 250-254).



Şekil 3.1. TEB'in İskelet Yapısı

**Kaynak:** TCI Chemicals,B0520,2022:a.g.i.s.

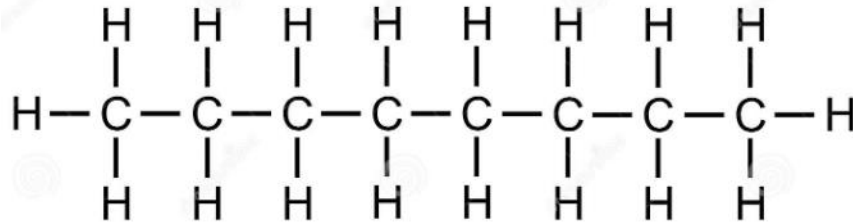


**Şekil 3.2.** TEB Yakıtı

TEB, oksidasyonunun kolay olması nedeniyle aniden parlayabilen fakat yanıcı özelliği iyi seviyede olmayan yakıtların hızlı bir şekilde tutuşmasını sağlar ve alev hızını artırır. Borat esterlerinin tabaka halindeki dolgularında alev geciktiriciler, hidrokarbonun oksidasyonu için reaksiyon düzenleyiciler kullanılmaktadır. Ayrıca TEB'in yakma sistemlerinde uygulanabilirlik ve enerji üretimi açısından yakıt olarak kullanımı üzerine herhangi bir çalışma literatürde yer almamaktadır.

### 3.1.2. Benzin

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan yakıtlardan biri olan benzin yakıtının içeriğinde olefin, parafin gibi birçok hidrokarbon bulunmaktadır. Petrol kaynaklı bir hidrokarbon yakıtı olan benzin içeriğinde; S (kükürt) ve N (azot) da bulunmaktadır. Benzin yakıtının içeriğinde ağır ve hafif hidrokarbonlar olmak üzere karbon sayısı 4 ile 10 arasında değişir. Bunlara ek olarak benzin yakıtı içerisinde parafinik, etilenik, naftanik ve benzenik hidrokarbonlar bulunmaktadır.



**Şekil 3.3.** Benzinin İskelet Yapısı



**Şekil 3.4. Benzin Yakıtı**

### **3.1.3. LPG (Bütan-Propan Gazı)**

LPG, bütan-propan gazlarının kullanıldığı karışımdır. Genel olarak %30 propan ve %70 bütan karışımı içerisinde kullanılmaktadır. Deneylerde kullanılan LPG 12 litre hacindedir. LPG hattında detandöre bağlanan 10 mm kalın yapılı formda borular bulunmaktadır. LPG borularının kalın yapılı olmasının nedeni basınç ve sıcaklığa karşı dayanıklı malzemedir yapılarak yakma işlemleri sırasında patlama tehlikesini ortadan kaldırmaktır. Detandör, LPG'nin çıkışına monte edilerek gazın basıncını ayarlamaya ve geçişin kontrollü bir şekilde (açık/kapalı konum) yapılmasına yardımcı olmuştur.

İçten yanmalı motorlar için LPG, motor performansını düşürse de emisyon salınımı açısından çevreci bir yakıttır. Benzin yakıtına göre motorda oluşan egzoz emisyonu düşüktür. Benzin ve LPG yakıtlarının birim hacim başına düşen enerji miktarını karşılaştırdığımızda; motordan eş performansı alabilmek için kütleli olarak daha fazla LPG yakıtı tüketilmesi gerekir. LPG'nin benzin yakıtına göre NO<sub>x</sub> emisyon oluşumu daha azdır (Choi vd., 2002:695-701). Aynı zamanda alternatif bir yakıt ve sürdürülebilir enerji kaynağı olarak da değerlendirilebilir. Fakat benzin yakıtının geleneksel dönüşüm uygulamaları çerçevesinde oluşturduğu etkiler hala devam etmektedir. Sıkıştırma oranının artırılması ile yanmanın ve ısı veriminin iyileştirilmesi için LPG özel yakıt sistemleri ile motorda kullanılmalıdır. Yakıtların kontrolsüz yanması çevre kirliliğine neden olmaktadır. Kontrolsüz yanmada oluşan temel problemlerden birisi de motor hacmini etkileyen güç kaybıdır. Yakıtlara ait spesifik özellikler Tablo 3.1'de yer almaktadır.

**Tablo 3.1.** Yakıtlara Ait Spesifik Özellikler

Özellikler	Benzin	Trietil Borat	Bütan	Propan
Moleküler Formülü	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>15</sub> BO <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
Moleküler Ağırlık (gr/mol)	114	146	58.08	44.1
H/C Oranı	2.25	2.5	2.5	2.67
Parlama Noktası (K)	261	284	213.15	169.15
Kaynama Noktası (K)	372	391	272.65	231.15
Yoğunluk (293 K) gr/cm <sup>3</sup>	0.691	0.858	0.573	0.493
Kendiliğinden Tutuşma Sıcaklığı (K)	669	-	638.15	723.15

**Kaynak:** Saxena,2016:77-101; Hosmane,2011:385-491; Owen vd.,1990:351-402.

## 3.2. Deneylerde Kullanılan Cihazlar

### 3.2.1. Emisyon Test Cihazı



**Şekil 3.5.** Emisyon Test Cihazı

Yakıt ile havanın karışımı sonucu Meker-Fisher beki alev üzerinde oluşan emisyonların ölçülmesi için Testo 350-S emisyon test cihazı kullanılmıştır. Emisyon test cihazında CO, NO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub> emisyonları ölçülebilmektedir.

Testlerde emisyon cihazı üzerindeki metal propun platform yan demir direk konumlandırılması gerçekleştirilmiştir. Meker-Fisher bekinden yukarı doğru yükselen emisyon gazlarının ölçümü, iç koni alev bölgesinde probun uç kısmı bek alevi içerisine tutularak yapılmıştır. Emisyon ölçümü sırasında ön karışım ve difüzyon alevlerinin üst kısmına emisyon test cihazı probu sabitlenerek zamana bağlı emisyon ölçümleri alınmıştır. Zamana bağlı ölçümler yaklaşık olarak 1 dakika 30 saniyelik süre içerisinde emisyon sonuçları grafik haline dönüştürülmüştür. Emisyon ölçüm cihazı her periyod sonunda sıfırlanmıştır.

### **3.2.2. Enjektör Test Cihazı**

Enjektör test cihazı, zamana bağlı belirli süreler dahilinde yakıt püskürtme işlemini sağlamak için kullanılmıştır. Bu cihazda üç farklı yakıt gönderim kademesi bulunmaktadır. Bunlar; 3 ms yakıt gönderiminde sıvı fazda, 6 ms yakıt gönderiminde sıvı+gaz fazında ve 12 ms yakıt gönderiminde gaz fazında püskürtme işlemi gerçekleştirilmektedir. Benzin ve TEB yakıtı karışımları zamana bağlı olarak yakıt pompası vasıtasıyla basınçlı bir şekilde pompalanarak enjektörden püskürtme işlemi gerçekleştirilmektedir. Yakıt deposu, yakıt karışımlarının homojenitesinin sağlanması amacıyla ultrasonik test cihazı içerisine konumlandırılmıştır.

Yakıtların püskürtülmesi işlemi sırasında, kronometre kullanılarak zamana bağlı deneylerde enjektör test cihazı 4.5 saniye boyunca enjektörün yakıt gönderimini sağlamıştır. Yakıt gönderimi zamana bağlı 600 rpm devire karşılık gelen pompa gücünde ve 12 ms süresince gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 3.6.** Enjektör Test Cihazı

### 3.2.3. Enjektör

Yakıt pompası vasıtasıyla saf ya da karışımli yakıtların basınçlandırılarak Meker-Fisher beki içerisinde bulunan karışım odasına gönderilmesini sağlamak amacıyla, enjektör yakıtların püskürtülmesi işleminde kullanılmıştır. Çalışmanın etkili bir şekilde gerçekleşmesi için kullanılacak enjektörü seçerken göz önüne alınması gereken kriter, enjektör test cihazının istenilen yakıt püskürtme işlemini gerçekleştirmesidir. Bundan dolayı, çalışmanın ek yakıtı olan benzine adaptasyon sağlaması için benzin enjektörü seçimi yapılmıştır. Benzin enjektöründe 12 adet enjektör deliği yer almakta ve enjektör elektrik hattı bağlantısında pozitif ve negatif kutuplar bulunmaktadır. Bu elektrik hattı bağlantısı enjektör test cihazı içerisinde bulunan 9 voltluk aküye bağlanmıştır.



**Şekil 3.7.** Benzin Enjektörü

### 3.2.4. Ultrasonik Temizleme Cihazı



**Şekil 3.8.** Ultrasonik Temizleme Cihazı

Ultrasonik temizleme cihazının görevi, ultrasonik temizleyici sıvının kap içerisine eklenmesi ile ultrasonik titreşimler aracılığıyla tıkanan ya da paslanan parçaların temizlenmesi için kullanılmaktadır. Ultrasonik temizleme cihazının tez kapsamında kullanım amacı; kullanılan yakıtların karışımlarının daha homojen bir şekilde karışmasıdır. Ultrasonik temizleme cihazı aynı zamanda ultrasonik temizleyici sıvı kullanılarak enjektör ve yakıt pompası başta olmak üzere tıkanma ihtimali olan parçalarda ve kirlenmiş parçaların temizlik işlemlerinde kullanılmıştır. Ultrasonik cihazın tank kapasitesi 1 litredir.

### 3.2.5. Yakıt Pompası



**Şekil 3.9.** Benzin Yakıt Pompası

Testlerde kullanılan ve Şekil 3.9’da yer alan yakıt pompası Bosch marka benzin yakıt pompasıdır. Çalışma prensibi olarak yakıt deposundan çekilen yakıt, yakıt giriş hattı vasıtasıyla yakıt pompasına taşınır. Pompanın iç kısmındaki diyaframın emme basma hareketi

yapmasıyla yakıt çıkış hattından yakıtın pompalanması sağlanır. Benzinli yakıt pompalarında hava yapma olayını görmek mümkündür. Bu durum giderilmediği takdirde yakıt pompası verimli bir şekilde çalışmayacaktır. Tez çalışmalarında kullanılan yakıt pompası ise Bosch marka benzin yakıt pompasıdır. Yakıt pompasının çalışması sırasında pompa basıncı birim zamanda yakıtın gönderim miktarını etkilemektedir. Yakıt pompasına ait hacimsel ve kütleli değerlerde enjektörün atış sayısına bağlı ölçüm sonuçları Tablo 3.2’de verilmiştir.

**Tablo 3.2.** Enjektörden Alınan Hacimsel ve Kütleli Ölçümler

Süre (s)	Toplam Atış Sayısı	Ortalama Atış Süresi (s)	Hacim (ml)	Ortalama Hacim (ml)	Ağırlık (g)	Ortalama ağırlık (g)
8.16	59	0.1383	3.4	0.0576	2.72	0.0461
9.4	67	0.1402	4.1	0.0611	3.18	0.0474
10.2	74	0.1378	4.6	0.0621	3.56	0.0481
10.09	73	0.1382	4.5	0.0616	3.46	0.0473
13.21	96	0.1376	6	0.0625	4.62	0.0481
12.64	93	0.1359	5.6	0.0602	4.46	0.0479
14.18	103	0.1376	6.6	0.0640	5	0.0485
16.77	127	0.1320	8.2	0.0645	6.2	0.0488
14.88	111	0.1340	7.2	0.0648	5.46	0.0491

Yakıt gönderimi ölçümleri 12 ms’de ve 600 rpm’e denk pompa gücünde gaz fazda püskürtme işlemi yapılmıştır. Bu kriterler ele alınarak deneysel ölçüm çalışmasının birim hacim ve birim ağırlık değerleri kronometre ve hassas terazi kullanılarak elde edilmiştir.

Benzin pompasından yapılan püskürtmelerde toplam yakıt miktarı 100 ml hacindedir. Stabil olarak atış bekleme süresi, yakıt pompasından enjektöre yakıtın ulaşması ile enjektör iğnesi kısmından yakıtın en uygun fazda püskürtüldüğü süreç aralığıdır. Stabil deney alma süresi ise yakıt pompasından çıkan yakıtın enjektörün iğne kısmından en uygun fazda püskürtülüp deneysel çalışmanın bittiği ana kadar geçen süreyi kapsar. Bu aşamalar uygulandığında stabil enjeksiyon bekleme süresi 34 s, stabil deney alma süresi 150 s ve enjeksiyon yakıt gönderim kontrol süresi ise 12 ms civarındadır. Bosch marka yakıt pompasından alınan deneysel sonuçlarda atış süresinin toplam atışa bölünmesiyle ortalama

atış süresi hesaplanmıştır. Enjektör test cihazından yapılan atışlarda 0.1368 saniyede bir atış işlemi yapılmaktadır. 0.1368 saniyede hacimsel olarak 0.0621 ml, kütleli olarak 0.048 g yakıt gönderimi gerçekleşmektedir. Ortalama hacmin hesabında ise toplam hacim miktarı toplam atışa bölünmüştür. Yakıt ağırlığının ölçümü hassas terazide, yakıtın hacimsel değerinin ölçümü küçük ve orta ölçekli mezurda gerçekleştirilmiştir.

Benzin yakıtının yoğunluğunun hesaplanması, ortalama ağırlığın ortalama hacime bölünmesiyle bulunmaktadır. Hesaplanan parametrelerde benzinin teorik yoğunluğu ile hesaplanan değer arasında %1.0085 oranında sapma değeri hesaplanmıştır.

### 3.2.6. Ateşleme Bobini

Doğrudan ateşleme sistemine sahip olan içten yanmalı motorlarda her silindirde bulunan ateşleme bujisinin kendisine ait bir ateşleme bobini bulunmaktadır. Yani motordaki silindir sayısı kadar ateşleme bobini bulunmak zorundadır. Ateşleme bobini içerisinde iki adet sargılı yapı bulunur. Birincil sargılı yapılar 12 volt beslemeyi sağlayan primer sargılardır. İkincil sargılı yapılar ise 30 bin volta kadar yüksek gerilim değerine çıkabilir ve bujiye ateşlemenin sağlanması için gerekli voltajı oluşturur.

Çalışmalarda kullanılan ateşleme bobininin bağlantı soketlerinin üzerindeki her bir pinin farklı bir anlamı vardır. Buradaki 1 nolu pin +12 volt ucu, 2 nolu pin ECU'ya giden ateşleme sinyali ucu, 3 nolu pin ECU'nun gönderdiği ateşleme sinyalinin geri besleme ucu, 4 nolu pin ise şasi (eksi) ucudur.

Deneylerde ateşleme bobininin kullanımı için 2 nolu pin ve 3 nolu pin iptal edilmiştir. Şasi pini ve +12 volt pini olan 1 ve 4 nolu pinler devreye alınarak ateşlemenin sağlanması için akü şarj güç kaynağına bağlanmıştır. Bobinin üst kısmında ve alt kısmında oluşan gerilimin ateşlemeyi gerçekleştirmesi için damlacık test düzeneği ve kanal yanma test düzeneklerinde çalışılmıştır.



Şekil 3.10. Ateşleme Bobini

### 3.2.7. Akü Şarj Güç Kaynağı

Akü şarj güç kaynağı, doğrultucu şarj ünitesinde şebeke elektriğinden gelen alternatif akım voltajı doğrultucu aracılığıyla doğru akım gerilimine çevrilerek çalışır. Doğrultucu şarj ünitesinde hem dönüştürücü için gerekli olan elektrik voltajı hem de akünün şarj olması için gerekli olan doğru akım gerilimi üretilir. Buradaki doğru akım voltajı akünün şarj olmasında kullanılır. Bu cihaz deneylerde damlacık test düzeneği ve kanal yanma test düzeneklerinde çalıştırılmıştır. Akü şarj güç kaynağı, ateşleme bobinine 0-20 V gerilimde alternatif akım çıkışı yapılarak ateşleme bobininde yüksek voltaj değerlerine çıkılmasını sağlar. Bobine gerekli voltaj değerinin üzerinde alternatif akım voltajı sağlanırsa ateşleme bobini birincil ve ikincil sargıları yanabilir.



Şekil 3.11. Akü Şarj Güç Kaynağı

### 3.2.8. Meker-Fisher Beki

Meker-Fisher beki ilk olarak Fransız mühendis George Meker yapmıştır. Meker-Fisher beklerinden farklı tipte bulunan diğer bekler Bunsen ve Teclu bekleridir (Şekil 3.12). Meker-Fisher beki boyutsal olarak incelendiğinde, Bunsen ve Teclu beklerinden daha büyük olup üst kısmındaki ağız kısmı da daha geniştir. Üst yüzeye alevin ulaşımı ağız kısmındaki delikler sayesinde gerçekleşmektedir. Alev yapısı olarak Meker-Fisher bekinin üst kısmında küçük alevcikler görülebilmektedir. Gaz karışımının hava ile reaksiyona girip daha iyi bir karışım oluşturması için yüksek sıcaklıklara çıkılabilmektedir.



**Şekil 3.12.** Bunsen Beki, Teclu Beki, Meker Fisher Beki ve Ocak Tipi Bek Düzeneği

**Kaynak:** Meker,1905a:348-354.

Şekil 3.12’de soldan sağa sıralandığında Bunsen beki, Teclu beki, Meker-Fisher beki ve ocak tipi bek düzeneği görülmektedir. Bunların gelişim sürecinde Bunsen beki temeli ile uygulamaya geçilmiştir. Bunsen bekinin yapısı itibariyle alevin tek hat üzerinden çıkması sonucu iç koninin görülmesi mümkündür. Fakat Meker-Fisher bekinin üst kısmındaki deliklerin fazla olması ve bunun sonucunda oluşan alev taneciklerinin fazla olması sebebiyle bu tip beklerde iç koninin görülmesi mümkün değildir. Aydınlatmada kullanılan yeni tip brülörlerin sıradan brülörlerden daha iyi bir kullanım sağlayan birçok farklı özelliği bulunmaktadır. Maksimum yakıtın yanması alevin hacmine bağlı olarak tam yanma ilkesinin temelinde gerçekleşmektedir. Gaz ve basınçlı hava kullanan brülörler genel olarak fırınlarda kullanılmaktadır. Fırınlarda yüksek sıcaklığın elde edilmesi sonucunda ortam şartına uygun brülör tasarımları gerçekleştirilmektedir.



**Şekil 3.13.** Meker-Fisher Beki

Sadece gaz kullanan brülör tiplerinde ise bu durum farklı olmaktadır. Boru içerisinden gelen gazın kullanımı, bekin alt tablası üzerine oturtulan gaz ayar vidası vasıtasıyla gaz giriş hattı üzerinden yakma sistemine gaz geçişi ile sağlanır. Gaz geçişinin sağlanması sonucu, LPG'nin gaz çıkış deliğinden yukarı doğru ilerlemesi sırasında alev oluşumu üst kısımda görülür. Alev üst kısımda oluşurken deliklerden çıkan alevcikler ve dış koninin oluşması gerçekleşir. Meker-Fisher bekinde yanma sonucu açığa çıkan hidrojen ve karbonun tam yanmasını sağlamak için yeterli miktarda havanın karışıma dâhil edilmesi gerekir. Meker-Fisher beki, üst kısmındaki deliklere gelen gazın hava ile karışmasına imkân verecek şekilde tasarlanmıştır. Gaz ayar vidası, Meker-Fisher beki üzerinde yanmamış gazın gönderim miktarının ayarlanması için önem arz etmektedir. Meker-Fisher bekinde gazın ters yönde yayılımının zor olması, alevin geri tepme oluşumuna engel bir durum teşkil etmektedir. Bek üzerinde elde edilen alev tipleri; büyük mavi konik alev tipi yerine küçük mavi konik alevlerin oluşmasıdır. Küçük mavi konik alev rengi de homojen morumsu ya da mavi formda oluşabilmektedir. Alevlerin her bir delikten aynı yükseklikte çıkması sonucu alevin sıcaklığı bütün küçük konik alevler ile aynı değerdedir (Meker,1905b:348-354).

### 3.2.9. Yüksek Hızlı Kamera



Şekil 3.14. Yüksek hızlı kamera

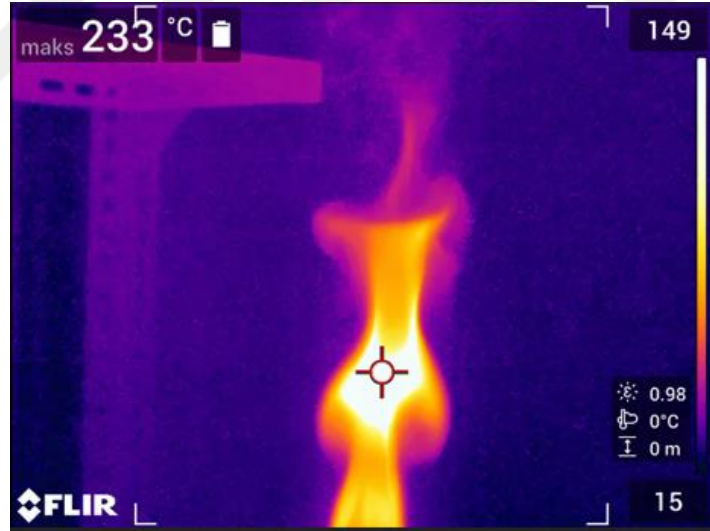
Yüksek hızlı kamera görüntü hızını ayarlayan, odak mesafesine göre en uygun görüntünün alınmasını sağlayan, alınan görüntülerin video olarak ayrı ayrı kayıtlar ile çok sıralı kayıt yapan cihazdır. DITECT HAS-EF yüksek hızlı kamerada 1 inç tamamlayıcı metal oksit yarı iletken sensörü bulunur. Yüksek hızlı kameranın teknik özellikleri; tam çözünürlükte 250 fps'e ya da full HD'de 500 fps'e kadar görüntü alması, VGA 1400 fps'ten

14000 fps'e kadar piksel görüntüleme alan sınırlandırması yapması ve 2560 x 2048 piksel efektifi sunmasıdır.

Kamera üzerinde mercek oturma yüzeyi, tripot için açılan oturma yüzeyi, USB 3.0 kablo girişi ve güç kaynağı kablo bağlantı girişi bulunmaktadır. Ditect HAS-EFC yüksek hızlı kamerada 11.5-69 mm Odak Uzaklığı 2/3" Format F1.4 Diyafram Açıklığı, M46 x P0.75 filtre boyutlu manuel iris görüntü ayarları bulunmaktadır. Bunsen ve Meker-Fisher beki üzerinde kanal yanma testleri ve damlacık yanma testlerinden alınan deneysel ölçümlerde görüntüyü parçalara ayırma işlemi ve video formatında kayıtlar yapılmıştır.

### 3.2.10. Termal Kamera

FLIR E-96 23<sup>0</sup> termal kamera kullanılan cihazın ismidir. 640 x 480 piksel boyutunda, 30 °C ısı hassasiyeti <40 mK, termal kaynaklı hata oranı  $\pm 2$  °C veya  $\pm \%2$  olan termal kamera, yanma deneylerinde alev sıcaklıklarının maksimum ve minimum değerlerinin ölçülmesinde kullanılmıştır. FLIR Thermal Studio programı ile alev görüntülerinin ya da birçok mekanik ve işlevsel görüntünün işlenmesinde kullanım sağlamaktadır.



Şekil 3.15. Meker-Fisher Beki Test Düzeneginde Termal Kameradan Alınan Görüntü

Termal kameradan görüntü alınırken bazı ayarlama işlemlerinin yapılması gerekir. Termal kamera ile ölçüm yapılması gereken deneysel test düzeneği arasındaki mesafeyi ölçmek için değiştirilebilir AutoCal lensler ile lazer ışıklı mesafe ölçümü yapılmaktadır. Kameranın odak uzaklığı 1x ile 8x arasında değişmektedir. Sıcaklık ölçümü renk seçeneği kamera görüntüsü için demir görüntü formundadır. Kamera üzerinde sıcaklık ölçüm alanının tespiti için dokunmatik ekranda bulunan ölçüm alan ayarı yapılarak ölçüm hassasiyeti

arttırılmaktadır. Sıcaklık seçeneği için kamera üzerinde 3 farklı değer aralığı mevcuttur. Bunlar; -20-120 °C, 0-650 °C ve 300-1500 °C arasındaki sıcaklıkların ölçümünde uygundur.



**Şekil 3.16.** Termal Kamera

### **3.2.11. Mikropipet**

Mikropipetler hacimsel boyutlarına göre 3 gruba ayrılmaktadır. Bunlar 0.1-10 µl hacimli mikropipet, 10-100 µl hacimli mikropipet ve 100-1000 µl hacimli mikropipettir. Bu hacimsel aralıklarda ayarlama yapılırken üst kısımdaki mikropipet ayar mekanizması çevrilir ve gösterge değer istenilen ayara getirilir. Çok küçük ve hassas ölçümleri kapsayan mikropipetlerin olmasından dolayı damlalık ya da normal pipetlerle hacimsel ölçüm yapmak mümkün değildir. Mikropipetin ucuna istenilen hacimsel boyut aralığındaki pipet ucu takılır ardından mikropipetin üst kısmında yer alan boşaltma butonuna basılır. Sıvı kabının içerisine dik pozisyonda daldırılır, boşaltma butonu basılı konumdan yavaşça yukarı doğru çekilir ve bunun sonucunda kabın iç kısmındaki sıvı pipet ucuna dolmaya başlar. Kullanılacak olan alana götürölüp tekrar boşaltma butonuna basılarak akışkan sıvının pipet ucundan akması veya damlaması sağlanır. Damlacık test düzeneğinde SiC teline benzin ve TEB damlacığının bırakılmasında, kanal yanmada da kanalın üst kısmından benzin ve TEB yakıtlarının bırakılmasında kullanılmıştır.



**Şekil 3.17.** 0.1-10 µl Mikropipet

### **3.2.12. Gaz Akış Debimetresi**

Gaz akış debimetresi SIARGO marka debimetredir. SIARGO gaz akış debimetresi 0-200 lt/dk debideki gaz akış ölçümlerini yapmaktadır. Kullanım alanları; gaz yakıtları, kimya endüstrisi ve termik santraller gibi sektörlerdir. Deneylerde gaz akışını kontrol eden sistem elemanıdır. LPG ve ozon jeneratöründen üretilen ozonun hacimsel debisinin ölçülmesi ve gaz sıcaklığının ölçülmesinde kullanılmıştır. Debimetrenin hacimsel ölçüm birimi lt/dak ve sıcaklık birimi °C'dir.



**Şekil 3.18.** Gaz Akış Debimetresi

### **3.2.13. Gaz Karışım Odası**

Meker-Fisher beki gaz haldeki yakıtın gönderimi için kullanılan karışım odasının alt kısmında gaz giriş ve gaz çıkış delikleri bulunmaktadır. Gaz giriş deliğinden giren yakıt, iç kısımda genişleme yaparak yakıtın basıncı düşürülür. Ayrıca karışım odası içerisinde LPG ve ozonun yanması sırasında alevin debi kaynaklı sönmesini önlemek için kullanılmıştır.



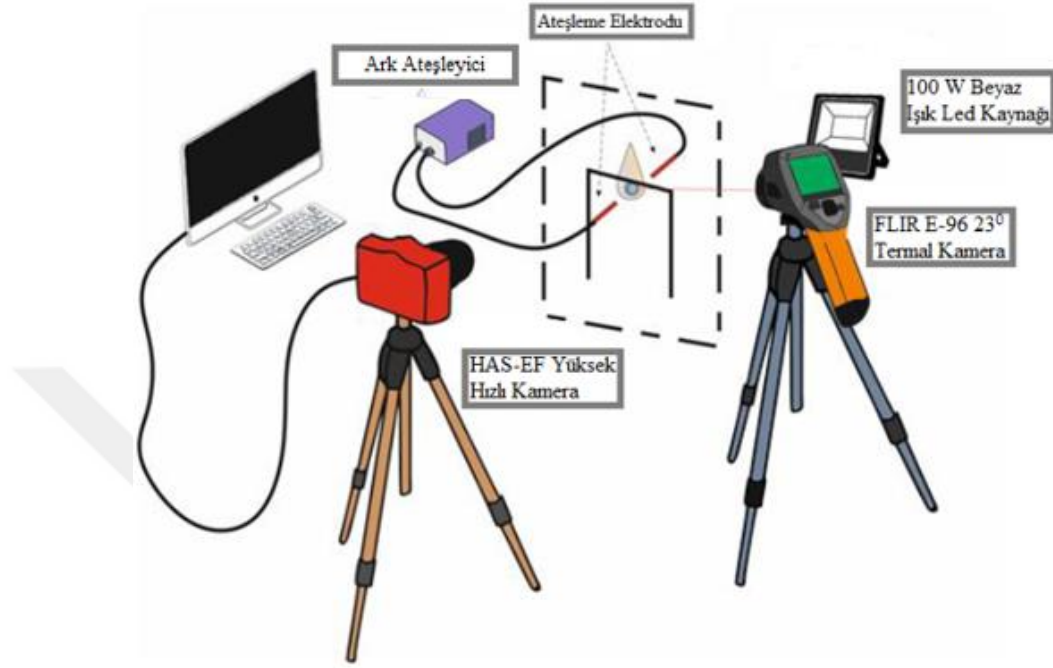
**Şekil 3.19.** Gaz Karışım Odası

### **3.3. Test Sistemleri**

#### **3.3.1. Damlacık Test Düzenegi**

Damlacık test düzeneginde yapılan çalışmada benzin ve TEB yakıtlarına ait damlacık yanma testleri gerçekleştirilmiştir. Damlacık test düzeneginde yakma işlemi gerçekleştirilirken ortam koşulları normal yerçekimi şartlarında, oda sıcaklığında ve atmosferik basınçtadır. Geleneksel yakıt olarak benzin ve yeni nesil yakıt olarak TEB'in damlacık yanma testleri yapılarak yanma ve atomizasyon davranışları incelenmiştir. Damlacık testinde zamana bağlı canlı alev görüntüleri ve yüzey gerilme görüntülerinin değerlendirilmesi için test düzenegi ile senkronize yüksek hızlı kamera kullanılmıştır. Testlerde geleneksel yakıt olan saf benzin, yeni nesil yakıt olan TEB %10, %20, %30, %40, %50, %60, %70, %80, %90 hacimsel oranlarda eklenerek deneyler yapılmıştır. Damlacığın yanması sonucu oluşan alev sıcaklığının ölçümü termal kamera ile gerçekleştirilmiştir. Benzin ve TEB yakıtlarının damlacık testleri 550mm x 250mm x 400 mm boyutlarındaki dikdörtgen prizmalı bir bölme içerisinde, standart atmosferik koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Damlacık deneylerinde ölçüm şeması üç açıklıktan oluşmaktadır. Bunlar; optik erişim, arka aydınlatma ve sıcaklık ölçümüdür. Termal kamera ve yüksek hızlı kamera görüntülerinin deneysel olarak düzenlemesi, damlacık canlı alev görüntüsü ve atomizasyon mekanizması üzerinde yapılmıştır. SiC telin çapı 50 µm olarak tasarlanmıştır. Ateşleme elektrodunun yakıt damlacıkları ile temasını engellemek için aralarında 2 mm'lik bir mesafe bırakılmıştır. SiC teli üzerine  $4.15 \pm 0.25$  µl'lik damlacık yapılarının üretilmesi için tek kanallı hacimsel µl olarak ayarlanabilen bir mikropipet kullanılmıştır. Ayrıca mikropipet ölçegi 0.5-10 µl arasındaki yakıt damlacıklarının üretilmesi için kullanılmıştır. Hacimsel

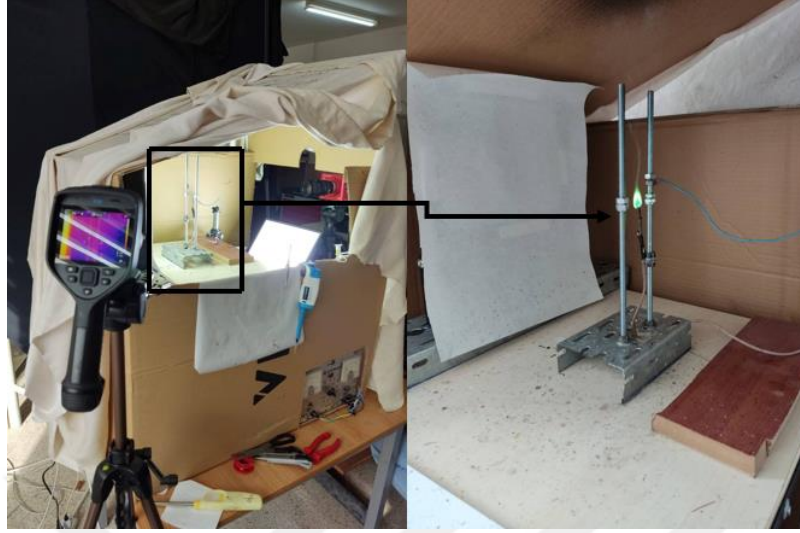
yakıt damlacığına karşılık gelen eşdeğer çap değeri  $2\pm 0.1$  mm ölçüsünde olmaktadır. 20 ms kademeli ateşleme bobininden 1 ms'lik kısa sürelerde, 6 kV gerilimde yakıt damlacıklarının yanması sağlanmaktadır. Sarkık yakıt damlacıklarının ateşlenmesinde atmosfer basıncı koşulları altında hava içerisinde yüksek enerjili kıvılcımla ateşleme sağlanmıştır.



Şekil 3.20. Damlacık Test Düzenine Deneysel Kurulum Şeması

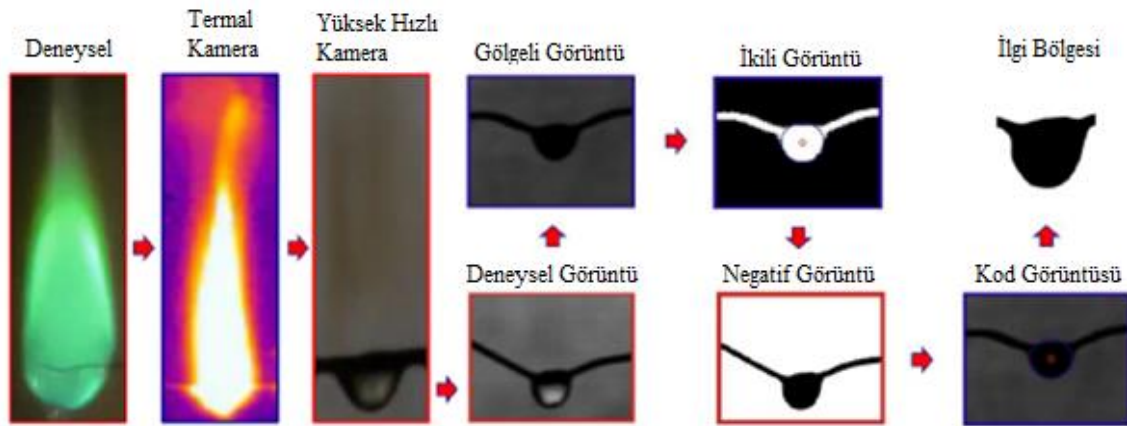
Ditect HAS-EFC Yüksek Hızlı Kamera damlacık görüntü işleme ve atomizasyon görüntüleri için kullanılmıştır. Yüksek hızlı kameranın görüntü çözünürlüğü 2560x2048 pixels de 14000 fps değerine kadar çıkmaktadır. Kamera görüntüleri Ditect HAS-EFC yüksek hızlı kamera ve 11.5-69 mm Odak Uzaklığı 2/3" Format F1.4 Diyafram Açıklığı M46 x P0.75 filtre boyutlu manuel iris görüntü ayarları yapılarak alınmıştır. Damlacık boyutunun küçülmesi ve alev davranışlarının incelenmesi için kamera görüntüleri iki farklı yöntemle alınmıştır. 100 W'lık led spot ışık kaynağı yakıt damlacık çapındaki küçülmelerin zamana bağlı olarak tespit edilebilmesi için damlacık gölgelendirmesi yapılarak kayıt altına alınmıştır. Damlacık çapı regresyon grafikleri kullanılarak görüntülerin işlenmesi sağlanmıştır. Ayrıca led spot ışık kaynağı kullanılmadan karanlık ortamda damlacıkların canlı alev görüntüleri yüksek hızlı kamera ile kayıt altına alınarak incelenmiştir. Damlacık test odasının karanlık bölgede kalmasındaki temel amaç; damlacık atomizasyonunda kabarcık atımı, yavru damlacık yapısının oluşumu ve yüzeysel dalgalanmalara benzer önemli olayların zamana bağlı olarak gösterdikleri gelişimi tam yakalamaktır. Damlacık

testlerinde karanlık bölgedeki alev boyutu gelişimini değerlendirmek için damlacık test odası içerisinde karanlık bölgede görüntüler alınmıştır.



Şekil 3.21. Damlacık Deneyi Test Düzenegi

Alev yapısının zamana bağlı olarak değişimlerini incelemek için FLIR E96 23<sup>0</sup> termal kamera kullanılmıştır. Termal kamera üzerinden alınan sıcaklık ölçümleri 640x480 termal çözünürlüktedir. Kameranın ısıl hassasiyeti 30 °C'de <40 mK değerinde ve hata oranı  $\pm 2$  °C'dir. Damlacık çapı değişimine ait kaydedilen gri tonlamalı görüntülerde kontrast değerleri artırılmıştır. Eşikleme teknikleri (Basu ve Miglani,2016a:482-503) çalışılarak damlacıklar ikili görüntülere dönüştürülmüştür.



Şekil 3.22. Yanma ve Damlacık Ayrışması İçin Damlacık Görüntü İşleme Şeması

MATLAB 9.4 programında görüntü analizi için kesit alanları alınıp yerleşik tip kenar algılama rutini kullanılarak yeniden yapılandırılmıştır.

Yukarıda görüntü analiz sürecinin değerlendirilmesi için şematik bir gösterim Şekil 3.22'de gösterilmiştir. Yanma süreci boyunca anlık damlacık çapının değişimi dinamik

zaman serisi verilerine karşılık gelen değerlerin elde edilmesi için kullanılmıştır. Yanma süreci boyunca anlık damlacık çapı 'D' (istenilen alan-eşdeğer kürenin çapıdır) ile ifade edilir. Damlacık çapının regresyon oranı  $(D/D_0)^2$  olarak belirlenmiştir. İlk damlacık çap değeri  $2.1 \pm 0.1$  mm, bağıl hata ise  $\pm 1\%$  olarak hesaplanmıştır. Bütün damlacıklar için kenar algılama sistemi yöntemiyle MATLAB 9.4 programında kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Atomizasyon ve canlı alev görüntülerine ait deneysel çalışmalardan elde edilen veriler değerlendirilerek damlacık çap değişimi yorumlanmıştır.

### **3.3.2. Kanal Yanma Test Düzenegi**

Tez çalışması kapsamında geleneksel yakıt olarak benzin, yeni nesil yakıt olarak TEB yakıtlarının kanal yanma düzeneginde testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ortam şartları; oda sıcaklığında normal yerçekimi koşulunda ve normal atmosferik basınçta yapılmıştır. Araştırma çalışması deneysel şartlarda standart başlangıç çapında saf benzin, saf TEB ve benzin-TEB'in farklı karışım oranlarındaki yakıt karışımının kanal hattı boyunca alev ilerleyişi ve yanma davranışı parametreleri incelenmiştir. İncelenen parametrelerin deneysel şartlarında benzin yakıtı çalışmasının referans yakıtıdır. Toplam karışım hacmi 100 ml olarak hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımında hacimsel %95 saf benzin yakıtına hacimsel %5 TEB ilave edilmiştir. Kanal yanma test düzeneginde alev yapısını içeren sıcaklık ölçümleri termal kamera ile elde edilmiştir. Yüksek hızlı kamerada, canlı alev görüntülerinin zamana bağlı olarak kanal yanma hattı boyunca yüzey gerilme görüntü analizi gerçekleştirilmiştir. Benzin ve TEB yakıtlarına ait gerçekleştirilen yanma deneyleri, 295 mm x 140 mm x 10 mm boyutundaki dikdörtgen yapılı bir bölmede standart atmosferik ortam koşullarında gerçekleştirilmiştir. Kanal yanma test düzeneginin dikdörtgen yapıda olması nedeniyle ölçümlerde kanal derinliği 2 mm, kanal genişliği 4 mm ve kanal uzunluğu 295 mm olarak imal edilmiştir. Kanal yanma deney bölgesi optik erişim ve sıcaklık ölçümü olmak üzere iki açıklıktan oluşur. Kanal yanmada canlı alev görüntüleri ve atomizasyon mekanizmasının incelenmesi senkronize edilmiş kıvılcım ateşleme vasıtasıyla termal kamera ve yüksek hızlı kameradan deneysel ölçümün alındığı şematik gösterim Şekil 3.23'de yer almaktadır.



**Şekil 3.23.** Kanal Yanma Test Düzenəğinin Deneysel Kurulum Şeması

Kanal yanma test düzenėğinde benzin ve TEB yakıtlarının ateşleyici ile temasının engellenmesi için elektrik ateşleme elektrodu arasına 2 mm'lik mesafe bırakılmıştır. Elektrikli ark ateşleyicisinin ateşleme elektrotları plakanın alt kısmında bulunmaktadır. Yakıtın hacimsel ölçekli mikropipete alınması sonrası deney düzenėğinin üst kısmından damlatma işlemi gerçekleştiği anda elektrikli ark ateşleyicisi çalıştırılarak kanal hattında yanma işlemi yapılmıştır. Mikropipetten damlatılan yakıtların ateşlenmesi, 20 ms kademeli ateşleyici trafonun 1 ms kısa süre, 6 kV kısa süreli gerilim ve yüksek enerjili kıvılcım ateşlemesi sağlanarak atmosferik basınç koşullarında uygulanmıştır. Benzin ve TEB yakıtlarının hacimsel ölçekleri 50 µl de sabit tutulmuştur.

### 3.3.3. Meker-Fisher Beki Deney Test Düzenėđi

Tez kapsamındaki deneysel çalışmalarda benzin yakıtı referans yakıt olarak kullanılmıştır. Saf benzin yakıtına ek olarak hazırlanan yakıt karışımı numunelerine hacimsel olarak sırasıyla %5, %10, %15, %20, %25 TEB ilavesi eklenmiştir. Yakıt hacmi saf ve karışimli yakıtlarda toplam 100 ml'dir. Tezin odak noktasında yer alan yakıt TEB yakıtı olduğu için TEB'a bağlı ifadelere yer verilmiştir. Hazırlanacak yakıtlarda LPG için %0 TEB yakıtı, %80 benzin için %20 TEB yakıtı ve %20 benzin ifadeside %80 TEB yakıtı ile ifade edilmektedir. Deneysel çalışma kapsamında kullanılan yakıtların kütleli ölçümlerine ek olarak hacimsel ölçümleri de alınmıştır.

**Tablo 3.3.** Meker-Fisher Beki Testlerinde Hazırlanacak Karışım Oranları

Kütlesel TEB	Hacimsel Benzin (ml)	Hacimsel TEB (ml)
%0	100	0
%5	95	4.02
%10	90.43	8.04
%15	85	12.06
%20	80	16.08
%25	75	20.10

Stokiyometrik şartlarda yakılan yakıtlara ait karışımların ürün çıktıkları aşağıda verilmiştir.

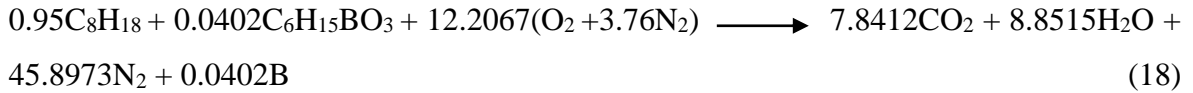
%100 benzin için stokiyometrik şartlarda yanma denklemi:



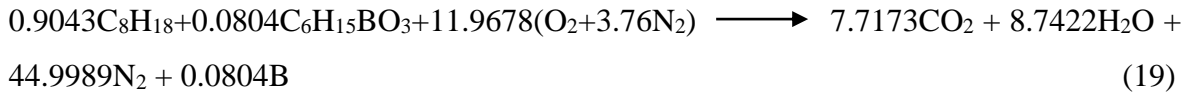
%0 TEB katkısı için stokiyometrik şartlarda yanma denklemi:



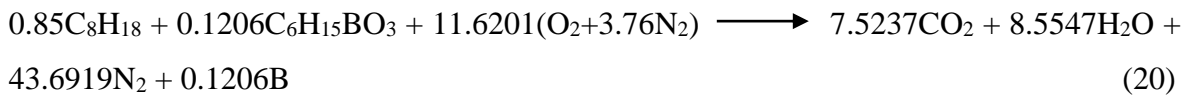
%5 TEB katkısı için stokiyometrik şartlarda yanma denklemi:



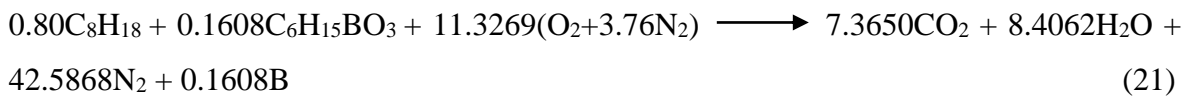
%10 TEB katkısı için stokiyometrik şartlarda yanma denklemi:



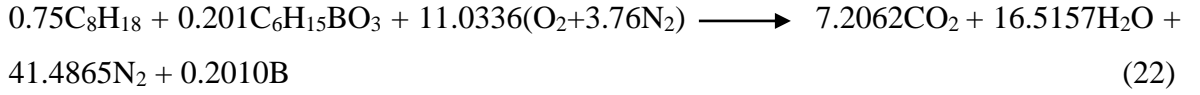
%15 TEB katkısı için stokiyometrik şartlarda yanma denklemi:



%20 TEB katkısı için stokiyometrik şartlarda yanma denklemi:

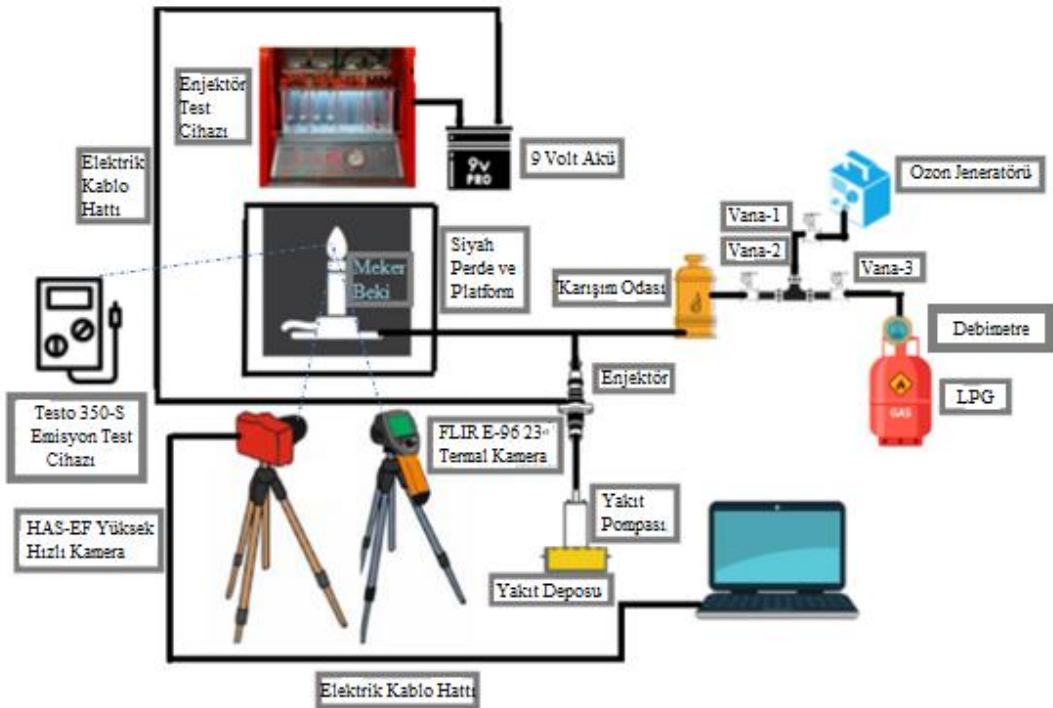


%25 TEB katkısı için stokiyometrik şartlarda yanma denklemi:



Yukarıda ifade edildiği üzere stokiometrik karışımda reaksiyona girenler ile oluşan ürünlerde denklem denkleştirilmesi yapılmıştır. TEB'in karışım oranı arttıkça ürünlerde oluşan bor elementinin katsayısı da artmıştır. Denklem denkleştirme işleminde minimum oksijen miktarı, C denkliği, H denkliği ve O denkliği yapılarak her bir ürünün karşısına yazılmıştır. Benzin ve TEB'in hacimsel olarak karışımında yanma reaksiyonuna girmesi ile elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilecektir.

Bor temelli malzemelerin spektral davranışı ve yeşil renkte alev ışınması yaptığı literatürde belirtilmiştir. Spektral yeşil renkli alev oluşumu deneysel çalışma kapsamında gözlenmiştir. Meker-Fisher bekinde TEB'in yanma testlerinin gerçekleştirilmesi ve Meker-Fisher beki alev yapısındaki incelemeler bor kaynaklı alevin gelişimi açısından önemlidir. Benzin ve TEB yakıtlarının saf ve karışım halde Meker-Fisher bekinde test edilmesi ile alev davranışında incelemeler yapılmıştır.



**Şekil 3.24.** Meker-Fisher Bekinin Deneysel Test Düzenegi Şematik Gösterimi

Meker-Fisher beki ile gerçekleştirilecek olan ön karışım ve difüzyon alev testlerinin deneysel şematik gösterimi Şekil 3.24'de görülmektedir. Şekil 3.24'de gösterilen deneysel şematik gösterimde 9 volt akü enjektör test cihazında yer almaktadır. Sistemde elektrik kablo

hattı HAS-EF yüksek hızlı kamera-bilgisayar ve enjektör-enjektör test cihazı arasında yer almaktadır. Diğer hatlarda bağlantı hortumu ile sistemin çalışması sağlanmaktadır. Ozon jeneratörünün çalışmasına engel teşkil eden durum 1 nolu vananın kapalı olmasıdır. Çalışılan sistemde LPG yakıtının kullanılması nedeniyle güvenlik açısından çalışma sonunda 2 nolu ve 3 nolu vananın kapatılması gereklidir. 2 nolu ve 3 nolu vananın kapatılmasına ilaveten en son LPG detandörü vanası da kapatılarak daha güvenilir bir çalışma sağlanabilmektedir.

Deneysel çalışmada yapılan bütün testlerde alev görüntülemek için karanlık ortam şartlarında gerçekleştirilmiştir. Burada karanlık ortamın önemi, görüntüleme hatayı minimuma indirmek ve alev spektral davranış yapısını en iyi şekilde gözlemlemektir. Alev görüntülerinin karanlık ortamda alınması için ölçüm setinin arka kısmına siyah düz perde çekilerek yanma testleri yapılmıştır.

Ölçüm seti olarak yüksek hızlı kameradan canlı alev görüntüleri alınmış, FLIR E96 23<sup>0</sup> termal kameradan alev yüzeyindeki sıcaklık ve maksimum sıcaklık değerleri tespit edilmiştir. Testo 350-S emisyon test cihazından ise yanma sonucu açığa çıkan emisyon ölçümleri yapılmıştır.

Meker-Fisher beki, kanal yanma ve damlacık yanmasında elde sonuçlar Bölüm 4'de verilecektir.

## DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

### BULGULAR

Bu bölümde tez çalışması kapsamında gerçekleştirilmiş olan deneylerin sonuçları ve bulguları tartışılacaktır.

#### 4.1. Damlacık Deneyleri Test Sonuçları

Bu bölümde damlacık deneylerine ait test sonuçları incelenecektir. Damlacık testlerinde kullanılan benzin ve TEB yakıtlarının yanma davranışları termal kamera ve yüksek hızlı kamera aracılığıyla incelenmiştir. Yüksek hızlı kameradan damlacık test sonuçlarına ait görüntüler analiz edilmiştir. Farklı oranlardaki yakıt damlacıklarının yanma süresince göstermiş olduğu sıcaklık değişimleri termal kamera aracılığıyla tespit edilmiştir. Deney kapsamında yorumlamalar yapılırken saf benzin damlacık yakıtı %0 TEB yakıtı ifadesi, %10 TEB-%90 benzin damlacık yakıt karışımında %10 TEB yakıtı ifadesi, %90 TEB-%10 benzin damlacık yakıt karışımında %90 TEB yakıtı ifadesi, saf TEB içinde %100 TEB yakıtı ifadesi kullanılmıştır.

Damlacık deneyleri için %0 TEB yakıtı yanma görüntüleri Şekil 4.1'de yer almaktadır. Deneysel çalışmada %0 TEB yakıtının yanma sürecindeki damlacık yanmasına ait ilk ışına yapan alev tabakasının oluşumu 12 ms'de görülmüştür. Yanma süreci devam ederken alevin oluşumu sırasında yüksek ışınlar meydana gelmiştir. Aynı zamanda alev boyutunda yoğun şekil değişimleri gözlemlenmiştir. Alev ışınması gerçekleşmeden 120 ms yanma sürecine kadar geniş alev yapılı bir yayılım görülmüştür ve şapkalı görünümde mantara benzeyen alev formasyonu sergilenmiştir. Şapkalı mantar tipi alev yapısı 130 ms prosesinde bozulmaya uğramamıştır. 150 ms'lik zaman diliminden sonra alev yüzeyi bölgesinde hem iç koni alevi hem de dış koni alevi oluşmuştur. İç koni ve dış koni alev yapılı görüntü 400 ms'ye kadar ilerlemiştir. Devam eden kısımda damlacık alevinin iç bölgesinde kaynamalar tespit edilmiştir. Damlacıkların ilk başta küçük boyutta olması, ilerleyen zaman diliminde iki farklı oluşum sürecini beraberinde getirmiştir. Birincisi damlacık alevinin iç kısmında dışarı doğru sıçrayış hareketlerinin olduğu süreç, ikincisi ise dış koni alevi üzerinden yukarıya doğru devam ettiği süreçtir.

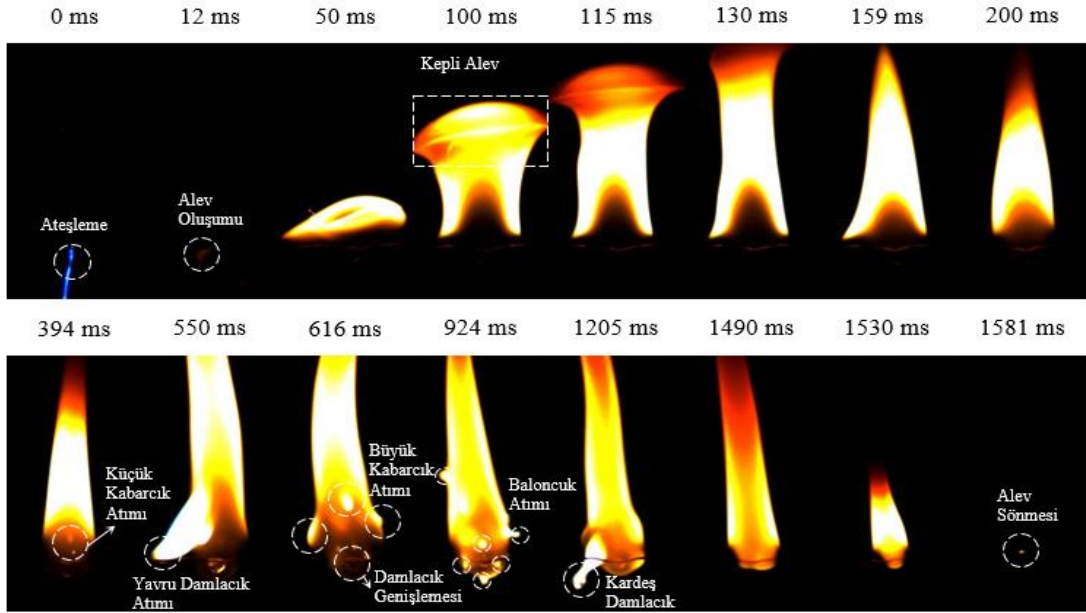
Kaynayan damlacıkların sayıca artması sonucunda mikropatlamalar alev içerisinde oluşmuştur. Mikropatlamalar ve damlacık çaplarındaki ani değişimler de alev parçacıklarının dışarı doğru sıçramasına neden olmuştur. Alevin iç kısmından dışarıya doğru sıçrayışlar ve kardeş damlacık atımları gözlemlenmiştir. Kardeş damlacık atımlarının

artması, %0 TEB yakıt alevinin yanma gelişim aralığında çok uzun bir süreyi kapsamıştır. %0 TEB yakıtının damlacık yanma gelişimi, alevin şekil değişimine ve alev boyu artışına sebep olmuştur. Damlacığın kabarcıklı yapısında oluşan akış hareketleri alev bölgesine taşınmıştır. Damlacığın kabarcıklı yapıda yanması alevin sönmesine ya da sönüp tekrar yanmasına fırsat vermemiştir.

Damlacıkların zamana bağlı kopmasındaki artışlar alevin sönmesine neden olmuştur. 1581 ms yanma prosesinde alev sönmesi ile yanmanın tamamlanması gerçekleşmiştir. %0 TEB yakıtı yanarken yüksek yoğunlukta sarı, beyaz ve kırmızı ışımaya bölgeleri oluşmuştur. %0 TEB yakıtının renginde sarıdan kırmızıya doğru renk değişimi gözlemlenmiştir. %0 TEB yakıtı rengindeki değişimin temel sebebi; hidrokarbon içerikli yakıtlarda eksik yanmanın aydınlık bölgede gerçekleşmesi ve is partiküllerinin damlacık yüzeyinde taşınım hareketine uğramadan agregatlaşmasıdır.

Genel olarak yakıtların yanması sırasındaki gelişim süreci, iki ya da daha fazla yakıtın yüksek karışım içeriğine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bu çerçevede damlacık yanması, nanopartikül katkılı nanoyakıt damlacıklarının yanma mekanizmalarındaki ilerleyiş süreçlerine öncü olmuştur.

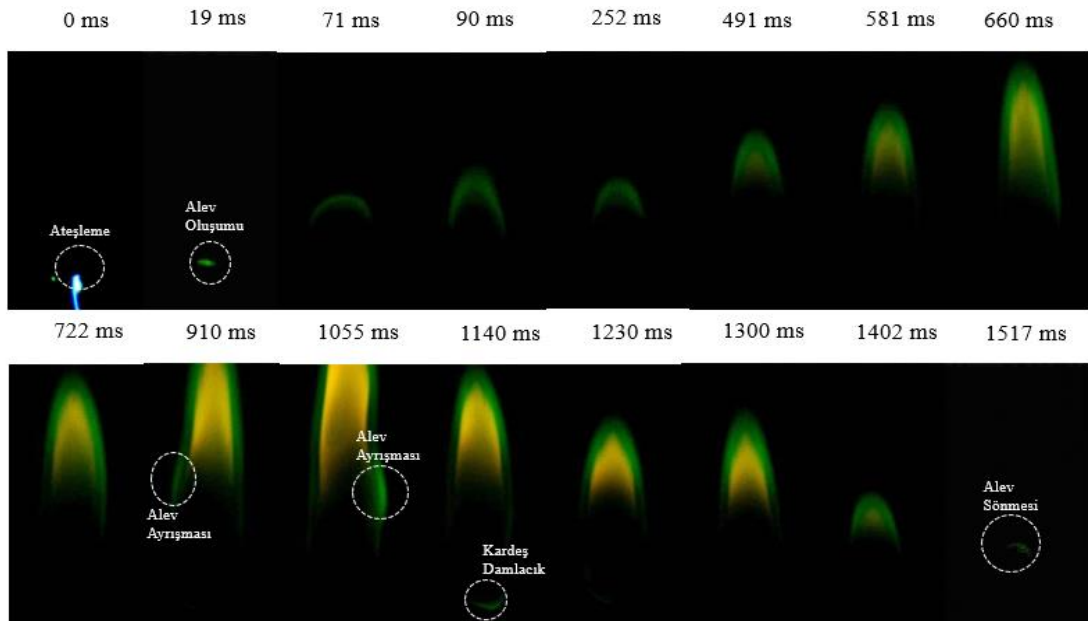
%0 TEB yakıtında kabarcıklaşmış yapı etkisinin görülebilmesi için iki şart vardır. Bunlar; çekirdekleşmiş bölgenin oluşması ve damlacık boyutundaki artışın görülmesidir. 394 ms'den sonraki süreçte %0 TEB yakıtı damlacık hacimsel şekil değişimini arttırmıştır. %0 TEB yakıtında boyun çıkarma ve boyunların parçalanmasına bağlı yavru damlacık yapılarının oluşumu 400-1300 ms yanma prosesi aralığında gerçekleşmiştir. Hacimsel şekil değişimleri damlacık boyutundaki değişimi kapsamaktadır. Kardeş damlacık alevinin oluşumu sırasında alev yüzeyinde kardeş damlacık atımları meydana gelmiştir.



**Şekil 4.1.** %0 TEB Yakıtının Zamana Bağlı Gelişim Süreci

%100 TEB (Saf TEB) yakıtı yanmasının zamana bağlı gelişim süreci Şekil 4.2’de yer almaktadır. %100 TEB yakıt damlacığının yanması sırasında %0 TEB yakıt damlacığına göre daha az aydınlık bölge oluşturan bir yanma görüntüsü sergilemiştir. Ayrıca %0 TEB yakıtının yanmasında yoğun sarı ve turuncu renk özelliği görülmektedir. %100 TEB yakıt damlacığında ise yoğun sarı ve turuncu renklerin yanma sırasındaki oluşumundan farklı olarak ilk alev oluşumu sırasında yoğun yeşil ışımalı alev oluşumu gözlemlenmiştir. 580 ms-1300 ms yanma süresi aralığında %100 TEB yakıt damlacık alevi kararlı alev oluşum trendi sergilemiştir. Yani %100 TEB yakıtındaki alevin kararlı yapısını durgun bir ortamda yanan ve sarı ışıma gösteren muma benzetebiliriz. %100 TEB yakıtının alev kararlılığının %0 TEB yakıtına göre yüksek olduğu gözlemlenmiştir. %100 TEB yakıtının yapısında oksijen bulundurduğu için alevin kararlılığını artırıcı yönde etki etmiştir. İlaveten de alev boyunun yükselmesini sağlamaktadır. 580 ms’den sonra alevin iç yapısında yeşil ışıma süreci bitmektedir ve sarı ışıma evresi başlamaktadır. Bu süreçten önce yoğun olarak görülen yeşil alev sarı alev bölgesi etrafında ince bir alev çerperini sarmış formdadır. %100 TEB yakıt damlacığının yanması sırasında alevin iç kısmında yer alan sarı alev rengi difüzyon yanmadaki is oluşum trendini göstermiştir. Alev yapısının genel olarak yeşil renkte davranış sergilemesinin sebebi; %100 TEB yakıt damlacığının içeriğinde bulunan bor elementidir. Bor elementi yanma reaksiyonlarında yeşil alev oluşum eğilimi sergilemektedir (Tang vd., 2007:4599-4601).

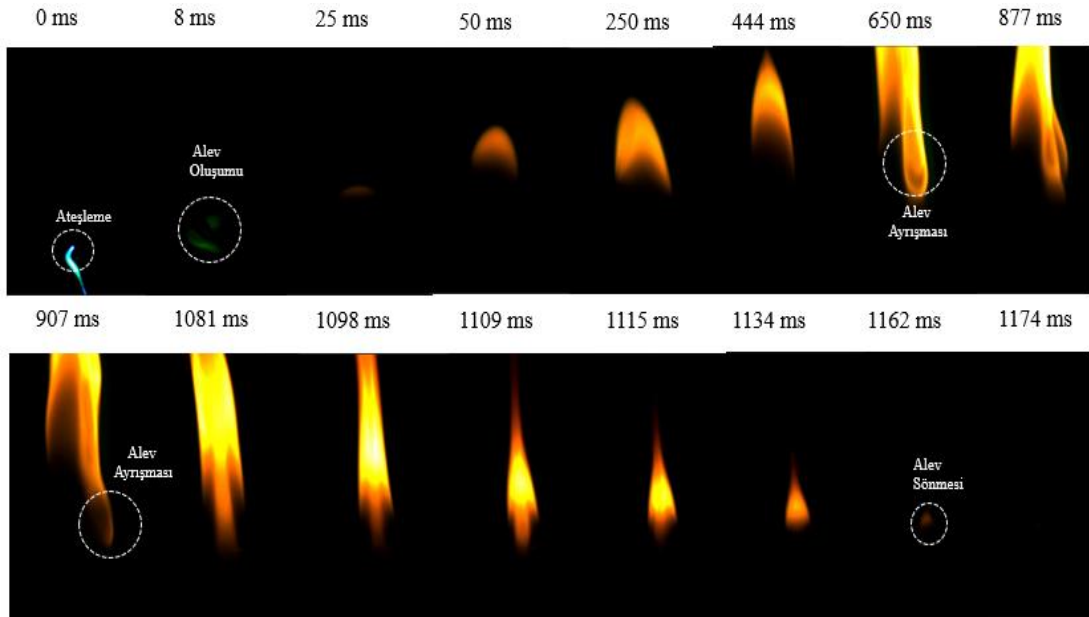
%100 TEB yakıtında HC içeren yapılar, bor ve oksijen elementleri bulunmaktadır. Bor türevi bir yakıt olan %100 TEB yakıtı yanarken hidrokarbon içerikli yapılar, koyu sarı renkte alev ışımalarının oluşumuna yardımcı olmaktadır. Kimyasal yapı olarak %100 TEB yakıtında metil grupları ve metilen grupları bulunmaktadır. Metil grupları yakıtın hızlı bir şekilde oksidasyonuna, metilen grupları da alev davranışına etki etmektedir. Buna bağlı olarak metilen grupları hidroksimetil ve formaldehit bağ yapısına dönüşmektedir. %100 TEB yakıtının metil gruplarını bünyesinde barındırması nedeniyle koyu sarı renkli alev bölgesi oluşmuştur. Oksijen içeren %100 TEB yakıtının %0 TEB yakıtı ile kıyaslaması yapılmıştır. İlk olarak gözlemlenen farklılıklardan biri %100 TEB yakıtının %0 TEB yakıtına göre ışısız alev bölgesi çok fazladır. %100 TEB yakıtı alev boyundaki kısalmalardan kaynaklı olarak alev parlaklığındaki artış trendini sürdürmüştür. %100 TEB yakıtlarının yanması sırasında damlacık yapısında meydana gelen değişimler, alev ayrışmaları, damlacık alevinin ilk yanması sırasında koyu sarı renkli alev bölgesinin oluşumu, kardeş damlacık atımının gerçekleşmesi %0 TEB yakıtına nazaran düşük seviyede oluşum trendi göstermiştir. %100 TEB yakıtında alev gelişimi 660 ms yanma prosesinde gerçekleşmiş, 1517 ms yanma prosesinde alev sönme eğilimi sergilemiştir. %100 TEB yakıtının alev davranışını incelediğimizde; sarı alev iç bölgesinde is oluşumu gözlemlenmiştir ve alev şekil değişimini sınırlı aralıklarda göstermiştir.



**Şekil 4.2.** %100 TEB Yakıtının Zamana Bağlı Gelişim Süreci

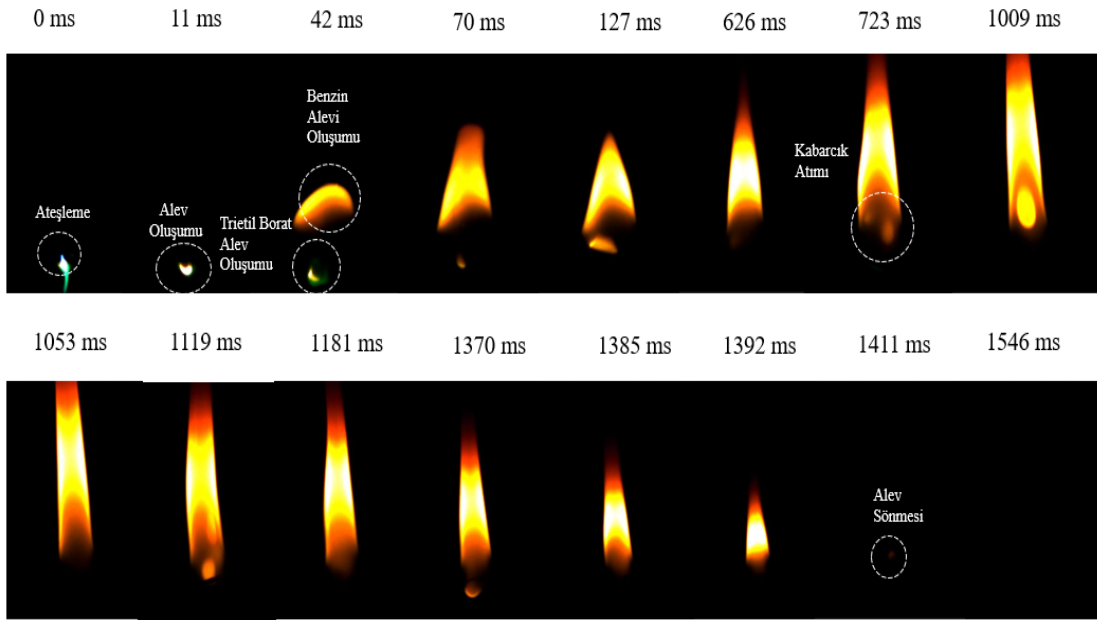
%90 TEB yakıtının zamana bağlı gelişim süreci Şekil 4.3’de yer almaktadır. %90 TEB yakıtında, TEB yakıt miktarının yüksek olması alevin 25 ms-444 ms yanma süreci

aralığında daha az aydınlık bölge görüntüsü sergilemesine sebep olmuştur. 444 ms yanma prosesinden sonra benzin yakıtına ait damlacık yanmasının etkileri görülmüştür. 250 ms yanma zamanında sarı ve turuncu renkli alev oluşumu yapısından ziyade alev dış bölge hattında yeşil renkli alev oluşumu görülmüştür. Yeşil renkli alev ışması 250 ms yanma prosesinde biterek yerini sarı renkli alev ışma bölgesine bırakmıştır. 250 ms yanma aşamasında sarı renkli alevde ışma bölgesinin yoğunluğu difüzyon yanma sonucu oluşumunda artış trendini sergilemiştir. %90 TEB yakıtının 250 ms yanma sürecine kadar damlacık yanmasını sürdürmesinin sebebi; metil ve metilen gruplarının yanma sırasında hızlı bir şekilde reaksiyona girmesinden kaynaklanmaktadır. %90 TEB yakıt karışımlarında metil gruplarının koyu sarı renkli alev oluşumuna etkisi yüksek orandadır. 440 ms-1100 ms yanma süreç aralığında %90 TEB yakıtı yanmasında kararlı alev oluşum trendi sergilenmiştir. %90 TEB yakıtı yanmasında alevin yapısal olarak kararlılığını gözlemlemek mümkündür. Çünkü alevin yapısal değişimine bakıldığında, sadece alev ayrışması etkisinden başka etken faktör yer almamaktadır. Bu yüzden TEB katkılı damlacık yakıtı alevinin kararlılığı benzin yakıtına göre yüksek orandadır. Alev uzaması 650 ms-1098 ms yanma prosesi aralıklarında gerçekleşmiştir. Genel olarak %90 TEB yakıtının yanması sırasında damlacık alevi koyu sarı renkte ışma bölgesinde daha az oluşum trendi sergilemiştir. Ayrıca %90 TEB yakıtında bor elementinin yüksek miktarda olması nedeniyle alev ayrışmaları ve kardeş damlacık atımının etkisi de görülmemiştir.



**Şekil 4.3.** %90 TEB Yakıtının Zamana Bağlı Gelişim Süreci

%50 TEB yakıtının zamana bağlı gelişim süreci Şekil 4.4'de görülmektedir. İlk aydınlık alev tabakası 11 ms yanma prosesinde görülmüştür. 42 ms yanma sürecinde ise benzin damlacık alevi %50 TEB yakıt damlacık alevi ile birlikte oluşum sergilemiştir. Bu yanma süreci içerisinde her iki yakıtın damlacık yanma etkisini görmek mümkündür. Damlacık alevinde 723 ms sürecinde kabarcık atımı izlenmiştir. 723 ms kabarcık atımı prosesinde alev gelişim göstermeye başlamıştır. Yanma gelişimi 1181 ms'de sona ermiştir. İç koni ve dış koni alev yapısı 720 ms-1120 ms damlacık yanma zamanı aralığında etkin bir şekilde görülmüştür. Damlacık boyutunun küçülmesi ise 1119 ms yanma sürecinde başlayarak 1411 ms yanma sürecinde alev sönmesi ile son bulmuştur.

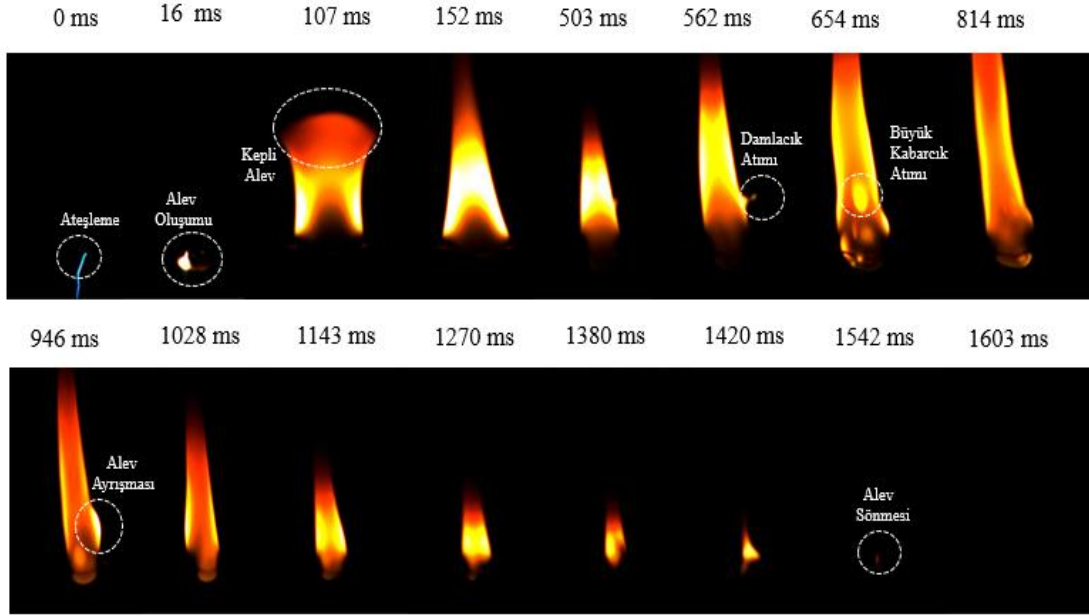


**Şekil 4.4.** %50 TEB Yakıtının Zamana Bağlı Gelişim Süreci

%10 TEB yakıtının zamana bağlı gelişim süreci Şekil 4.5'de görülmektedir. İlk aydınlık alev tabakası 16 ms sürecinde oluşum göstermiştir. Alevin ilk oluşumu sırasında yükselerek 107 ms yanma sürecinde geniş yapılı ışımalar ve kepli alev oluşumu sergilemiştir. %10 TEB yakıt karışımında damlacık alevinin gelişimi 550 ms yanma sürecinde başlamıştır. 152 ms-503 ms yanma süreci aralıklarında alev boyutunda gelişme tam olarak gözlemlenmemiştir. Damlacık alevinde 562 ms yanma prosesinde alev üzerinden damlacık atımı gerçekleşmiştir. Alevin iç yapısındaki kaynamalardan dolayı damlacık atımı gittikçe büyüyerek 654 ms sürecinde damlacık üzerinde büyük kabarcık atımı görülmüştür. Büyük kabarcık atımında kaynayan damlacıklar mikropatlamaları meydana getirmiştir. Yanan damlacıkların kabarcık atımı sırasında damlacık yanmaya devam ederken 946 ms'de alev kopması izlenmiştir. Alev ayrışmasında yakıt yanmaya devam etmiştir. Yanma gelişim

süreci 1028 ms sürecinde sona ermiştir. 1542 ms’de ise SiC teli üzerindeki damlacık alevi sönmüştür.

Damlacıkların yanması açısından %10 TEB yakıtında benzinin hacimsel oranı daha yüksek olduğu için bu durum damlacık renk yoğunluğuna etki etmiştir. Çünkü alev rengi genel olarak yüksek oranda sarı, beyaz ve kırmızı ışımaya bölgelerini oluşturmuştur.

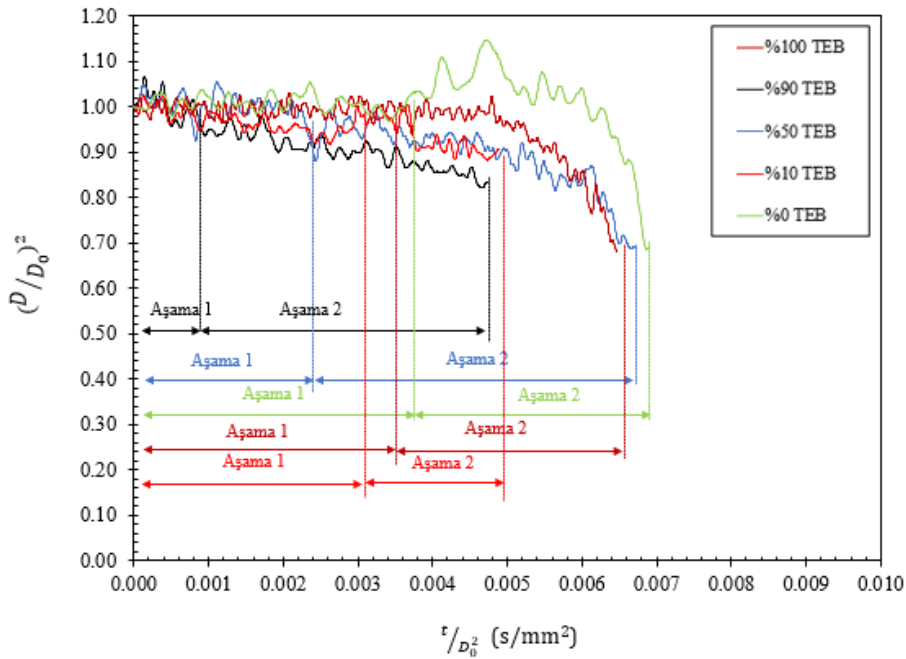


Şekil 4.5. %10 TEB Yakıtının Zamana Bağlı Gelişim Süreci

Damlacıkların zamana bağlı olarak damlacık çap değişimlerine ait grafik Şekil 4.6’da verilmiştir. Damlacık seviyesinin zamanla değişim sürecine sıvı faz sirkülasyonları, yanma sürecindeki şekil değişiklikleri, buhar-sıvı faz arasındaki kararsızlıklar etki etmiştir. Damlacık alevinin sönmeye, atmosferik ortam şartlarındaki uçuşmalar damlacık çapı-zaman eğrisinde değişimler sergilemektedir. Yakıt damlacıklarının yanarken farklı uzay-zamansal ölçeklerde oluşan yakıtın iç yapısındaki kaynamalar kabarcık atımından dolayı hacimsel şekil değişikliği göstermiştir (Basu ve Miglani,2016b:482-503). Damlacık çapındaki şekil değişiklikleri damlacığın ilk yanma sürecinde periyodik olarak şişme-büzülme hareketi yapmasına neden olmaktadır. Bu oluşum süreci 5 farklı yakıt damlacığında gözlenmiştir. Normalleştirilmiş damlacık çapının zamana bağlı değişim eğrisinde damlacığın boyutsuz oranındaki dalgalanmalar damlacık oluşum sürecini ifade etmektedir.  $D^2$  yasasındaki damlacık grafiklerinin her biri farklı oluşum süreci sergilemiştir. Damlacıkların oluşum sürecine kadar geçen zaman Aşama 1 ve Aşama 2’den oluşmaktadır. Aşama 1’de şişme-büzülme hareketlerinin yakıtın ısınma süreci ile rekabeti söz konusudur. Aşama 2 ise damlacık buharlaşmasında şişme-büzülme döngüsünün önüne geçildiği evredir. %100 TEB,

%0 TEB, %90 TEB, %50 TEB, %10 TEB yakıtlarının Aşama 1 için şişme büzülme hareketi döngüsü etkin mekanizmaları Şekil 4.6'da gösterilmiştir. %0 TEB yakıtının Aşama 1'de etkin buharlaşma mekanizmasına sahip olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi; yakıtların yüksek kaynama noktasında buharlaşma hızının genleşme mekanizması ile rekabet edememesidir. Ayrıca %0 TEB yakıtı, diğer saf ve karışimli yakıtlara nazaran daha uzun karbon zincirine sahip olması sebebiyle yanma sürecinde daha uzun ve etkin rol oynamaktadır. %100 TEB ve TEB katkılı yakıtlar %0 TEB yakıtına göre daha kısa süre içerisinde yanmıştır. Çünkü TEB'in iskelet yapısında daha fazla metil grubunu bulundurması, daha hızlı yanmasına ve şekil değişimlerini hızlı bir şekilde gerçekleştirmesine neden olmuştur.

Genel eğri incelemesinde %90 TEB yakıtı Aşama 1'de en kısa sürede, Aşama 2'de %10 TEB yakıtının daha kısa sürede yandığı görülmüştür. %0 TEB yakıtı Aşama 2'de daha yüksek şekil değişimi sergilemiştir. Saf ve karışimli TEB damlacık yakıtının %0 TEB yakıtına göre hızlı bir şekilde tükenmesine neden olmuştur. C/H oranının yüksek olması C temelli zincir yapılara sahip moleküllerin yanma süreçlerinin uzun sürmesine yol açmıştır. Metil grupları kararsız formda tepkimeye girmesinden dolayı daha hızlı tükenmeye neden olmuştur. Bu sebeple yeni türlerin oluşumu sağlanmıştır. Saf ve katkılı TEB yakıt damlacıklarının %0 TEB yakıtına göre davranış farklılığının sebebi; metil sayılarının yüksek seviyede olmasıdır.

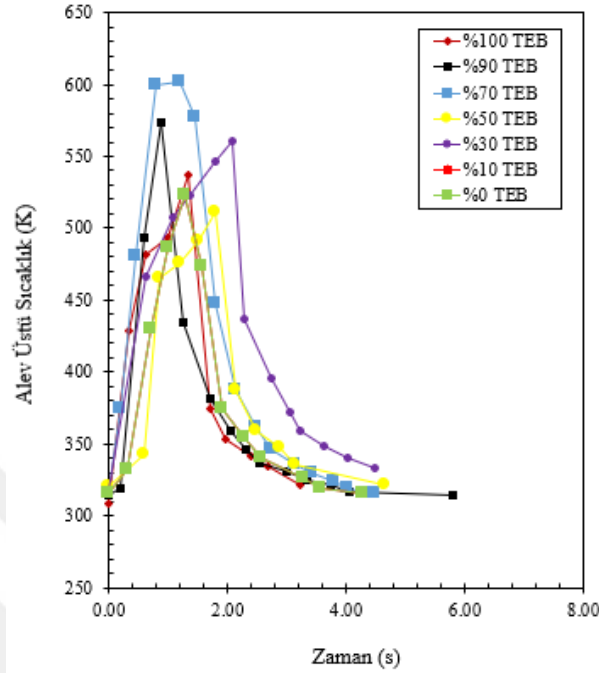


**Şekil 4.6.** Normalize Edilmiş Damlacık Çapının Karesinin Normalize Edilmiş Zamana Göre Değişimi

Saf ya da karışimli damlacık yakıtının yanması sırasında termal kamera görüntüsünde damlacık alev üstü sıcaklığı değerleri zamana bağlı değişim sergilemiştir. Damlacık yakıtının yanması sırasında oluşan alev üstü sıcaklık ve zaman ilişkisi Şekil 4.7'de görülmektedir. Termal kamera üzerinden alınan deneylerde, ölçüm yapılan bölgedeki maksimum alev üstü sıcaklığın ölçümü, alev görüntüsüne odaklanmış lazer algılayıcı tarafından sağlanmıştır. Alev üstü sıcaklık ölçümünde kullanılan termal kamera damlacık yüzeyine damlacık alevi görüntüsünün algılanmasını sağlayacak şekilde ayarlanmıştır. Zamana bağlı alev üstü sıcaklık eğrilerini incelediğimizde en yüksek alev üstü sıcaklığın %100 TEB yakıtında olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca %100 TEB yakıtı ateşlemenin başlangıcından hemen sonra yanarak maksimum alev üstü sıcaklığa ulaşmıştır. Saf ve karışimli yakıtlar açısından maksimum alev üstü sıcaklık bölgelerinin oluşum zamanı, yanma süresinin orta kısımlarında görülmüştür. Karışimli yakıtların zamana bağlı alev üstü sıcaklık verilerini incelediğimizde; %90 TEB ve %70 TEB yakıtlarında maksimum alev üstü sıcaklık oluşum trendleri gözlemlenmiştir. Alev üstü sıcaklıkları genel olarak incelediğimizde; oksijen içerikli yakıtlarda difüzyon alevi sıcaklığının ışısız bölgede hızlı bir şekilde artmasına, oksijen içeriğine sahip olmayan yakıtlarda ise en düşük seviyede sıcaklık oluşumu değerlerine karşılık gelmiştir. Saf yakıtlar arasında alev üstü sıcaklık karşılaştırmasında maksimumdan minimuma doğru %100 TEB yakıtı ve %0 TEB yakıtı olarak sıralama yapabiliriz. Karışimli ve saf yakıtların kıyaslamalarına bakıldığında %90 TEB ve %70 TEB yakıtlarının %100 TEB yakıtına göre alev üstü sıcaklık seviyesi maksimum seviyededir. Çünkü benzin yakıtına farklı hacimsel oranlarda TEB katkısı mikropatlama ve kabarcık atım sayısını arttırmaktadır. Mikropatlama ve kabarcık atım sayısındaki artışlarda alev üstü sıcaklığı anlık olarak yükseltmektedir. Karışimli yakıtlarda ise yüksek orandaki TEB yakıtlarının alev üstü sıcaklıkları maksimum seviyededir. %100 TEB yakıtının maksimum alev üstü sıcaklık seviyesinde olmasının sebebi; %0 TEB yakıtına göre H/C oranının daha yüksek seviyede olmasıdır. Test edilen saf yakıtlardan %100 TEB yakıtının anlık olarak alev üstü sıcaklık artışı göstermesi ilgi çekicidir. Çünkü, %100 TEB yakıtı diğer saf yakıtlardan daha fazla metil grubunu bünyesinde barındırmaktadır. Üstelik %100 TEB yakıtının yüksek reaktivitesi de alev üstü sıcaklığın keskin bir şekilde artışı ile ilişkilidir.

Saf ve karışimli yakıtların zamana bağlı alev üstü sıcaklık kıyaslamalarını genel olarak değerlendirdiğimizde; oksijen içeriğine sahip %100 TEB yakıtı ve TEB katkılı

damlacık yakıtlarında alev üstü sıcaklık artışları anlık ve maksimum seviyededir. Bu sıcaklık artış trendinin sebepleri TEB yakıtının bünyesinde barındırdığı metil grupları, oksijen içerikli yakıt olması ve H/C oranının yüksek seviyede olmasıdır.

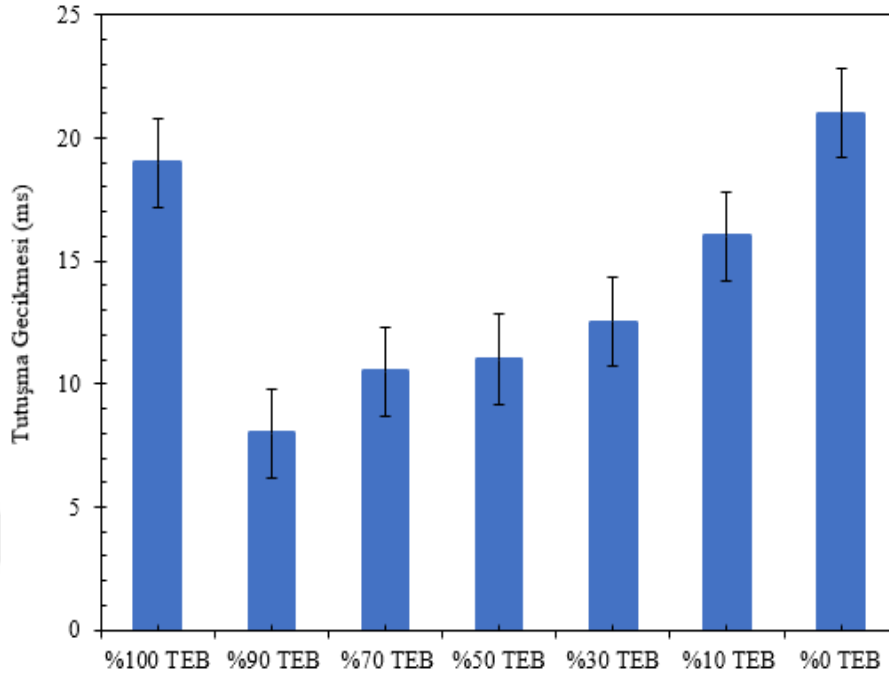


**Şekil 4.7.** Saf ve Karışımli Damlacık Yakıtlarının Alev Üstü Sıcaklıklarının Değişimi

Saf ya da karışımli haldeki damlacık yakıtının SiC teli üzerine damlacık olarak bırakıldığı andan itibaren ark ateşleyici tarafından yanmanın başlaması için ateşleme yaptığı süreye tutuşma gecikmesi denmektedir. Saf ve karışımli damlacık yakıtlarına ait tutuşma gecikmesi süreleri Şekil 4.8’de sütun grafiği halinde verilmiştir. Saf yakıtların tutuşma gecikmesi kıyaslaması %0 TEB>%100 TEB şeklindedir. Karışımli yakıtlarda ise tutuşma gecikmesi sırasıyla %10 TEB yakıtından başlayarak %90 TEB yakıtına doğru azalan bir trend sergilemiştir. Uzun tutuşma gecikmesi süresine sahip olan yakıtlar yüksek oktan sayısına ve düşük setan sayısına sahip hidrokarbon temelli yakıtlardır. Yakıtın kimyasal yapısının tutuşma gecikmesi üzerindeki etkilerini karışımli yakıtlar üzerinden görmek mümkündür. Bu aşamada %0 TEB yakıtının içeriğindeki metilenin ve aromatik hidrokarbonların tutuşma gecikmesini arttırıcı yönde etkisi olduğu görülmüştür.

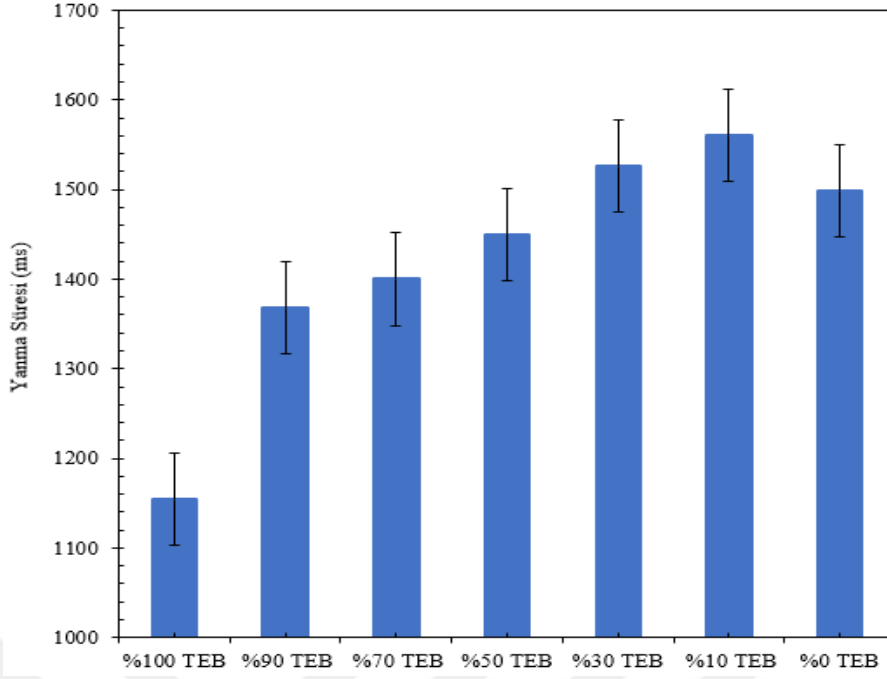
Metilen grupları %0 TEB yakıtının bünyesinde fazla miktarda yer almaktadır. Fakat sarı alev bölgesinin oluşumunda %100 TEB yakıtında az miktarda bulunmaktadır. Kimyasal yapıda bulunan metil sayısının artması reaksiyonun hızını direkt olarak arttırır. Reaksiyon hızının artması da tutuşma gecikmesi süresini azaltmıştır. Buna ek olarak H/C oranındaki artış tutuşma gecikmesi süresini kısaltmıştır. Sonuç olarak H/C sayısının değişimi, metilen

gruplarının varlığı, reaksiyonun gerçekleşme hızı, oktan sayısı ve setan sayısı tutuşma gecikmesine etki etmiştir.



**Şekil 4.8.** Saf ve Karışımli Damlacık Yakıtlarının Tutuşma Gecikmesi Süresi

Yanma süresi, atmosferik ortam koşullarında damlacık yakıtının ilk yandığı andan itibaren alevin söndüğü sürece kadar geçen zaman olarak tanımlanmıştır. Yakıtların yanma sürelerine ait değişimler Şekil 4.9’da yer almaktadır. Bor içerikli %100 TEB yakıtı bünyesinde oksijen elementini barındırmaktadır ve bu sebeple yakıtın yanma süresi daha hızlı gerçekleşmiştir. Bundan dolayı yanma süresine ait sütun grafiğinden elde edilen sonuçlarda, %0 TEB yakıtının yanma süresi diğer yakıtlara nazaran çok yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Diğer %100 TEB ve TEB katkılı yakıtlarda ise düşüş trendi gözlemlenmiştir.



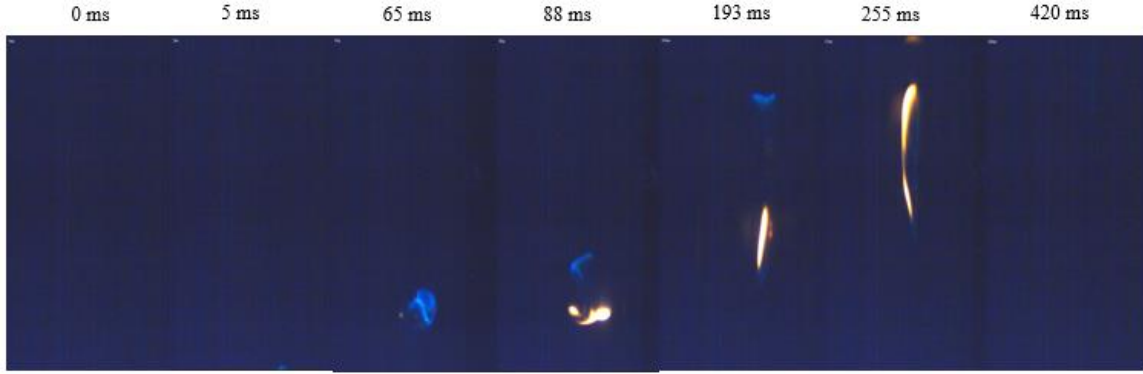
**Şekil 4.9.** Saf ve Karışımli Damlacık Yakıtlarının Yanma Süresi

#### 4.2. Kanal Yanma Deneylerinin Test Sonuçları

Bu kısımda kanal deneylerinin yanma test sonuçlarına ait alev ilerleyiş görselleri ve grafikleri bulunmaktadır. Kanal yanma testlerinde kullanılan %0 TEB yakıt, %5 TEB yakıt ve %100 TEB yakıtın alev davranışları termal kamera ve yüksek hızlı kamera ile incelenmiştir. Termal kameradan alınan test sonuçlarında kanal yanma sırasında hareket halindeki yakıt alevinin sıcaklık ölçümleri anlık olarak gerçekleştirilmiştir. Yüksek hızlı kamera ile kanal yanma test sonuçlarında alev hareketlerinin zamana bağlı değişimiyle ilgili görüntüleri alınmıştır. Kanal yanma deneylerinde saf benzin yakıtı %0 TEB yakıtı ifadesi, %5 TEB-%95 benzin yakıtı karışımında %5 TEB yakıtı ifadesi ve saf TEB içinde %100 TEB yakıt ifadesi kullanılmıştır.

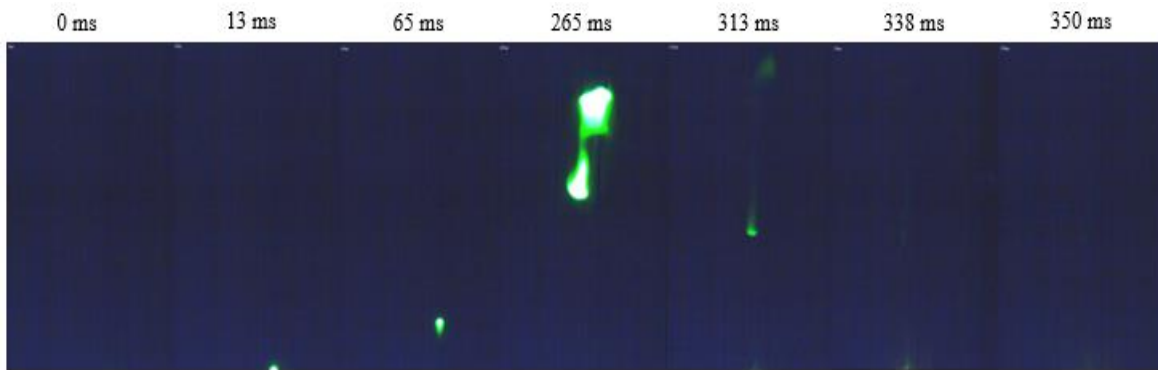
%0 TEB yakıtının kanal yanma alanındaki alev ilerleyişi Şekil 4.10'da yer almaktadır. Kanal yanma hattının üst kısmından mikropipet kullanılarak 50 µl hacimde %0 TEB yakıtı gönderilmiştir. Kanal yanma hattındaki ateşleyici elektrodun üst kısmında %0 TEB yakıt alevinin ilk oluşumu 5 ms yanma süresindedir. 65 ms yanma sürecinde alev ilerleyişini sürdürürken sonra tam olarak mavi renkli alev oluşumu gözlemlenmiştir. İlk sarı renkte alev oluşumu 88 ms yanma prosesinde görülmüştür. Alev gelişiminin ilk evresi de 88 ms yanma sürecini içermektedir. 193 ms yanma sürecinde sarı alev ile mavi alev rengi arasındaki mesafe artmıştır. Bu sırada alev levhanın üst kısmına doğru ilerlemeye devam

etmektedir. 255 ms sürecinde alev kanal yanma hattının üst kısmına ulaşmıştır. Alev ışması devam ederken 420 ms sürecinde ise alev sönmesi görülmüştür.



**Şekil 4.10.** %0 TEB Yakıtının Kanal Yanma Alanında Zamana Bağlı Alev İlerleyişi

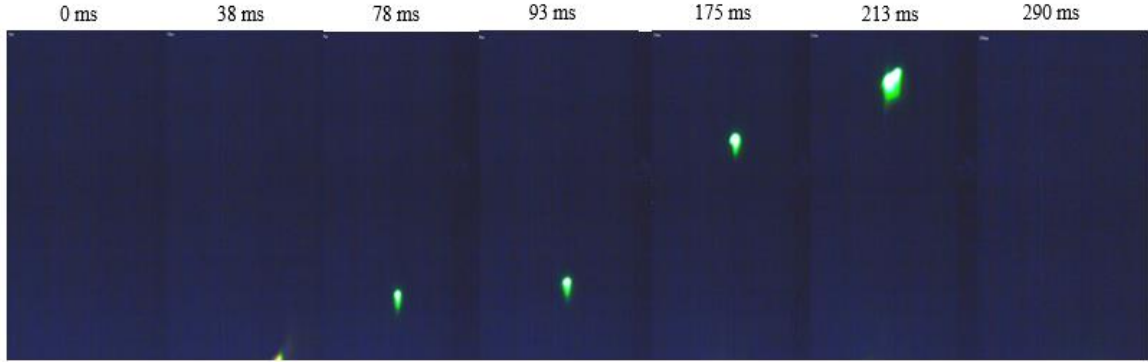
%5 TEB yakıtının kanal yanma alanındaki alev ilerleyişi Şekil 4.11’de yer almaktadır. 0 ms yanma sürecinde %5 TEB yakıtı (50 µl) kanal yanma hattının üst kısmından mikropipet aracılığıyla gönderilmiştir. Burada ilk alevin oluşumu, 13 ms yanma sürecinde kanal yanma hattının alt kısmında görülmüştür. Alev ilerleyişini 65 ms sürecinde devam ettirmiştir. 265 ms yanma sürecinde alev yüzeyinde kopmalar meydana gelmiş ve alevin üst kısma doğru ilerleyişi gözlemlenmiştir. Alev kanal yanma hattının üst kısmından alt kısmına doğru ilerleyişini 313 ms yanma sürecinde alev alanını azaltarak başlatmıştır. Aynı zamanda bu süreçte alev yapısındaki kopmalar alev alanından dolayı daha küçük yapıdadır. 350 ms yanma sürecinde ise alev sönmüştür.



**Şekil 4.11.** %5 TEB Yakıtının Kanal Yanma Alanında Zamana Bağlı Alev İlerleyişi

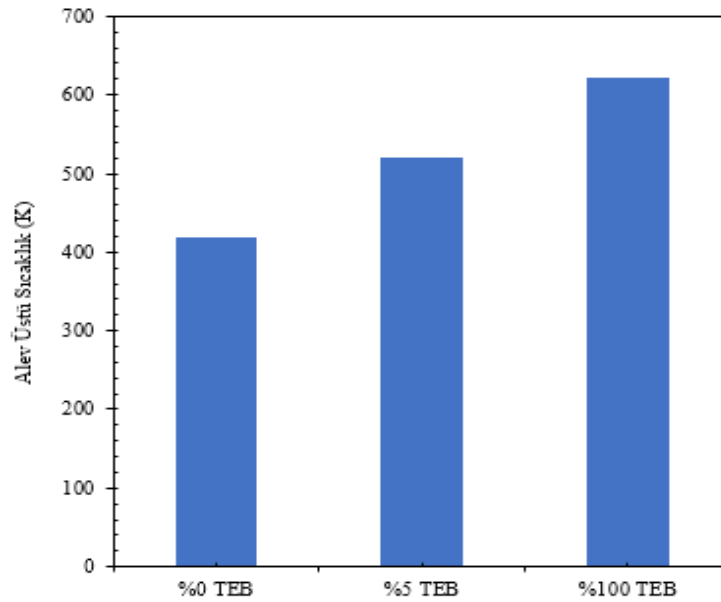
%100 TEB yakıtının kanal yanma test düzeneğinde alev ilerleyişi Şekil 4.12’de görülmektedir. Alev arkının üst kısımdan aşağı doğru salınımı gerçekleştirilen %100 TEB yakıtının ilk ark ateşlemesi 0 ms yanma sürecinde gerçekleşmiştir. Bu yanma sürecinde kanal yanma hattının üst kısmından mikropipet aracılığıyla 50 µl hacimde %100 TEB yakıt gönderimi gerçekleştirilmiştir. Kanal yanma hattının alt kısmında ilk alev oluşumu 38 ms

yanma sürecinde gözlemlenmiştir. Alev oluşuktan sonra ilerleyişini sürdürmeye devam ettirirken 78 ms'den 93 ms yanma sürecine kadar alev alanı büyüme trendi sergilemiştir. 213 ms yanma sürecine kadar alev cephesi kanal içerisinde ilerlemeye devam etmiştir. 290 ms yanma sürecinde alev sönmüştür.



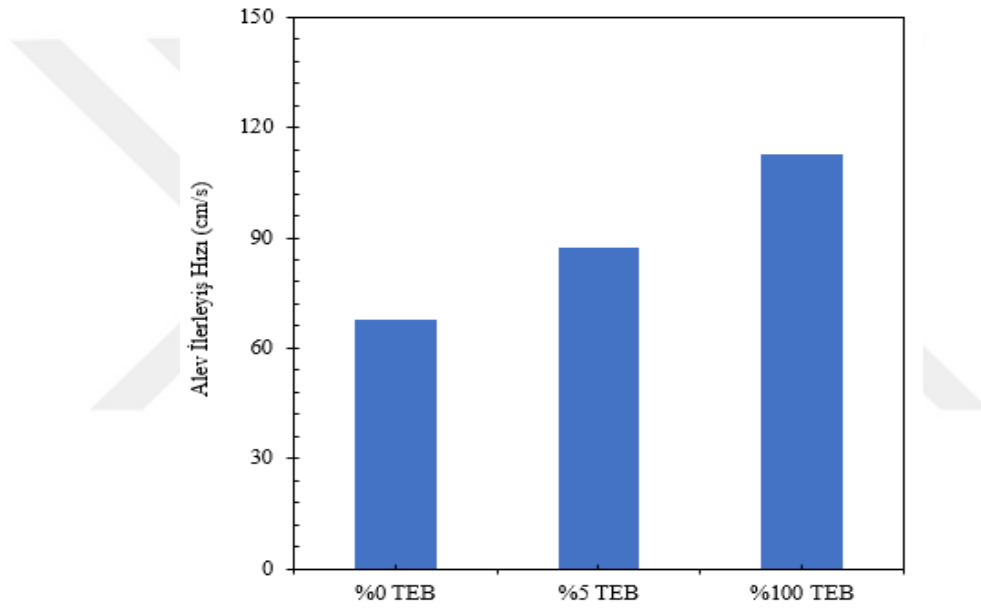
**Şekil 4.12.** %100 TEB Yakıtın Kanal Yanma Alanında Zamana Bağlı Alev İlerleyişi

Kanal yanma testlerinde termal kameradan alınan alev üstü sıcaklık ölçümlerine ait grafik Şekil 4.13'de verilmiştir. Alev üstü sıcaklık ölçümlerinde termal kamera, kanal yanma alev bölgesinin görüntüsünü algılayacak şekilde ayarlanmıştır. Sütun grafiğinde %0 TEB yakıtı, %5 TEB yakıtı ve %100 TEB yakıtlarının maksimum alev üstü sıcaklık ölçümleri bulunmaktadır. Termal kameradan alınan ölçümlerde sırasıyla %0 TEB yakıtı 418 K, %5 TEB yakıtı 521 K ve %100 TEB yakıtı 621 K maksimum alev üstü sıcaklık seviyesine çıkmıştır. Burada %100 TEB yakıtının maksimum alev üstü sıcaklıkta olmasının sebebi; oksijen içeriğini barındırması ve H/C oranının %0 TEB yakıtına göre yüksek olmasıdır.



**Şekil 4.13.** Kanal Yanmada Saf ve Karışım Yakıtların Alev Üstü Sıcaklıkları

Kanal yanma testlerinde alev ilerleyiş hızları hesaplanmış ve Şekil 4.14’de sütun grafiği halinde verilmiştir. Kanal yanma alev ilerleyiş hattının alt kısmı ile üst kısmı arasındaki mesafe 295 mm uzunluğundadır. %0 TEB, %5 TEB ve %100 TEB yakıtlarının yanma süresi alevin söndüğü andan alevin ilk görüldüğü proses çıkarılarak hesaplanmıştır. Alev ilerleyiş hızı ise kanal yanma hattının uzunluğunun yanma süresine bölünmesiyle hesaplanmıştır. Buradan hareketle alev ilerleyiş hızı sırasıyla %0 TEB yakıtının 67.8 cm/s, %5 TEB yakıtının 87.5 cm/s ve %100 TEB yakıtının 112.6 cm/s’dir. %100 TEB yakıtında alev ilerleyiş hızının en yüksek değerde olmasının sebepleri; bünyesinde bulundurduğu oksijen miktarı, diğer saf ve karışımli yakıtlara göre tek başına yanması ve H/C oranındaki artıştır.



**Şekil 4.14.** Kanal Yanmada Saf ve Karışımli Yakıtların Alev İlerleyiş Hızı

### 4.3. Meker-Fisher Beki Deneş Sonuçları

Meker-Fisher beki yakıcı test düzeneği deneşlerinde benzin yakıtına TEB ilavesi yapılarak yanma davranışları incelenmiştir. Enjektörden püskürtülen sıvı yakıt karışımli Meker-Fisher beki gaz çıkış hattı üzerine ilerleyerek yakma deneşleri gerçekleştirilmiştir. Deneşsel alışma kapsamında hacimsel karışımli %5 TEB, %10 TEB, %15 TEB, %20 TEB ve %25 TEB yakıtları için hazırlanmıştır. LPG’nin gönderimi esnasında gaz akışının kontrolü için gaz akış debimetresi kullanılmıştır. LPG sırasıyla 0.75 lt/dk, 1.5 lt/dk, 2.25 lt/dk, 3 lt/dk, 3.75 lt/dk, 4.5 lt/dk, 5.25 lt/dk, 6 lt/dk, 6.75 lt/dk ve 7.5 lt/dk debilerde ayarlanarak gaz akış debimetresi üzerinden gönderimi yapılmıştır. Enjektörden püskürtme

işlemi yapılarak farklı karışım oranlarındaki yakıtların yanmasının görüntülenmesi için yüksek hızlı kamera ve sıcaklık ölçümleri için termal kamera kullanılmıştır.

TEB katkılı yakıtların karışım oranına göre kısaltmaları;

•%0 TEB, LPG yakıtı,

•%5 TEB, %95 Benzin-%5 TEB yakıtları,

•%10 TEB, %90 Benzin-%10 TEB yakıtları,

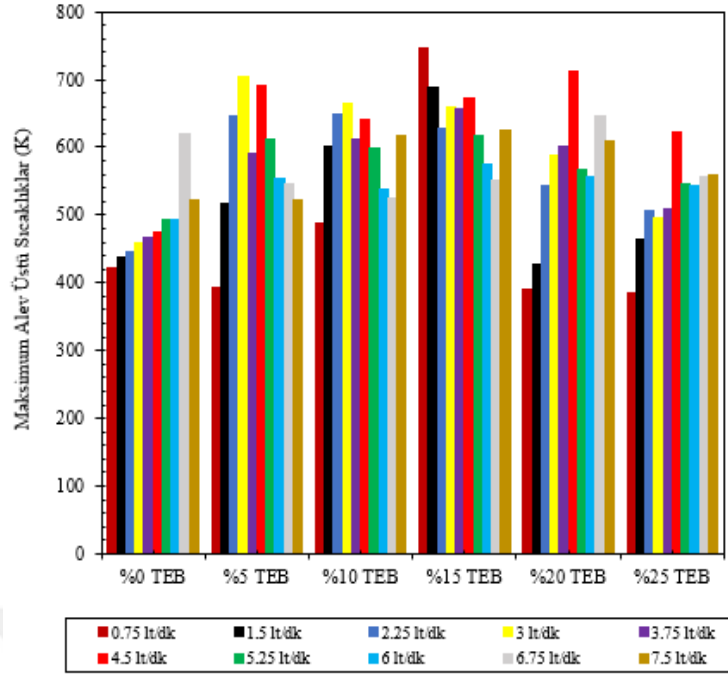
•%15 TEB, %85 Benzin-%15 TEB yakıtları,

•%20 TEB, %80 Benzin-%20 TEB yakıtları,

•%25 TEB, %75 Benzin-%25 TEB yakıtlarının hacimsel karışım halinde kullanıldığı anlamına gelmektedir.

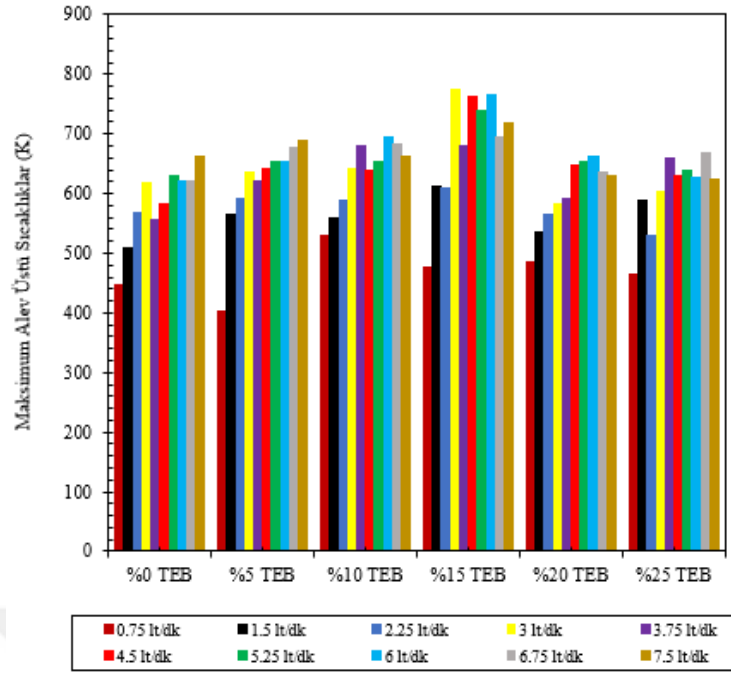
Yüksek hızlı kamera ve termal kameradan alınan deneysel veriler MATLAB 9.4 ve ADOBE PHOTOSHOP CS6 programlarında görüntü işlemleri yapılarak grafiksel veri elde edilmiştir ve alev görsellerinin boy, açı ve alan parametreleri hesaplanmıştır. TEB katkılı yakıtların yakıcı test düzeneğinde yanma işlemleri gerçekleşmeden önce ultrasonik temizleme cihazı içerisinde ultrasonik titreşimlerle yakıt homojenitesi sağlanmıştır.

Ön karışımli alevlerin bütün debi şartlarına ait yakıt karışımlarındaki maksimum alev üstü sıcaklık ölçümleri Şekil 4.15'de verilmiştir. Maksimum alev üstü sıcaklıkları genel olarak TEB katkılı yakıtlar olan %15 TEB ve %20 TEB en yüksek değerdedir. Genel olarak %0 TEB yakıtından %15 TEB yakıt karışımlarına doğru maksimum alev üstü sıcaklıklarında artış trendi sergilenmiştir. Yeşil alev renginden sarı alev rengine geçiş süreci de maksimum alev üstü sıcaklığını etkileyen önemli bir durumdur. Buna ek olarak TEB katkısı ve debi miktarındaki artışla beraber sıcaklık artışı da gözlemlenmiştir. Bunun nedeni sistemde zengin karışım sonucu yanan fazla miktarda yakıtın gösterdiği sıcaklık artışıdır.



**Şekil 4.15.** Debi Değişimleri için Ön Karışımli Yanma Maksimum Alev Üstü Sıcaklıkları

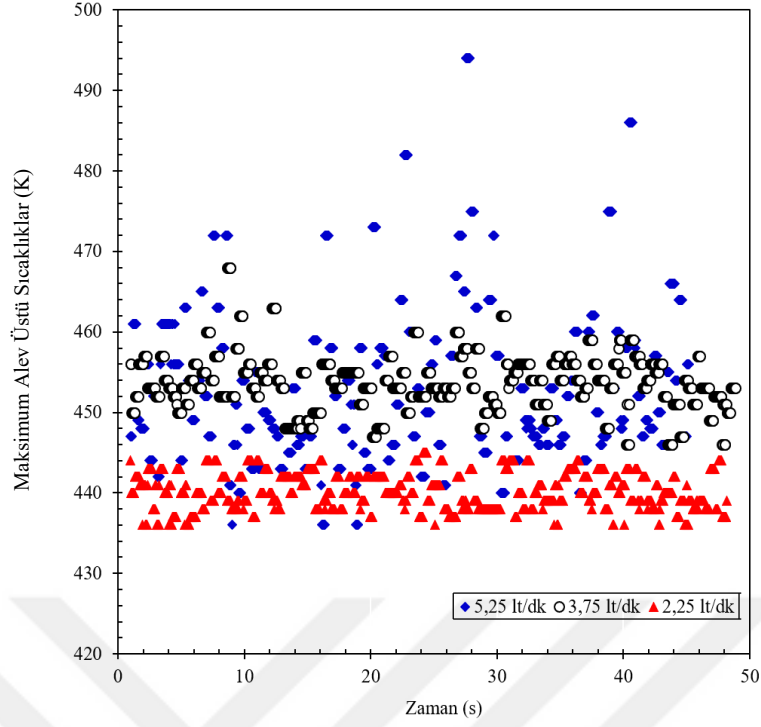
Difüzyon alevlerinin bütün debi şartlarındaki maksimum alev üstü sıcaklıkları Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Maksimum alev üstü sıcaklığı %15 TEB yakıtının yanması sırasında görülmüştür. %0 TEB, %5 TEB, %10 TEB ve %15 TEB yakıtında maksimum alev üstü sıcaklıklarının artış trendi düzenlidir. Fakat %20 TEB ve %25 TEB yakıtındaki maksimum alev üstü sıcaklıklarında diğer TEB katkılarına göre azalma gözlemlenmiştir. Bu alev sıcaklığındaki azalmalar TEB yakıtının bünyesinde bulundurduğu oksijen ile ilgilidir. Çünkü TEB katkısı artış göstererek oksijenli ortamın volümetrik verimini düşürmektedir. Ön karışımli ve difüzyon yanma kriterleri damlacık yanmasına göre farklılık arz etmektedir. Çünkü damlacık yanmasına göre sisteme daha fazla yakıt gönderimi yapılarak yanan HC sayısında artışlar gözlemlenmiştir. Difüzyon yanmanın ön karışımli yanmaya göre alev bölgesi üzerinden alınan alev üstü sıcaklık ölçümleri yüksek seviyededir. Bunun sebebi termal kameradan alınan alev sıcaklık ölçümlerinin alev çekirdek bölgesinden alınmamasıdır.



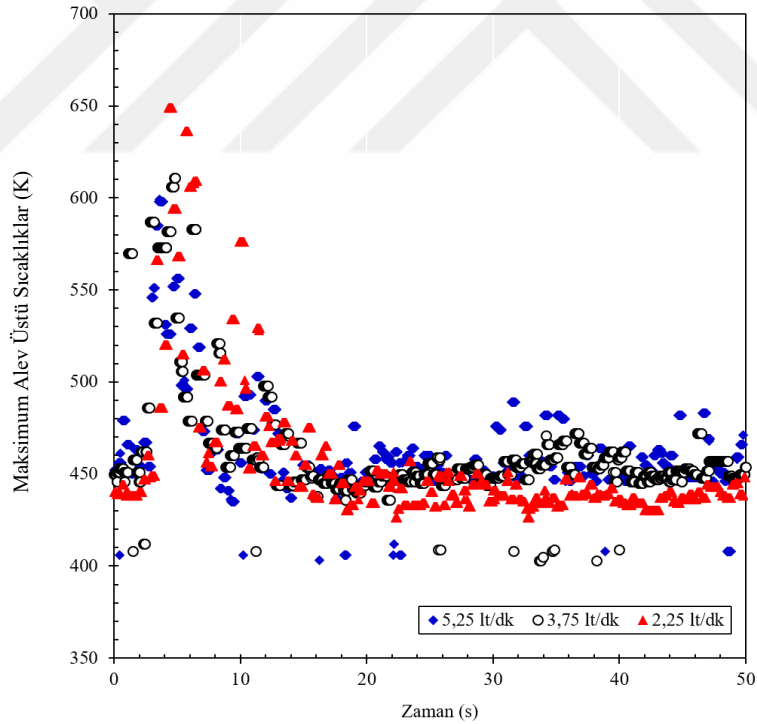
**Şekil 4.16.** Debi Değişimleri için Difüzyon Yanma Maksimum Alev Üstü Sıcaklıkları

%0 TEB yakıtının ön karışimli yanma ve %10 TEB yakıtının ön karışimli yanmada zamana bağlı alev üstü sıcaklıklarının yüzeysel dağılım grafiği Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde %10 TEB yakıt karışımının %0 TEB yakıt karışımına göre sıcaklık artış oranları şöyledir: 2.25 lt/dk debide %45.8 oranında, 3.75 lt/dk debide %30 oranında, 5.25 lt/dk debide %21.2 oranında alev üstü sıcaklık artışı gözlemlenmiştir. %10 TEB ile ön karışimli yanmada alev üstü sıcaklık değişiminin %0 TEB ile ön karışimli yanmaya göre debi miktarının artması ile alev üstü sıcaklık artış oranında azalmalar görülmüştür. Bunun nedeni; 2.25 lt/dk debiden 5.25 lt/dk debiye doğru giderken Meker-Fisher bekinde hacimsel debi çalışma aralığının dışına çıkılmasıdır. Meker-Fisher beki hacimsel debi çalışma aralığı dışına çıkıldıkça alev bekten uzaklaşarak alev salınımını arttırmıştır.

Genel alev üstü sıcaklık yönelimine bakıldığında hem yakıt oranı hem de debi artışı sonucunda alev üstü sıcaklıklarda artış sergilenmiştir. Meker-Fisher beki testlerinde TEB ilavesinin alev üstü sıcaklık üzerindeki etkilerini görebiliriz. Burada TEB katkısının artırılarak yüksek sıcaklık değerlerine çıkılması oksijen içeriğine sahip olmasından ve H/C oranının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.



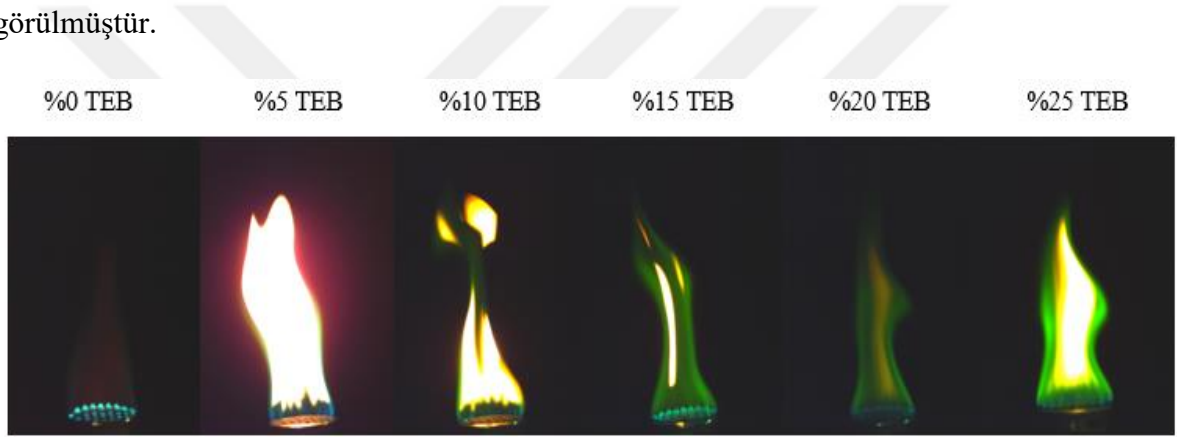
**Şekil 4.17.** %0 TEB ile Ön Karışımli Yanmada Alev Üstü Sıcaklık Değişimi



**Şekil 4.18.** %10 TEB ile Ön Karışımli Yanmada Alev Üstü Sıcaklık Değişimi

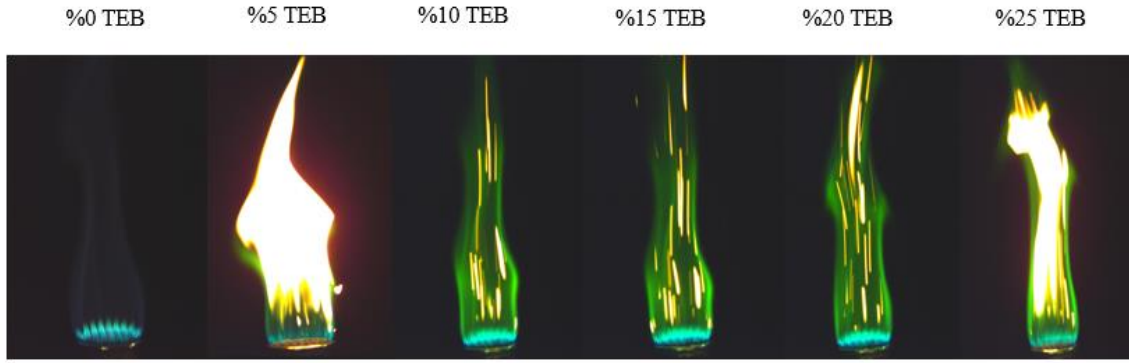
%0 TEB, %5 TEB, %10 TEB, %15 TEB, %20 TEB ve %25 TEB yakıtlarının 1,5 lt/dk debide Meker-Fisher beki yakıcı test düzeneğinde yakılması ile yüksek hızlı kameradan alınan görüntüler Şekil 4.19’da verilmiştir. İncelenen görüntülerde borun kimyasal olarak moleküler yapıda yanmasından kaynaklanan yeşil renkli alev oluşumuna sebep olan etken

TEB katkısındaki artışlardır. Bor partiküllerinin yanması sırasında ilk alev oluşumu yeşil renktedir. İlerleyen süreçte yanmaya devam eden yakıt, alev üstü sıcaklık artışını sürdürürken yeşil alev rengi sarı renkli alev dönüşümüne başlamıştır. TEB yakıtının hacimce yoğun olduğu yakıt karışımlarında bor parçacıkları daha fazla çökme meydana getirmiştir ve daha fazla sarı ışıklı alev rengi oluşumu sergilemiştir. Meker-Fisher beki test düzeneğinde, enjektör test cihazının TEB katkılı yakıt karışımını enjektörden püskürttüğü anda TEB katkılı yakıt hızı LPG akış hızından daha fazla olmaktadır. Enjektör test cihazı 4.5 saniye boyunca püskürtme işlemini devam ettirmiştir. Enjektör test cihazının püskürtme işlemini sona erdirmesi ile TEB katkılı yakıtın debisi azalmıştır. Meker-Fisher beki test düzeneğinde yanma devam ederken mavi renkli alev oluşumu yerini sarı ve yeşil renkli alev oluşumuna bırakmıştır. Bu esnada bor partiküllerinin yanma süreçlerinde mikro patlamalar görülmüştür.



**Şekil 4.19.** Meker-Fisher Bekinde 1,5 lt/dk Debide Ön Karışım Yanma

4.5 lt/dk debide TEB katkısının Meker-Fisher beki ön karışım alevde yanmasına ait yüksek hızlı kamera görüntüleri Şekil 4.20'de verilmiştir. Yüksek hızlı kameradan alınan görüntülerde TEB katkısının hacimsel olarak artması yeşil renkli alev oluşumunu daha etkin kılmıştır. 4.5 lt/dk'daki yakıt debisinin görüntü analizinde 1.5 lt/dk'daki yakıt debisinden farkı, debinin artış durumunda LPG'nin basıncının fazla olmasıdır. Bundan dolayı 4.5 lt/dk debide alev yüzeyinde mikro patlamaların görülme miktarı çok fazladır. 4.5 lt/dk debi değerlendirmeleri; %5 TEB ve %25 TEB yakıtında alev alt bölgesinde ve dış koninin kenar kısımlarında yeşil renkli alev, alev yüzeyinin büyük bir kısmında ise sarı renkli alev oluşumu görülmüştür. Genel görünümde %10 TEB, %15 TEB ve %20 TEB yakıtında yeşil renkli alev oluşumu eğilim sergilemiştir. Diğer yandan hacimsel TEB miktarı artmaya devam ederken bor partikül miktarı da artarak yeşil renkli alev yukarı bölgedeki yüksek sıcaklık ışımaya bölgesine ilerlemiştir. TEB katkısında hacimsel artışın alev kopmalarını meydana getirdiği tespit edilmiştir.



**Şekil 4.20.** Meker-Fisher Bekinde 4.5 lt/dk Debide Ön Karışımli Yanma

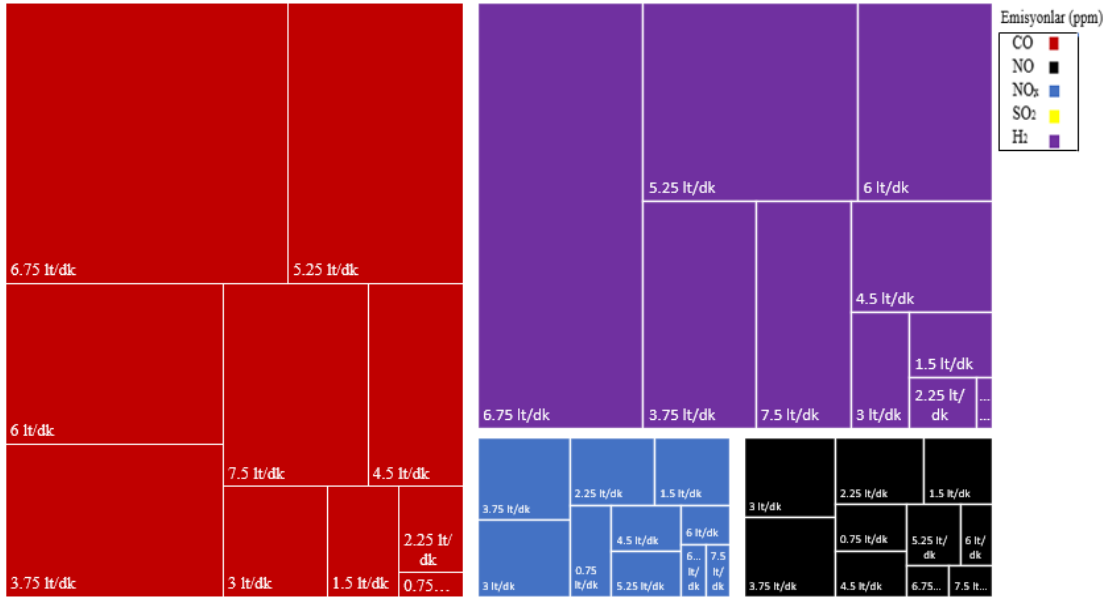
TEB katkılı yakıtların 7.5 lt/dk'lık debide yanma davranışları Şekil 4.21'de gösterilmiştir. 7.5 lt/dk debinin 1.5 ve 4.5 lt/dk'daki debiden farkı yanan yakıt miktarındaki artıştır. Aynı zamanda debi miktarındaki artışlar da alev üstü sıcaklığın yükselmesine neden olmuştur. TEB miktarının artması ile alev rengi de sarı renkte ışımaya yoğunluğunu arttırmıştır. Bor parçacık gönderiminin en yoğun olduğu durumlar; %5 TEB, %10 TEB, %15 TEB, %20 TEB ve %25 TEB yakıtlarının yanması sırasında görülmüştür.



**Şekil 4.21.** Meker-Fisher Bekinde 7.5 lt/dk Debide Ön Karışımli Yanma

%0 TEB yakıtının Meker-Fisher bekinde yakılması ile oluşan maksimum emisyon değerleri Şekil 4.22'de verilmiştir. 0.75 lt/dk, 1.5 lt/dk, 2.25 lt/dk, 3 lt/dk, 3.75 lt/dk, 4.5 lt/dk, 5.25 lt/dk, 6 lt/dk, 6.75 lt/dk, 7.5 lt/dk debilerde maksimum emisyon değerlerine bakıldığında CO ve H<sub>2</sub> emisyonlarının oluşumu gözlemlenmiştir. Zengin karışımli yanma reaksiyonlarında karışımın yanması için yeterli oksijen sağlanamadığı için eksik yanma ürünleri oluşum gösterir. Yanma sonucu açığa çıkan CO ve H<sub>2</sub> de eksik yanma ürünleridir. Eksik yanma reaksiyonu sonucu açığa çıkan CO emisyonu faydalı enerjiye dönüştürülemez. Aynı zamanda H<sub>2</sub> emisyonlarının oluşumunda da aynı durum geçerlidir. Çünkü H<sub>2</sub> emisyonu yetersiz oksijen seviyesinden dolayı H<sub>2</sub>O'ya dönüşmemektedir. CO ve H<sub>2</sub> emisyonları en fazla 6.75 lt/dk debi değerinde oluşum göstermiştir. Burada zengin karışım oluşumu ve eksik

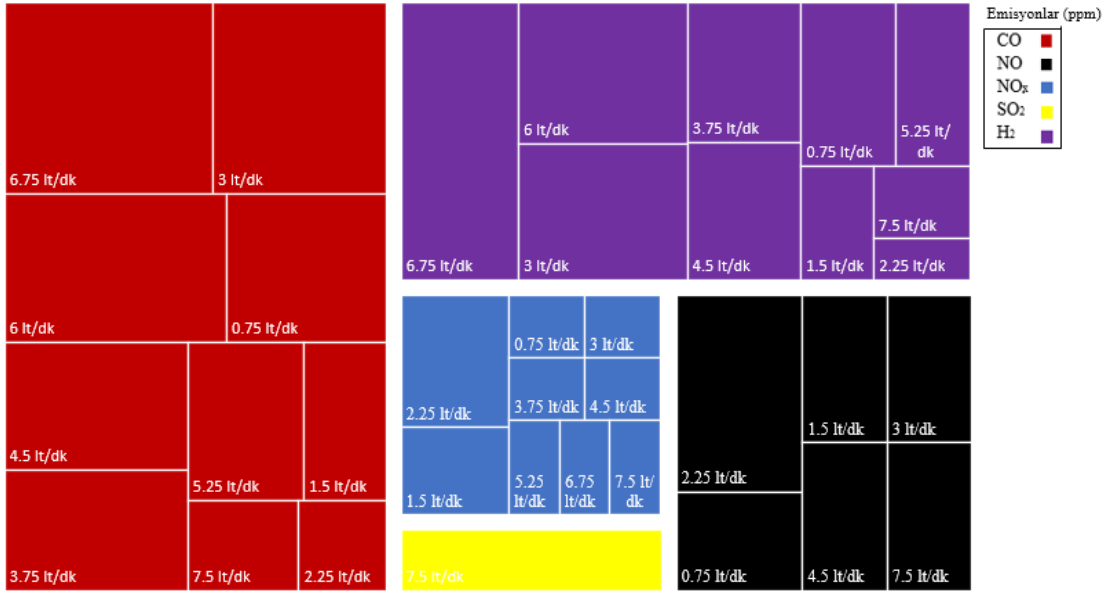
yanma etkinliği daha baskındır. NO<sub>x</sub> emisyonları ise 3.75 lt/dk ve 4.5 lt/dk debilerde maksimum değerindedir. Burada NO<sub>x</sub> emisyonunun maksimum olmasındaki etken ortamın hava yapısıdır. NO emisyon değerleri ile NO<sub>x</sub> emisyon değerleri aynı oranda artışlar göstermiştir.



**Şekil 4.22.** Ön Karışım Yanmada %0 TEB Yakıtı ile Emisyon Ölçüm Sonuçları

%10 TEB yakıtının Meker-Fisher beki yakıcıda yanması sonucu açığa çıkan emisyon oluşum değerleri Şekil 4.23’de görölmektedir. Emisyon test cihazından alınan analiz sonucuna göre CO emisyonlarının en fazla oluştuğu debiler sırasıyla 7.5 lt/dk, 6.75 lt/dk, 0.75 lt/dk, 6 lt/dk, 4.5 lt/dk, 5.25 lt/dk, 3.75 lt/dk, 3 lt/dk, 1.5 lt/dk ve 2.25 lt/dk şeklindedir. 7.5 lt/dk debide TEB katkılı yakıt konsantrasyonunun ve LPG debisinin yüksek olmasından dolayı zengin karışım yanarak CO emisyonu maksimum seviyeye çıkmıştır. 0.75 lt/dk ile 6 lt/dk debi aralığında düşük debiden dolayı TEB’in etkisini gösterememesi CO emisyonunu azaltmıştır. CO ve H<sub>2</sub> emisyonlarının artış ve azalış eğilimleri doğru orantılıdır.





**Şekil 4.24.** Ön Karışım Yanmada %20 TEB Yakıtı ile Emisyon Ölçüm Sonuçları

1.5 lt/dk debide TEB katkısının difüzyon alev oluşumuna etkisi Şekil 4.25’de gösterilmiştir. Meker-Fisher beki test düzeneğinde yapılan testlerde TEB katkısının sınır alev bölgesindeki spektral yeşil alev oluşumu azdır. Bek karışım odasındaki 1.5 lt/dk’lık LPG debisi TEB katkısını alev bölgesine etkin bir şekilde taşıyamamıştır. TEB katkılı sıvı yakıt, karışım odası içerisinde kenar bölgelere yayılım sergileyerek alev bölgesine çıkış göstermemiştir. %0 TEB yakıtında LPG’de difüzyon alevi hâkim olduğu için alev rengi koyu kırmızı renkli ışımaya yapmıştır. LPG alevinin iç bölgesinde sarı renkli alev ışması sergilemiştir. %5 TEB, %10 TEB, %15 TEB, %20 TEB ve %25 TEB yakıtında spektral yeşil alev oluşum bölgesi genel trendde Meker-Fisher beki alev çıkış bölgesinin üst kısmında hakimdir. TEB alevinin spektral yeşil alev oluşum bölgesi difüzyon alevlerinde oldukça küçüktür. Karışım odasında hava ile yakıt reaksiyona girmiştir. Meker-Fisher beki üst kısmı, sınır alev bölgesinde görünmekte olan alevin hava temasının olduğu yerdir. Bu bölgede hava ile yakıtın etkin reaksiyonu sonucu difüzyon alevleri oluşmuştur.



**Şekil 4.25.** Meker-Fisher Bekinde 1.5 lt/dk Debide Difüzyon Yanma

4.5 lt/dk debide Meker-Fisher beki yakıcıda difüzyon alevlerine ait yanma görüntüleri Şekil 4.26'da verilmiştir. TEB katkısının artması ile alev yüzeysel dağılım etkinliğini içeren görüntülerde alev salınımları, alev kopmaları, alev ışımaları ve bor partikül parçacıklarının alevden dışarı atımı gözlenmiştir. Görüntüler incelenirken TEB katkısının giderek artması sonucunda alev bölgesinin iç kısmında yeşil renkli alev oluşumu gözlemlenmiştir. TEB katkısının artması ile bor partiküllerinin atımını da artmıştır. %15 TEB, %20 TEB ve %25 TEB yakıtlarının alev görüntülerinde alev kopmaları giderek artmıştır.



**Şekil 4.26.** Meker-Fisher Bekinde 4.5 lt/dk Debide Difüzyon Yanma

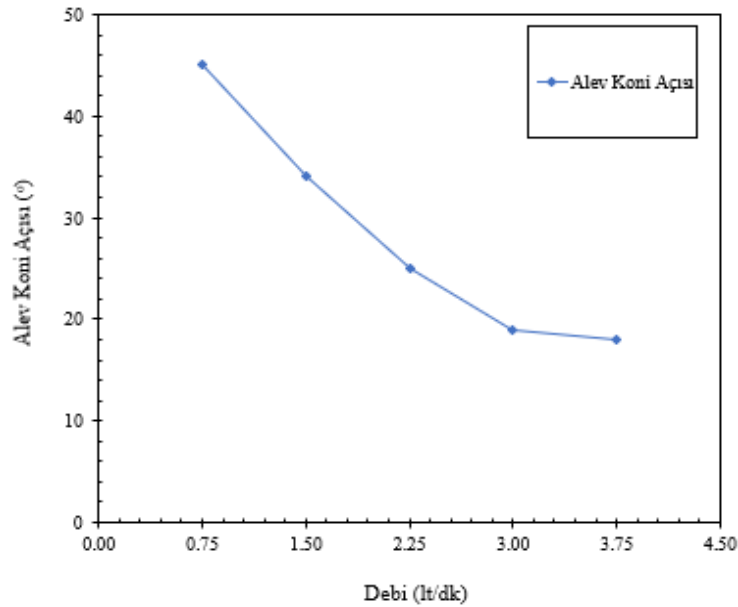
7.5 lt/dk'da bütün debi şartlarına ait TEB katkısının alev üzerindeki etkileri Şekil 4.27'de gösterilmiştir. %5 TEB, %10 TEB, %15 TEB, %20 TEB ve %25 TEB yakıtında alev salınımına bağlı alev kopmalarının miktarı artmıştır. %10 TEB yakıtında yanma sisteminin atmosferik ortam şartlarında olmasından dolayı alevin hareket pozisyonu, alev oluşum bölgesinden ayrıdır. Diğer yandan %5, TEB, %10 TEB, %15 TEB, %20 TEB ve %25 TEB yakıtında bor partiküllerinin atımı gerçekleşmiştir. Bununla birlikte görüntülerde alev kopmalarında artış görülmüştür.

4.5 lt/dk ve 7.5 lt/dk debilerde TEB katkısının yanma davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. TEB katkısının hacimsel olarak artışı hem alev salınımlarında hem de alev kopmalarında artış göstermiştir. 7.5 lt/dk debide TEB katkısının giderek artması ile alev kopmaları ve alev salınımı etkisi daha büyüktür. Çökme eğilimi gösteren bor partikülleri ani parlayan alev görüntülerini meydana getirmiştir. Hacimsel TEB katkısının artması yakıt içerisinde çökme eğilimi gösteren bor partiküllerinin yanmasını başlatarak alev salınımı, alev ışıması, alev kopması ve bor partiküllerinin atımını arttırmıştır.



**Şekil 4.27.** Meker-Fisher Bekinde 7.5 lt/dk Debide Difüzyon Yanma

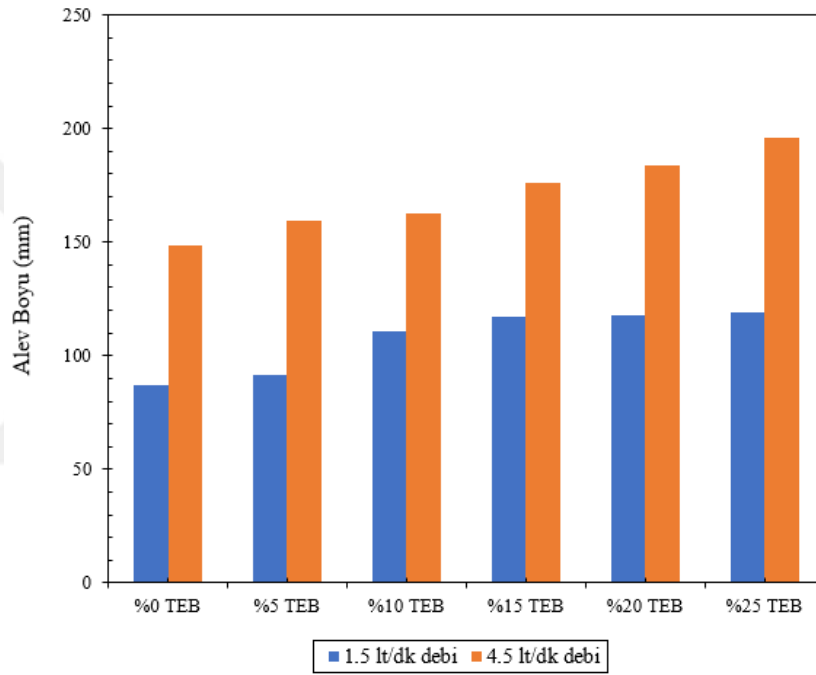
Meker-Fisher beki test düzeneğinde yapılan deneyde LPG kullanılmıştır. LPG'nin 0.75 lt/dk, 1.5 lt/dk, 2.25 lt/dk, 3 lt/dk, 3.75 lt/dk debilerde alev açıları incelenmiştir. Alev koni açısının debiye bağlı değişimi Şekil 4.28'de yer almaktadır. Debi miktarına bağlı olarak alev koni açısı değerlerinde azalma eğilimi görülmüştür. Alev koni açısı ölçümü Ginifab açılı ölçer programı yardımı ile yapılmıştır. Debi miktarının alev koni açısına göre değişimi sırasıyla 0.75 lt/dk debide 45°, 1.5 lt/dk debide 34°, 2.25 lt/dk debide 25°, 3 lt/dk debide 19° ve 3.75 lt/dk debide ise 18° açı ölçümü gerçekleştirilmiştir. LPG debisinin artması ile alev koni açısı azalışını genel trendde sürdürmüştür. Bunun sonucunda alev koni açısının azalması alev boyunun yükselmesine ve alev hızının artmasına neden olmuştur.



**Şekil 4.28.** Alev Koni Açısının Debiye Bağlı Değişimi

Ön karışımli yakıtların Meker-Fisher beki test düzeneğinde yanma testlerinin gerçekleştirilmesi ile alev boylarının değişimi Şekil 4.29'da gösterilmektedir. TEB katkıli yakıtların 1.5 lt/dk ve 4.5 lt/dk debilerdeki alev boyları incelenmiştir. TEB katkıli karışım

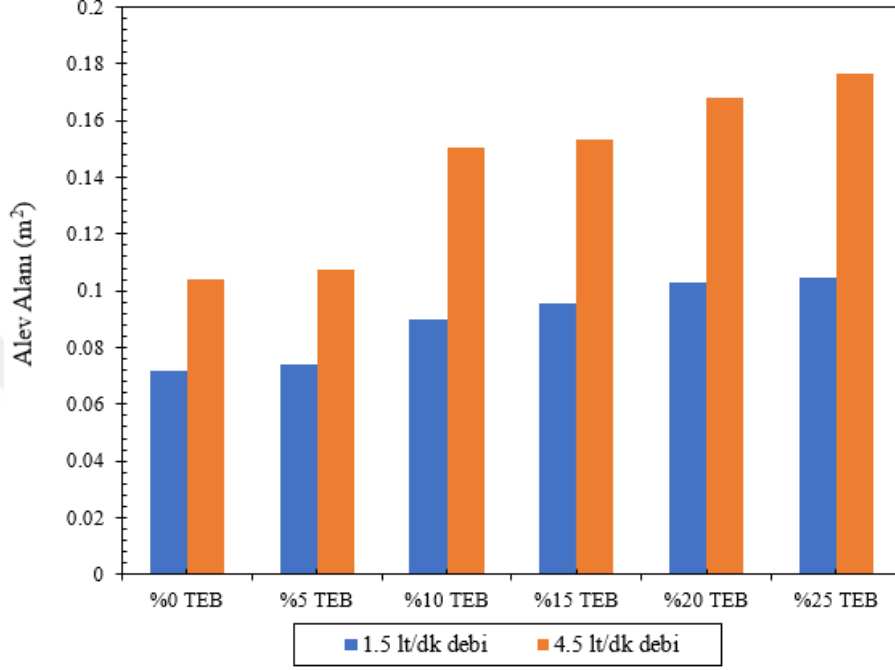
yakıtının hacimsel artışı ile Meker-Fisher beki test düzeneğinde alev boyu değişimleri gözlemlenmiştir. Ön karışımli alevlerin boylarında ve şekillerinde hacimsel debi etkilidir. Deneylelerden elde edilen sonuçlarda alev boyutu, gaz ve sıvı yakıtın hacimsel bir fonksiyonu olarak değişim göstermiştir. Bundan dolayı alev boyları ön karışımli alevlerde çok farklı bir durum sergilemektedir. Kimyasal olarak TEB yakıt katkısı yanma hızını artırıcı yönde etki etmiştir. Yanma hızının artması ile alev boyunda yükseliş trendi gözlemlenmiştir. Alev boylarındaki değişimler büyükten küçüğe doğru sırasıyla %25 TEB, %20 TEB, %15 TEB, %10 TEB, %5 TEB ve %0 TEB yakıtlarıdır. Genel değerlendirmede debiye bağlı yakıt gönderim hızının artması yakıtın karışım oranı ve alev boyunun artmasını sağlamıştır.



**Şekil 4.29.** Alev Boyunun TEB Katkısına Göre Değişimi

Meker-Fisher beki test düzeneğinde farklı karışım oranlarındaki difüzyon alevlerinin alev alanları Adobe Photoshop CS6 programı aracılığıyla hesaplanmıştır. Hesaplanan alev alanları Şekil 4.30'da bulunmaktadır. Alev alanı hesaplamalarında difüzyon alevi oluşum bölgesinde renk konsantrasyonu ayrışımı yapılmıştır. Difüzyon alevinde yapılan deneylerde alev alanı incelemelerinde 1.5 lt/dk ve 4.5 lt/dk debi değerlerine ait sütun grafiği şekilde verilmiştir. Alev alanına debi miktarı ve TEB katkısı etki etmiştir. 1.5 lt/dk debide alev alanları küçükten büyüğe doğru sırasıyla %0 TEB yakıtında  $0.0719 \text{ m}^2$ , %5 TEB yakıtında  $0.0741 \text{ m}^2$ , %10 TEB yakıtında  $0.0899 \text{ m}^2$ , %15 TEB yakıtında  $0.0957 \text{ m}^2$ , %20 TEB yakıtında  $0.1028 \text{ m}^2$  ve %25 TEB yakıtında  $0.1049 \text{ m}^2$  olarak renk konsantrasyonu içeren alev bölgesi alan hesabı yapılmıştır. 4.5 lt/dk debide ise alev alanları küçükten büyüğe doğru

sırasıyla %0 TEB yakıtında 0.1041 m<sup>2</sup>, %5 TEB yakıtında 0.1075 m<sup>2</sup>, %10 TEB yakıtında 0.1505 m<sup>2</sup>, %15 TEB yakıtında 0.1530 m<sup>2</sup>, %20 TEB yakıtında 0.1682 m<sup>2</sup> ve %25 TEB yakıtında 0.1767 m<sup>2</sup> olarak renk konsantrasyonu içeren alev bölgesi alan hesabı yapılmıştır. Genel değerlendirmede hacimsel TEB katkısının artması, alev alanını arttırıcı yönde etki etmiştir.



Şekil 4.30. Alev Alanının TEB Katkısına Göre Değişimi

## SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Deneysel çalışma kapsamında Meker-Fisher beki deneyi, damlacık yanma deneyi ve kanal yanma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında benzin ve TEB yakıtları farklı yakma sistemlerinde ve değişen hacimsel karışım oranlarında yakılmıştır.

Damlacık yanması deneysel test sonuçlarında %0 TEB yakıtı ve %100 TEB yakıtının kendine ait yanma davranışının olduğu tespit edilmiştir. %0 TEB yakıtında kepli alev oluşumu, kabarcık ve baloncuk atımları, damlacık atımı ve genişlemesini gösteren alev oluşumları görülmüştür. %100 TEB yakıtında alev ayrışması ve kardeş damlacık oluşumu gözlemlenmiştir. %0 TEB yakıtı damlacık alev renginin sarıdan kırmızıya doğru renk değiştirirken; %100 TEB yakıt damlacık alev renginin yeşil ve sarı ışmalı alev rengi görüntülenmiştir. %0 TEB yakıtı yanarken iç koni ve yukarı doğru sivrilen alev formatında bir yanma eğilimi gözlenmiştir. Saf ve karışimli TEB yakıtları maksimum alev üstü sıcaklıkta yanma eğilimi göstermişlerdir. Karışimli TEB yakıtlarında ise ilk önce TEB yakıtı yanma eğilimi göstermiş sonrasında benzin yakıtı yanmaya devam etmiştir. Karışimli yakıtlar yanarken karışım içeriğine göre yanma süreci oluşturmuşlardır. Tutuşma gecikmelerinde %100 TEB yakıtı çok kısa sürede yanmıştır. %0 TEB yakıtı ise daha uzun sürede yanmıştır. Karışım içeriğinde yüksek oranda TEB içeren yakıtların daha kısa sürede yanarak tutuşma gecikmesi süresini düşürdüğü tespit edilmiştir. Yanma sürelerine bakıldığında, saf yakıtlarda %0 TEB yakıtı %100 TEB yakıtından daha uzun sürede yanmıştır. Karışimli yakıtlarda ise %10 TEB yakıtı %90 TEB yakıtından daha uzun süre yanma eğilimi göstermiştir. Damlacık çaplarındaki değişimler iki aşamalı olarak göz önüne alınmıştır. Damlacık çapının karesinin zamana bağlı değişim sürecinde %90 TEB yakıtı Aşama-1'de daha kısa sürede yanmıştır. Aşama-2'de ise %10 TEB yakıtı daha kısa sürede yanma eğilimi göstermiştir. %0 TEB yakıtı damlacık şekil değişimini Aşama-2'de etkin bir şekilde sergilemiştir. Saf ve karışimli TEB yakıtlarında damlacık yakıtı hızlı bir şekilde tükenme davranışı gözlemlenmiştir. Kanal yanma deneysel test sonuçlarında %100 TEB yakıtı daha yüksek alev üstü sıcaklıkta yanmıştır. Alev ilerleyiş hızlarında ise %100 TEB yakıtı daha kısa sürede yanma eğilimi göstermiştir.

Meker-Fisher bekinde ön karışimli alevlerde bütün debi şartlarında maksimum alev üstü sıcaklıkları %15 TEB ve %20 TEB yakıtında en yüksek değerdedir. Meker-Fisher beki test düzeneğinde difüzyon alevlerinin maksimum alev üstü sıcaklığı %15 TEB yakıtında görülmüştür. %0 TEB ve %10 TEB yakıtının Meker-Fisher bekinin ön karışimli alevinde yanması sonucu oluşan alev üstü sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Meker-

Fisher bekinde bütün debi şartlarında %10 TEB yakıtının ön karışimli yanması sonucu ani artan alev üstü sıcaklıklar gözlemlenmiş ve alev üstü sıcaklık skalasındaki maksimum minimum alev üstü sıcaklık farkının çok fazla olduğu tespit edilmiştir. 1.5 lt/dk debide ön karışimli alevlerde bütün debi şartlarında Meker-Fisher bekinde yeşil renkli alev oluşumları görülmüştür. TEB yakıtının benzinle karışımı sonucunda yakıt çökeltmeleri meydana gelmiştir. Bor partiküllerinin yanması sırasında ilk alev oluşumu yeşil renktedir. Yeşil alev rengi artan sıcaklıkla beraber sarı renkli aleve dönüşmüştür. 4.5 lt/dk debide ön karışimli alevlerin Meker-Fisher bekinde yanması ile TEB katkısının artışı sonucu yeşil renkli alev oluşumunda artışlar gözlemlenmiştir. 4.5 lt/dk debideki alev görüntü analizinin 1.5 lt/dk debiden farkı TEB katkılı yakıtlarda küçük patlamaların artışına neden olmasıdır. Ön karışimli alevde 7.5 lt/dk debide bor partiküllerindeki yoğunluk ve TEB katkısının artması ile alevin rengi yeşil renkten sarı renge dönüşmeye başlamıştır. TEB katkısının artması alev kopmasını ve alev salınımını da arttırmıştır. %10 TEB yakıtı ve %20 TEB yakıtındaki emisyon oluşumları %0 TEB yakıtındaki emisyon oluşumlarına göre azalma eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. %0 TEB yakıtının maksimum emisyon oluşumuna göre; %10 TEB yakıtında maksimum CO emisyonunda %5.51 oranında ve %20 TEB yakıtında maksimum CO emisyonunda %60.22 oranında emisyon azalması tespit edilmiştir. Genel olarak bütün debi şartlarında %0 TEB yakıtı, %10 TEB yakıtı ve %20 TEB yakıtında CO ve H<sub>2</sub> gibi eksik yanma ürünlerinin yüksek miktarda olduğu izlenmiştir. 1.5 lt/dk debide difüzyon yanma alev görüntülerinde TEB yakıtı alev bölgesine etkin bir şekilde taşınmamıştır. Genel trendde 1.5 lt/dk debide difüzyon alevinde yeşil renkli alev oluşum bölgesi Meker-Fisher beki alev çıkış bölgesinin üst kısmında hakimdir. TEB yakıtının 1.5 lt/dk debide spektral yeşil alev ışıma bölgesi oldukça küçüktür. 4.5 lt/dk debide difüzyon yanmada bor partiküllerinin atımı, alev salınımı, alev kopması ve alev ışıması TEB yakıt katkısının artışı ile birlikte görülmüştür. 4.5 lt/dk debide alev kopmaları %15 TEB, %20 TEB ve %25 TEB yakıtında giderek artmıştır. Benzer şekilde 7.5 lt/dk debide TEB katkısının artması ile alev kopmaları ve alev salınımları giderek etkisini arttırmıştır.

LPG yakıtı Meker-Fisher bekinde ön karışimli alevlerde yapılan deneylerde alev koni açısının ölçümünde kullanılmıştır. Ölçümler 0.75 lt/dk, 1.5 lt/dk, 3 lt/dk ve 3.75 lt/dk debilerde yapılmıştır. Debi miktarının artması ile alev koni açısında azalma trendi sergilenmiştir.

Meker-Fisher beki ön karışimli alevde TEB katkısının artması ile alev boylarında yükselme gözlemlenmiştir. Difüzyon alevleri Meker-Fisher bekinde 1.5 lt/dk ve 4.5 lt/dk

debilerde yapılan ölçümlerde TEB katkısının ve debi miktarının artmasıyla alev alanında büyümeler görülmüştür.

Genel çerçeveden bakıldığında TEB yakıtı yanma testlerinde ana yakıt ve karışımli yakıt olarak kullanılmıştır. Bor türevi yakıt olan TEB'in düşük enerji yoğunluğuna sahip olan diğer yakıtlara ilave yakıt olarak kullanıldığında yakma sistemlerinin verimini ve performansını arttırıcı yönde avantajlar sağlayacaktır. Ayrıca TEB'in yada bor türevi yakıtların ilave yakıt olarak yakma sistemlerinde kullanımını yanma sonrası açığa çıkan emisyon oluşumlarını azaltacaktır. Dünya çapında en fazla bor rezervine sahip olan ülkemizin enerji bağımsızlığının sağlanması adına bu yüksek lisans tezinin ilerde bor ve bor türevleri üzerine gerçekleştirilecek deneysel çalışmalar için önemli verileri literatüre kazandırdığı düşünülmektedir.

## KAYNAKÇA

- Basu, S., and Miglani, A. (2016). Combustion and Heat Transfer Characteristics of Nanofluid Fuel Droplets: A Short Review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 96, p. 482-503.
- Besser H. L. and Strecker, R., (1993). Overview of Boron Ducted Rocket Development, *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*, vol. 2, p. 133-178.
- Beşergil, B., Atomik Spektroskopi. Alev, Absorbsiyon, Fluoresans (alev, absorpsiyon, flüoresans) Blog Sayfası, 24.05.2022 tarihi [http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page\\_587.html](http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_587.html) adresinden erişildi.
- Blackham, A. U., Smoot, L. D., and Yousefi, P. (1994). Rates of Oxidation of Milimeter-Sized Char Particles: Simple Experiments. *Fuel*, 73(4), p. 602-612.
- Britannica, The Editors of Encyclopaedia. "Bunsen Burner". Encyclopedia Britannica, (6 May. 2020), 24 Mayıs 2022 tarihinde <https://www.britannica.com/science/Bunsen-burner> adresinden erişildi.
- Brotherton, R. J., Weber, C. J., Guibert, C. R., and Little, J. L. (2000). Boron Compounds. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, p. 250-254.
- Choi, H., Kim, H., Min, K., and Lee, J. (2002). The Stratified Combustion Model of Direct-Injection Spark-Ignition Engines, *Proceedings of the combustion institute*, v. 29(1), p. 695-701.
- Demirbaş, A. (2005). Hydrogen and Boron as Recent Alternative Motor Fuels. *Energy Sources*, 27(8), p. 741–748. doi:10.1080/00908310490450836.
- Doğu, Y., Yontar, A. A., and Kantaroğlu, E. (2020). Experimental Investigation of Effects of Single and Mixed Alternative Fuels (Gasoline, CNG, LPG, Acetone, Naphthalene and Boron Derivatives) on A Commercial i-DSI Engine. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, p. 1-20.
- Dreizin, E. L., Keil, D. G., Felder, W., and Vicenzi, E. P. (1999). Phase Changes in Boron Ignition and Combustion. *Combustion and Flame*, 119(3), p. 272-290.

- Ediz, N. and Özdağ, H. (2001). Bor Mineralleri ve Ekonomisi. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, 2: s. 133-151.
- Elbasuney, S., Gobara, M., and Yehia, M. (2019). Ferrite Nanoparticles: Synthesis, Characterization and Catalytic Activity Evaluation for Solid Rocket Propulsion Systems. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 29(3), p. 721-729.
- Element Simgesi, (2022). Vikipedi, 24 Mayıs 2022 tarihinde [https://tr.wikipedia.org/wiki/Element\\_simgesi](https://tr.wikipedia.org/wiki/Element_simgesi) adresinden erişildi.
- Etimaden, 2006. Eti Mine Works General Management. 24 Mayıs 2022 tarihinde <http://www.etimaden.gov.tr> adresinde erişildi.
- Faik, A. M. D., and Yang Z., (2018). Multicomponent Fuel Droplet Combustion Investigation Using Magnified High Speed Backlighting and Shadowgraph Imaging. *Fuel*, vol 221, p. 89-109.
- Fan, Y., Suzuki, Y., and Kasagi, N. (2009). Experimental Study of Microscale Premixed Flame in Quartz Channels. *Proceedings of the Combustion Institute*, 32(2), p. 3083-3090.
- Foelsche, R. O., Burton, R. L., and Krier, H. (1999). Boron Particle Ignition and Combustion at 30–150 Atm. *Combustion and Flame*, 117(1-2), p. 32-58.
- Glassman, I., Yetter, R. A., and Glumac, N. G. (2018). *Combustion*. Academic Press, U.S.A., p. 151-153.
- Gökmen, S., (2019). Gıda Sanayinde Borun Kullanım İmkanları ile İlgili Bir Araştırma, s. 499-503.
- Griffiths, J. F., and Barnard, J. A. (1995), *Flame and Combustion*. Routledge, Londra, Birleşik Krallık. p. 61.
- Hayhurst, A. N., and Telford, N. R. (1970). Diffusional Effects in Premixed Laminar Flames of Hydrogen, Oxygen, and Nitrogen. *Combustion and Flame*, 14(3), p. 303–312. doi:10.1016/s0010-2180(70)80044-x.
- Heywood, J. B. (2018). *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill Education, p. 1.

- Hosmane, N. S., (2011). *Boron science. New Technologies and Applications*, U.S.A., p. 385-491.
- İlbaş, M. ve Karyeyen, S. (2012). Kok Fırını Gazının Model Bir Gaz Türbini Yanma Odasındaki Yanma Performansının Sayısal Olarak İncelenmesi . *Politeknik Dergisi* , 15 (4), s. 171-176.
- Jain, A., Joseph, K., Anthonysamy, S., and Gupta, G. S. (2011). Kinetics of Oxidation of Boron Powder. *Thermochimica Acta*, 514(1-2), p. 67-73.
- Javed, I., Baek, S. W., and Waheed, K. (2013). Evaporation Characteristics of Heptane Droplets With The Addition of Aluminum Nanoparticles at Elevated Temperatures. *Combustion and Flame*, 160(1), p. 170-183.
- Jones, J. M., Darvell, L. I., Bridgeman, T. G., Pourkashanian, M., and Williams, A. (2007). An Investigation of the Thermal and Catalytic Behaviour of Potassium in Biomass Combustion. *Proceedings of the Combustion Institute*, 31(2), p. 1955–1963. doi:10.1016/j.proci.2006.07.093.
- Ju, Y., and Maruta, K. (2011). Microscale Combustion: Technology Development and Fundamental Research. *Progress in Energy and Combustion Science*, 37(6), p. 669-715.
- Karmakar, S., Wang, N., Acharya, S., and Dooley, K. M., (2013). Effects of Rare-earth Oxide Catalysts on the Ignition and Combustion Characteristics of Boron Nanoparticles, *Combustion and Flame*, vol. 160, p. 3004-3014.
- Kashir, B., Tabejamaat, S., and Jalalatian, N. (2015). A Numerical Study on Combustion Characteristics of Blended Methane-Hydrogen Bluff-Body Stabilized Swirl Diffusion Flames. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(18), p. 6243-6258.
- Kelen, F. (2014). Motorlu Taşıt Emisyonlarının İnsan Sağlığı ve Çevre Üzerine Etkileri. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19(1-2), s. 80-87.
- KILIÇASLAN, C., ve AKTÜRK, A. İ. (2020) Borun Stratejik ve Ekonomik Önemi. *KOSTARIKA UNIVERSIDAD EMPRESARIAL DE COSTA RICA (UNEM)*, İstanbul, s. 10-30.
- Law, C. K. (2010). *Combustion physics*. Cambridge University Press, İngiltere, Birleşik Krallık, p. 264.

- Liang, D., Liu, J., Zhou, Y., and Zhou, J. (2017). Ignition and Combustion Characteristics of Amorphous Boron and Coated Boron Particles in Oxygen Jet. *Combustion and Flame*, 185, p. 292-300.
- Liu, P. J., Liu, L. L., and He, G. Q., (2016). Effect of Solid Oxidizers on the Thermal Oxidation and Combustion Performance of Amorphous Boron, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, p. 1-7.
- Mansouri, Z. (2019). Combustion in Wavy Micro-channels for Thermo-photovoltaic Applications–Part I: Effects of Wavy Wall Geometry, Wall Temperature Profile and Reaction Mechanism. *Energy Conversion and Management*, 198, p. 111155.
- Maruta K, Park J K, et al., (2004). Characteristics of Microscale Combustion in A Narrow Heated Channel. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 40: p. 516-523.
- Mason, P. E., Darvell, L. I., Jones, J. M., Pourkashanian, M., and Williams, A. (2015). Single Particle Flame-Combustion Studies on Solid Biomass Fuels. *Fuel*, 151, p. 21–30. doi:10.1016/j.fuel.2014.11.088.
- Meng, K., Bao, L., Shi, Y., Han, K., Lin, Q., and Wang, C. (2020). Experimental Investigation on Ignition, Combustion and Micro-explosion of RP-3, Biodiesel and Ethanol Blended Droplets. *Applied Thermal Engineering*, p.115649.
- MTA, 2010. Borun Tarihiçesi, Starbor, 24 Mayıs 2022 tarihinde <https://www.starbor.com.tr/haber/borun-kisa-tarihcesi.html> adresinden erişildi.
- Mutlu, İ., Bayrakçeken, H., Yavuz, İ., Çengelci, E., and Kunt, M. (2018). Motorlu Taşıtlardan Kaynaklanan Sera Gazı Emisyonları ve Önleme Yöntemleri. *14th International Combustion Symposium*, s. 240-244.
- Neuber, A., Krieger, G., Tacke, M., Hassel, E., and Janicka, J. (1998). Finite Rate Chemistry and NO Mole Fraction in Non-premixed Turbulent Flames. *Combustion and Flame*, 113(1-2), p. 198-211.
- Owen, K., and Coley, T. ,(1990). *Automotive fuels handbook*, U.S.A., p. 351-402.
- Özener, O. (2006). İçten Yanmalı Motorlarda Kullanılan Yakıtlar ve Alternatif Yakıtların Yanma Hızlarının Ölçümü, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü., *Fen Bilimleri Enstitüsü*, s. 8-9.

- Öztürk, H., (2021). Yenilenebilir Enerji Kaynakları. Birsen Yayınevi, İstanbul, s. 1-11.
- Peleg, M., Normand, M. D., and Corradini, M. G. (2012). The Arrhenius Equation Revisited. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 52(9), p. 830-851.
- Saxena, S. (Ed.), (2016). *Handbook of Boron Nanostructures*, CRC Press, U.S.A., p. 77-101.
- Shang, W., Yang, S., Xuan, T., He, Z., and Cao, J. (2020). Experimental Studies on Combustion and Microexplosion Characteristics of N-Alkane Droplets. *Energy & Fuels*, 34(12), p. 16613-16623. doi:10.1021/acs.energyfuels.0c02904.
- Shen, X., Xu, J., and Wen, J. X. (2021). Phenomenological Characteristics of Hydrogen/Air Premixed Flame Propagation in Closed Rectangular Channels. *Renewable Energy*, 174, p. 606-615.
- Shinomori, K., Katou, K., Shimokuri, D., and Ishizuka, S. (2011). NO<sub>x</sub> Emission Characteristics and Aerodynamic Structure of a Self-Recirculation Type Burner for Small Boilers. *Proceedings of the Combustion Institute*, 33(2), p. 2735-2742.
- Shkolnikov, E. I., Zhuk, A. Z. and Vlaskin, M. S., (2011). Aluminum as Energy Carrier: Feasibility Analysis and Current Technologies Overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, p. 4611-4623.
- Sun, P., Wu, C., Zhu, F., Wang, S., and Huang, X. (2020). Microgravity Combustion of Polyethylene Droplet in Drop Tower. *Combustion and Flame*, 222, p. 18–26. doi:10.1016/j.combustflame.2020.08.032.
- Tang, C., Bando, Y., Zhi, C., and Golberg, D. (2007). Boron–Oxygen Luminescence Centres in Boron–Nitrogen Systems. *Chemical Communications*, (44), p. 4599-4601.
- TCI Chemicals, Triethyl Borate İskelet Yapısı, 24 Mayıs 2022 tarihinde <https://www.tcichemicals.com/OP/en/p/B0520> adresinden erişildi.
- Vetlicky B., and Chladek, J., (2012). Underwater Incineration of Heterogeneous Propellants. *Journal of Propulsion & Power*, 15(6), p. 925-926.
- Weigand P., Meier, W., Duan, X. R., Stricker, W., and Aigner, M., (2006). Investigations of Swirl Flames in a Gas Turbine Model Combustor: i. Flow Field, Structures, Temperature, and Species Distributions. *Combustion & Flame*, 144(1-2), p. 225-236.

- Xiang, Y., Yuan, Z., Wang, S., and Fan, A. (2019). Effects of Flow Rate and Fuel/Air Ratio on Propagation Behaviors of Diffusion H<sub>2</sub>/Air Flames in a Micro-combustor. *Energy*, 179, p. 315-322.
- Yadav, A., Chowdhury, A., and Srivastava, A. (2021). Gas-phase Thermography of Droplet Combustion and Its Application to Characterize Nanofuels. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 120, p. 105054.
- Yangaz, M.U., (2018). Investigation of The Effects of Industrial Gas Burner Modifications on Emissions and Efficiency. M.Ü. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, p. 68.
- Yeh, C. L., and Kuo, K. K. (1996). Ignition and Combustion of Boron Particles. *Progress in Energy and Combustion Science*, 22(6), p. 511-541.
- Yenmez, N., (2009). Stratejik Bir Maden Olarak Bor Minerallerin Türkiye İçin Önemi. *Coğrafya Dergisi*, (19), s. 59-94.
- Yontar, A. A. (2016). Buji Ateşlemeli Motorda Saf ve Karışımli Alternatif Yakıtların Motor Performansına ve Emisyonlarına Etkilerinin Sayısal ve Deneysel İncelemesi. K.Ü. Doktora Tezi, Kırıkkale, p. 30-49.
- Yontar, A. A., and Doğu, Y. (2016). 1-D Modelling Comparative Study to Evaluate Performance and Emissions of a Spark Ignition Engine Fuelled With Gasoline and LNG. *In MATEC Web of Conferences (Vol. 81, p. 5003). EDP Sciences*, p. 1-3.
- Young, G., Sullivan, K., Zachariah, M. R., and Yu, K. (2009). Combustion Characteristics of Boron Nanoparticles. *Combustion and flame*, 156(2), p. 322-333.
- Zha, Z., Pan, J., Yang, W., Lu, Q., Stephen, B., and Shao, X. (2017). Experimental Investigation on the Combustion Characteristics of Premixed CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> Flame in a Micro Plate Channel. *Energy Procedia*, 105, p. 4814-4821.
- Zhang, Y. (2017). Propagation and Extinction Studies of Laminar Lean Premixed Syngas/Air Flames. *Springer*. p. 1-26. doi:10.1007/978-981-10-4615-5\_1.
- Zhou, W., Yetter, R. A., Dryer, F. L., Rabitz, H., Brown, R. C., and Kolb, C. E. (1999). Multi-phase Model for Ignition and Combustion of Boron Particles. *Combustion and Flame*, 117(1-2), p. 227-243.

## EKLER

### **Ek-1. Damlacık Yanma Test Kodu**

```
clear;close all;

ctr=1;

for i=1:3415

if i<10

    fileName=[' '];

elseif (i>=10 && i<=99)

    fileName=[' '];

elseif (i>=99 && i<=999)

    fileName=[' '];

else

    fileName=[' '];

end

Igray = rgb2gray( );

fasf=Igray;

a12=imcomplement( );

a1=im2double( );

c=0.5;

%% LOGARITHMIC TRANSFORMATION%%

S=c*log(1+a1);

%% CANNY EDGE DETECTION%%

BW4 = edge( );

[centers, radii] = imfindcircles( );
```

```

clf;

if ~isempty( )

    r(ctr)=radii(1);

    C(ctr,:)=centers( );

    ctr=ctr+1;

end

imshow(a1);

h = viscircles( );

pause( );

end

plot(r)

A=r;

x=1:(ctr-1);

B = smoothdata( );

subplot( );plot(x,A,'-o');

subplot( );plot(x,B,'-x');

legend( )

t1=input('Lutfen 1.timestepi gir=');

t2=input('Lutfen 2.timestepi gir=');

t3=input('Lutfen 3.timestepi gir=');

ortt=(t1+t2+t3)/3000

ort=ortt/(ctr-1) %milisaniye

t=0:ort:2.3

xlswrite('C12H23_TMB_9_1.xlsx',A,'anaveri','A1');

```

```
xlswrite('C12H23_TMB_9_1.xlsx',B,'smootha','A1');
```

```
xlswrite('C12H23_TMB_9_1.xlsx',t,'zaman','A1');
```

### **Ek-2. Maksimum Sıcaklık Test Kodu**

```
clc;clear;close all;
```

```
tic;
```

```
% import the video file
```

```
obj = VideoReader('FLIR1838.mp4');
```

```
vid = read(obj);
```

```
% read the total number of frames
```

```
frames = obj.NumberOfFrames;
```

```
% file format of the frames to be saved in
```

```
ST = '.jpg';
```

```
fprintf('*****\n');
```

```
fprintf('** Video dosyasından resimler oluşturuluyor **\n');
```

```
fprintf('*****\n');
```

```
% reading and writing the frames
```

```
for x = 1 : frames
```

```
% converting integer to string
```

```
Sx = num2str(x);
```

```
% concatenating 2 strings
```

```
Strc = strcat( );
```

```
Vid = vid( );
```

```
cd frames
```

```
% exporting the frames
```

```
imwrite(Vid, Strc);
```

```

cd ..

fprintf(&quot;%i. Resim Dosyası Oluşturuldu...\n&quot;,x);

end

fprintf(&quot;*****\n&quot;);

fprintf(&quot;** Video dosyasından resimler oluşturuldu **\n&quot;);

fprintf(&quot;*****\n&quot;);

fprintf(&quot;*****\n&quot;);

fprintf(&quot;** Resim Kesme İşlemi Başlatılıyor **\n&quot;);

fprintf(&quot;*****\n&quot;);

for i=1:frames

Sx = num2str(i);

Strc = strcat( );

cd Frames;

I = imread(Strc);

cd ..;

I2 = imcrop(I,[60 10 80 40]);

cd CutFrames

imwrite(I2, Strc);

cd ..;

fprintf(&quot;%i. Resim Dosyası Oluşturuldu...\n&quot;,i);

end

fprintf(&quot;*****\n&quot;);

fprintf(&quot;** Resim Kesme İşlemi Tamamlandı **\n&quot;);

fprintf(&quot;*****\n&quot;);

```

```

fprintf(&quot;*****\n&quot;);
fprintf(&quot;** Resim Okuma İşlemi Başlatıldı **\n&quot;);
fprintf(&quot;*****\n&quot;);
warning (&#39;off&#39;, &#39;Images:initSize:adjustingMag&#39;);

for i=1:frames

baseFileName=[ ];

%baseFileName = &#39;File_0006.jpg&#39;;

% Get the full filename, with path prepended.

folder = [ ]; % Determine where demo folder is (works with all versions).

fullFileName = fullfile( );

picture=imread( );

%imshow(picture);

title( );

% figure;

% picture=rgb2gray(picture);

% imshow(picture);

% title( );

% figure;

% picture=imbinarize(picture);

% imshow(picture);

% title( );

picture=~picture;

g=strel(&#39;disk&#39;,5);

picture=imclose(picture,g);

```

```

% figure;

% imshow(picture);

title('Image after applying Morphological Closing');

picture=imread(fullFileName);

% imshow(picture);

m=ocr(picture);

[~,cc]=size(picture);

picture=imresize(picture,[ ]);

if size(picture,3)==3
picture=rgb2gray(picture);
end

threshold=graythresh(picture);

picture=~im2bw( );

picture=bwareaopen( );

% imshow(picture);

if cc>2000

picture1=bwareaopen(picture,3500);

else

picture1=bwareaopen(picture,3000);

end

% figure,imshow(picture1);

picture2=picture-picture1;

% figure,imshow(picture2);

picture2=bwareaopen(picture2,100);

```

```

% figure,imshow(picture2);

[L,Ne]=bwlabel(picture2);

propied=regionprops(L, '&#39;boundingBox&#39;);

%hold on

%for n=1:size(propied,1)

% rectangle (&#39;position&#39;, propied(n).BoundingBox,
    &#39;EdgeColor&#39;,&#39;g&#39;,&#39;LineWidth&#39;,2)

%end

%hold off

% figure ;

final_output=[];

t=[];

for n=1:Ne

[r, c]=find(L==n);

n1=picture(min(r):max(r),min(c):max(c));

n1=imresize(n1,[42,24]);

% imshow(n1);

x=[];

%totalLetters=size(imgfile,2);

%for k=1:totalLetters

% y=corr2( );

%x=[x y];

%end

t=[t max(x)];

if max(x)>,45

```

```

z=find(x==max(x));
out=cell2mat(imgfile(2,z));
final_output=[ ];
end
end
m=ocr(picture);
disp(m.Text);
d(i)=(m.Words);
k(i)=0.0430622*i;
end
xlswrite( )
xlswrite('1838.xlsx',k,'Time','A1');
fprintf('*****\n');
fprintf('** Resim Okuma İşlemi Tamamlandı **\n');
fprintf('*****\n');
toc;

```