



TARSUS
ÜNİVERSİTESİ

T.C.

TARSUS ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**TRİMETİL BORAT KATKILI YAKITLARIN YANMA
KARAKTERİSTİKLERİNİN YAKMA SİSTEMLERİNDE
İNCELENMESİ**

AYŞE GİZEM ÖZGÜNER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TARSUS – 2022

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

**TRİMETİL BORAT KATKILI YAKITLARIN YANMA
KARAKTERİSTİKLERİNİN YAKMA SİSTEMLERİNDE İNCELENMESİ**

AYŞE GİZEM ÖZGÜNER

Danışman: DOÇ. DR. AHMET ALPER YONTAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TARSUS – 2022

Tarsus Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürlüğüne;

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

Başkan: Doç. Dr. Ahmet Alper YONTAR

(Danışman)

Üye:

Üye:

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...

Ayşe Gizem ÖZGÜNER

ÖZET

TRİMETİL BORAT KATKILI YAKITLARIN YANMA KARAKTERİSTİKLERİNİN YAKMA SİSTEMLERİNDE İNCELENMESİ

AYŞE GİZEM ÖZGÜNER

Yüksek Lisans, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç Dr. Ahmet Alper YONTAR

Haziran 2022, 97 sayfa

Bu tez çalışmasında benzin ve trimetil borat (TMB) yakıtlarının saf ve karışım hallerinin, çeşitli deney düzeneklerinde alev karakteristiği, maksimum sıcaklık değerleri ve emisyon oluşumlarının deneysel olarak incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Benzin ve TMB yakıtları saf ve karışımli olarak Bunsen brülörü, damlacık teli ve kanal deney sistemlerinde yakma işlemi gerçekleştirilerek alev davranışı incelenmiştir.

Benzin yakıtının ana yakıt olarak düşünülmesi durumunda kütleli olarak %20 ve katlarında TMB ilavesi gerçekleştirilerek karışımli yakıtlar elde edilmiştir. Oluşturulan karışım yakıtları 3 farklı deney sisteminde incelenmiştir. Bu deney sistemleri; damlacık, Bunsen brülörü ve kanal yanma deney sistemleridir. Damlacık deney sisteminde; yakıt damlacıklarının çaplarında gerçekleşen değişimler, canlı alev görüntüleri ve atomizasyon yapısı incelenmiştir. Damlacık deneyleri neticesinde karışım yakıt içerisinde kütlece TMB oranı düşükçe alev yayılımı artmış ve ışım tonları kırmızı-sarı-beyaz görünürlükte gözlemlenmiştir. Deneylerde kullanılan karışım yakıt içeriğinde kütlece TMB oranının artması durumunda alev boyunda kısalma ve yeşil ışım olduğu kaydedilmiştir. Karışım yakıtların içeriğinde TMB oranının azalmasıyla yanma sürelerinde artış olduğu gözlemlenmiştir. Damlacık deneyleri esnasında karışım yakıtların içeriğinde TMB ilavesinin tutuşma gecikmesi sürelerinde radikal artışlara sebep olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde yanma süresince ölçülen maksimum sıcaklık değeri de karışım yakıt içerisindeki kütlece TMB oranına bağıli olarak artmaktadır. Deneysel olarak gerçekleştirilen ikinci deney sisteminde ise Bunsen brülör temelinde incelemeler gerçekleştirilmiştir. Benzin yakıtı ana yakıt olarak belirlenerek %5 ve artan karışım oranında TMB eklenmesiyle oluşan karışım yakıtlarının belirli debilerde (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) gerçekleştirildiği deney verileri incelenmiştir. Bunsen brülör deney sisteminde alev karakteristiği ve emisyon çıktıları incelenmiştir. Damlacık deneylerinde de gözlemlendiği gibi yakıt karışımı içerisinde TMB oranı arttıa alev ışımalarının yeşil ışıma olduğu, oran artışına bağlı olarak ışıma koyuluğunun değiştiği gözlemlenmiştir. TMB oranının artması ile alev davranışlarında da radikal artışlara, emisyon gazlarından karbonmonoksit (CO) değerlerinde azalışa neden olduğu tespit edilmiştir. Tez kapsamında gerçekleştirilen son deney sisteminde ise kanal boyunca ilerleyen yakıtın hız profili incelenmiştir. Karışımlı yakıtlarının alev hızlarındaki farklılıklar mercek altına alınarak yakıt viskozitesi ve partikül yapıların alev hızı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Tez kapsamında gerçekleştirilen karışım yakıtların çeşitli deney dzeneklerinde incelenmesinin neticesinde benzin ve TMB yakıtlarının karışım oranlarında istenilen sonuçları sağlayabilecek konfigürasyonlarda kullanılabileceği görölmüştür.

Anahtar Kelimeler: Bor, Trimetil Borat, Yanma, Alev Karakterizasyonu, Emisyon, Bunsen Beki, Atomizasyon

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE COMBUSTION CHARACTERISTICS OF TRIMETHYL BORATE ADDITIVE FUELS IN COMBUSTION SYSTEMS

AYŞE GİZEM ÖZGÜNER

Master Thesis, Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Ahmet Alper YONTAR

June 2022, 97 pages

In the thesis, an experimental investigation of pure and mixed states of gasoline and trimethyl borate (TMB) fuels, flame characteristics, maximum flame temperature and emission formations in various experimental setups was carried out. Flame behavior was investigated by burning gasoline and TMB fuels in pure and mixed form in Bunsen burner, droplet wire and channel test systems.

Blended fuels are obtained by adding 20% by mass and its multiples of TMB, if gasoline fuel is considered as the main fuel. The blended fuels were examined in 3 different experimental systems. These test systems; droplet, Bunsen burner and channel combustion test systems. In the droplet test system; The changes in the diameters of the fuel droplets, live flame images and atomization structure were investigated. As a result of the droplet experiments, as the mass of TMB in the mixed fuel decreased, the flame spread raised and the chemiluminescence were observed as red-yellow-white. It has been noted that when the TMB ratio by mass raises in the blended fuel used in the experiments, there is a shortening of the flame length and green chemiluminescence. It was observed that the combustion times soared with the diminish of TMB in the blended fuels. During the droplet experiments, it was determined that the addition of TMB in the content of the blended fuels caused radical raises in the ignition delay times. Similarly, the maximum temperature value measured during combustion also increases depending on the TMB ratio by mass in the mixed fuel. In the second experimental system, which was carried out experimentally, investigations were carried out on the basis of Bunsen burner. Gasoline fuel is determined as the main fuel and the mixture fuels formed by adding TMB at 5% and increasing the mixing ratio at certain flow rates (1.5 lt/min, 2.25 lt/min, 3 lt/min, 3.75 lt/min, 4.5 lt/min, 5.25 lt/min.) min, 6 lt/min, 6.75 lt/min and 7.5 lt/min) were analyzed. Flame characteristics and emission outputs were

investigated in the Bunsen burner experimental system. As observed in the droplet experiments, it was detected that as the TMB ratio in the fuel mixture increased, the flame chemiluminescence was green in color, and the color darkness changed depending on the rise in the ratio. It has been determined that the increase in TMB ratio causes radical soars in flame behavior and a decrease in carbon monoxide (CO) values, one of the emission gases. In the last experimental system carried out within the scope of the thesis, the velocity profile of the fuel moving along the channel was examined. The effects of fuel viscosity and particulate structures on flame velocity were investigated by examining the differences in flame rates of blended fuels.

As a result of the examination of the mixed fuels carried out within the scope of the thesis in various experimental setups, it has been seen that gasoline and TMB fuels can be used in configurations that can provide the valuable results in mixing ratios.

Keywords: Boron, Trimethyl borate, Combustion, Flame Characterization, Emission, Bunsen Burner, Atomization

ÖNSÖZ

Yüksek lisans süresince bilgi ve tecrübesiyle daima yanımda olan, tez çalışmamın tüm süreçlerinde desteğini esirmeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, bilimsel temeller ışığında yönlendirmeleri ile çalışmamı şekillendiren Sayın Doç Dr. Ahmet Alper Yontar'a, hayatımın her anında arkamda olduklarını bildiğim, varlıklarıyla daima güç veren annem Mülkiye Özgüner, babam Zülküf Özgüner, ablam Özlem Kurtuluş, abim Kerim Kurtuluş ve canım yeğenim Uzay Kurtuluş'a, Tarsus Üniversitesi Yanma Laboratuvarı CORET ekibi olarak bir çok başarıya imza attığımız yol arkadaşlarım Mehmet Ali Adıgüzel, Tahir Ayaz, Duygu Sofuoğlu, Rıdvan Küçükosmanoğlu ve Hüseyin Değirmenci'ye tez çalışması kapsamında göstermiş olduğu desteği ile tez çalışmamı çok daha iyi noktalara taşımama destek olan Sayın Doç Dr. Deniz Üstün'e, tez çalışmasına teknik altyapıları ile destek olan Tarsus Üniversitesi BAP Birimi'ne ve desteklerini esirgemeyen TÜBİTAK'a ortaya çıkan eser için teşekkür eder, saygılar sunarım.

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. Amaç ve Kapsam	3
1.1.1. Bor Elementi	3
1.2. Literatür	7

İKİNCİ BÖLÜM

YANMA TEKNİĞİ

2.1. Alev Yapısı	10
2.2. Aktivasyon Enerjisi	12
2.3. Yanma Teorisi	21
2.4. Alev Teorileri	24
2.5. Alev Yapısı	25
2.5.1. Laminer Alev Yapısı	25
2.5.2. Türbülanslı Alev Yapısı	27
2.6. Alev Hızı Ölçümleri	28
2.6.1. Alev Açısı ile Hız Ölçümü	28
2.6.2. Alev Alanı ile Hız Ölçümü	29

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

MATERYAL METOD

3.1. Yakıtlar ve Kimyasal Maddeler	31
--	----

3.1.1. Benzin	31
3.1.2. Trimetil Borat.....	31
3.1.2.1. Trimetil Borat Sentezi	32
3.1.3. Bütan-Propan	33
3.2. Deneysel Sistem Ekipmanları.....	34
3.2.1. Yüksek Hızlı Kamera	34
3.2.2. Termal Kamera.....	35
3.2.3. Emisyon Test Cihazı	35
3.2.4. Enjektör Test Cihazı.....	36
3.2.5. Yakıt Enjektörü	37
3.2.6. Mikropipet.....	38
3.2.7. Debimetre	38
3.2.8. Ultrasonik Test Cihazı	39
3.2.9. Güç Kaynağı.....	40
3.2.10. Bunsen Brülörü	41
3.2.11. Kanal (Kanal Yanma Levhası).....	41
3.3. Deney Sistemleri	42
3.3.1. Damlacık Deney Sistemi.....	42
3.3.2. Bunsen Brülör Deney Sistemi.....	45
3.3.3. Kanal Yanma Deney Sistemi	48

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

BULGULAR

4.1. Damlacık Deneylerinin Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	50
4.2. Bunsen Brülör Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi	62
4.3. Kanal Yanma Deneyi Sonuçları ve Değerlendirilmesi	72
SONUÇLAR ve TARTIŞMA	74
KAYNAKÇA.....	77
EKLER	80
ÖZGEÇMİŞ	95

KISALTMALAR

AlB₂: Alüminyum Diborür

B: Bor

B₂O₃: Borik Oksit

B₄C: Bor Karbür

C: Karbon

C₃H₉BO₃: Trimetil Borat

CH₄: Metan

CO: Karbonmonksit

CO₂: Karbondioksit

H₂O: Su

HC: Yanmamış Hidrokarbon

LPG: Sıvılaştırılmış Petrol Gazı

MgB₂: Magnezyum Diborür

N₂: Azot

NO_x: Azot Oksit

O₂: Oksijen

O_{min}: Minumum Oksijen Miktarı

Re: Reynolds Sayısı

SiC: Silisyum Karbür

S_l: Laminer Alev Hızı

TiB₂: Titanyum Diborür

TMB: Trimetil Borat

TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1.1. Dünya atmosferi gaz içeriği.....	2
Tablo 3.1. Tez Kapsamında Kullanılan Yakıtların Özellikleri	31
Tablo 3.2. Yüksek Hızlı Kamera Özellikleri	34
Tablo 3.3. Enjektör Test Cihazı Verimi (Benzin Yakıtı İçin)	37
Tablo 3.4. Damlacık Deney Sisteminde Kullanılan Yakıt Karışımları	42
Tablo 3.5. Bunsen Brülör Deney Sisteminde Kullanılan Yakıt Karışımları	45
Tablo 3.6. Kanal Yanma Deney Sisteminde Yakıt Ait Kütleli Oranlar ve İsimlendirmeler	48
Tablo 4.1. Karışım Oranları ve İsimlendirmeler.....	50

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Bor Elementi Periyodik Tablo Konumu	4
Şekil 1.2. Dünya Bor Elementi Rezervlerinin Ülkelere Bağlı Oransal Dağılımı.....	6
Şekil 1.3. Çeşitli Yakıtların Isıl Değer Verileri.....	7
Şekil 2.1. Yakıcı Üzerindeki Alev Sıcaklık Bölgeleri.....	11
Şekil 2.2. S Eğrisi.....	13
Şekil 2.3. Temel Alev Bölgeleri.....	14
Şekil 2.4. Ön Karışım Alev; (1) Çizim Gösterimi, (2) Deney Görseli	17
Şekil 2.5. Değişken Re Sayılarına Ait Alev Boyu Şemaları	18
Şekil 2.6. Laminer Alev Bölgeleri.....	18
Şekil 2.7. Difüzyon Alev (1) Çizim Gösterim, (2) Deney Görseli.....	19
Şekil 2.8. Alev İlerleyişi.....	20
Şekil 2.9. Sabit ve Hareketli Alev Bölge Ayrımları.....	21
Şekil 2.10. Difüzyon Yanma Alev Katmanları	23
Şekil 2.11. Laminer Alev İlerleyişi ve Alev Bölgeleri.....	26
Şekil 2.12. Alev Bölgeleri (1) Çizim Gösterim, (2) Deney Görseli.....	27
Şekil 2.13. Alev Koni Açısı Kaynaklı Alev Hızının Hesaplanması.....	29
Şekil 3.1. Benzin Yakıtı Kimyasal İskelet Yapısı	31
Şekil 3.2. TMB İskelet Yapısı Görseli	32
Şekil 3.3. TMB Yakıtı	32
Şekil 3.4. Trimetil Borat Sentezi- Ana Üretim Aşamaları	33
Şekil 3.5. DITECT HAS-EF Yüksek Hızlı Kamera.....	34
Şekil 3.6. FLIR E96 23° Termal Kamera	35
Şekil 3.7. Testo 360-S Emisyon Test Cihazı.....	36
Şekil 3.8. Enjektör Test Cihazı.....	36
Şekil 3.9. Yakıt Enjektörü	37
Şekil 3.10. Mikropipet.....	38
Şekil 3.11. Debimetre	39
Şekil 3.12. Ultrasonik Test Cihazı	39
Şekil 3.13. Deneysel Konumlandırma (Ultrasonik Test Cihazı ve Enjektör Test Cihazı)	40
Şekil 3.14. Güç Kaynağı	40
Şekil 3.15. Bunsen Brülörüne Ait Görsel ve Teknik Çizim.....	41
Şekil 3.16. Kanal Alev Hızı Levhası Teknik Çizim.....	41
Şekil 3.17. Damlacık Deney Sistemi.....	44
Şekil 3.18. Yanma ve Damlacık Bozulması- Damlacık Görüntü İşleme Şeması	45
Şekil 3.19. Bunsen Brülör Deney Sistemi.....	47
Şekil 3.20. Kanal Alev Hızı Deney Sistemi	49
Şekil 4.1. 0T10B Damlacıkları Yanma Evreleri	51
Şekil 4.2. 10T0B Damlacığı Yanma Evreleri	53
Şekil 4.3. 8T2B Yakıtı Damlacık Yanma Evreleri.....	54
Şekil 4.4. 6T4B Yakıtı Damlacık Yanma Evreleri.....	54
Şekil 4.5. 4T6B Yakıtı Damlacık Yanma Evreleri.....	55
Şekil 4.6. 2T8B Yakıtı Damlacık Yanma Evreleri.....	55

Şekil 4.7. 6T4B Yakıtının 143 ms Anında Alev Ayrıntılı Yapısı.....	56
Şekil 4.8. Tüm Yakıtlar İçin Damlacık Alev Sıcaklığı	58
Şekil 4.9. Tüm Yakıtlar İçin Damlacık Test Düzenğinde Tutuşma Gecikme Süreleri	59
Şekil 4.10. Tüm Yakıtlar İçin Damlacık Test Düzenğinde Yanma Süreleri (ms).....	60
Şekil 4.11. Normalleştirilmiş Damlacık Çapının Normalleştirilmiş Zamana Bağlı Değişimleri	62
Şekil 4.12. 1.5 lt/dk Debide Bunsen Brülörde Karışım Yakıtların Davranışları.....	63
Şekil 4.13. 2.25 lt/dk Debide Bunsen Brülörde Karışım Yakıtların Davranışları.....	64
Şekil 4.14. Alev İç Koni Değişim Ölçümleri	65
Şekil 4.15. 3 lt/dk Debide Bunsen Brülörde Karışım Yakıtların Davranışları.....	66
Şekil 4.16. 3.75 lt/dk Debide Bunsen Brülörde Karışım Yakıtların Davranışları.....	66
Şekil 4.17. 6 lt/dk Debide Bunsen Brülörde Karışım Yakıtların Davranışları.....	67
Şekil 4.18. 7.5 lt/dk Debide Bunsen Brülörde Karışım Yakıtların Davranışları.....	68
Şekil 4.19. 4.5 lt/dk Debi İçin Karışım Yakıtların Yanma Maksimum Sıcaklık (K) Değerleri	69
Şekil 4.20. Karışım Yakıtlarının Debiye Bağlı Maksimum Alev Sıcaklığı Değişimleri	70
Şekil 4.21. Bunsen Brülöründe 0T10B Yakıtının Maksimum Emisyon Ölçümler.....	71
Şekil 4.22. Bunsen Brülöründe 5T95B Yakıtının Maksimum Emisyon Ölçümleri.....	72
Şekil 4.23. 0T10B Yakıtı Kanal Yanma Birleşik Görsel	73
Şekil 4.24. 10T0B Yakıtı Kanal Yanma Birleşik Görsel	73

EKLER LİSTESİ

	Sayfa
Ek 1. Damlacık Yanma Test Kodu	80
Ek 2. Alev İç Koni Test Kodu.....	83
Ek 3. Maksimum Sıcaklık Test Kodu	88

GİRİŞ

Teknoloji alanında gerçekleşen gelişmeler, mevcut yapıdaki bileşenlere alternatiflerin oluşturulmasına ve değerlendirilmesine sebebiyet vermektedir. İnsanlık 1850 yılından itibaren enerji ihtiyacını fosil kaynaklı yakıtlardan karşılamaktadır. 18. yüzyılda gerçekleşen sanayi devrimiyle beraber fosil yakıtların kullanımı ülkeler çapında büyüme ve kalkınma yarışında önemli ayrıcalıklar sağlamıştır. Bu devrimin ardından 1990'lı yıllarda nüfus artışı ile birlikte enerji ihtiyacında da artışa neden olmuştur. (Karakaya ve Sofuoğlu,2015:30). Ülkemiz özelinde nüfus artışı ele alındığında; 1990 yılında Türkiye nüfusu 56.47 milyon iken 2016 yılında bu rakam 79.81 milyona ulaşmıştır. Nüfusun 2050 yılında 104.8 milyona ulaşacağı tahmin edilmektedir (Republic of Turkey Ministry of Environment and Urbanization Turkey's 7th National Communication of Turkey Under UNFCCC,2018:a.g.i.s). 26 yıllık süreçte nüfusun %41.33 oranında artışı ile enerji ihtiyacında da en az yarı yarıya artış göstereceğini belirtmektedir.

Dünya üzerinde yaşayan insan sayısındaki artış ile birlikte elde edilen enerjiyle ilgili iki başlık dikkat çekmektedir. Bunlar; enerji verimliliği ve çevresel etkileridir. Enerji elde edilmek amacıyla yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan zararlı atıklar nedeniyle yaşanan çevresel sorunların başında küresel iklim değişikliği gelmektedir. Yanma sonucu açığa çıkan zararlı gazlar yer küreden yansıyarak uzayın derinliklerine gitmesi gereken güneş ışınlarını dünya atmosferinde tutarak küresel ısınmaya sebebiyet vermektedir. Sera etkisinin meydana gelmesi ile yer küre ortalama sıcaklık değerinin yükselmesine sebep olan emisyonların başlıcaları şunlardır; karbondioksit (CO₂), azot oksit (NO_x), silisyum oksit (SO_x), azot (N₂O) vb. çevre kirliliğine neden olan yapıların başlıca örneği olarak emisyon çıktıları olarak gösterilebilmektedir. Emisyon, yakıtın yanma tepkimesi sonucunda oluşan yanmış gazlara denmektedir. Yanma sonu açığa çıkan emisyonlar Dünya atmosferinde mevcut halde bulunan zararlı gazların artışına neden olarak, önüne geçilemeyecek boyutta zararlar vermekte ve iklim değişikliğine sebep olmaktadır.

Dünya atmosferinde bulunan CO₂ konsantrasyonu 1950 yılından beri %30 artış göstermiştir. Bu artış miktarı kritik seviyededir. İnsanlık enerji üretimini temel olarak fosil yakıtlardan sağlamaktadır. Enerji eldesi için gerçekleştirilen yanma işlemi sonucunda farklı oranlarda emisyon gazları meydana gelmektedir. Kömür, petrol ve doğalgaz en yaygın kullanılan fosil yakıt türleridir. 2015 yılından meydana gelen CO₂ emisyonlarının %45'i kömür, %35'i petrol ve %20'si de doğalgaz yakılmasından kaynaklandığı raporlanmıştır (IEA CO₂ Emissions from Fuel Combustion,2017:1-162).

Tablo 1.1. Dünya Atmosferi Gaz İçeriği

Gaz Adı	Yüzde (%)
Nitrojen	78
Oksijen	21
Karbondioksit	0.0935
Metan	0.000442
Azot Oksit	0.000078
Ozon	0.00001

Kaynakça: Al-Ghussain,2019:19-21.

Günümüzde, enerji verimliliğinin arttırılması ve emisyon değerlerinin düşürülmesine yönelik çalışmalar global çapta gerçekleştirilmeye başlanmıştır. İstenilen düzeyde gerçekleştirilmeyen emisyon ölçümlerindeki azalış oranları işletmelere vergilendirmeler ile ceza olarak geri yansıtılacağı belirtilmiştir.

Avrupa Yeşil Mutabakat ve benzeri yönelimlerin beraberinde karışım yakıtlarına olan ilginin her geçen gün artacağı öngörülmektedir. Dünya çapında emisyon gazlarının düşürülmesiyle ilgili “Avrupa Yeşil Mutabakat” gibi global çapta radikal kararlar alınırken yakıt türlerinde de değişikliğe gidilmesi kaçınılmaz olmuştur. Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmenin gerçekleşebileceği gibi mevcut sistemlerde kullanılacak alternatif yakıtlara talep artışı yaşanması ön görülmektedir. Alternatif yakıtlar saf ya da yakıt karışımı halinde kullanılabilir. Karışım yakıtlar ise mevcut saf yakıtların aranılan özelliklerinin ve yanma sonrası oluşturduğu ürünlerin içeriklerine bağlı olarak oluşturulmaktadır. Saf yakıtlara ilave yakıt olarak farklı oranlarda ekleme yapılabilir. Yakıtlara, sıvı ve katı formlarda eklenen katkıların kalorifik değerlerinin üst sınıra yakın olması, oluşturulan karışım yakıtın özelliklerini olumlu yönde arttırıcı özellik kazandırmaktadır. Yakıtlarda önemli parametrelerden birisi olan kalorifik değer belirli miktardaki malzemenin yanması sonucunda açığa çıkan ısı miktarı olarak açıklanabilir.

BİRİNCİ BÖLÜM

GENEL BİLGİLER

1.1. Amaç ve Kapsam

Radyometrik ölçümler neticesinde 4.5 milyar yıl önce oluştuğu tespit edilen dünya gezegeni, enerji ihtiyacının büyük çoğunluğunu petrol türevli fosil yakıtlardan sağlaması sonucunda küresel iklim değişikliği sorunu ile mücadele etmektedir. Dünya atmosferinde ozon tabakası üzerinde ciddi boyutlarda deformasyona yol açan nedenlerden birisi de yanma sonrası açığa çıkan emisyon gazlarıdır. Dünyada atmosfer tabakalarında büyük oranda tahribata neden olmasına rağmen enerji elde edilebilmesi amacıyla petrol rezervleri hızla tükenmektedir. Hızla tükenen petrol rezervlerine bağlı olarak uluslararası imzalanan anlaşmalar ise atmosfere salınan zararlı gazların (emisyon gazları) basamaklar halinde sıfır seviyesine çekilmesi hedeflenmektedir. Alternatif yakıt ve yakıt karışımları alanında gerçekleştirilen araştırma ve geliştirme çalışmaları uluslararası gündemden aldığı itki ile hız kesmeden devam etmektedir. Gerçekleştirilen Ar-Ge çalışmaları bağlamında bor kaynaklı yakıtların güncelde girenler kısmında tüketilen ana yakıt türleriyle oluşturulan konfigürasyonları ile enerji elde edilerek kullanılmasında artış gözlemlenirken, yanma tepkimesi ardından oluşan ürünler çıktısında emisyon gazı kategorisinde yer alan molekül oranlarında azalma gözlemlenmesi amaçlanmaktadır.

Yakıtların kimyasal iskelet yapılarında bağ oluşumuna imkan veren hidrojen atomu barındırmaları karışım oluşumuna zemin hazırlamaktadır (Saxena,2016:77-101). Hidrojen atomlarının bor elementi ile kararlı bağ kurabiliyor olması saf halde de yakıt olarak kullanılan bileşiklerin yanında karışım yakıtı bileşimlerine de izin verecek formdadır. (Hosmane,2011:385-491). Bu tez kapsamında ana yakıt olarak saf benzin yakıtına belirli oranlarda trimetil borat ($C_3H_9BO_3$) eklenmesiyle karışım yakıtları oluşturulmuştur. Elde edilen karışım halindeki yakıtların çeşitli deney sistemlerinde farklı yanma davranışları incelenmiştir.

1.1.1 Bor Elementi

Doğada hiçbir zaman serbest halde bulunmayan bor elementi, ametal ve metallere farklı bileşikler oluşturabilmektedir. Bor elementi, çeşitli bileşikler oluşturabilme özelliği

yoğunluğundan yararlanarak malzeme sektöründe alüminyum ve magnezyum bileşenleri ile bağ yapmada aktif rol oynamaktadır. Bu bileşiklere örnek olarak magnezyum diborür (MgB_2) ve alüminyum diborür (AlB_2) gösterilebilir.

Dünya üzerindeki en fazla bor rezervine sahip ülkeler %72.2'lik paya sahip Türkiye ardından Rusya, Güney Amerika ve Amerika Birleşik Devletleri olarak sıralamak mümkündür. Hammadde kaynaklarının hızla tükenmesinin etkisiyle sanayide kullanılan maddelerde bor türevlerine yönelme ciddi boyutlardadır. 2000 yılında dünyada bor üretimi 3.1 milyon ton seviyelerinde gerçekleşirken bu üretim 2017 yılında 3.8 milyon ton miktarında gerçekleşerek %21,46 oranında artış göstermiştir. 2017 yılında üretimi 3.8 milyon ton olan bor ve bor türevlerinin 2.7 milyon tonluk kısmı Eti Maden Kurumu tarafından karşılanmaktadır. Türkiye bor rezervlerinin bulunduğu Kütahya, Balıkesir, Bursa, Eskişehir illerinde tinkal, kolemanit ve yan ürün olarak da üleksit eldesi gerçekleştirilmektedir. (Etimaden,2020c:a.g.i.s)

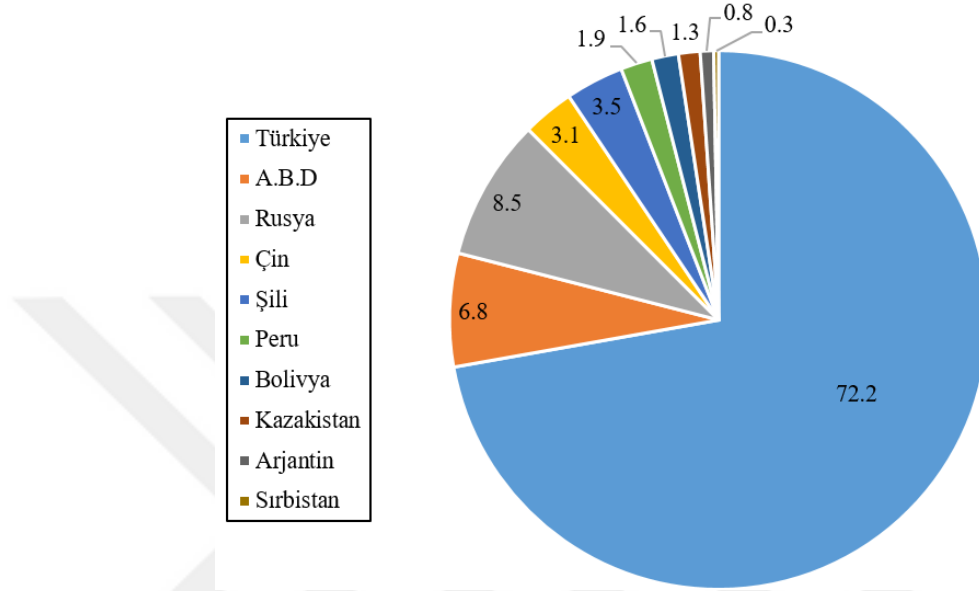
Tablo 1.2. Bor Elementinin Atomik Yapısı ve Fiziksel Özellik Tablosu

ATOMİK YAPISI		FİZİKSEL ÖZELLİKLER	
Atomik Çapı	1.17 Å	Atomik Kütle	10811
Atomik Hacmi	4.6 cm ³ /mol	Kaynama Noktası	4275 K
Kristal yapısı	Rhombohedral	Termal Genleşme Katsayısı	0.0000083 1/°C (0°C)
Elektron Konfigürasyonu	1s ² 2s ² p ¹	Fiziksel Durumu (20°C & 1atm):	Katı
İyonik Çapı	0.23 Å	Elektriksel:	1.0E -12 106/cm
Elektron Sayısı (Yüksüz)	5	Spesifik Isısı	1.02 J/gK
Nötron Sayısı	6	Yoğunluk	2.34 g/cc @ 300K
Proton sayısı	5	Görünüş	Sarı-Kahverengi Ametal Kristal.
Valans Elektronları	2s ² p ¹	Füzyon Entalpisi	22.18 kJ/mol

Kaynakça: Etimaden,2020d:a.g.i.s.

Bağ kurabilme yetisi yüksek olan bor elementi bu tez kapsamında benzin ana yakıtına ilave edilerek oksidasyonu sağlanmıştır. Borun yanması sonucu renk spektrumunda yeşil ışımaya görülmektedir. Bor elementine ilave edilen yakıtların yanması sonucunda motorlarda kullanılması durumunda kontrol edilebilirliği arttırmak için güvenli yakıt kategorisinde değerlendirilebilir. Kontrollü yanma özelliğini bor elementinin yanma

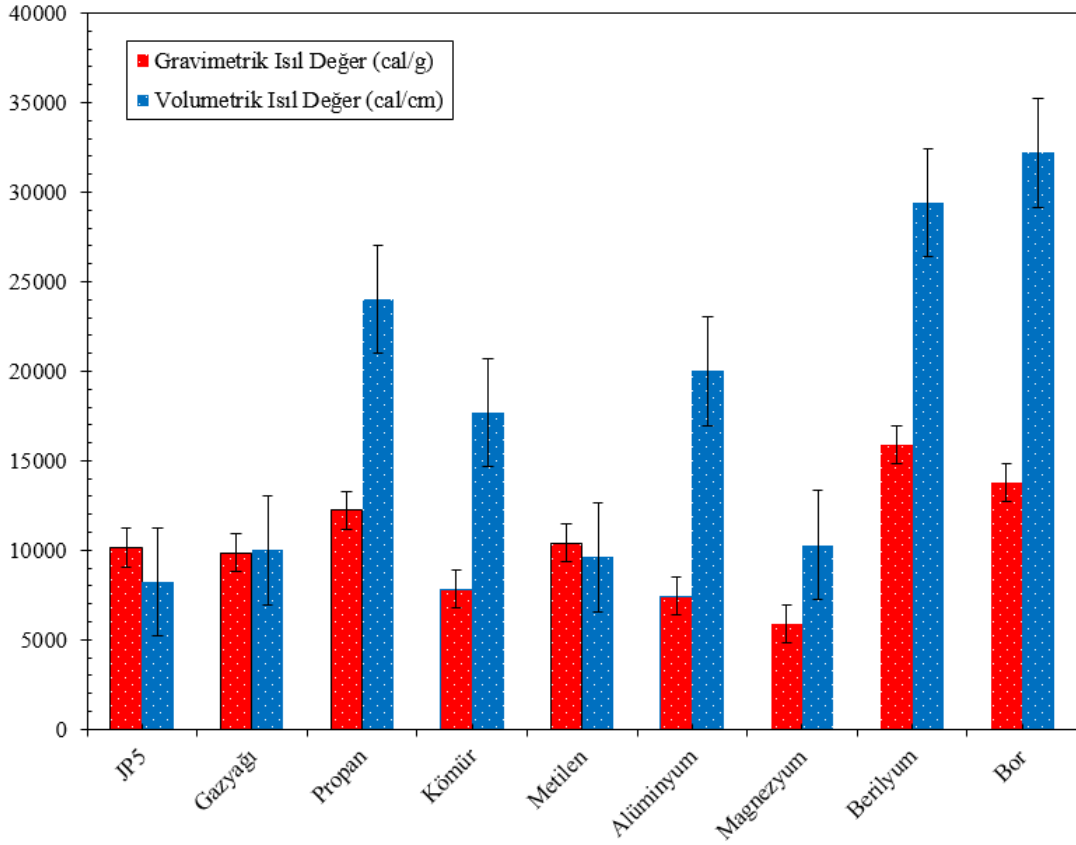
tepkimesine göstermiş olduğu direnç dolayısıyla tutuşma zorluğundan kazanmaktadır. Motorlarda olumlu yönlerinin kullanılabilmesi gibi yanma tepkimesi esnasında element çevresinde oluşan camsı tabaka sayesinde oksidasyona engel olarak oksijen ile bağ kurulmasının önüne geçilebilmektedir. Yanma esnasında oksijen ile bağ kurulmaması durumunda yanma tepkimesinin son bulması kaçınılmazdır (Demirbaş,2005:741-748).



Şekil 1.1. Dünya Bor Elementi Rezervlerinin Ükelere Bağlı Oransal Dağılımı

Bor elementinin direk yakıt olarak kullanılması katı yakıt formunda gerçekleştirilmektedir. Bor elementinin mevcut yakıtlara karşılık hacimsel yanma ısısına sahip olması yüksek performans çıktısı istenilen tahrik sistemlerinde çeşitli metaller (Al, Mg vb.) ile karışım oluşturularak, yanma tepkimesinde tam yanma şartlarını sağlaması durumunda %61 oranında hacimsel ısıtma değerinde artış göstermektedir. Hacimsel ısıtma değerinin yüksek değerde olmasından kaynaklanan katı yakıt uygulamalarında yüksek enerji kaynağı olarak kullanılabilir (Sandall vd.,2017:243-252).

Bu tez kapsamında ana yakıt olarak seçilen benzin yakıtına bor türevi olan TMB'nin %20'lik ilavesi ile yanma karakteristiğinde gerçekleşen değişimler mercek altına alınmıştır. Tez kapsamında oluşturulmuş 3 farklı deney sisteminde tüm değişken parametrelerin ve oluşturulan karışım yakıtların özellikleri mercek altına alınarak sonuçlar kısmında değerlendirilmiştir.



Şekil 1.2. Çeşitli Yakıtların Isıl Değer Verileri

1.2. Literatür

Tez kapsamında gerçekleştirilen literatür araştırmalarında Bunsen brülöründe incelenen yakıtların oluşturulmasında kullanılan ana ve katkı yakıtların alev karakteristiği üzerindeki etkilerine yönelik akademik çalışmalara ulaşmak mümkündür. Tez kapsamında incelenmesi gerçekleştirilen konular ile ilgili gerçekleştirilmiş çalışmalara ait özet bilgilere bu kısımda değinilmektedir.

Hu ve arkadaşları (Hu vd.,2018:149-158) bunsen alev yönteminin çeşitli basınçlardaki alevlerin yapılarını incelemeye ve laminer alev hızlarını değerlendirme aşamasında nihai sonuçlar ile örtüşmesini çalışmışlardır. Özel tasarımlı bunsen brülöründe ön karışımli metan-hava laminer alevinin gelişimini gözlemlemişlerdir. Deneysel olarak yapılan çalışmanın ardından, deneylerin doğruluğunu karşılaştırmak için nümerik çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Bu nümerik çalışmalarda tek boyutlu ve iki boyutlu aksel simetrik olarak yapılandırılmış ve ayrıntılı taşıma niteliğine sahip olacak biçimde gerçekleştirmişlerdir. Deneysel ve nümerik çıktılar değerlendirilerek, çeşitli basınç değerleri için farklı ekivalans oranında ve alev hızında saptamaya çalışmışlardır. Bu aşamada alev ile ilgili koni açısına ve alan yöntemlerine başvurmuşlardır. Gerçekleştirmiş oldukları

çalışmalar neticesinde alev konisi ile çözümlenmelerin alev alanına kıyasla doğru sonuçlara yakınsadığını saptamışlardır.

Doğu ve arkadaşları (Doğu vd.,2020:1-20) benzin ana yakıtının içerisine boraks pentahidrat ($B_4H_{10}Na_2O_{12}$), susuz boraks ($Na_2B_4O_7$) ve borik asidi (H_3BO_3) katkı olarak eklenmesi ile hazırlanılan yakıtları içten yanmalı motor test düzeneğinde kullanmışlardır. Test düzeneği yardımı ile oluşturmuş oldukları yakıt karışımının deneysel sonuçlarını elde etmişlerdir. Gerçekleştirmiş oldukları çalışma neticesinde benzin yakıtına borik asit ilavesiyle yakıtın hacimsel oranında azalışa sebep olduğunu saptamışlardır. Bu azalış oranları özgül yakıt sarfiyatında %15.2 , HC emisyonunda %2.7 , NO_x emisyonunda ise %18,3 oranında azalış gözlemlemişlerdir.

Shen ve arkadaşları (Shen vd.,2021:606-615) kanal içerisinde ön karışım formunda hazırlanmış hidrojen-hava karışımının alev davranışının, kanal hattındaki yayılımı mercek altına alınmışlardır. Gerçekleştirmiş oldukları çalışmada yöntemler ile kanalın en ve boy ölçülerinin alev üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sayısal modelleme yöntemi ile desteklenen çalışmada çıkış noktası olarak belirtilen alevin ilk hızı ve dalgalanmalar neticesinde mevcut basınç artışı ile örtüştüğünü kanıtlamışlardır. Gerçekleştirmiş oldukları çalışmada en boy oranının düşük değerlere sahip olması durumunun performans üzerinde olumlu etki yarattığını tespit etmişlerdir. Kanal ölçülerinde en boy oranının artması koşullarında alevin yayılımı başta olmak üzere alevin şekil değişimi ve dalgalar şeklindeki hareketini güçleştirdiğini görmüşlerdir.

Clanet ve arkadaşları (Clanet vd.,1996:225-238) yarı açık bir tüp içerisinde alev davranışının incelemesini gerçekleştirmişlerdir. Alevin dört aşamalı yapıda yayılım gösterdiğini kanıtlamışlardır. Alevin başlangıç koşullarındaki küreselliği parmak biçimini alarak hızlandığını belirtmişlerdir. Parmak alev formunun yarı açık tüp içerisinde yan cidarlara temas etmesi neticesinde belirlenen ve çeşitli literatürlerde kanıt olarak sunulan alev şeklinin oluştuğu belirtmişlerdir. Yan cidarlar ile temas eden alevde yavaşlama davranışı gözlemleyerek bu alev davranışının viskozite ve akustik kaynaklı olduğunu belirtmişlerdir. Gerçekleştirmiş oldukları çalışmalar sonucunda alevin ön kalınlık değerinin içerisinde alev gelişimi yaşanan kanalın boyutları ile kıyasında küçük değere sahip olması koşulunda alevin ilişkili olduğu parametreler olarak laminer yanma hızı, boru yarıçapı ve boyutsuz gaz genleşme sayısının etkili olduğunu görmüşlerdir.

Xiao ve arkadaşları (Xiao vd.,2011:6325-6336) yatay konumlandırılmış yarı açık ve tam kapalı kanal geometrisinde incelemeler gerçekleştirmişlerdir. Çalışmaları çeşitli ü ekivalans oranlarında önceden karıştırılmış hidrojen-hava alev davranışlarının ve süreye bağlı olarak gösterdikleri şekil değişimlerinin incelemesini yapmışlardır. Gerçekleştirmiş oldukları deneyler neticesinde diğer gazlı yakıtların davranışlarına kıyasla, daha karmaşık şekil değişikliklerine uğradığı ve çok daha belirgin özellikler sergilediğini tespit etmişlerdir. Çalışma sonucunda kapalı kanal şartlarında denklin oranı 0.84 ve 4.22 arasında değişmesi durumunda kanal alev çapları arasında alevin tam oluşuktan sonra ciddi bozulmalara uğradığı tespit etmişlerdir.



İKİNCİ BÖLÜM

YANMA TEKNİĞİ

Kimyasal maddelerin (yakıt) oksitleyici (oksijen) ile tutuşma (parlama) sıcaklığında kimyasal reaksiyona girmesi durumuna yanma denir. Oksitleyicinin bulunmadığı ortamda yanmadan söz edilmesi mümkün değildir.

Yanma tekniği insanlığın var oluşundan beri farklı teknolojilerin anahtarı niteliğini taşıyarak birçok alanda ilerleyişini sağlamıştır. İnsanlık ateşi keşfettikten sonra kullanılabilir enerji miktarını arttırma çalışmalarına devam ettirmiştir. Yakma sisteminde geliştirilen bazı konular şunlardır; plazma ateşleme, lazer ateşleme, birden fazla noktadan ateşleme sistemleri vb. yanma olayları orman yangınlarından roket motorlarına, astrofiziksel yanma olaylarından gaz türbinlerine kadar uzanan geniş inceleme aralığına sahip bir konudur.

2.1. Alev Yapısı

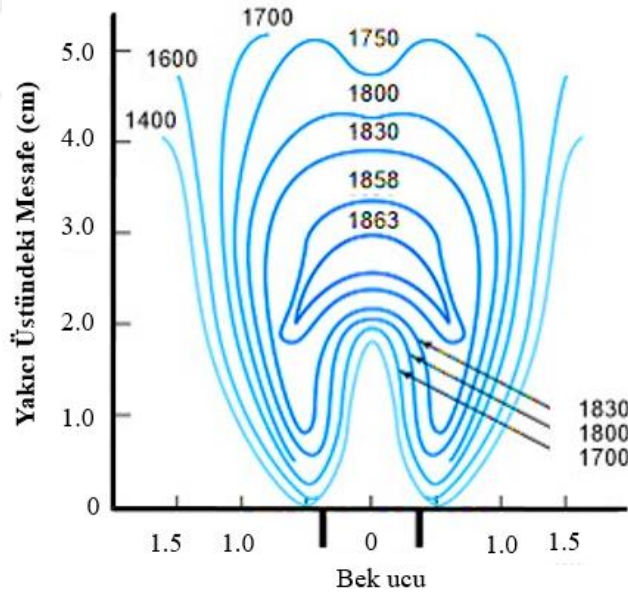
Alev, kabaca yanma anından ateşin gözümüz ile görebildiğimiz kısmıdır. Aynı zamanda yakıt ile oksitleyici maddenin reaksiyona girerek ısı çıkışının yaşandığı süreçlerdir. Alev iç içe geçmiş konilerden oluşmaktadır. Alevin iç noktasında yakın olan katmana iç koni, dış çeperinde yer alan katmana ise dış koni denilmektedir. Ancak farklı yakıt tiplerinde farklı davranışlar da gözlemlenebilmektedir. Birçok yakma sisteminde reaksiyon kinematiğini hızlandırmak amacıyla yanmayı gerçekleştiren tüm bileşiklerin gaz faza geçmesi ihtiyacı dolayısıyla reaksiyona inert gaz (azot, su buharı vb.) eklemesi yapılabilmektedir. İntert gaz ekleme işlemi reaksiyon davranışının kontrol altında olması durumunda kullanılabilir. Alev oluşumları yerçekiminin tersine oluşum göstermektedirler. Alevin bulunduğu yerdeki yerçekimi özelliklerine bağlı olarak alev yapısında ve davranışında farklılıklar gözlemlenebilmektedir.

Alev yapıları iki ana kategoride incelenmektedir. Bunlar; ön karışım ve difüzyon alevler olarak ikiye ayrılmaktadırlar. Ön karışım alev ile difüzyon alev arasında ciddi farklılıklar mevcuttur. Ön karışım alevler debiye bağlı olarak laminer yanma tipine yakın davranış, difüzyon alevler ise akış davranışlarından dolayı türbülanslı yanma davranışı göstermektedir.

Akış davranışı sistemin akış özellikleri ile ilişkilidir. Akışın türbülanslı ya da laminer olması direkt olarak alev davranışını etkileyen bir faktördür. Akışın yapısı yüzey sürtünmesi ve ısı transferini etkileyerek ısı salınımından emisyon oluşumlarına kadar birçok alanda

farklı davranışlar gözlenmesine sebep olmaktadır. Bu noktada yakıt hava karışımı ön karışımı ya da birbirinden bağımsız olarak yakma sistemi içerisine gönderimi alevin yapısını belirlemektedir.

Türbülanslı akımlar zamana bağlı ve üç boyutludur. Zamana bağlılığın frekansı ve ölçeği çeşitli büyüklük mertebelerine dağılmaktadır. Herhangi bir yakma sisteminde akışı ait özelliklerin ve farklı Reynolds sayısının hesaplanması alevin davranışı hakkında bilgi edinmemize yardımcı olur. Alev stabilizasyonunun oluşmasıyla osilasyon gözlemlenir. Alev kopmaları, alev gerilmeleri, alev oluşum yapıları ısı transferi ve sürtünmeyi arttırmaktadır. Örneğin; yüksek türbülans alev stabilizasyonunu bozmakla kalmaz aynı zamanda ısı transferini ve sürtünme kayıplarını yükseltmektedir. Fakat türbülanslı alevlerde difüzyon yanma olayının gerçekleşebilmesi için istenen bir akış özelliğidir. Bu sebeple seçilen akış özellikleri istenen alev tipi ve alevin kullanılacağı yere göre farklılık arz eder. Alevin her noktasında sıcaklık farklı değerlerdedir. Bu lokalleşmeyi sağlayan aslında alevi oluşturan sistemin akış özellikleridir. Lokal sıcaklık dağılımı alev üzerinde olduğu gibi Şekil 2.1’de yer almaktadır.



Şekil 2.1. Yakıcı Üzerindeki Alev Sıcaklık Bölgeleri

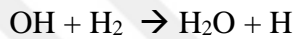
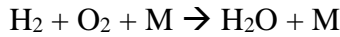
Genel olarak alevin yapısını incelerken alevin iç koni ve dış koni olarak iki kısma ayırmak mümkündür. Diğer taraftan alevin ışımaya özelliklerine bakılarak da bazı bölgesel tayinler yapılabilmektedir. Bunlara mavi bölge, siyah bölge, ışımaya bölgesi, ışımaya olmayan yanma bölgesi, ışımaya olmayan bölge gibi örnekler verilebilmektedir. Alevin ışımaya bölgesindeki renk dağılımları göz ile görülebilmektedir. Mavi ve siyah bölge gözle

görülebilen alanlarda yer almaktadır. Termal bölgede ise göz ile görebilmek mümkün değildir.

Yanma prosesleri gerçek şartlarda reaksiyon, zincir reaksiyonları adı verilen başlangıç tepkimesiyle başlamaktadır. Örneğin, hidrojen ile oksijen reaksiyonunun zincir başlatma reaksiyonu;



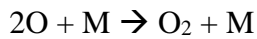
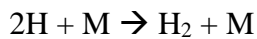
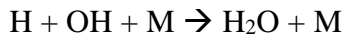
şeklindedir. Benzer şekilde yayılma reaksiyonları;



şeklindedir. Zincir dallanma reaksiyonları ise;



şeklindedir. Reaksiyon zincirinin yok olma durumunda ise;



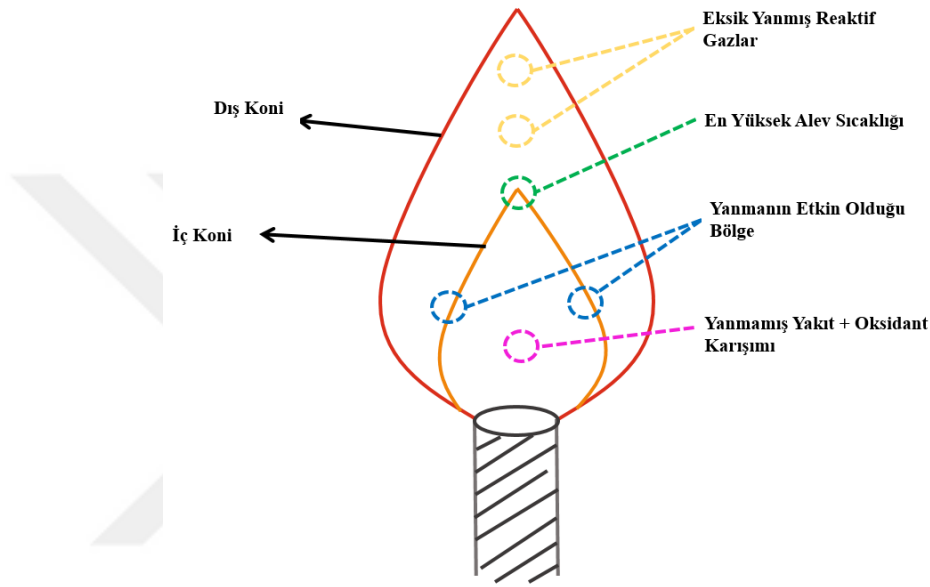
Radikaller, serbest radikaller olarak da bilinmektedir. Radikal içeriğindeki eşlenmemiş elektronu olan atom, molekül ya da iyonlardır. Bilinen en iyi radikal üreten tepkime ise yanma tepkimesidir. En çok bilinen radikal ise di-radikal dioksittir (O_2).

2.2. Aktivasyon Enerjisi

Yanma olayının gerçekleşebilmesi için iki hal arasındaki enerji bariyerinin aşılabilmesi mecburidir. Isı enerjisiyle bu aşım gerçekleşebilmektedir. Ancak bu durum yüksek değerlerde sıcaklık ihtiyacı doğurmaktadır. Yanma reaksiyonunda kullanılan aynı zamanda kararlı yapıda bulunan oksijen molekülü di-radikaldir. Bu molekülün kararlı olmasının sebebi ise elektron spinlerinin paralel olmasıdır. Belirli bir maddenin yanma reaksiyonuna girebilmesi için zincirleme reaksiyonların başlaması ve dallanma safhasında ortamda yeterince serbest radikalın olmasına bağlıdır. Zincir dallanma reaksiyonlarında

gelir. Buna soğuk alev adı verilir. Soğuk alev sonrası alevin sönmesi ya da patlama olayı gözlemlenebilmektedir.

Alev hacmi içerisinde kimyasal reaksiyonlar yardımıyla yakıt-hava karışımının yanma ürünlerine dönüştüğü ince bir bölgedir. Alev yayılabilir ya da sabit kalabilmektedir. Sabit kalan alev davranışına bunsen brülörünün yanması örnek verilebilmektedir. Temel alev üzerinden değerlendirme yapılması gerekirse alev bölümleri Şekil 2.3'te açıklandığı gibi gerçekleşmektedir.



Şekil 2.3. Temel Alev Bölgeleri

Alevin iç konisinde genellikle zengin karışım mevcuttur. Alev cephesi hattı alev üzerinde en düşük sıcaklık değerinin gözlemlendiği alanlardır. Bu sıcaklık düşüşünün sebebi fakir yakıt karışımının gözlemlenmesidir. Alev merkezinde ise hız yüksek olması nedeniyle sıcaklık değerleri alev hattına göre yüksek olmakla birlikte düşük gözlemlenmektedir. Ana reaksiyon bölgelerinde maksimum reaksiyon sıcaklığına ulaşılmaktadır. Alev dış koni cephesinde yakıt karışımının fakirleşmesinden kaynaklanan sıcaklık düşüşleri gözlemlenmektedir.

Alev davranışının yanma esnasındaki fiziksel süreçleri genel hatlarıyla kütle ve enerji iletimiyle ilgilidir. Termik enerjinin ısı transferi yani; konveksiyonu, kondüksiyonu ve ışınımı prosesi belirlemektedir. Alev içerisinde çeşitli olaylar gerçekleşmektedir. Gerçekleşen olaylara örnek olarak kimyasal bileşenlerin difüzyonu, gazlarının akışı, egzotermik reaksiyonlar sonucunda kimyasal enerjinin serbest bırakılmasından söz edilebilmektedir.

Reaksiyonların evrilme davranışları incelenerek alev içerisinde gerçekleşen olaylar hakkında analizler gerçekleştirilmek mümkündür.

Yanma esnasında radikaller kararlı yapılara ulaşarak reaksiyonların sonlanmasına neden olmaktadır. Yanma tepkimelerinin gerçekleşme basamaklarındaki her adımda bir reaktant molekülü tüketilip aktif bir üretim gerçekleşmektedir. Yanma olayında devam eden adımlar sonrasında zincir reaksiyon mekanizması başlamaktadır. Yanma tepkimesinin sonucunda alevin kararlılığından söz edilebilmesi için sisteme giren öğelerin hızı ile tüketim hızlarının eşit olması gerekmektedir.

Tüm yanma olaylarında reaksiyon başlarken soğuk alev oluşumu gerçekleştiği bilinmektedir. Yanma sisteminde belirli olan parametreler şunlardır;

- ❖ Kimyasal kinetik
- ❖ Geometri
- ❖ Kondüksiyon
- ❖ Konveksiyon
- ❖ Radyasyon

Yanma sistemlerinde belirleyici olan parametreler arasında ısı transferi çeşitlerinin tüm parametreden en etkilisi olduğu bilinmektedir. Yanma olayında gerçekleşen ısı kayıpları, reaksiyon boyunca oluşan ısı kazancına eşitse kararlı bir sıcaklık dağılımı gözlemlenir. Sistemde ısı kaybetme hızı, ısı üretim hızından daha düşük değerde gerçekleşmesi durumunda, sistemden transfer olan ısı miktarı üretilenden az olursa patlama olayı yaşanmaktadır.

İnsanlık tarihi süresince yanma çalışmaları her zaman dikkat çeken ve bilim insanlarının üzerine çalışmalar gerçekleştirdiği konu durumunda yer almıştır.

Semenov'a göre ısı kaybı hızı formülünde sıcaklık dağılımı düzgün kabul edilerek formülize edilmiştir.

$$\dot{Q} = (K * \frac{A}{V})(T - T_w) \quad (1)$$

Denklem 1'de ısı kaybının sadece kondüksiyon ile iletildiği kabulüne dayandırılmaktadır. Bu kabuller dolayısıyla gerçek koşullardaki diğer ısı transferi çeşitleri göz ardı edildiği için deneysel sonuçlardan sapma görülmesi kaçınılmazdır. Benzer şekilde

Arrhenius'a göre ısı üretim hızı reaksiyon hızı (Q), konsatrasyon fonksiyonu $f(n)$ ve kinetik hız sabiti ($A * e^{-E/RT}$) aracılığı ile gösterimi ise Denklem 2'de gösterilmektedir.

$$\Phi = Q * f(n) * A * e^{-E/RT} \quad (2)$$

Termal patlama başladıktan sonra sıcaklık değişim hızı (V_{DT}) Denklem 3'de gösterilmektedir.

$$V_{DT} = \frac{\Phi - \emptyset}{C_s} \quad (3)$$

Zincir dallanma reaksiyonlarının patlaması ve dış etken olmadan kendiliğinden gelişmesinin nedeni yüksek reaktiviteye sahip bileşenlerden oluşmasıdır. Yüksek reaktiviteye sahip bileşenler, reaksiyona girerek kendi türlerinden daha fazla bileşen oluşturmaktadır. Süreç genel hatlarıyla dört bölümde değerlendirilebilmektedir. Bunlar; başlangıç, ilerleme, zincir dallanma, sona erme süreçleri olarak sıralanmaktadır.

Enerji dallanması, yüksek enerji yüklü bileşenlerin bir moleküle enerji ileterek ayrışmasına sebep olması durumuna denilmektedir. Gerçekleşen reaksiyonlardaki hızlanmaların nedenleri egzotermik davranışlardan kaynaklanabileceği gibi kendiliğinden ısıtma kaynaklı zincir dallanması sebebiyle de ortaya çıkmaktadır. Fiziksel şartların etkilerinden ziyade kimyasal kinematığın, ana ürünlerinin ve radikallerinin kararlı hale geçmesi için izledikleri yolları, alev davranışının, reaksiyon davranışı, deflagrasyon dalgasının davranışı ve detonasyon dalgalarının davranışları kritik önem arz etmektedir.

Yanma bölgelerinde iki durumun yaşanması şartlar dahilinde mümkün olmaktadır. Bunlar;

- ❖ Geçiş bölgesi boyunca oluşan basınç ve yoğunluğun arttığı detonasyonlar,
- ❖ Geçiş bölgesi boyunca oluşan basınç ve yoğunluğun azaldığı deflagrasyonlardır.

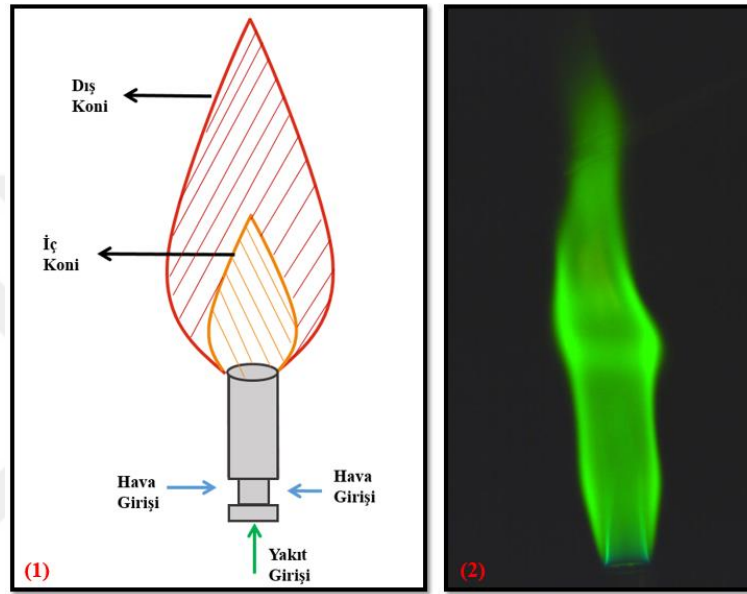
Alev cephesini terk eden yanmış gaz, başlangıçtaki reaktant hıza göre daha yüksek hıza, daha düşük basınç ve yoğunluğa sahiptir. Dış koniyi çevreleyen sınırlar içerisinde dış hattı alev cephesi yer almaktadır.

Stabil alev elde etmenin birçok açıdan önemi vardır. Bunlar;

- ❖ Emisyon salınımı
- ❖ Yakıt tüketimi

❖ Alev kontrol edebilmek için önem arz etmektedir.

Alev içeriğinde yanıcı ve yakıcı bileşenlerin aynı anda ortamda tepkimeye girmesi sonucu yanmış gazlar meydana gelmektedir. Bu gazlardan karbondioksit (CO_2) yanmaya katılmama davranışı sergilemektedir. Yanmaya katılmamakla birlikte yakıtların oksijen ile tepkimeye girmesine engel olarak yanmayı önlemektedirler. Alev yapısı iki ana başlıkta incelenebilmektedir. Bunlar ön karışımli alevler ve difüzyon alevlerdir. Ön karışımli ve difüzyon alevlerde iki ana başlık altında laminar ve türbülanslı olarak incelenmektedir.

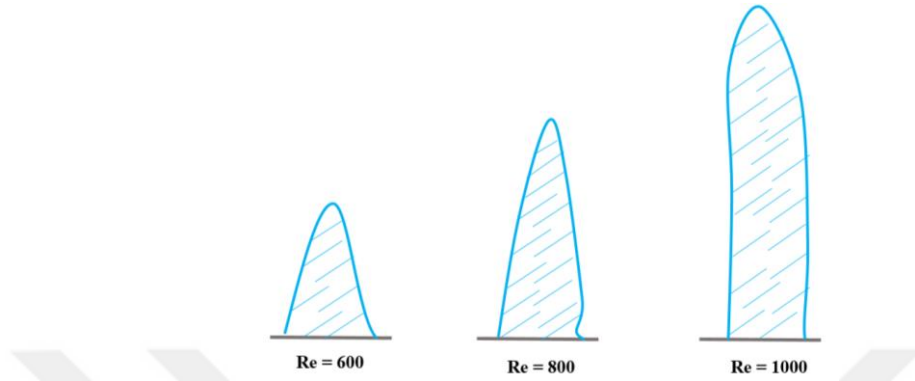


Şekil 2.4. Ön Karışımli Alev; (1) Çizim Gösterimi, (2) Deney Görseli

Alev oluşumu esnasında yanma hızı, stokiyometrik karışıma yakın noktada maksimum değerine ulaşmaktadır. Alev hızının, alev cephesine dik bileşeninin yanma hızına eşit olduğu yüzey alevin yerini vermektedir. Yanma hızı, akış hızını geçerse alev Bunsen brülörü içerisinde hareket etmeye başlar. Literatürde bu duruma alev tepmesi (Flashback) denilmektedir. Özellikle hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı sistemlerde alev tepmesi sıklıkla yaşanmaktadır. Yanma hızı ve akış hızının olması gerektiği oranlarda ayarlanması kritik bir konudur. Akış hızı yanma hızına göre yüksek olursa, akış yoğunluğu dolayısıyla alev gözle görünen kısımda sönecektir ancak Bunsen brülörü içerisine doğru yanmaya devam edecektir. Akışın içeriye doğru devam ederek yanması durumu ciddi riskler içermektedir.

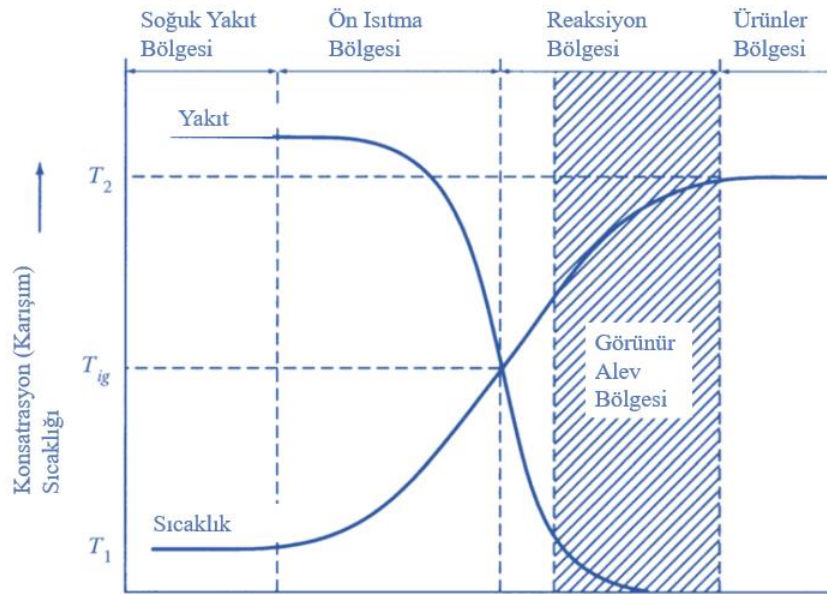
Akış hızı arttıkça, Re sayısında artmakta ve gaz akışı alev cephesinden uzaklaşmaktadır. Bu durum daha fazla yakıtın okside olup reaksiyon hızının artmasına ve alev boyunun uzamasına sebep olmaktadır (Şekil 2.4). Hız arttıkça atmosferik havanın

etkisiyle sistem fakirleşmekte ve yanma hızı belli bir noktadan sonra düşme eğilimi göstermektedir. Bu nedenle alev yükselmeye devam etsede davranışı kararsızlaşmakta ve belli hızlardan sonra alev dış koni bölgesinde buruşma halleri gözlemlenebilmektedir.



Şekil 2.5. Değişken Re Sayılarına Ait Alev Boyu Şemaları

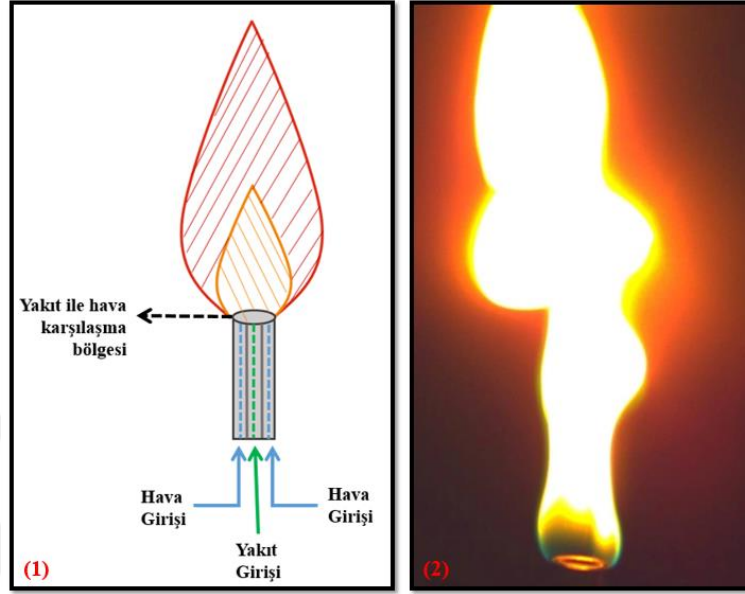
Zengin karışım ve yakıt hızı çok yüksek değerlerde ise atmosferik hava ile karışım sonucu stokiyometrik şartlarda meydana gelmektedir. Yanma hızı artış göstererek brülör üzerinde yükselen alevi meydana getirmektedir.



Şekil 2.6. Laminer Alev Bölgeleri

Difüzyon alevler ise genellikle gaz formundaki yakıtların ayrı ayrı yanma alanına gönderilmesi sonucunda tutuşması durumudur. Oksitleyici maddenin yakıt ile tepkimeye girmesi difüzyon ile gerçekleşmektedir. İki farklı alev tipi gözlemlenebilmektedir. Alevin

hızına difüzyon hızı engel teşkil etmektedir. Difüzyon alevlerde karışım homojenitesinin düşük olması durumunda yanmamış karbon parçacığı (is) ve sarı ışımaya yüksek miktarda gözlemlenmektedir.



Şekil 2.7. Difüzyon Alev (1) Çizim Gösterim, (2) Deney Görseli

Alev rejimleri Bunsen brülörleri için incelenecek olursa; alevin sahip olduğu basıncın ters orantılı olarak kritik brülör çapı değerine soğuma çapı denmektedir. Kullanılacak çap ile istenen hızın hesaplamaları yapılmalıdır. Difüzyon ve ısı iletim hızı basınç ile ters orantılıdır. Yüksek yanma hızına sahip sistemler için küçük soğuma çapları gereklidir.

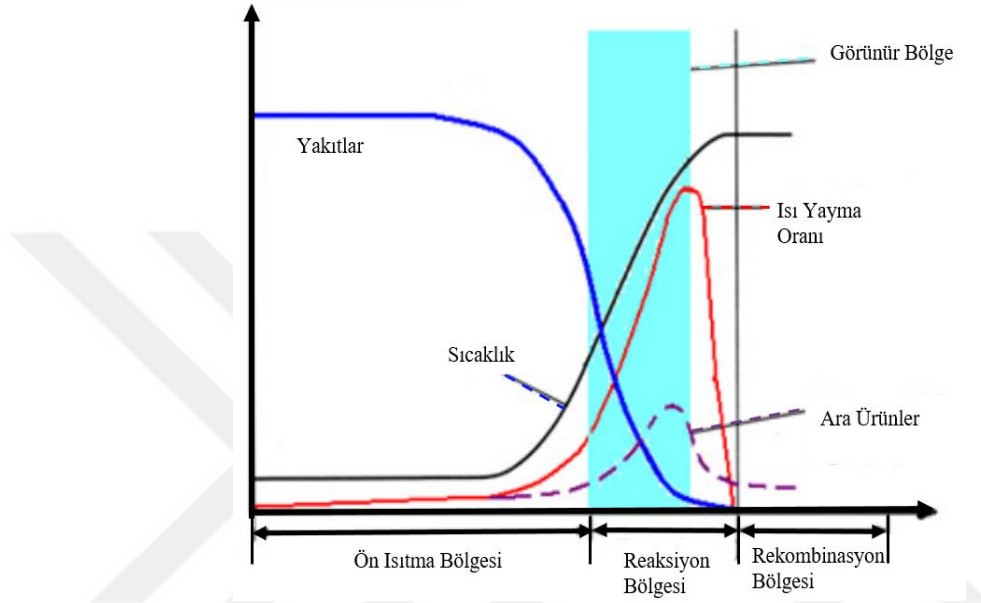
Laminer akışlı düz bir alev için ısıl ifade;

$$\frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) - \frac{d}{dx} (C_p T_g u) + QW = 0 \quad (4)$$

şeklinde gösterilmektedir. Denklemden $\frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{dT}{dx} \right) - \frac{d}{dx} (C_p T_g u)$ bölümü kondüksiyon, $\frac{d}{dx} (C_p T_g u)$ gaz akışını ve "QW" ise kimyasal reaksiyonu ifade etmektedir. Tutuşma noktası ön ısıtma bölgesi ile reaksiyon bölgesi arasındaki geçişi tarif etmektedir. Tutuşma noktası sonrasında alev çok yüksek hızlara ulaşmaktadır. Alev ilerleyişi termal nedenler ile gerçekleşmekteyse tutuşma noktasında ölçülen sıcaklık değeri alevin son sıcaklığına çok yakın değerlerde gözlemlenmektedir. Reaksiyon bölgesinde yanma hızı reaksiyon hızının karekökü ile

orantılıdır. Reaksiyon bölgesinin kalınlığı yanma hızı ile ters orantılıdır. Yanma hızının artmasıyla doğru orantılı olarak alev cephesini aynı oranda incelemektedir.

Alevin ilerlemesine (Şekil 2.8) ait termal teoriler alevin reaksiyon bölgesinin ötesinde bulunan aktif merkezlerinin difüzyonel tutuşmayı geliştirecek kadar olmadığı kabulüne dayandırmaktadır. Bu teoride tutuşma reaktant gazların ısınması sonucunda oluştuğu kabulünü esas almaktadır.



Şekil 2.8. Alev İlerleyişi

Tutuşma sıcaklığının son alev sıcaklığına yakı değerlerde olduğu kabul edilmektedir. Tutuşma sıcaklığı (T_i) yaklaşık olarak;

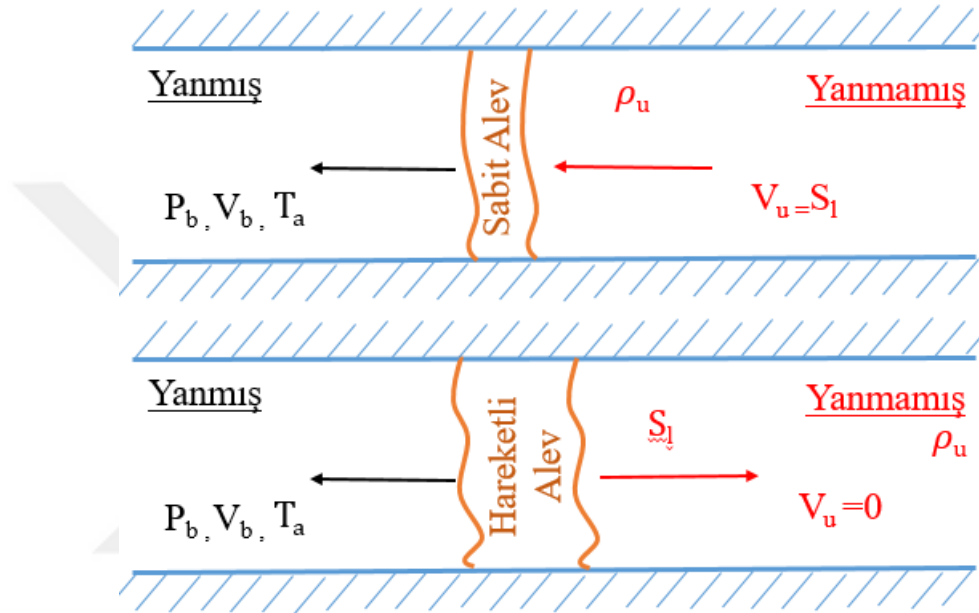
$$T_i = \frac{R \cdot T_F^2}{E} \quad (5)$$

formülü ile ifade edilmektedir. Denklem 5'de T_F alev sıcaklığı, E aktivasyon sıcaklığı ve R ise universal gaz sabitidir. Difüzyon alevde ise yanma içerisinde reaksiyon hızı alev hattı boyunca sabit kabul edilmektedir. Difüzyon alevine reaksiyon hızı öncesinde karışım oranının daha yüksek oranda etki ettiği bilinmektedir.

Alev, belirli bir hacim içerisinde kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesi sonucu yakıt-hava karışımının yanma ürünlerine dönüştüğü ince bölgedir. Alev yayılma davranışı gösterebildiği gibi sabit kalarak da yanma tepkimelerini gerçekleştirebilir. Yayılma davranışı gösteren aleve en iyi örnek içten yanmalı motor uygulamaları olacakken, sabit yanma için bu tez kapsamında incelemesi gerçekleştirilen Bunsen brülörü örnek verilebilir.

Belirli sıcaklık, basınç ve yoğunluk özelliklerine sahip ortamda gerçekleşen yanma tepkimesi adyabatik alev sıcaklığı (T_{ad}) ve laminer alev hızı (S_l) gibi temel özelliklere sahiptir. İncelemelerin genel kabulünde alev boyunca basınç sabit kalmaktadır. Basıncın sabit kalmasından kaynaklanarak $\rho \sim 1/T$ ilişkisi kurulabilmektedir.

Sabit ve hareketli alev yapılarının incelenmesinde “u” yanmamış, “b” ise yanmış alt indisi olarak kullanılmaktadır. Matematiksel modellemelerde genellikle yanmış ve yanmamış bölge arasında alev cephesi gösterimi ile sıralama yapılmaktadır.



Şekil 2.9. Sabit ve Hareketli Alev Bölge Ayrımları

Alev hızı incelemeleri gerçekleştirilirken kondüksiyon ve difüzyon haricinde reaksiyonlar ile gerçekleşen ısı üretimi de dikkate alınmalıdır. Aksi takdirde alev hızı incelemeleri sonuç vermeyecektir. Alev ilerleyişi için toplam hız bağıntısı;

$$-\frac{d[yakıt]}{dt} = A \cdot [yakıt]^B \cdot [oksidant]^C \cdot e^{-E/RT} \quad (6)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Denkleminde belirtilen “A”, “B” ve “C” deneysel ölçüm parametrelerinin gösterimidir. Ayrıca $-E/RT$ reaksiyonunun büyüklüğü reaksiyonun kontrollü olduğunu, küçük olması ise difüzyonun kontrollü olduğunu göstermektedir.

2.3. Yanma Teorisi

Yakıt ile oksitleyici maddenin belli sıcaklık değerlerinde kimyasal reaksiyon sonucunda oluşturdukları ısı ve kimyasal bileşenlere evrildikleri süreçlerdir. Yanma tepkimesi kimyasal bir olaydır ve sonucunda ısı meydana gelmektedir. Kimyasal içeriğinde

hidrojen ve karbon atomları bulunduran bileşenler (hidrokarbonlar (C_nH_m) ve organik maddeler) yanma tepkimesi sonucunda su (H_2O) ve karbondioksit (CO_2) oluşumuna neden olmaktadır. Oksitleyici madde olarak yüksek oranda oksijen kullanılmaktadır. Flor ve klor da oksitleyicilere örnek olarak verilebilmektedir. Kimyasal tepkime sonucu ürün ve ısı oluşumu tepkimelerin incelenmesi kısmında yer alan yanma teorisindeki akış incelemelerini içermektedir. Tepkimeye giren yakıtın yanma tepkimesine girmesi için ihtiyaç duyduğu minimum hava miktarına stokiyometrik hava denilmektedir. Yakıt, stokiyometrik hava ile tepkimeye girerek tamamen yanmaktadır. Yanma verimliliğinin analiz edilmesinde stokiyometrik hava kritik bir faktördür. Yanmanın gerçekleştiği alan çerçevesinde ısı alışverişinin olmaması durumunda yanma sonucu oluşan alevden elde edilen teorik en yüksek alev sıcaklığına adyabatik alev sıcaklığı denilmektedir. Yanma tepkimesinin gerçekleşebilmesi için ihtiyaç duyulan hava oranının teorik olarak bulunması gereken hava miktarına oranı, hava fazlalık katsayısı olarak bilinmektedir. Lambda (λ) olarak adlandırılan hava fazlalık katsayısının formülü;

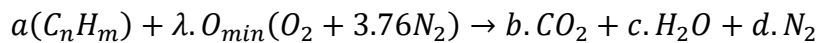
$$\lambda = \frac{\frac{\text{Gerçek hava oranı}}{\text{Gerçek yakıt oranı}}}{\frac{\text{Teorik hava oranı}}{\text{Teorik yakıt oranı}}} = \frac{(H/Y)_g}{(H/Y)_t} \quad (7)$$

şeklinde dir. Hava fazlalık katsayısının tersine ise ekivalans oranı denilmektedir. “ ϕ ” şeklinde gösterilmektedir.

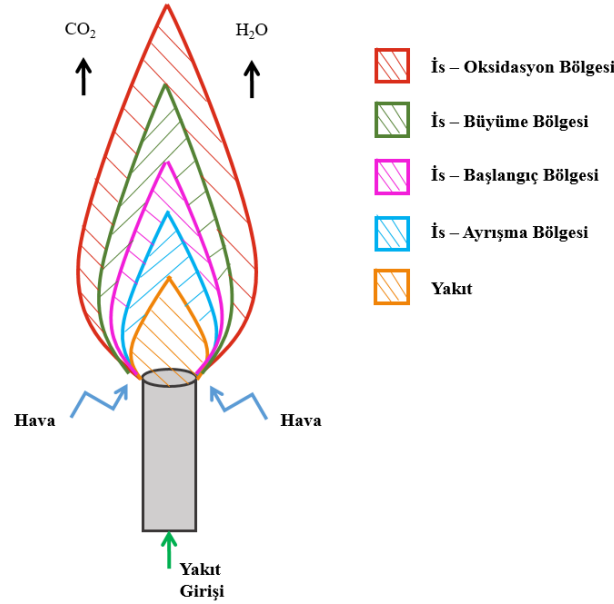
$$\phi = 1/\lambda \quad (8)$$

Yanma reaksiyonunun gerçekleşmesi esnasında bulunan havanın, hava fazlalık katsayısı ve reaksiyon çıktılarına göre belirli sınıflandırmalar yapılmaktadır. Oksitleyici ile aynı ortamda bulunan yakıtların tepkime sonucunda ürünler çıktısını oluşturduğu denklem ile farklılıklar açıklanmaktadır.

Tepkimeye giren yakıtın stokiyometrik hava ile tepkimeye girmesi sonucunda bileşiminde barındırdığı tüm karbon ve hidrojen gibi atomların oksijen ile bağ kurduğu anlamına gelmektedir. Teorik tam yanma sonucunda reaksiyon çıktılarında oksijen minimum seviyelerde gözlemlenmektedir. Ürünler tarafında karbondioksit (CO_2), su (H_2O) ve azot (N_2) oluşumu gözlemlenir.

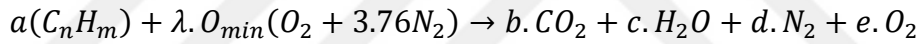


Lamda değeri 1'e eşit ($\lambda=1$) olarak hesaplanmaktadır.

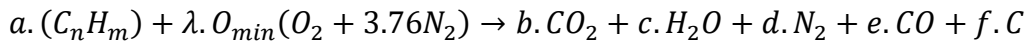


Şekil 2.10. Difüzyon Yanma Alev Katmanları

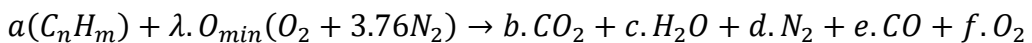
Yanma tepkimesi için hava-yakıt karışım oranının 1'den büyük olduğu durumlar ($\lambda > 1$) ise tam yanma olarak isimlendirilmektedir. Teorik tam yanmadan farklı olarak tam yanma durumunda, ürünler çıktısında oksijen atomu gözlemlenmektedir.



Teorik tam yanmaya göre tam yanma ortamında daha fazla hava olduğunu görmek mümkündür. Gerçekleşen yanma tepkimesinde hava-yakıt oranının 1'den küçük olması durumunda eksik yanma olayı görülür. Zengin karışım durumu ise ortamda oksijen oranının az olması durumudur. Yanma ortamında oksijen miktarının az olması dolayısıyla oksidasyon sürecini tam anlamıyla gerçekleştiremez ve moleküller arası bağlar kırılmamasından dolayı yanma ürünleri kısmında karbonmonoksit ve is oluşumu gözlemlenmektedir.



Yanma tepkimesinin gerçekleştiği ortamın sıcaklığı nedeniyle lamda değerinin hava fazlalık katsayısından büyük olmasına rağmen karbondioksit (CO_2) ve su (H_2O) moleküllerinden ısıl ayrışma sonucunda karbonmonoksit (CO), hidrojen oksit (OH) ve hidrojen (H) molekülleri yanma tepkimesinde ürünler tarafında görülmektedir. Bu yanma kısmi yanma olarak isimlendirilmektedir. Yanma tepkimesinin gerçekleştiği ortam sıcaklık şartları, moleküllerin bileşik oluşturma sürelerinden düşük olması nedeniyle reaksiyon için yeterli süre verilmez. Reaksiyonda donma yaşanarak eksik yanma ürünleri meydana gelir.



2.4. Alev Teorileri

Aleve ait en önemli parametrelerden birisi de laminer alev hızıdır. S_l ile gösterilmektedir. Alev hızı hesaplama yöntemleri için birçok yaklaşım mevcuttur. Bu yaklaşımlardan en yaygın kullanılan ise Mallard-Le Chatelier ilkesidir. Mallard-Le Chatelier tarafından önerilen formülasyondan yola çıkılarak laminer alev hız hesaplamasını yapmak mümkündür. Bu formülasyon;

$$S_l = (\alpha \cdot P^{n-2} \cdot \exp(-\frac{E_A}{RT_{ad}}))^{0.5} \quad (9)$$

şeklinde gösterilmektedir. T_{ad} olarak gösterilen adyabatik alev sıcaklığı, E_A ise aktivasyon enerjisi anlamında kullanılmaktadır. α ile gösterilen termal difüzyon parametresinin açılımı;

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \quad (10)$$

şeklindedir. Bu formülde ise k ısı transfer katsayısı, ρ yoğunluk ve C_p sabit basınçtaki özgül ısı değeri anlamını ifade etmektedir. Alev hızının yüksek olması teorik hesaplama formüllerinden yola çıkarak yüksek yanmamış gaz sıcaklığı, adyabatik sıcaklığı ve termal difüzyon katsayısı (α) ve düşük basınca sahip yorumlamalar yapılabilmektedir. Laminer alev hızı yaklaşımlarından bir diğeri ise Metghalchi ve Keck tarafından geliştirilen formüllerdir.

$$S_l = S_{l,ref} \left(\frac{T_u}{298 \text{ "K"}}\right)^{\gamma} \left(\frac{P}{1 \text{ "atm"}}\right)^{\beta} \cdot (1 - 2.1Y_{dil}) \quad (11)$$

Laminer alev hızı yanmamış gazların başlangıç noktasına bağlı olarak ölçülmektedir. Alev hızı sabit bir gözlemciye bağlı olarak ölçülmektedir. İncelenen alevin uç kısmı kapalı bir boru içerisinde alev yayılma davranışı gösteriyorsa ölçülen hız alev hızıdır. Bu hız yanma hızından 8 kat daha fazla olabilmektedir (Şekil 2.10).

Yanma sistemlerinde alevin yayılma davranışı çevre ile ısı transferi sonucunda sürekli olarak gerçekleşmektedir. Herhangi bir yanma sisteminde soğuma mesafesi alev kalınlığından küçük değerlerde ölçülürse alev sönme davranışı göstermeye başlayacaktır. Alevin kritik soğuma mesafesi, ilgili alevin kalınlığı (δ) ile ilişkilidir. Alev soğuma mesafesi ile alev kalınlığı değerleri genellikle yakın değerlerdir. Laminer alev kalınlığı formülü;

$$\delta = \frac{2a}{S_l} = \frac{2}{S_l} \left(\frac{k}{\rho \cdot C_p}\right) \quad (12)$$

şeklindedir. Alev, sadece yakıt-hava karışımının tutuşma sınırı içerisinde olması durumunda alev yayılım davranışı gösterebilmektedir. Yakıtın alevlenme davranışı gösterebileceği

yakıt-hava oran aralığına tutuşma aralığı denilmektedir. Tutuşma aralığı yanmanın başlaması ve devam etmesi için önemli parametrelerdendir. Yakıtın tutuşma sınırı karışımın başlangıç basınç ve sıcaklığından etkilenerek değişkenlik göstermektedir. Fakir yakıt karışım sınırı alt tutuşma sınırını, zengin yakıt karışım ise üst tutuşabilirlik sınırı olarak bilinmektedir.

2.5. Alev Yapısı

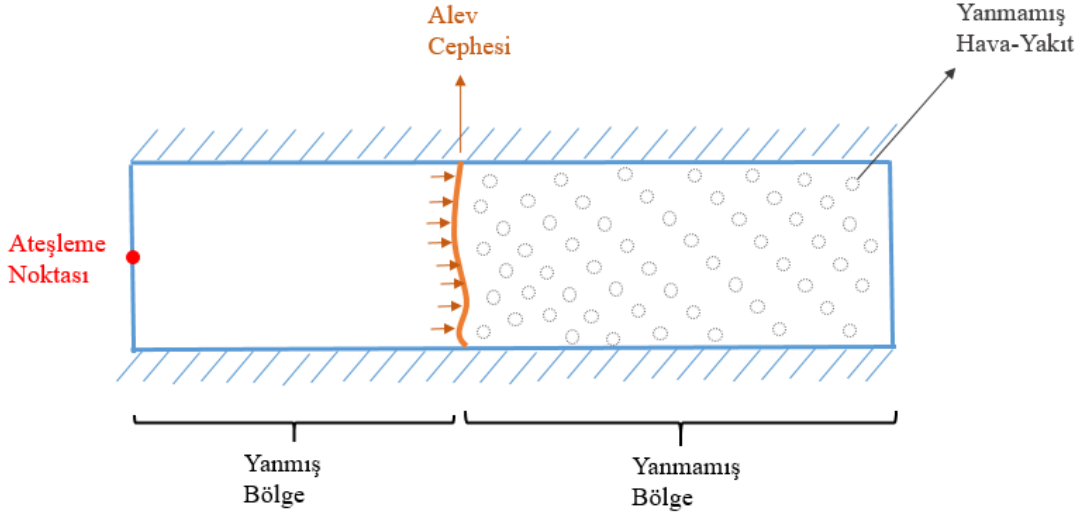
2.5.1. Laminer Alev Yapısı

Hava-yakıt karışımları için sıcaklık seviyesinin yükselmesiyle birlikte üç farklı durum ile karşılaşmak mümkündür. Bunlar;

- 1) Bölgesel ateşleme bölgeleri,
- 2) Yüksek miktarda serbest radikal oluşum bölgeleri,
- 3) Patlama olayının gerçekleştiği bölgelerdir

Üç madde içerisinde süreç içerisinde hangisinin gerçekleşeceği sistem içerisindeki hava-yakıt oranına ve karışımın alevlenebilirliği ile ilgilidir.

Yanmanın gerçekleşmesi için oluşan ilk alev kernel alevi ya da alev küreciği denilmektedir. Alev ilerleyişi sürdükçe alev cephesi, önündeki yanmamış hava-yakıt karışımını sıkıştırarak ön reaksiyonların meydana gelmesini sağlar. Alev ilerledikçe basınç artacaktır. Alev cephesinin hızı yakıt tipine ve yanma ortamı geometrisine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Alev cephesi hat boyunca ilerledikçe moleküler çarpışma, sürtünme ve momentum transferi artış göstermektedir. Sistemde enerji üretimi (e_u), enerji tüketiminin (e_t) önüne geçmesi durumunda ($e_u > e_t$) patlama olayı gerçekleşmektedir. Patlama olayında hava-yakıt karışımı içerisinde alev dalgalarının yayılım hızı, ısı iletimi ve radikallerin etkisi ile ses hızının oldukça altında gerçekleşmektedir. Alev tanımında deflagrasyon dalgası gözlemlenmektedir. Patlama gerçekleşiyorsa detonasyon dalgası gözlemlenmektedir.



Şekil 2.11. Laminer Alev İlerleyişi ve Alev Bölgeleri

Alev yayılım davranışı farklı hızlarda gerçekleşebilmektedir. Bu hız tanımları ses altı hız, ses hızı ve ses üstü hız olmak üzere mach sayısına bağlı olarak değişmektedir. Alev yayılımının ses altı hızlarda gerçekleşmesi durumunda $Ma < 1$, ses hızına eşit olarak yani sonik hızlarda gerçekleşiyorsa $Ma = 1$ ve ses üstü hızlarda gerçekleşiyorsa $Ma > 1$ değerinde gerçekleşiyor denmektedir. Ses üstü hızların gözlemlenmesi için detonasyon dalgalarının varlığından söz edilebilir.

Yanmış gaz bölgesi ve yanmamış gaz bölgesi arasındaki enerji salınım miktarları süreklilik, momentum, enerji ve hal denklemleri aracılığıyla açıklanabilmektedir. Enerji salınım (q) denklemi;

$$q = \frac{k}{k-1} \left(\frac{P_2}{\rho_2} - \frac{P_1}{\rho_1} \right) - \left(\frac{1}{2} \right) \cdot (P_2 - P_1) \cdot \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \right) \quad (13)$$

şeklindedir. Denklemde k özgül ısılar oranını ifade etmektedir. Yanmamış hava-yakıt karışım içerisindeki alev yayılım hızının mach sayısına bağlı ifade edilmesi istenirse;

$$k \cdot Ma_1^2 = \frac{\left(\frac{P_2}{P_1} - 1 \right)}{\left[1 - \frac{1}{\rho_2} \right] \left[1 - \frac{1}{\rho_1} \right]} \quad (14)$$

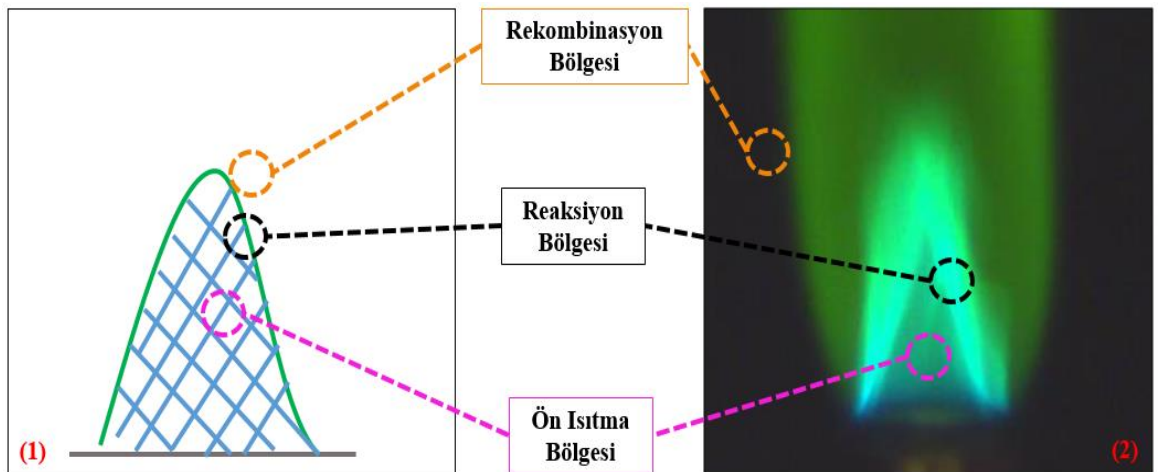
şeklinde ifade edilmektedir. Yanma sisteminde özgül hacim arttıkça detonasyon oluşma ihtimali azalmaktadır. Sistem içerisinde basınç oranı yükseldikçe detonasyon oluşma ihtimali artış göstermektedir.

Genel hatlarıyla alev yapısı hakkında Bunsen brülörlerde alev incelemesi gerçekleştirilebilmektedir. Yakıt ve havanın ayrı girişlerden sisteme dahil oldukları yakıcıda

tepe noktasında hava ve yakıt karışım halde bulunmaktadır. Tepe noktasında karışım homojen ve zengin yapıya sahiptir. Bunsen brülörlerinde oluşan laminer alevde hız çizgileri yakıcı duvarına sıfır olacak şekilde parabolik davranış sergilemektedir. Bu noktada hızın sıfır "0" olması alevin tepe noktasında stabil kalması ve ısı kaybının temel sebebidir. Bunsen alevinde siyah bölge, yanmamış ön karışimli gaz bölgesidir. Işıma yapan bölge ise reaksiyonların ve ısı salınımlarının olduğu bölgelerdir. Işıma bölgesinin 1 mm'den daha az kalınlığa sahip olduğu bilinmektedir. Işıma bölgesi sıcaklık değerinin en yüksek olduğu bölgedir. Reaksiyonların ve ısı salınımlarının büyük çoğunluğu ışıma bölgelerinde gerçekleşmektedir. Alevde bölgesel olarak farklı ışımalar hava-yakıt oranına bağlı olarak değişim göstermektedir. Hidrokarbon ile havanın fakir karışım koşullarında CH radikallerinden kaynaklı mor radyasyon yayımları sergilerler.

Alev bölgesinde yüksek sıcaklıkta yanmış gazlar, genellikle CO ve su buharı ışımastan kaynaklanan akkor kırmızımsı bir radyasyon gerçekleştirirler. Karışımın zengin olması durumunda yüksek yoğunlukta sarı bir radyasyon gözlemlenebilmektedir. Sarı alev yayılımı yakıt içerisindeki karbon parçacıklarından (is vb.) kaynaklanmaktadır.

Hidrokarbon mekanizmalarını referans alarak alevi üç bölgede karakterize etmek mümkündür. Bunlar; ön ısıtma bölgesi, reaksiyon bölgesi ve rekombinasyon bölgesidir.



Şekil 2.12. Alev Bölgeleri (1) Çizim Gösterim, (2) Deney Görseli

2.5.2. Türbülanslı Alev Yapısı

Yaygın karşılaşılan alev yapılarından biri olan türbülanslı alev yapısı buruşmalardan, kopmalardan ve bağımsız alev parçacıklarından oluşan yapılara sahiptir. Türbülanslı

alevlerde reaksiyon hızını reaktantların kütleli oranına bağı olarak tanımlamak mümkündür.

$$\dot{w} = -k \cdot \rho^{n-1} \cdot y_i^n = -A \cdot e^{-E/RT} \cdot \left(\frac{P}{R}\right)^{n-1} (T)^{1-n} (y_i)^n \quad (15)$$

Türbülans kinetik enerji, türbülanslı alev davranışını tanımlamada temel ifadelerdendir.

$$\bar{q} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) = \frac{3}{2} (\overline{u'})^2 \quad (16)$$

$$u' = (2\bar{q})^{1/2} \quad (17)$$

Yakhot'a ait teoriye göre türbülanslı alev hızı formülü belirtilmiştir.

$$S_T = S_L \cdot \exp \left[\frac{(u'/S_L)^2}{(S_T/S_L)^2} \right] \quad (18)$$

Türbülans, akış temelli bir olay olması sebebiyle karışım oluşum hızını artırırken alev kopması ve yerel sürtünmeyi etkileyerek alev uzunluğunu azaltmaktadır. Türbülanslı alev hızı modellerinin farklı hesaplama yöntemleri de mevcuttur. Bunlardan bazıları, Zimont ve Peters alev hızı hesaplama modelleridir.

2.6. Alev Hızı Ölçümleri

Bunsen brülöründe gerçekleştirilen deneylerde alev hızının ölçümü ile ilgili iki çeşit yöntem kullanılmaktadır. Ön karışımli laminer alevlerin deney görüntüleri kullanılarak laminer alev hızı hesaplaması gerçekleştirilebilmektedir. Bunsen brülör üzerinde oluşan aleve ait ön kesit görünümünden bakıldığında, alev cephesinin yanmamış gaz bölgesine göre dik olduğu kabul edilerek hesaplamalar gerçekleştirilmektedir. Türbülanslı aleve kıyasla ile çok daha stabil şekil yapısına sahip laminer alev hızlarının ölçümü için iki farklı yöntem kullanılabilir. Literatürde yoğunlukla kullanılan alev hızı hesaplama yöntemleri alev açısı ve alev alanı yöntemleridir.

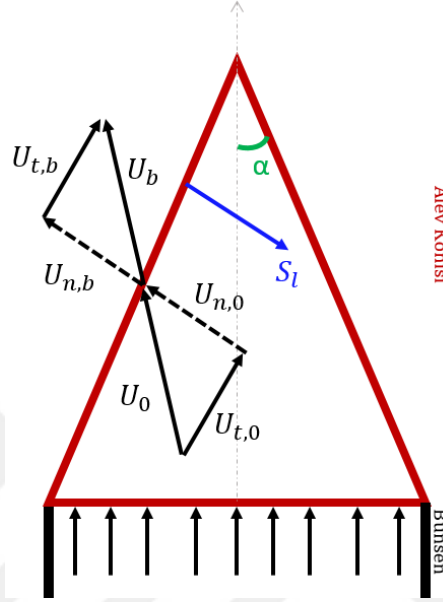
2.6.1. Alev Açısı ile Hız Ölçümü

Bunsen brülörde ön karışımli yakıtın yakılmasıyla birlikte laminer alevin elde edilebilmesi için çıkan akış hızının, yanma hızından daha büyük olması gerekmektedir. Koni geometrisine benzeyen alev şekli, alev konisi olarak bilinmektedir. Alev konisinin ön kesitinden alınan verilerden laminer alev hızı hesaplanmaktadır.

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - a\right) = \frac{S_l}{u_0} \quad (19)$$

$$S_l = u_0 \cdot \sin a \quad (20)$$

Denklem 20’de gösterilen S_l laminer alev hızı, u_0 yanmamış hava-yakıt karışımı akış hızı, a ise koni tepe açısını simgelemektedir.



Şekil 2.13. Alev Koni Açısı Kaynaklı Alev Hızının Hesaplanması

Alev konisi yöntemiyle alev hızının hesaplanmasından doğru sonuçlar elde edilebilmesi için alevin kararlı şekilde davranış sergilemesi gerekmektedir. Yanma esnasında gerçekleşen osilasyonlara karşılık gelen ölçüm sonuçları doğruluk oranını negatif yönde etkilemektedir. Alev cephesinde normal hız bileşeni artmaktadır. Bunun temel sebebi ise termal genişlemedir. Alev hattında, alev akışı boyunca akış yoğunluğunun yanmamış hava-yakıt karışımının bulunduğu ortamda ve yanmış gaz için aynı olması durumundandır. Denklem 21’de ρU_n , kütle akış yoğunluğu anlamında kullanılmaktadır.

$$(\rho U_n)_0 = (\rho U_n)_b \quad (21)$$

2.6.2. Alev Alanı ile Hız Ölçümü

Tez kapsamında gerçekleştirilen alev hızı hesaplamalarında yüksek hızlı kameradan alınan görüntüler, görüntü işleme yöntemleri kullanılarak hata oranı en aza indirgenerek ortalama en boy oranlamaları ile hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

$$Q_m = \rho_0 S_l A \quad (22)$$

$$S_L = \frac{Q_m}{\rho_0 * A} \quad (23)$$

Denklem 23'te ρ_0 yanmamış gaz yoğunluğunu, S_L laminar alev hızını, A alev alanını ve Q_m ise toplam kütleli debiyi ifade etmektedir.



ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

MATERYAL METOD

3.1. Yakıtlar ve Kimyasal Maddeler

Tez kapsamında sıvı ve gaz gibi farklı hallerde bulunan yakıtlar kullanılmaktadır. Çalışmada yer alan yakıtların özellikleri Tablo 3.1’de yer almaktadır.

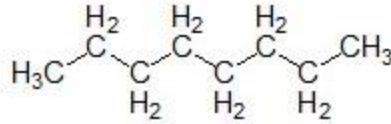
Tablo 3.1. Tez Kapsamında Kullanılan Yakıtların Özellikleri

Yakıtların Spesifik Özellikleri	Benzin	TMB	Propan	Bütan
Moleküler Formül	C ₈ H ₁₈	C ₃ H ₉ BO ₃	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀
Moleküler Ağırlık (gr/mol)	114	104	44	58
Tutuşma Sıcaklığı (K)	261	262	169	213
Kaynama Noktası (K)	372	340	231	273,5
Yoğunluk (gr/cm ³) (293 K)	0.691	0.932	0.493	0.579
Kendiliğinden Tutuşma Sıcaklığı (K)	669	342	743	638

Kaynak: Hosmane,2011:385-491; Owen vd.,1990.

3.1.1. Benzin

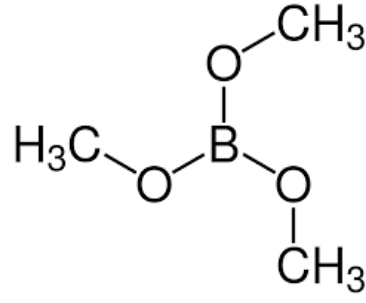
C₈H₁₈ kimyasal formülüne sahip benzin yakıtı yüzlerce sayıda hidrokarbon yapısının kompleks bir çeşididir. İçerisinde bulunan hidrokarbonlar çeşitli miktarlarda parafinik, olefinik ve aromatik yapıda bulunmaktadırlar. Bu tez çalışmasında ana yakıt türü olarak benzin seçilmiştir.



Şekil 3.1. Benzin Yakıtı Kimyasal İskelet Yapısı

3.1.2. Trimetil Borat

Kimyasal formülü C₃H₉BO₃ olan trimetil borat kısaltma olarak “TMB” ifadesiyle gösterilmektedir. Tez kapsamında kullanılan TMB yakıtı %97 saflık konsantrasyonuna sahiptir. Ana yakıt olan benzine belirli oranlarda ekleme yapılarak karışım yakıtı oluşturulacaktır.



Şekil 3.2. TMB İskelet Yapısı Görseli

3.1.2.1. Trimetil Borat Sentezi

Trimetil borat, önemli bir organik borik asit esteri türüdür. Tek potada üretilen trimetil borat kimyasal sentez tekniği ile imal edilmiştir. Trimetil borat sentezinde kullanılan malzemelerin başlıcaları borik asit ve metanoldur. Reaksiyonları hızlandırmak amacıyla sülfirik asit katalizör olarak kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerden borik asit ve metanol yüksek saflıkta, sülfirik asit %95-%97 saflık aralığındadır. Sentez işlemi atmosferik koşullar (25 ± 5 °C, 1atm ve bağıl nem-%53) altında gerçekleştirilmiştir. Reaksiyona 1:3 oranında metanol ve borik asit eklemesi gerçekleştirilmiştir. Sülfirik asit sisteme kademeli olarak dahil edilmiştir.

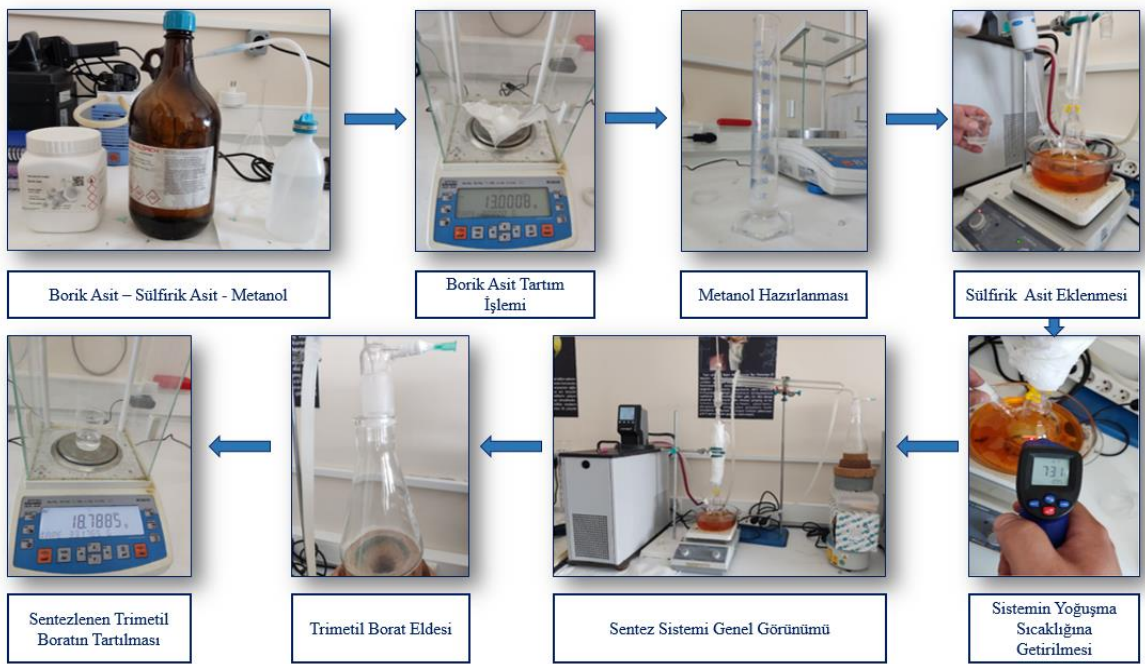


Şekil 3.3. TMB Yakıtı

Şekil 3.4'te trimetil borat sentezinin ana üretim aşamaları gösterilmektedir. Borik asit, metanol ve sülfirik asit çift boyunlu balon içerisinde 70-80 °C aralığında 1 saat süre ile riflax edilmiştir. Faz ayrılması gözle görülür hale gelinceye kadar Trimetil borat/metanol/sülfirik asit azeotropik karışımının riflax işlemine devam edilmiştir. Faz ayrılmasının gözlemlenmesinin ardından riflax işlemi sonlandırılmıştır. Bu aşamadan sonra sentez sistemine damıtma sistemi dahil edilmiştir. 3 saat süreyle reaksiyon karışmaya bırakılmıştır. Buhar fazında oluşan trimetil borat damıtma sistemi yardımıyla yoğunlaştırılmıştır. Sentezi

sağlanan renksiz sıvı erlen içerisinde toplanmıştır. Trimetil borat daha sonra hassas terazide ölçüm işlemi gerçekleştirilerek UV ışını geçirmeyen kahverengi cam şişede muhafaza edilmiştir.

Deney sonucu elde edilen trimetil borat Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Üniversite-Sanayi-Kamu İşbirliği Geliştirme Uygulama ve Araştırma Merkezi (ÜSKİM) laboratuvarında (Perkin Elmer Spectrum 400) cihazında gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar FTIR testlerine göre sentezi gerçekleştirilen trimetil borat'ın %68 saflıkta olduğu tespit edilmiştir. FTIR sonucu incelendiğinde elde edilen numunenin literatür ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür. (Schechter, 1954).



Şekil 3.4. Trimetil Borat Sentezi- Ana Üretim Aşamaları

3.1.3. Bütan-Propan

Tez kapsamında oluşturulan karışım yakıtların yakıcı brülörlerde akışını sağlamak amacıyla kullanılan gaz formundaki yakıt çeşididir. Sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), %70 bütan ve %30 propan gaz karışımları sonucu oluşmaktadır.

3.2. Deneysel Sistem Ekipmanları

3.2.1. Yüksek Hızlı Kamera

Tez kapsamında gerçekleştirilen ve göz ile yakalanamayacak kadar hızlı gerçekleşen yakıtların yanma davranışlarının incelenebilmesini sağlamak amacıyla yüksek hızlı kamera kullanılmaktadır.



Şekil 3.5. DITECT HAS-EF Yüksek Hızlı Kamera

Yüksek hızlı kameraya ait özellikler Tablo 3.2’de yer almaktadır. Bu tez kapsamındaki deneyler DITECT markasına ait HAS-EF isimli yüksek hızlı kamera kullanılmaktadır.

Tablo 3.2. Yüksek Hızlı Kamera Özellikleri

Özellikler	Değer Aralığı
Tam Çözünürlük (fps)	250
Full HD Çözünürlük (fps)	500
Odak Uzaklığı (mm)	11.5-69 mm
Sensör	1 inç CMOS
Efektif piksel	2560x2048

3.2.2. Termal Kamera

Kamera görüntü alanı içerisindeki ısı farkının ölçümünü ve görselleştirme işlemini gerçekleştirerek ihtiyaç duyulan verilere erişimi sağlayan cihazlara termal kamera adı verilmektedir. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen tüm deneylerin sıcaklık verilerinin alınması için kullanılmaktadır.

Tez kapsamında kullanılmakta olan termal kamera FLIR E96 23° isimli cihazdır. Termal kamera -20 °C ile +1500 °C aralığındaki sıcaklık ölçümleri için kullanım olanağı sağlamaktadır.



Şekil 3.6. FLIR E96 23° Termal Kamera

3.2.3. Emisyon Test Cihazı

Emisyon ölçüm cihazları, çeşitli ölçüm elemanlarının kullanılmasını mümkün kılar. Bu faktörlerin örnekleri arasında ses ve titreşim, kokular ve hava kirleticileri sayılabilir. Yapılan ölçümlerin çoğu hava kirleticileri ile ilgilidir. Bu ölçümler ayrıca havada bulunan kirleticileri tanımlamayı da amaçlamaktadır.

Bu tez kapsamında yanma olayı sonucunda açığa çıkan emisyon gazlarının kimyasal içeriklerinin tayini yapılarak açığa çıkan emisyon miktarının belirlenmesinde kullanılan cihazlar olarak rol oynamaktadır. Gerçekleştirilen deneylerde TESTO markasının 360-S modeli emisyon ölçüm cihazı kullanılmaktadır. Yanma olayı sonucunda açığa çıkan CO, CO₂, H₂, NO_x, NO SO₂ gazlarının ölçümlerini yapabilme kabiliyetine sahip bir cihazdır. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen tüm deneylerde emisyon gaz ölçümlerini Şekil 3.7’de yer alan emisyon test cihazı aracılığıyla kaydedilmiştir.



Şekil 3.7. Testo 360-S Emisyon Test Cihazı

3.2.4. Enjektör Test Cihazı

Enjektör test cihazı, ilgili yakıtın istenilen oranda püskürtme işlemini gerçekleştirmek üzere çalışan cihazlardır. Bu tez kapsamında kullanılan enjektör test cihazı markası System Clean Arg-Inject 'tir. Cihaz deneyler için orijinal halinden farklı kabiliyetler kazandırılarak yoğunlaştırıcı özelliği kazandırılmıştır. İstenilen yakıt türünün püskürtme davranışını kontrollü bir şekilde sağlayan cihaz üç farklı yakıt gönderme sürelerine sahiptir. Bu gönderme süreleri 3 ms için cihaz sıvı halde yakıt püskürtme, 6 ms'de sıvı + gaz püskürtme, 12 ms'de ise gaz halde yakıt püskürtme işlemi yapılabilmektedir.



Şekil 3.8. Enjektör Test Cihazı

Tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerde enjektör test cihazı 12 ms ayarında kullanılmaktadır. Enjektör cihazında kullanılan enjektörün benzin yakıtı ile gerçekleştirilen verim analizi çalışması Tablo 3.3'te yer almaktadır. Enjektör aracılığı ile püskürtme işlemi gerçekleştirilmesi durumuna "atış" adı verilmektedir. Belirli süreler dahilinde

gerçekleştirilen toplam atış sayılarının incelemesi gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda enjektör test cihazının her 0.1368 saniyede bir kerelik atış işlemi gerçekleştirdiği saptanmıştır. Her atış süresinde ortalama hacim 0.0620 ml olarak gözlemlenirken enjektöre gönderimi sağlanan yakıtın 0.0479 gr olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 3.3. Enjektör Test Cihazı Verimi (Benzin Yakıtı İçin)

Süre (s)	Toplam Atış Sayısı	Ortalama Atış Süresi (s)	Hacim (ml)	Ortalama Hacim (ml)	Ağırlık (gr)	Ortalama Ağırlık (gr)
8.16	59	0.1383	3.40	0.0576	2.72	0.0461
9.40	67	0.1403	4.10	0.0611	3.18	0.0474
10.20	74	0.1378	4.60	0.0621	3.56	0.0481
10.09	73	0.1382	4.50	0.0616	3.46	0.0474
13.21	96	0.1376	6	0.0625	4.62	0.0481
12.64	93	0.1359	5.60	0.0602	4.46	0.0479
14.18	103	0.1376	6.60	0.0640	5	0.0485
16.77	127	0.1320	8.20	0.0645	6.20	0.0488
14.88	111	0.1340	7.20	0.0648	5.46	0.0491

3.2.5. Yakıt Enjektörü

Enjektörler motor içerisinde yer alan yakıt aktarım elemanlarıdır. Yakıt pompasından gelen yakıtın hassas miktarlarda ayarlanarak motor silindiri içerisine yüksek basınç ile püskürtme işlemi yapan parçalara denilmektedir. Tez kapsamında gerçekleştirilen deneyler esnasında enjektör test cihazında kullanılan enjektör Bosch markasına ait 12 adet deliğe sahip olan enjektör çeşididir.



Şekil 3.9. Yakıt Enjektörü

3.2.6. Mikropipet

Mikropipetler çok küçük hacimlerdeki sıvıların aktarımını sağlamak amacıyla kullanılan malzemelerdir. Bu tez kapsamında kullanılan mikropipetin hacim aralığı 0.5–14.5 μ l'dir. Damlacık deneylerinde yüksek iletkenli tel üzerine karışım yakıtın asılması işlemi mikropipet aracılığı ile sağlanmaktadır.



Şekil 3.10. Mikropipet

3.2.7. Debimetre

Debimetreler farklı fazlardaki (sıvı, gaz ve buhar) akışkanların belirlenen hatları üzerinden geçen maddelerin birim zamanda geçen birim miktar ölçümünü gerçekleştiren cihazlardır. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerde SIARGO marka debimetre aracılığı ile yakıtların akış kontrolünün sağlanarak belirli sınırlamalar dahilinde akış ayarlaması yapılması için kullanılmaktadır. Debimetre bağlı olduğu sistemdeki akışkanların debilerini 0–200 lt/dk aralığındaki debi ölçümlerini gerçekleştirebilmektedir.



Şekil 3.11. Debimetre

3.2.8. Ultrasonik Test Cihazı

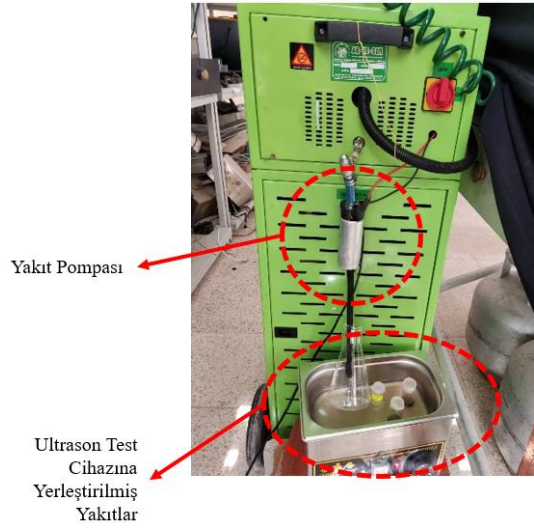
Ultrasonik test cihazları, ultrasonik dalgaları ve tekrarlayan titreşim hareketini kullanarak oluşturulması hedeflenen karışım yakıtların homojenitesini sağlamak amacıyla kullanılan cihazlardır. Aynı zamanda kirleticilere maruz kalmış veya birikintiler sonucu tıkanmış pompa vb. laboratuvar ekipmanların temizlenme aşamasında kullanım sağlamaktadır.



Şekil 3.12. Ultrasonik Test Cihazı

Deneyler için hazırlanılan yakıtların hazırlanıp ultrasonik test cihazında tutularak yakıt homojenitesi sağlanmaktadır. Ardından enjektör test cihazına ait pompa hattı, ultrasonik test cihazı içerisine konumlandırılmış erlenler ile bağlantısı sağlanarak (Şekil

3.12) belirli sürelerde karışım yakıt içerisinde partiküllerin birikmesinin önlemek amacıyla kullanılmıştır.



Şekil 3.13. Deneysel Konumlandırma (Ultranik Test Cihazı ve Enjektör Test Cihazı)

3.2.9. Güç Kaynağı

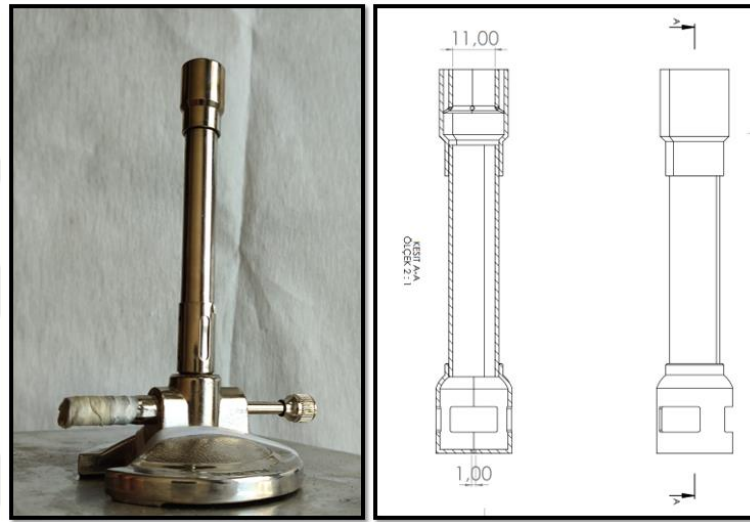
Güç kaynağı, sistemlere veya düzeneklere ihtiyaç duyduğu enerjiyi sağlamak amacıyla kullanılan cihazların genel adıdır. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen damlacık deney sisteminde yüksek iletken tel üzerine asılan yakıt damlacığına ark gönderimini kontrol etmek amacıyla kullanılmaktadır. Güç kaynağı 1 ms' de 6 kV gücünde enerji iletimi sağlamaktadır.



Şekil 3.14. Güç Kaynağı

3.2.10. Bunsen Brülörü

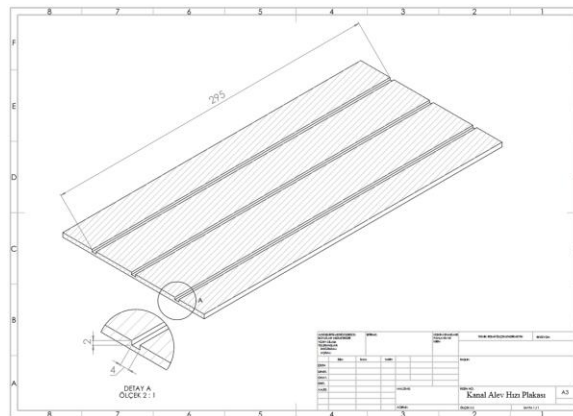
Brülörler, yakıt ve havayı ön karışimli ve difüzyon karışım şekillerinde yanma bölgesine transferini gerçekleştirerek kontrollü bir biçimde yanmasını sağlayan cihazlardır. Brülörler yakıt cinsine, çalışma prensibine ve yakıt atomizasyonuna göre çeşitleri bulunmaktadır. Bu tez kapsamında benzin ve TMB yakıtlarının saf ve karışimli halde yanma işlemleri bunsen brülöründe gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.15. Bunsen Brülörüne Ait Görsel ve Teknik Çizim

3.2.11. Kanal (Kanal Yanma Levhası)

Tez kapsamında gerçekleştirilen kanal alev hızı deney sisteminde kullanılmak üzere tasarlanmıştır. 295 mm x 140 mm x 10 mm ölçülerine sahip levha yüzeyine 2 mm derinliğe sahip 4 mm genişliğinde kanal açılmıştır.



Şekil 3.16. Kanal Alev Hızı Levhası Teknik Çizim

3.3. Deney Sistemleri

Tez kapsamında üç farklı deney sistemi kullanılarak incelemeler gerçekleştirilmektedir.

3.3.1. Damlacık Deney Sistemi

Damlacık deney sisteminin amacı eşit başlangıç çap ölçülerine sahip olan yakıtların gerçek yanma ve atomizasyon davranışlarının incelenmesidir. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen damlacık deneylerinin uygulandığı düzenek olan damlacık deney sistemi normal yerçekimi koşulları altında, oda sıcaklığında ve atmosferik ortam basıncında gerçekleştirilmektedir. Geleneksel yakıtlardan benzin ile yeni nesil yakıt olan TMB yakıtının belirli oranlarda karışımları için deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu karışım oranları ve isimlendirmeler Tablo 3.4'te yer almaktadır.

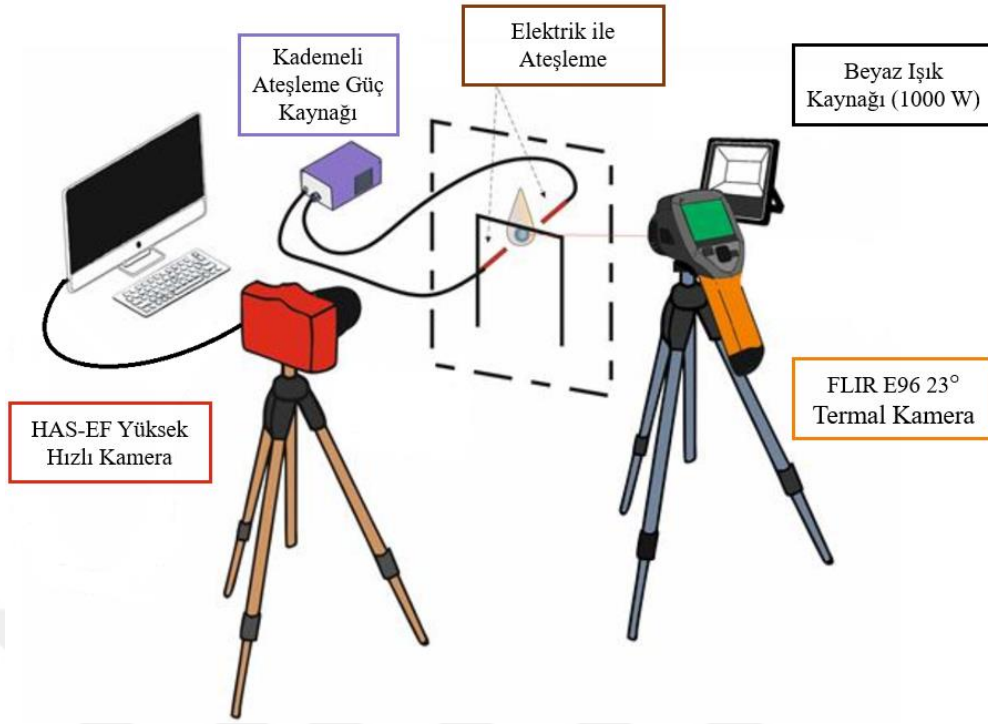
Tablo 3.4. Damlacık Deney Sisteminde Kullanılan Yakıt Karışımları

Kütlesel Benzin Oranı	Kütlesel Trimetil Borat Oranı	Karışım İsimlendirme
%0	%100	10T0B
%20	%80	8T2B
%40	%60	6T4B
%60	%40	4T6B
%80	%20	2T8B
%100	%0	0T10B

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen damlacık deneyleri 550 mm x 250 mm x 400 mm ölçülerine sahip dikdörtgen prizma şeklindeki bölmede kararlı atmosferik ortam şartları altında gerçekleştirilmiştir. Atmosferik ortam şartları; sıcaklık 25 ± 5 °C, 1 atm basınçta ve bağıl nem %53 olarak kabul edilmektedir. Belirtilen yakıtların damlacık formundaki canlı alev görüntülerinin ve atomizasyon mekanizmalarının incelenebilir kılınması için 50 µm çap ölçülerine sahip silisyum karbür (SiC) tel üzerine asılmak suretiyle yakıt damlacık tel askısına bırakılmaktadır. Tel üzerine asılacak yakıtın sabit hacimli olmasını sağlamak

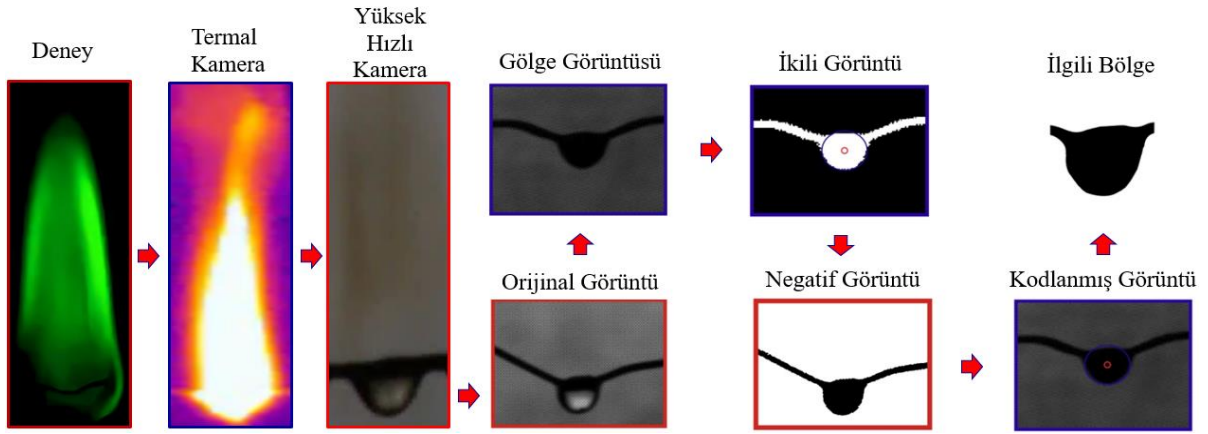
amacıyla tek kanallı yapıya sahip hacimsel ölçüm özelliğine sahip mikropipet kullanılmaktadır. Bu mikropipet aracılığı ile $4.15 \pm 0.25 \mu\text{l}$ lik sabit hacimli damlacıklar üretilmesi amaçlanmaktadır. Yakıt damlacıklarına ait eşdeğer çap yaklaşık $2 \pm 0.1 \text{ mm}$ olarak ölçülmüştür. SiC tel üzerine bırakılan yakıt damlacığının ateşleyici ile temas etmesinin önüne geçilmek amacıyla elektrik ark ateşleyici ile arasında 2 mm 'lik açıklık bırakılmıştır. Tel üzerinde sarkmış halde bulunan yakıt damlacığının ateşlenmesi, 20 ms kademeli bir güç kaynağından sağlanarak 1 ms 'lik 6 kV değerli yüksek enerji barındıran kıvılcım aracılığı ile mümkün kılınmıştır. Damlacık deney sisteminin şematik görüntüsü Şekil 3.17'de yer almaktadır.

Dikdörtgen prizma şeklindeki deney alanında ölçüm cihazlarına erişimin kolaylıkla sağlanması amacıyla üç açıklık bulunmaktadır. Bu açıklıklardan biri damlacık deneyi esnasında damlacığın yanma esnasında alev sıcaklık değişimlerinin ve maksimum değerlerinin belirlenmesi için FLIR E96 23° termal kamera kullanılmaktadır. 640×480 termal çözünürlük ve ısı hassasiyet değeri 30° (86° F) sıcaklığa sahip ortamlarda $<40 \text{ mK}$ ' dir. Termal kameraya ait hata oranı ise $\pm 2^\circ \text{ C}$ ($\pm 3.6^\circ \text{ F}$) ortamda $\pm 2\%$ oranındadır. Bir diğer açıklık ise damlacıkların canlı alev görüntülerinin, atomizasyon karakteristiklerinin ve çap ölçüm değişiminin kaydedilip incelenmesi için yüksek hızlı kamera konumlandırılmasının yapılmasıdır. Tez kapsamında hazırlanılan yakıtların damlacık formunda damlacık deneyi düzeneğinde test süreçleri boyunca canlı alev görüntü kayıtları karanlık ve aydınlık atmosferik ortam şartlarında gerçekleştirilmiştir. Yüksek hızlı kamera aracılığı ile damlacığın canlı alev görselleri, damlacık çapı değişimleri ve yakıtın atomizasyon davranışları kayıt altına alınmaktadır. Damlacık formundaki yakıtın yanmaya başlamasının ardından göstermiş olduğu kabarcık fırlatma, yavru damlacık oluşumu ve yüzeysel farklılıklar gibi kritik davranışların ayrıntılı bir biçimde incelenebilmesini mümkün kılmak amacıyla damlacık 100 W beyaz led spot ışık kaynağı yardımıyla deney alanı aydınlatılmaktadır.



Şekil 3.17. Damlacık Deney Sistemi

Damlacık deney sisteminde gerçekleştirilen deneyler sırasında yüksek hızlı kamera ve termal kamera aracılığı ile alınan görseller ve veriler işlenerek gri tonlamalı görsellerin kontrastı artırılmıştır. Ardından görseller için eşikleme tekniği kullanılarak ikili görsellere evriltirilmiştir. (Basu ve Miglani, 2016a:482-503). Görsellerin dönüşümünden sonra damlacık boyutu kesit alanı verilerinin elde edilmesi için damlacık kenarlarını algılayan ve tekrarlayan yöntem kullanılarak yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Bu işlem MATLAB 9.4'ün görüntü araç kutusu verileri üzerinde değişiklikler yapılmıştır. Deney esnasında kaydedilen verilerde yanma süresi boyunca anlık olarak damlacık üzerinden alınan verilerin çap değişimleri incelenerek gerçekleştirilmiştir. Yanma esnasında anlık damlacık çapı D için eşdeğer olarak verilerin elde edilmesi için kullanılmıştır. İlk damlacık çapı olarak belirtilen D_0 ölçüsü için $(D/D_0)^2$ olan damlacık regresyon oranının belirlenmesi sürecinde bağıl hata ± 1 % değerinde hesaplanmıştır. Şekil 3.18'de damlacık çapı analiz süreci aşamalarının şematik gösterimi yer almaktadır. Tüm yakıtlar için gerçekleştirilen deneyler sonucunda alınan görüntüler MATLAB 9.4 programı aracılığı ile damlacık kenar algılama işlemine tabi tutulmuştur. Damlacık çap değişimi canlı alev ve atomizasyon görüntüleri için elde edilen veriler ve tüm yakıt çeşitleri için gerçekleştirilen deneyler sonucunda incelenmiştir. Elde edilen verilerin değerlendirilmesi gerçekleştirilerek sonuçlar yorumlanmıştır.



Şekil 3.18. Yanma ve Damlacık Bozulması- Damlacık Görüntü İşleme Şeması

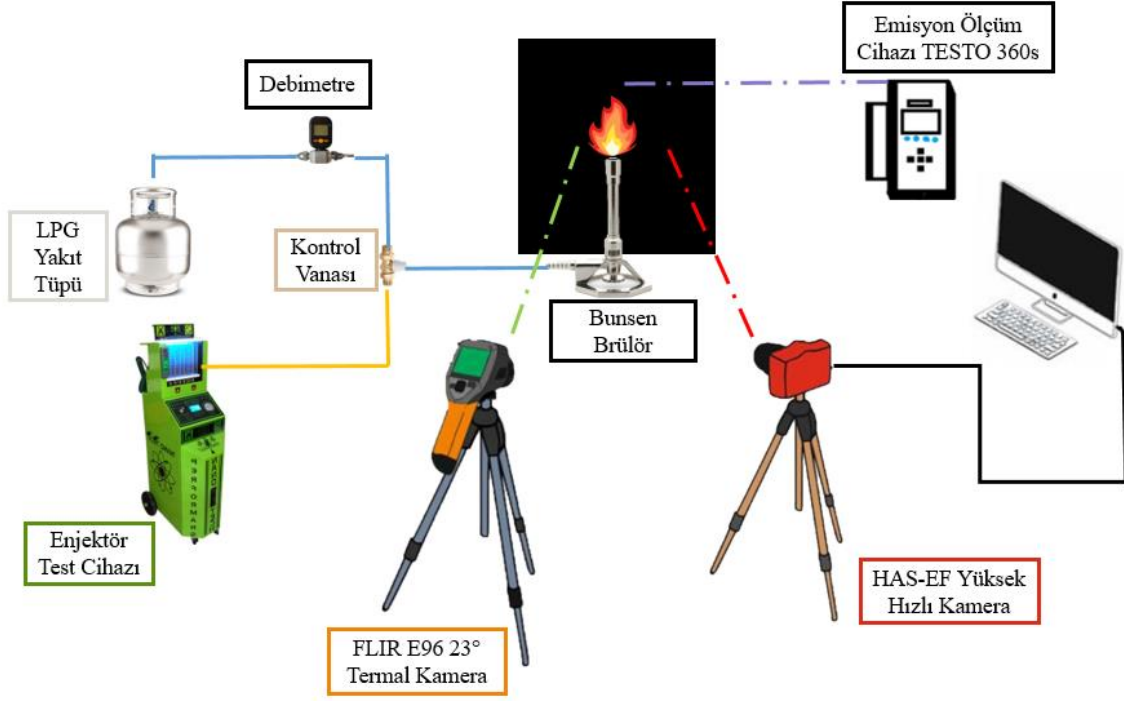
3.3.2. Bunsen Brülör Deney Sistemi

Bunsen brülör deney sisteminin amacı, belirli yakıtların ve yakıt karışımlarının alev karakteristiğinin incelenmesidir. Bu tez kapsamında tüm bunsen brülör deneylerinin gerçekleştirildiği ortamın normal yerçekimi koşulları altında, atmosfer basıncında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında oluşturulan karışım yakıtlarının kütle oran bilgileri Tablo 3.5'te yer almaktadır. Bunsen brülör deney sisteminde ön karışım ve difüzyon alev karakteristikleri de incelenmiştir.

Tablo 3.5. Bunsen Brülör Deney Sisteminde Kullanılan Yakıt Karışımları

Kütle Benzin Oranı	Kütle Trimetil Borat Oranı	Deneysel Karışım İsimlendirme
%100	%0	%0
%95	%5	%5
%90	%10	%10
%85	%15	%15
%80	%20	%20
%75	%25	%25

Deneyleerde yakıcı olarak kullanılan bunsen brülörünün ölçüleri; boy 112 mm, iç çap ise 11 mm'dir. Brülörün yakıt bağlantısının ve sabitlenmesinin gerçekleştirildiği alt bölümde yer alan açıklıkların hava girişine uygun (açık) halde bulunmasıyla ön karışımli alevlerin gözlemlenmesi mümkündür. Benzer şekilde açıklıkların hava girişine kapatılmasıyla (kapalı) difüzyon alev karakteristiğinin incelenmesi mümkün hale gelmektedir. Bunsen brülör deney sisteminde test edilmek üzere hazırlanılan karışım yakıtlarında partikül oluşumu gibi davranışların gerçekleşmemesi için ultrasonik test cihazı yardımı ile yakıtlar homojenleştirilmektedir. Enjektör test cihazının yakıt haznesine eklenmesinin ardından yakıtın homojen yapısını kaybetmemesini sağlamak amacıyla ultrasonik test cihazı içerisine yerleştirilmiş erlenler bulunmaktadır. Erlen içerisindeki yakıtlar, doğrudan enjektör test cihazının yakıt pompası vasıtasıyla deney sistemine dahil edilmiştir. İçerisinde yakıt bulunduran erlenler silikon kapak ile kapatılmıştır. Enjektör test cihazında kullanılan enjektörün 12 ms yakıt gönderimini gaz fazında yapmak ve yakıt püskürtmek üzere ayarlanmıştır. Sistem içerisindeki yakıtın, sıvı fazda bulunması gerekçesiyle yakıt akışı direkt olarak bunsen brülörüne ulaşmamaktadır. Durgun halde bulunan yakıtların, farklı fazlarındaki (sıvı + buhar) yakıtlar ile hareket kabiliyeti kazandırılması için LPG (%70 bütan + %30 propan) gazı kullanılmıştır. Tüp içerisinde bulunan LPG yakıtı sisteme dahil edilmiştir. LPG tüpünden gönderilen gazın gönderim debisinin kontrolü sisteme dahil edilen debimetre yardımı ile sağlanmaktadır. Tüpten gelen gazın debisi belirli oranlarda tutularak yakıt ve yakıt karışımları için deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney debileri 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 değerindedir.



Şekil 3.19. Bunsen Brülör Deney Sistemi

Deney sisteminin aktif hale getirilmesiyle bunsen brülöründe yakma işlemi gerçekleştirilmektedir. Bunsen brülörü yakma işlemi sırasında oluşan canlı alev görüntüsü Ditect HAS-EFC yüksek hızlı kamera aracılığı ile gözlemlenmektedir. Yanma esnasında sıcaklık verileri ise FLIR E96 23° termal kamera aracılığı kaydedilmektedir. Yanma sonu ürünleri olan emisyon gazlarının kimyasal ölçümlerinin yapılabilmesi için emisyon test cihazı kullanılmaktadır. Deney esnasında yüksek hızlı kamera ve termal kamera aracılığıyla toplanan veriler görüntü işleme yöntemi ile damlacık deneyinde kullanılan algoritmaya benzer yazılımlar aracılığıyla toplanan verilerin incelenmesi sağlanmıştır. Yüksek hızlı kamera aracılığı ile alınmış canlı görsellerden alevin iç koni ve dış koni boy uzunlukları incelemesinin yapılması mümkün hale gelmiştir. Yanma sonucu olan alev görsellerinin renk spektrumunda buldukları konumlara bağlı olarak yorumlamalarda bulunulmuştur.

Deney esnasında termal kamera aracılığı ile toplanan verilerde yer alan zamana bağlı sıcaklık değişimleri incelenmiştir. Termal kamera video görüntülerinden yararlanmak amacıyla MATLAB 9.4 programında görüntü işleme için üçüncü bir kod yazılmıştır. Elde edilen verilerin değerlendirilmesi gerçekleştirilerek sonuçlar bölümünde yorumlanmıştır.

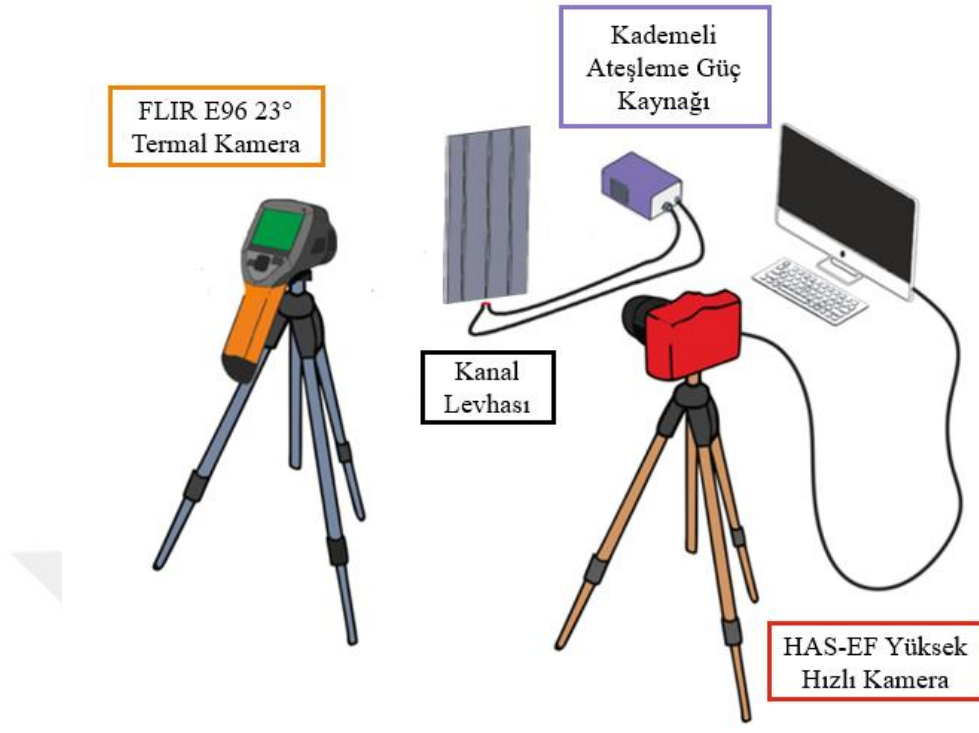
3.3.3. Kanal Yanma Deney Sistemi

Kanal yanma deney sistemi, kanal içerisinde hareket eden alev hızının saptanması, yakıtın yanması sonucu oluşan alev hareketinin izlenimi amacıyla hazırlanan bir test düzeneğidir. 295 mm x 140 mm x 10 mm ölçülerine sahip levhanın yüzeyine 2 mm derinlikte ve 4 mm genişliğinde kanal açılmıştır. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen tüm deneylerin bulunduğu sistemin şartları normal yerçekimi koşullarında, atmosfer basıncında ve oda sıcaklığı altında gerçekleştirilmiştir. Kanalda yanma deney sisteminde incelenen yakıtların kütle oran bilgileri ve isimlendirme içerikleri Tablo 3.6 de yer almaktadır.

Tablo 3.6. Kanal Yanma Deney Sisteminde Yakıt Ait Kütle Oranlar ve İsimlendirmeler

Kütleli Trimetil Borat Oranı	Kütleli Benzin Oranı	Karışım İsimlendirme
%100	%0	10T0B
%0	%100	0T10B

Kanal yanma deney sisteminde kullanılan mikropipetin 50 µl'lik yakıt damlacığı halinde kanala bırakma işlemi yapılır. Yerçekiminin ve özgül ağırlığının etkisiyle yakıt damlacığı aşağı doğru ilerleyerek kanalın iç cidarlarını ıslatır. Kanal iç cidarları boyunca yakıtın ilerlemesi sağlanır. Ardından güç kaynağı aracılığı ile 6 kV kısa süreli ve yüksek enerjili ateşleme kıvılcımı sağlanmaktadır. Damlacık ile ateşleyici ucun temasının önüne geçmek amacıyla 2 mm uzunluğunda aralık bırakılarak deney düzeneği hazırlanmıştır. Alev alan damlacık kanal boyunca ıslanan yüzeylerde yukarı yönde +y yönünde (yukarı) yanma tepkimesiyle hızlanarak hareket etmektedir. Deney esnasında canlı alev görüntüleri ve alev ilerleyişi yüksek hızlı kamera ile kaydedilmiştir. Hızlı kamera ile toplanılan veriler neticesinde hesaplamalar yapılarak alev hızı hakkında verilere erişim sağlanmıştır. Elde edilen verilerin değerlendirilmesi gerçekleştirilerek sonuçlar bölümünde yorumlanmıştır.



Şekil 3.20. Kanal Alev Hızı Deney Sistemi

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

BULGULAR

Bulgular bölümünde bu tez kapsamında gerçekleştirilen tüm deney sonuçları değerlendirilmiştir.

Tez kapsamında incelenen yakıt karışımları Tablo 4.1 de gösterildiği üzere karışım oranları isimlendirilmiştir.

Tablo 4.1. Karışım Oranları ve İsimlendirmeler

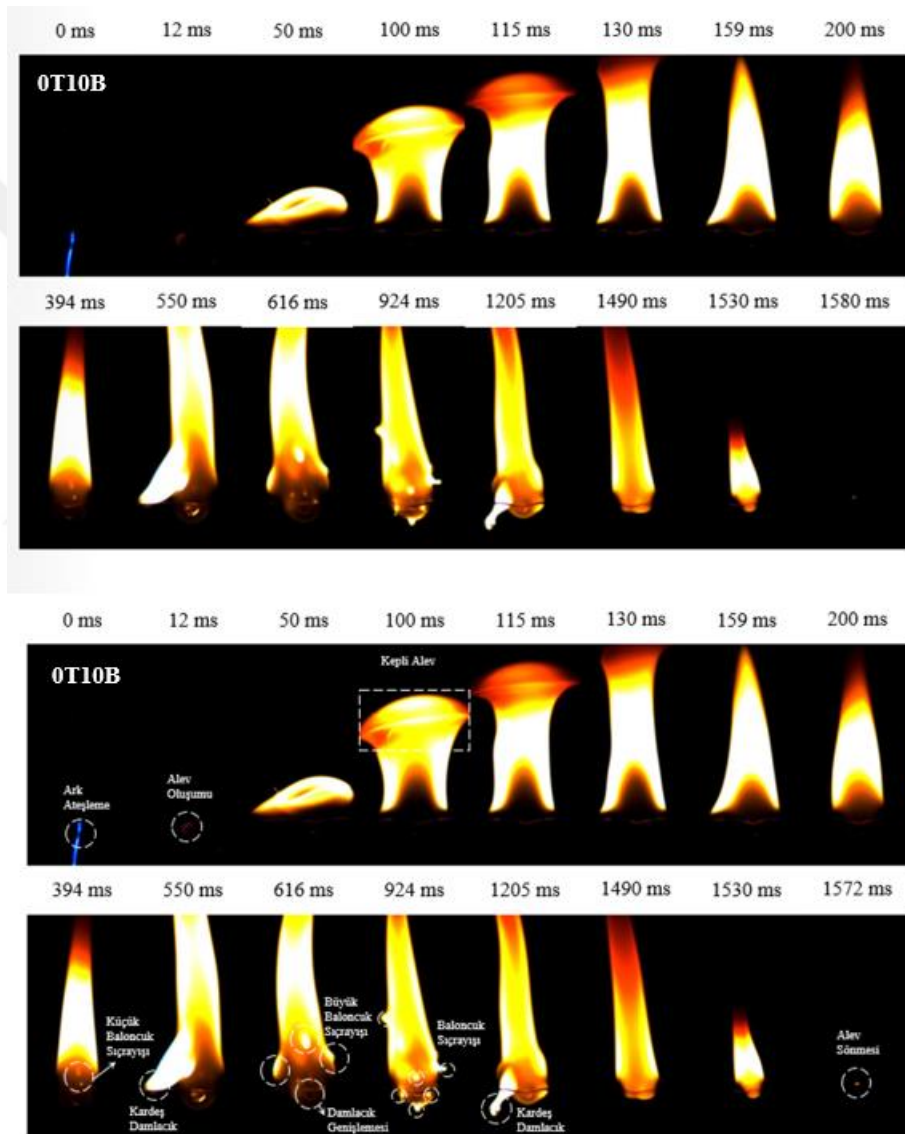
Karışım Oranları	İsimlendirme
% 100 TMB (saf)	10T0B
% 80 TMB + % 20 Benzin	8T2B
% 60 TMB + % 40 Benzin	6T4B
% 40 TMB + % 60 Benzin	4T6B
% 20 TMB + % 80 Benzin	2T8B
% 100 Benzin (saf)	0T10B

4.1. Damlacık Deneylerinin Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Tez çalışmasının bu bölümünde benzin ve TMB yakıtlarının belirtilen oranlarda karışımı sonucu (10T0B, 8T2B, 6T4B, 4T6B, 2T8B, 0T10B) damlacık yanma davranışları incelenmiştir. Deneysel çalışma verileri yüksek hızlı kamera ve termal kamera aracılığı ile incelenmiştir. Gerçekleştirilen deneylerden elde edilen görüntüler analiz edilerek damlacık yakıtının yanması esnasında göstermiş olduğu yanma davranışları tespit edilmiştir.

Hızlı kamera aracılığı ile kaydedilmiş benzin damlacığına ait yanma görselleri Şekil 4.1’de yer almaktadır. Damlacık yanma süreci incelendiğinde benzin yakıtındaki ilk ışıma 12 ms süresinde gözlemlenmiştir. Damlacık yakıtının yanması sonucu gözlemlenen ilk alev oluşumu sonrasında devam eden yanma süreci büyük şekil değişiklikleri ve güçlü alev ışıma davranışı göstermiştir. Ark ateşlemesinin ardından gözlemlenen ilk alev ile 120 ms yanma süresine kadar gelişen alev geniş yayılım davranışı sergilemiştir. Bu süre zarfında kepli alev görüntüleri ilerleyen proste büyüme davranışı göstermeye devam etmiştir. Kepli alev

görüntüsünde 130 ms süresinin ardından bozulmalar meydana gelmiştir. Alevin üst noktasındaki şapkalı görüntü yerini üçgen prizmaya benzeyen sivri bir yapıya bırakmıştır. Bu sivri yapı görüntüsü ile birlikte 150 ms yanma prosesinde alev iç ve dış koni oluşumu gözlemlenmiştir. İç ve dış koni görüntüsü 400 ms süresine kadar gözlemlenebilmiştir. İlerleyen süreçte damlacık alevinin davranışı damlacık yakıtındaki kaynamalar nedeniyle alev içerisinde fazla miktarda küçük baloncuk oluşumları tespit edilmiştir. Küçük damlacıklar alev akışı etkisiyle dış koni hattından yukarı doğru hareket etmiştir. Bazı küçük damlacıklar ise alev bölgesinden koparak sıçrama davranışı göstermiştir.



Şekil 4.1. 0T10B Damlacıkları Yanma Evreleri

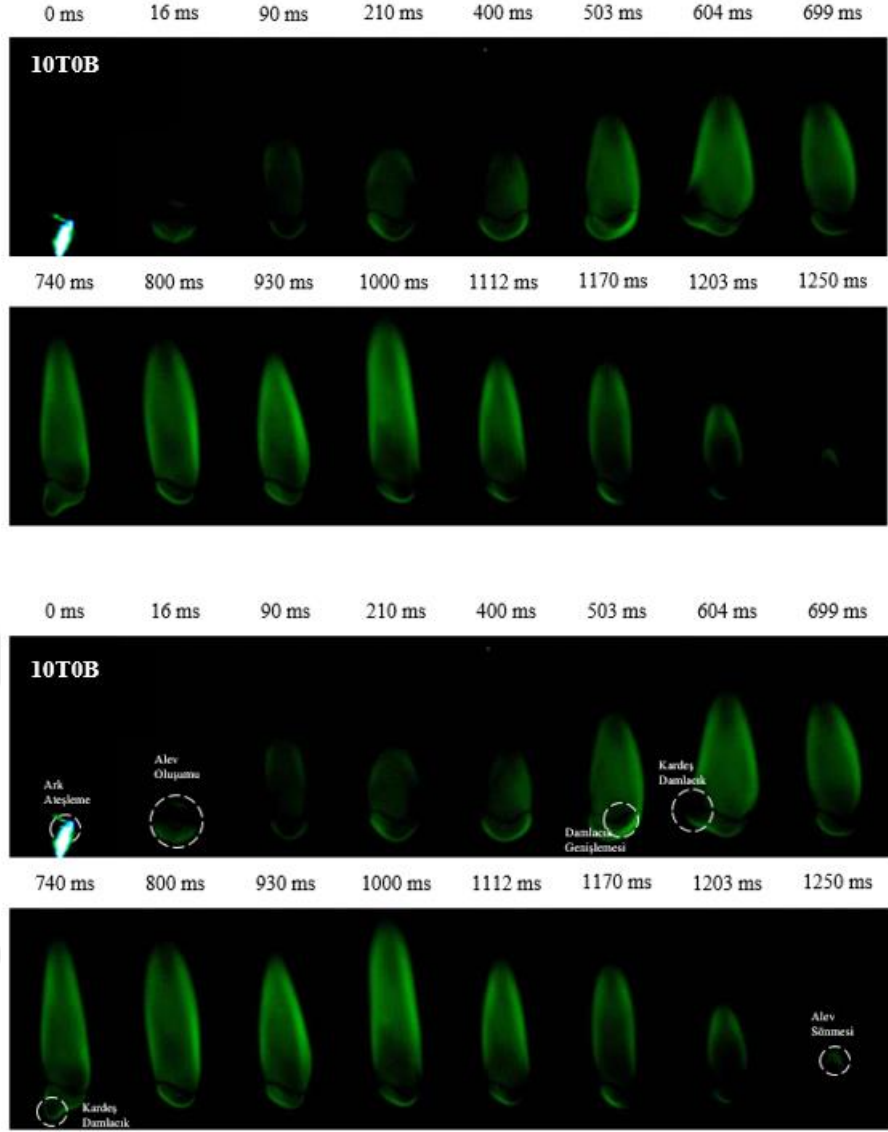
Alev içerisinde kaynama davranışı gösteren damlacıkların sayısı ve boyutu artarken yüksek oranda mikropatlamlar oluşmuştur. Damlacık çap ölçülerinin büyümesi ile alev

içerisinde oluşan kardeş damlacık ayrılmaları ve alevden dış ortama sıçrayışlar gözlemlenmiştir. Bu süreçte sıçrama davranışı gösteren damlacıklar doğal taşınım alanı dışına çıkararak alevin yapısını bozmuşlardır. Damlacık kopmalarının giderek artması alevin hızlı bir şekilde sönme davranışı göstermesine sebep olmuştur. Bu gözlemler sonrasında alevin 1572 ms’de yanma sürecini tamamladığı gözlemlenmiştir.

Benzin damlacığının yanması ile ortaya çıkan ışınma renk dağılımı ağırlıklı olarak kırmızı, sarı ve beyaz tonlarındaki ışınmalar olarak görülmüştür. TMB damlacığının zamana bağlı alev oluşumunun ve damlacık davranışının yüksek hızlı kameradan alınan görüntüleri Şekil 4.2’de yer almaktadır. Benzin damlacığının TMB damlacığı ile karşılaştırılması durumunda TMB damlacık yakıtının farklı davranış sergilediği tespit edilmiştir.

Alev görüntülerinin incelenmesiyle damlacığın ilk alev oluşumunun 16 ms yanma prosesinde oluşmuştur. Alev yapısının benzin yakıtından farklı olarak küresel alev yakın geometride oluşum göstermiştir. Küresel yapıya alev oluşumunun temel nedeni TMB’nin yüksek reaktiviteye sahip olmasından kaynaklandığı öngörülmektedir. TMB damlacık yakıtının yanması sonucu ilk alev oluşumu sonrasında kararlı davranış sergilemeye başlayan alev hızlı bir şekilde yanma eğilimi sergilemiştir. Bu oluşumun ardından alev şekil değişimi azalma eğilimindedir. 200 ms ile 1200 ms yanma süreleri arasında alev görüntüsünde radikal bir değişim bulgulanmamıştır. TMB damlacık yakıtının yanma sürecinde kardeş damlacık ayrılığı ve alev kopması az sayıda gerçekleştiği gözlemlenmiştir. TMB yanması sonucu alev renk spektrumu dağılımında yeşil ışınma alev aralığına denk gelmektedir. Buna istinaden alev renginin iç ve dış koni oluşumlarında incelenmesi söz konusu değildir.

TMB kimyasal yapısında bulunan oksijeni ve içeriğinde barındırdığı metil gruplarına bor ile bağlanmış durumdadır. Bahsedilen metil yapıları hızlı oksitlenme, kararlı alev davranışı sergilemekte ve TMB damlacık yakıtının benzine oranla daha hızlı tükenmesine sebep olmaktadır. Benzin damlacığının kademeli sönme davranışı TMB damlacığında görülmemiştir. TMB alevinin damlacık çapı küçülerek sönme davranışını göstermesi yerine aniden alev sönmesi oluşum göstermiştir. TMB damlacığının yanma davranışı sergilemesi esnasında benzin damlacığına kıyasla şekil değişimi kısa aralıkta ve sınırlı seviyelerde gerçekleşmiştir.

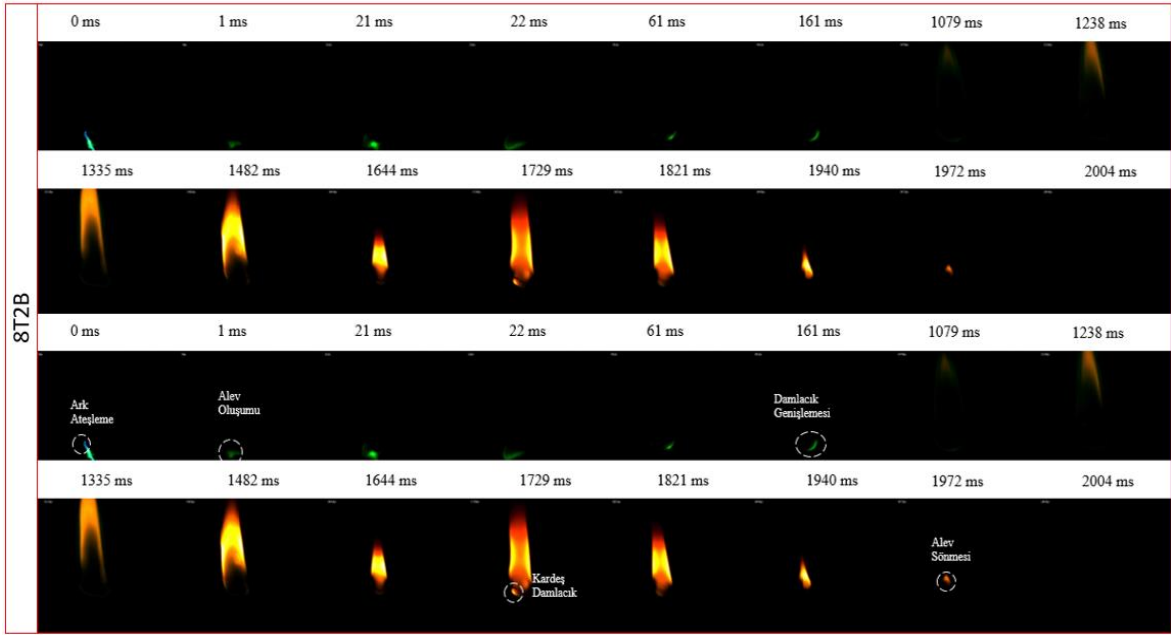


Şekil 4.2. 10T0B Damlacığı Yanma Evreleri

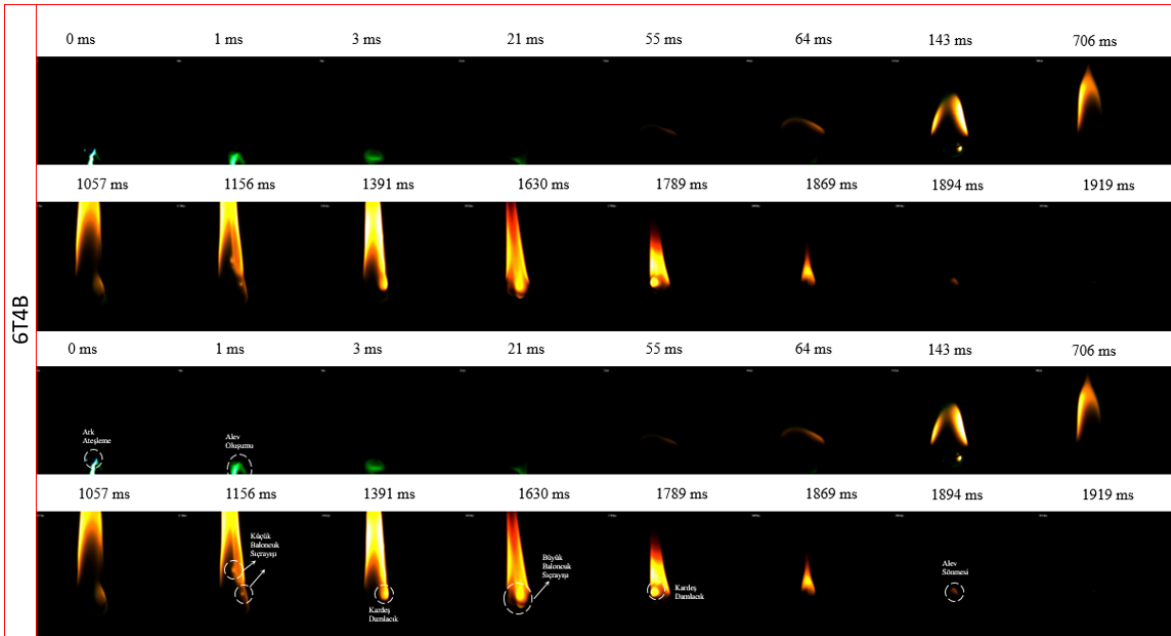
Tez kapsamında oluşturulan karışım yakıt damlacıklarının, alev oluşumlarının ve yanma süresi boyunca damlacık değişiminin yer aldığı Şekil 4.3'te 8T2B, Şekil 4.4'te 6T4B, Şekil 4.5'te 4T6B ve Şekil 4.6'da 2T8B yakıtına ait görseller yer almaktadır.

Damlacıkların ark yardımı ile ateşlenmesi sonucunda gözlemlenen ilk alev tutuşması dört farklı karışım içerisinde yeşil renkte ışımaya yaparak oluşmaktadır. İlk alevin yeşil renkli olmasının sebebi yakıt karışımı içerisindeki TMB'nin benzinden daha önce yanmasıdır. TMB yakıtının benzin yakıtına kıyasla düşük tutuşma gecikmesine sahip olması gözlemlenen durumu destekler niteliktedir. TMB yakıtının ilk olarak yanması halinde yeşil alev görüntüsünün ardından karışım içeriğinin azalması ya da tükenmesi sonucunda benzin yakıtına ait sarı renkli alev ışımaları gözlemlenmektedir. Alev yüzeyinde geçiş bölgesi

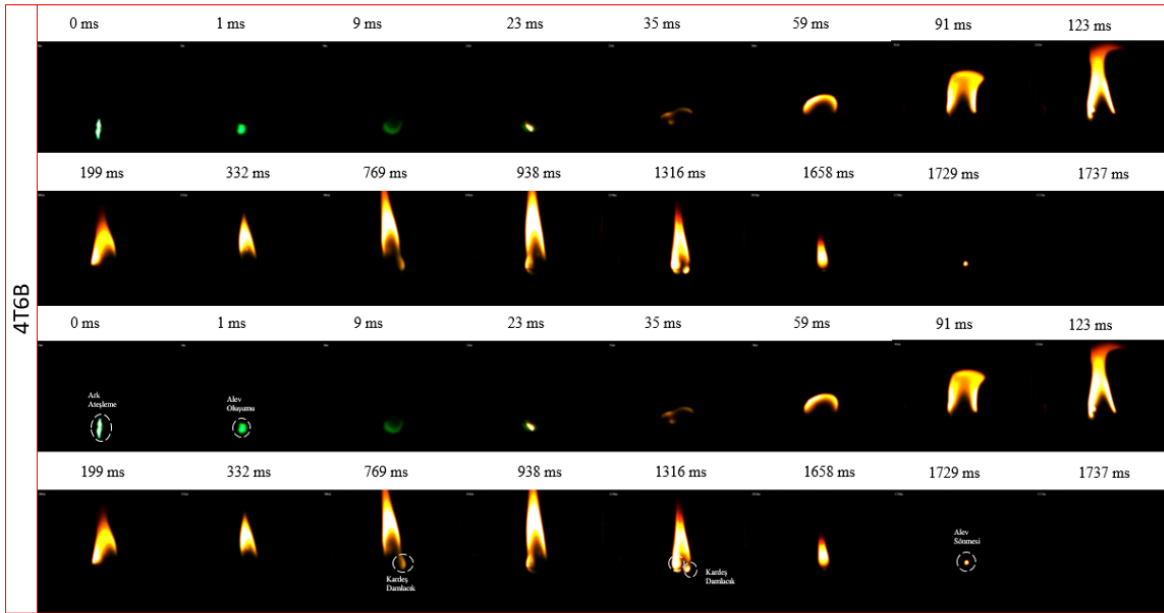
olarak nitelendirilebilecek alanda alev dış koni yüzeyinde yeşil yansımalar gözlemlenmektedir.



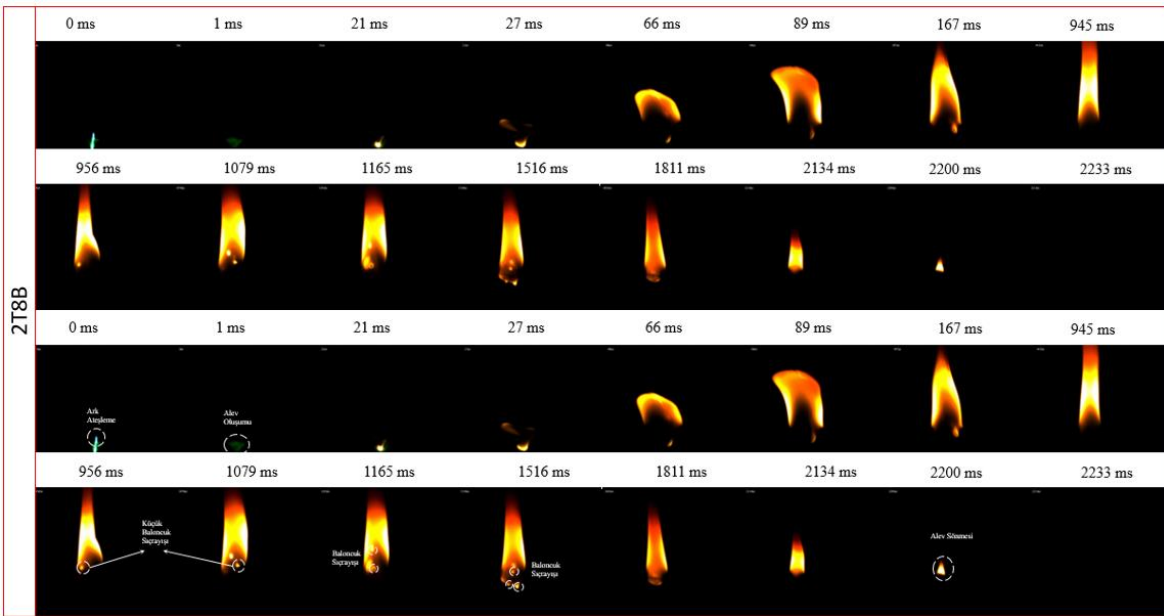
Şekil 4.3. 8T2B Yakıtı Damlacık Yanma Evreleri



Şekil 4.4. 6T4B Yakıtı Damlacık Yanma Evreleri



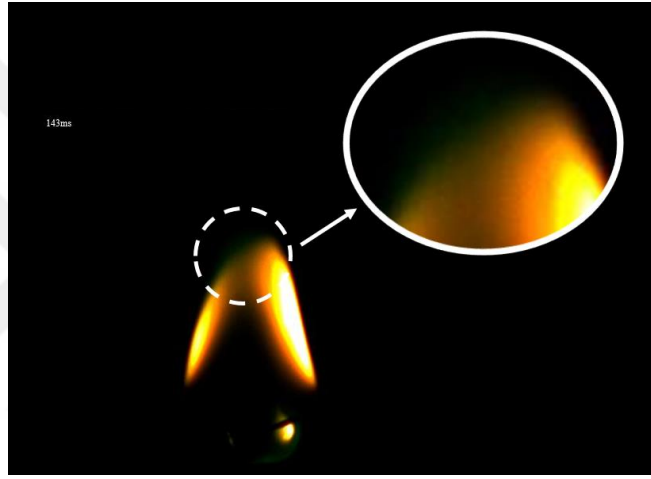
Şekil 4.5. 4T6B Yakıtı Damlacık Yanma Evreleri



Şekil 4.6. 2T8B Yakıtı Damlacık Yanma Evreleri

6T4B karışımına ait damlacık yakıtının 143 ms yanma sürecinde karışımı oluşturan iki yakıtın birlikte yandığını kanıtlar niteliktedir. 6T4B yakıtının ayrıntılı olarak damlacık alev görüntüsü Şekil 4.7’de yer almaktadır. Karışım yakıtı içerisinde TMB damlacık yakıtının oranı arttıkça yeşil ışığa görülme süresinin uzadığı tespit edilmiştir. Şekil 4.2’de görülen 10T0B damlacık yakıtının yanma davranışında açıkça görüldüğü gibi TMB yakıtının alev tutuşması ve sonrasında yuvarlak yapıda yanma davranışı sergilediğini göstermektedir. Yanma süresinin ilerlemesi ile yakıtların birlikte yanması alev

geometrisindeki yuvarlak hatlar yerini sivri geometrilerdeki alev görüntülerine bırakmaktadır. Karışım içerisinde TMB miktarının azalması ya da tükenmesi sonucunda alev sönme noktasına ilerlerken dar ve yüksek alev geometrisi gözlemlenmiştir. Karışım yakıtlarının yanması sırasında, benzin damlacık yakıtının yanmasının gözlemlendiği sırada iç ve dış koni çizgileri belirgindir. En uzun yanma süresi 2233 ms yanma süreci boyunca 2T8B damlacık yakıtında görülmüştür. Benzin yakıtının karışım oranı arttıkça yanma sürelerinde artış trendi sergilenmiştir. 2T8B damlacık yakıtının yüksek benzin oranı dolayısıyla 0T10B damlacık yakıtına benzer davranışlar sergileyerek 559 ms yanma prosesinde damlacık sıçrayışı gözlemlenmiştir. Kardeş damlacık yapısına yakın görüntülerin benzin oranıyla ilişkisi olduğu açık bir şekilde bulgulanmıştır.

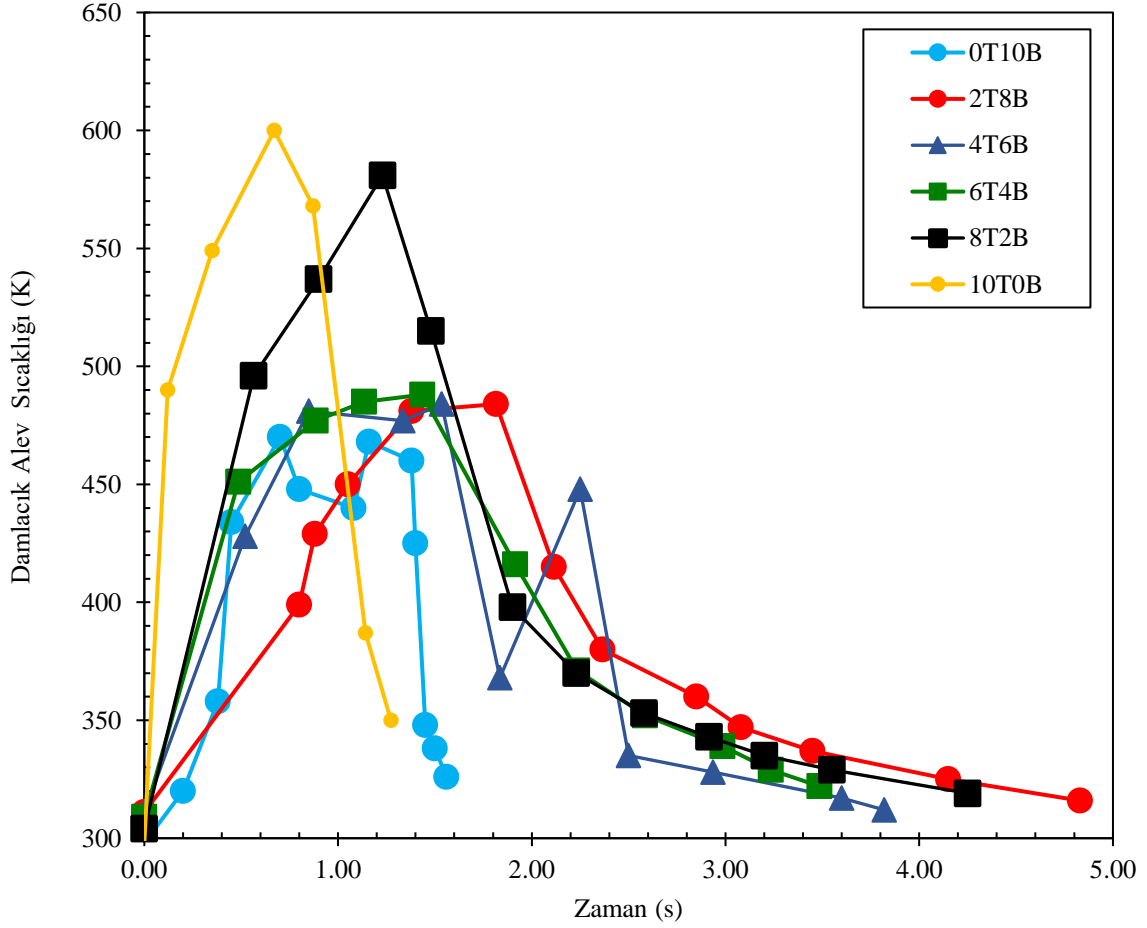


Şekil 4.7. 6T4B Yakıtının 143 ms Anında Alev Ayrıntılı Yapısı

TMB yanması esnasında açığa çıkan is oluşumu ve ışıma miktarının benzine göre daha düşük ölçüde olduğu tespit edilmiştir. Saf halde bulunan benzin yakıtına %20-%40-%60-%80 oranlarında TMB ilavesi yapılarak hazırlanan karışım yakıtlarının damlacık deneyinde kullanılmıştır. Damlacık deneyinde kullanılan yakıtların yanma sürecinde gözlemlenen sıcaklık verileri termal kamera aracılığı ile elde edilmiştir. Ölçüm alanı içerisinde termal kameranın lazer algılayıcısı damlacık alev bölgesine odaklanmış durumdadır. Damlacık yakıtlarının alev sıcaklık değerlerinin zamana bağlı değişimini içeren grafik Şekil 4.8’de yer almaktadır.

Karışım halindeki damlacık yakıtlarına bağlı olarak elde edilen ölçümler ile oluşturulan grafikler incelendiği zaman tüm karışımlar için ulaşılmış en yüksek alev sıcaklığı 10T0B damlacık yakıtı için 600 K olarak 0.67 s yanma süresinde olduğu görülmüştür. Damlacık yakıt karışımında en yüksek H/C oranına sahip olan 10T0B damlacık yakıtının en

yüksek sıcaklık değerindedir. TMB yanması sırasında maksimum sıcaklık değerine ani yükseliş sergilemesinin sebebi yakıtın yüksek reaktivitesi ve çok sayıda metil grubunu bünyesinde barındırmasından kaynaklanmaktadır. Yakıt karışımlarının 10T0B, 8T2B, 6T4B, 4T6B, 2T8B, 0T10B damlacık yakıt sıralamasıyla maksimum sıcaklık değerleri sırasıyla 470 K, 484 K, 484 K, 488 K, 581 K, 600 K olarak ölçülmüştür. Genel trendde TMB damlacık yakıt oranının artmasıyla yanma sürecinde gözlemlenen maksimum sıcaklık değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Maksimum sıcaklık verilerinin görülme süreleri ise sırasıyla; 0.7 s, 1.815 s, 1.535 s, 1.435 s, 1.23 s, 0.67 s olarak tespit edilmiştir. Damlacık yakıt karışımının yanma sürecinde gözlemlenen maksimum sıcaklıklar yaklaşık olarak yanma süreci ortalarına ve son kısımlarına yaklaşılırken gözlemlenmiştir. Deney sürecinde elde edilen verilerin incelenmesi sonucunda alev görüntülerinden ve tutuşma gecikmesi grafikleri ile birlikte en yüksek alev sıcaklığının 10T0B damlacık yakıtında ölçülmüştür. Ancak stabil maksimum alev sıcaklık davranışı gösteren, en uzun yanma süresine sahip 6T4B damlacık yakıtı olmuştur. Karışım yakıtların davranış incelemeleri gerçekleştirildiğinde 8T2B damlacık yakıtının yanması sonucu oluşan maksimum alev değeri kararlı bir şekilde azalma eğilimindedir.

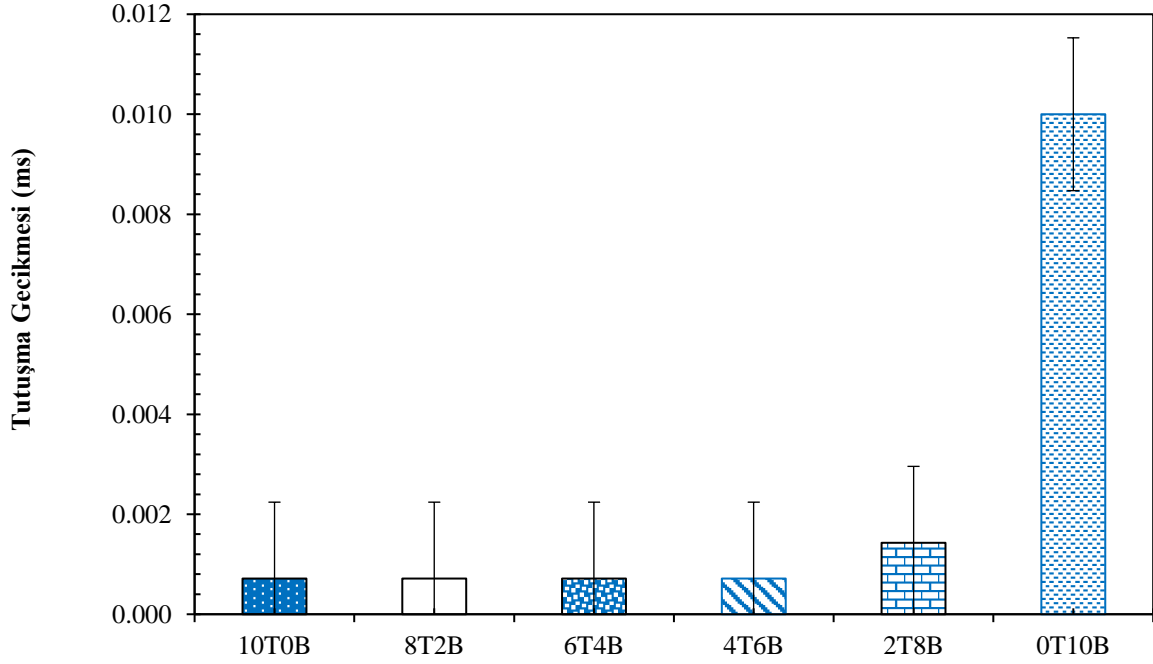


Şekil 4.8. Tüm Yakıtlar İçin Damlaçık Alev Sıcaklığı

Tutuşma gecikmesi sürelerinde gerçekleştirilen ölçümlerde, mevcutta kullanılan benzin damlaçık yakıtının hava-yakıt karışımlarında bünyesinde barındırdıkları oktan ve setan sayısında ortam şartları ile (sıcaklık, basınç vb.) etkileşim halindedir. Farklı ortam değerleri için gerçekleştirilen seyreltilmiş yakıtlar için tutuşma gecikmesi ölçümleri, operasyonel ortam koşullarında gözlemlenemeyebilmektedir. Bu tutarsız verilere rağmen kimyasal kinetik modellerinin incelenmesi kıymetli verileri sağlamaktadır (Yang vd.,2015:537-548).

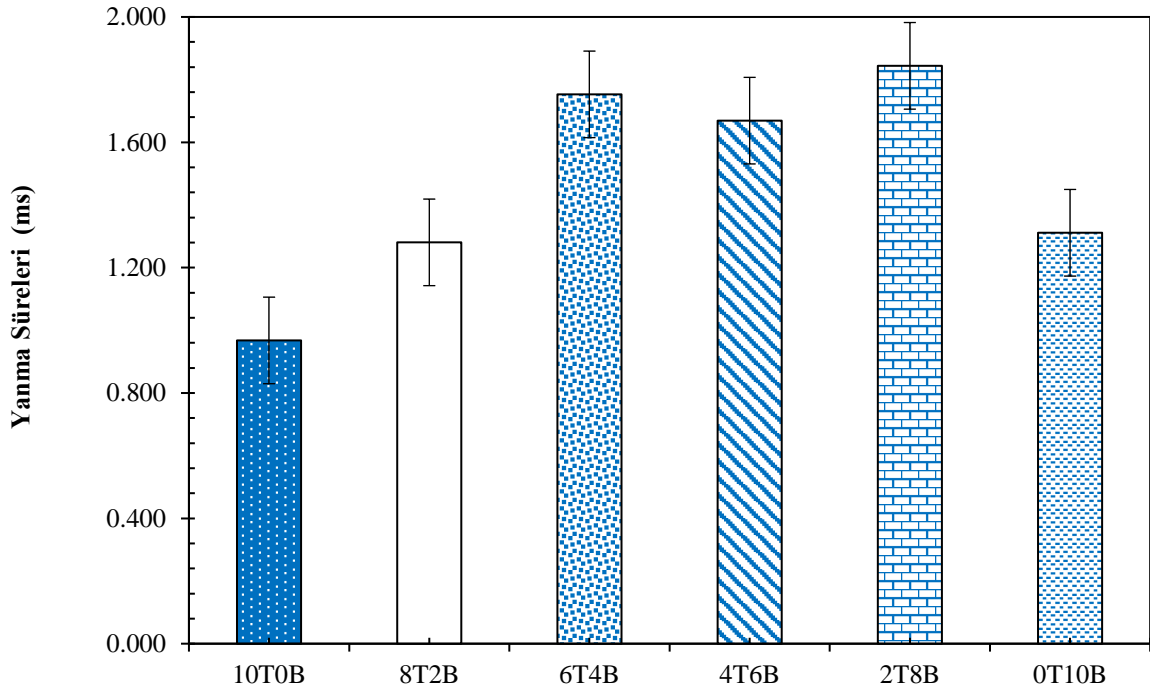
Benzin yakıtına %20 ve katları oranında TMB damlaçık yakıtının eklenmesiyle oluşturulan karışım yakıtlarının tutuşma gecikme sürelerinin yer aldığı grafik Şekil 4.9'da yer almaktadır. İlgili yakıtların kimyasal yapıları düşünülerek inceleme yapıldığı zaman, kompleks kimyasal yapının etkili olduğu düşünülmüştür. Saf benzin damlaçık yakıtından geriye kalan karışım yakıtlarından daha fazla metil ve aromatik yapılar bulundurması sonucunda yüksek tutuşma süresi ölçülmüştür. Kimyasal yapıda metil sayısının fazlalığı

doğrudan reaksiyon hızını arttırıcı etkiye sahiptir. Yakıtlar kendi aralarında kıyaslandığı zaman; 0T10B>2T8B>4T6B=6T4B=8T2B=10T0B sıralamasında olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.9. Tüm Yakıtlar İçin Damlacık Test Düzeneginde Tutuşma Gecikme Süreleri

Benzin yakıtına %20 ve katları oranında TMB eklenmesiyle oluşturulan karışım yakıtların yanma sürelerinin yer aldığı grafik Şekil 4.10'da yer almaktadır. Tablo 4.1'de belirtilen yakıtların parlama noktası sıcaklık değerlerindeki 1 K sıcaklık farkının yakıtların yanma süresi üzerinde 0.34 s'lik farka neden olduğu düşünülmektedir. Saf TMB yakıtının bünyesinde metil gruplarını barındırması yanma süresinin kısa olmasından kaynaklanmaktadır. Benzer şekilde saf benzin yakıtının içerisindeki aromatiklerin çevresine yaydığı ısı radyasyon süresi daha uzundur. Hidrokarbon içerikli benzin damlacık yakıtının saf TMB damlacık yakıtına oranla daha uzun süre yanma reaksiyonu sergilemiştir.

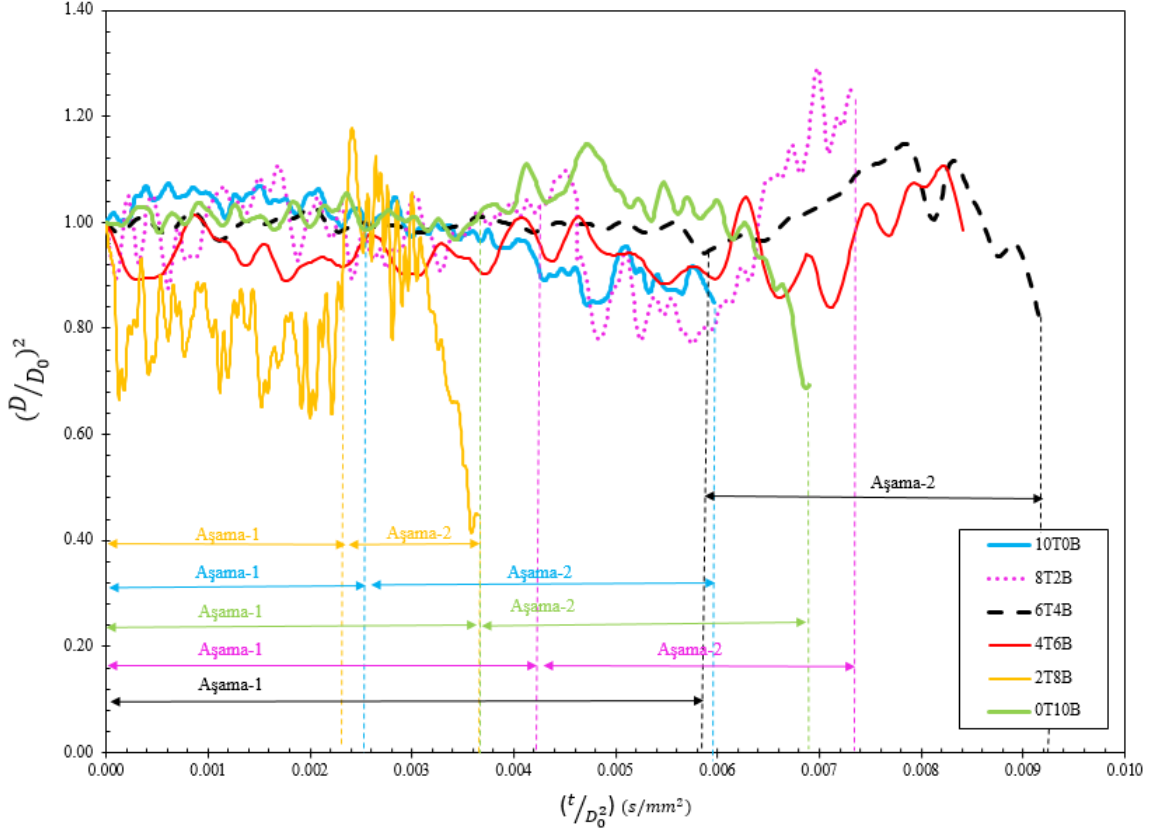


Şekil 4.10. Tüm Yakıtlar İçin Damlacık Test Düzenğinde Yanma Süreleri (ms)

Damlacık formundaki yakıtların yapıları itibariyle gerçekleşen yanma süreçlerinin tamamı uçuşma, alev sönmesi ve kirletici emisyon oluşumu gibi örnek verilebilecek olayların genel hatlarını değiştirmektedir (Basu ve Miglani,2016b:482-503). Damlacık yakıtının yapılarından kaynaklanan yüzey gerilmesi ve şekil değişimi bu duruma örnek verilebilir. Damlacık yakıtı yanma tepkimesinin başlaması ile iç kaynamalar sebebiyle kabarcık püskürtmeleri gerçekleşerek yüksek hacimsel şekil değişimleri sergilenmiştir. (Miglani vd.,2014:32101). Bu şekil değişiklikleri nedeniyle kurallı tekrarlanmayan büzülme ve şişme hareketinin tekrar etme hareketinin yaşanmasına neden olmaktadır.

Bu tez kapsamında incelemesi yapılan damlacık yakıt karışımlarının standartlaştırılmış damlacık davranış yönelimlerinde damlacık boyutsuzlaştırma $(D/D_0)^2$ oranındaki dalgalanmalara tekabül etmektedir. D^2 yasası eğrilerinin bu tez kapsamında incelemesi gerçekleştirilen yakıt damlacıkları için farklı özellikler gösterdiği görülebilmektedir. Damlacığın yanma sürecindeki evreleri incelendiği zaman damlacık çapının küçülmeye başlamasının net bir şekilde gözlemlenmeye başlamasını iki aşamada değerlendirilmesi mümkündür. Birinci aşama ısınma sürecini kapsamaktadır. Bu süreçte şişme-büzülme ve buharlaşma mekanizmaları etkindir. Bu aşamanın ardından buharlaşma, şişme-büzülme hareketinin baskın hale gelerek damlacığın ikinci aşamaya geçmesine neden olmaktadır. Bu tez kapsamında incelemesi gerçekleştirilen yakıt damlacıklarının boyutsal

değişimlerinin grafiği Şekil 4.11'de görülmektedir. Çalışma esnasında buharlaşma mekanizmasının belirleyici etken olmamasının nedeni yakıtların kaynama noktalarının yüksek olmasıdır. Yakıt karışımı bakımından değerlendirme yapılmak istendiğinde 0T10B damlacık yakıtı incelemesi yapılırken birinci aşamada kararlı davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Damlacık çap değişiminin zamana bağlı gerçekleşmesi hususunda, benzin yakıtının yanması sonucu açığa çıkan is yapısının buharlaşma mekanizması ile çakışmaktadır. Bu durum ikinci aşama davranışı göstererek damlacık geometrisinde şişme ve büzülme hareketlerini göstermiştir. Büzülme ve şişme davranışı neticesinde ulaşabileceği en yüksek çap ölçüsüne sahip yakıt damlacığı buharlaşmanın etkisiyle tepkimeyi tamamlayarak sönme davranışı göstermiştir. 10T0B damlacık yakıtının benzin damlacık yakıtına göre iskelet yapılarında buldukları metil sayısının fazla olması daha hızlı yanmaya ve hızlı şekil değişiminin gözlemlenmesine sebebiyet vermiştir. Deneysel verilerin incelenmesiyle birinci aşamada en kısa yanma süreci 10T0B damlacık yakıtı için gözlemlenmiştir. 0T10B damlacık yakıtına kıyasla, 10T0B damlacık yakıtının yanması esnasında daha küçük şişme ve büzülme davranışı sergilemiştir. Şişme ve büzülme davranışındaki bu farklılıklar metil gruplarını bünyesinde bulundurmasından kaynaklanmaktadır. 2T8B damlacık yakıt karışımı göz önüne alındığında hacimsel oranda benzin yakıtının fazla olmasıyla yanma sırasında is yapısının oluşması sonucu hızlı bir şekilde sönme davranışı göstermiştir. 0T10B damlacık yakıtı ile 2T8B damlacık yakıtının kıyas edilmesi durumunda, karışım içerisine dahil edilen %20 TMB damlacık yakıtının yanma reaktivitesini artırıcı yönde etki ettiği tespit edilmiştir. Reaktivitenin artırılmasıyla karışım halindeki damlacık yakıtları arasında en hızlı sönme davranışı gösteren karışım 2T8B damlacık yakıtı olmuştur. 4T6B damlacık yakıtı ve 6T4B damlacık yakıtı benzer yanma davranışı sergilemiştir. Yanma başlangıcında kararlı bir şekilde şişme ve büzülme davranışı gözlemlenmiştir. Benzin katkısı kaynaklı is oluşumu ile kararlı yapıda devam eden şişme ve büzülme hareketinin artış gösterdiği saptanmıştır. Yakıt damlacığı ulaşabileceği maksimum çap değerine ulaşmasının ardından sönme eğilimi göstermiştir. 8T2B damlacık yakıtının hacimsel oranında benzin yakıtının düşük hacimsel orana sahip olmasından kaynaklı is oluşumu oldukça azalmıştır. Buharlaşma mekanizmalarının baskın olduğu süreçler birinci aşamada yer almıştır. Damlacık yakıtının ulaşabileceği maksimum çap öncesinde ani sönme davranışı göstermiştir.

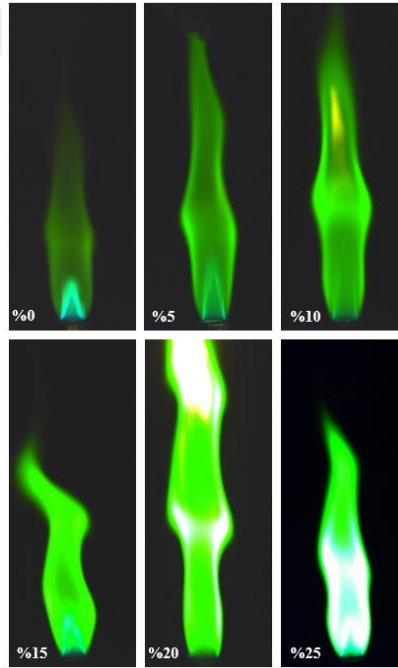


Şekil 4.11. Normalleştirilmiş Damlacık Çapının Normalleştirilmiş Zamana Bağlı Değişimleri

4.2. Bunsen Brülör Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Tez kapsamında belirtilen benzin ve TMB yakıt karışımlarının bunsen brülör test düzeneğinde gerçekleştirilen deney sonuçları analiz edilmiştir. Deney esnasında brülörde yanma davranışına ait veriler yüksek hızlı kamera ve termal kamera aracılığı ile incelenmiştir. Deney sırasında karışım yakıtların bunsen çıkış doğrultusunda hareketini sağlayarak yakma işleminin gerçekleştirilmesi amacıyla LPG'den yararlanılmıştır. Bütan-propan LPG karışımı gaz yakıtı bunsen brülörüne ölçümü yapılarak kontrollü bir biçimde iletilmektedir. Gaz akışı debimetre kontrol edilerek sisteme iletilmektedir. Deney esnasında debimetre yardımı ile debi değerleri sırasıyla 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 değerlerine ayarlanarak yüksek hızlı kamera, termal kamera ve emisyon test cihazı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yakıt karışımlarımda yüzdelik olarak benzin oranlarına göre isimlendirmeler yapılmıştır. Örneğin %90 benzin ile %10 TMB yakıtı içeren karışım yakıtına ait isimlendirmede %10 TMB olarak belirtilmektedir. Tezin bu kapsamında %0, %5, %10, %15, %20 ve %25 trimetil borat katkısı eklenmiş karışım yakıtları incelenmiştir.

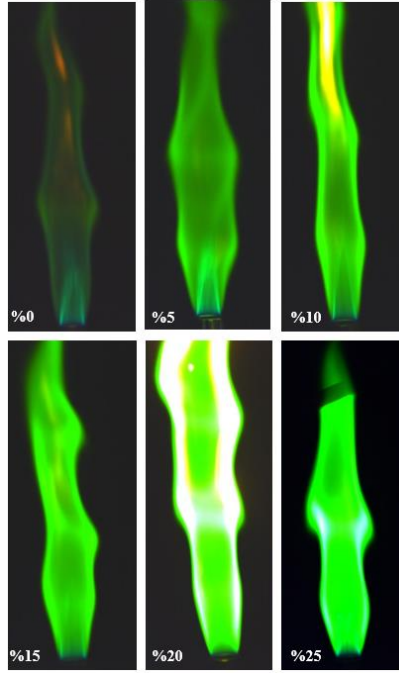
Debi değerinin 1.5 lt/dk olduğu koşullarda gerçekleştirilen beş farklı yakıt çeşidi için deneylerin görseli Şekil 4.12’de yer almaktadır. Bu görsel verileri deney esnasında yüksek hızlı kamera aracılığı ile kaydedilmiştir. Karışım yakıtlarında TMB oranının artması ve görüntülerde bor elementinin moleküler düzeyde yanma tepkimesine girmesiyle yeşil işımaların yoğunluğu giderek artmaktadır. Karışım yakıtın hava ile tepkimeye girmesi sonucu sıvı formdaki yakıt içerisinde partiküller oluşmuştur. Partikül formunda bulunan bor parçacıklarının akış ile alev görüntüsüne dahil olarak tam yanma sonucu yeşil alev oluşturan yakıtın üzerinde sarı yansımalı alanlar oluşurmaktadır. Yakıt karışımında yüzdelik olarak TMB arttıca partikül oluşma miktarının artması ile sarı işımaların yoğunluğu da artış göstermiştir. TMB oranının yoğun olduğu karışımlarda, enjektör test düzeneğinden sağlanan püskürtme işlemi ile enjektörden gelen yakıt karışımının, LPG’den gelen yakıtın önüne geçmesi gözlemlenebilmektedir. Bu Şartlarda karışım yakıtın debisinde kısmi azalmalar yaşanmaktadır. Deney düzeneğinde debimetre yardımı ile belirlenen oranda yakıtın akışa zorlanmasıyla bunsen brülöründe yanma tepkimesine girmektedir. Bu esnada partikül halindeki bor parçacıklarını yanmalarını gözlemlemek mümkün hale gelmektedir.



Şekil 4.12. 1.5 lt/dk Debide Bunsen Brlrde Karışım Yakıtların Davranışları

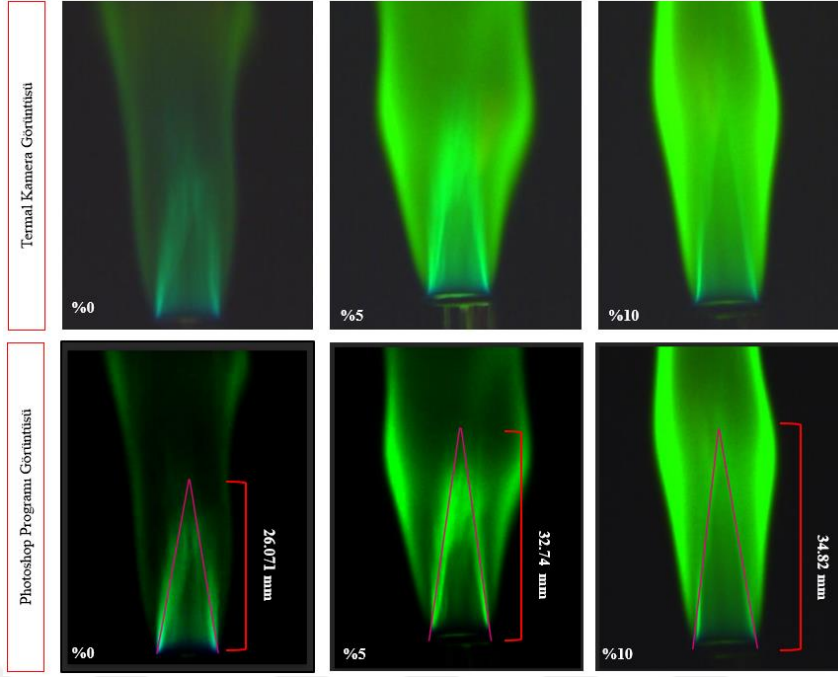
Debi değerinin 2.25 lt/dk olduğu koşullarda gerçekleştirilen beş farklı yakıt çeşidi için deneylerin görseli Şekil 4.13’te yer almaktadır. Bu görsel verileri deney esnasında yüksek hızlı kamera aracılığı ile kaydedilmiştir. Yakıt karışımlarında trimetil borat oranının artmasıyla yeşil işıma yoğunluğunun artması 2.25 lt/dk debi koşullarında da

gözlemlenmiştir. Bir önceki Şekil 4.12’de debi miktarından kaynaklanan sarı ışımalar 2.25 lt/dk debi oranında daha az gözlemlenmektedir. Deney düzeneğinde bütan-propan LPG yakıtının debisinin artmasıyla bor partiküllerinin yanması ve küçük patlamaları sonucundaki görüntülerde azalma saptanmıştır.



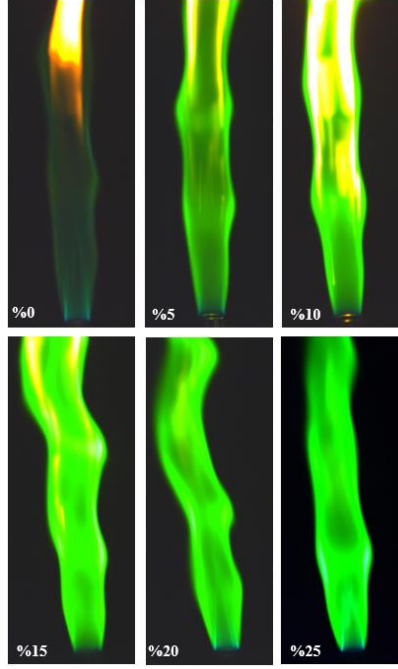
Şekil 4.13. 2.25 lt/dk Dehide Bunsen Brülörde Karışım Yakıtların Davranışları

Debi değeri 2.25 lt/dk olduğu koşullarda %0, %5 ve %10 TMB oranları için gerçekleştirilen deneylerde alev içerisinde iç koni oluşumu gözlemlenmiştir. Ancak yakıt karışımına %15 ve üzerinde trimetil borat eklenmesiyle iç koni görüntülenememiştir. Deneyler esnasında yüksek hızlı kamera ile kayıt altına alınan görüntüler Adobe Photoshop 2021 görüntü işleme programı aracılığıyla işlenerek iç koni yapısı daha da belirgin hale getirilmiştir. İşlemler esnasında gerçekleştirilen ölçümlerde iç koni alev boyu %0 TMB için 26,07 mm , %5 TMB için 32.74 mm ve %15 TMB yakıt karışımı için 34.82 mm olarak saptanmıştır. Yakıt karışımına eklenen trimetil borat oranı arttıkça iç koni boyunda artış olmuştur. Alev açısı metodu ile saptanan açı değerinin negatif yönde etkilendiği belirlenmiştir (Şekil 4.14).



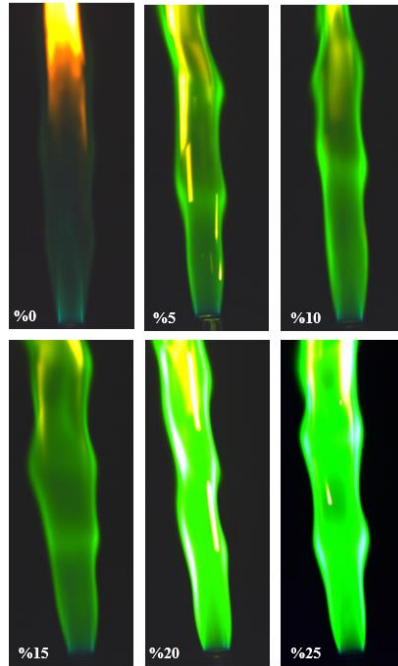
Şekil 4.14. Alev İç Koni Değişim Ölçümleri

Debi değerinin 3 lt/dk olduğu koşullarda gerçekleştirilen beş farklı yakıt çeşidi için deneylerin görseli Şekil 4.15'te yer almaktadır. Bu görsel verileri deney esnasında yüksek hızlı kamera aracılığı ile kaydedilmiştir. Alınan görüntülerde iç koni oluşumu gözlemlenememiştir. Yanma türü ön karışimli olmasına karşılık karışımın tam yanması sonucu oluşan yeşil alevin üst bölgelerinde difüzyon yanma başlangıçları tespit edilmiştir. Karışım yakıtında bulunan bor parçacıkları yanma tepkimesine girerek doğrudan ışıma davranışı göstermiştir.



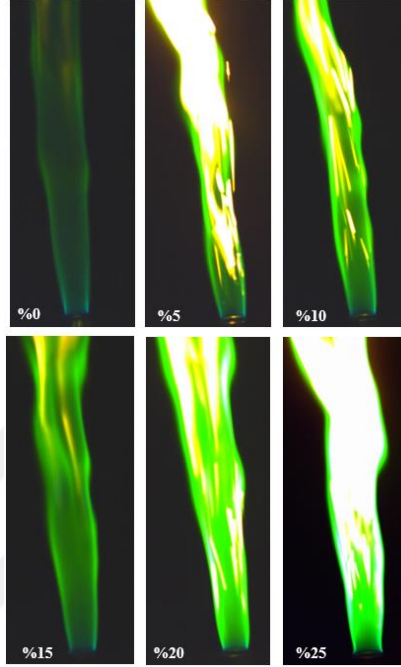
Şekil 4.15. 3 lt/dk Dehide Bunsen Brülörde Karışım Yakıtların Davranışları

Debi değerinin 3.75 lt/dk olduğu koşullarda gerçekleştirilen beş farklı yakıt çeşidi için deneylere ait görseller Şekil 4.16’da yer almaktadır. Bu görsel verileri deney esnasında yüksek hızlı kamera aracılığı ile kaydedilmiştir. Yakıt debisindeki artışla maksimum alev sıcaklığında artış tespit edilmiştir. Yakıtın hacimsel debisindeki yükselişler bor partiküllerinin ışınmasında meydana gelen artışlara neden olmuştur.



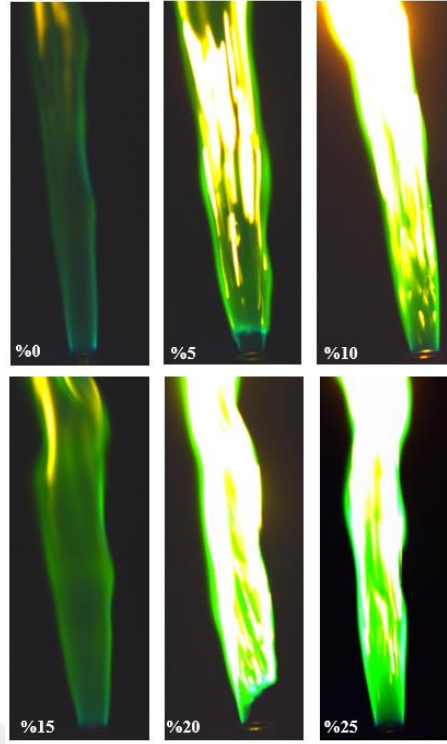
Şekil 4.16. 3.75 lt/dk Dehide Bunsen Brülörde Karışım Yakıtların Davranışları

Debi değerinin 6 lt/dk olduğu koşullarda gerçekleştirilen beş farklı hacimsel orana sahip yakıt çeşiti için deneylere ait görseller Şekil 4.17’de yer almaktadır. Bu görsel verileri deney esnasında yüksek hızlı kamera aracılığı ile kaydedilmiştir. Daha düşük debilerde sisteme dahil edilen karışım yakıtların alev davranışlarını baktığımız zaman debi artışıyla birlikte ışıma oranında ciddi artış olduğunu kanıtlar nitelikte çıktılar alınmıştır.



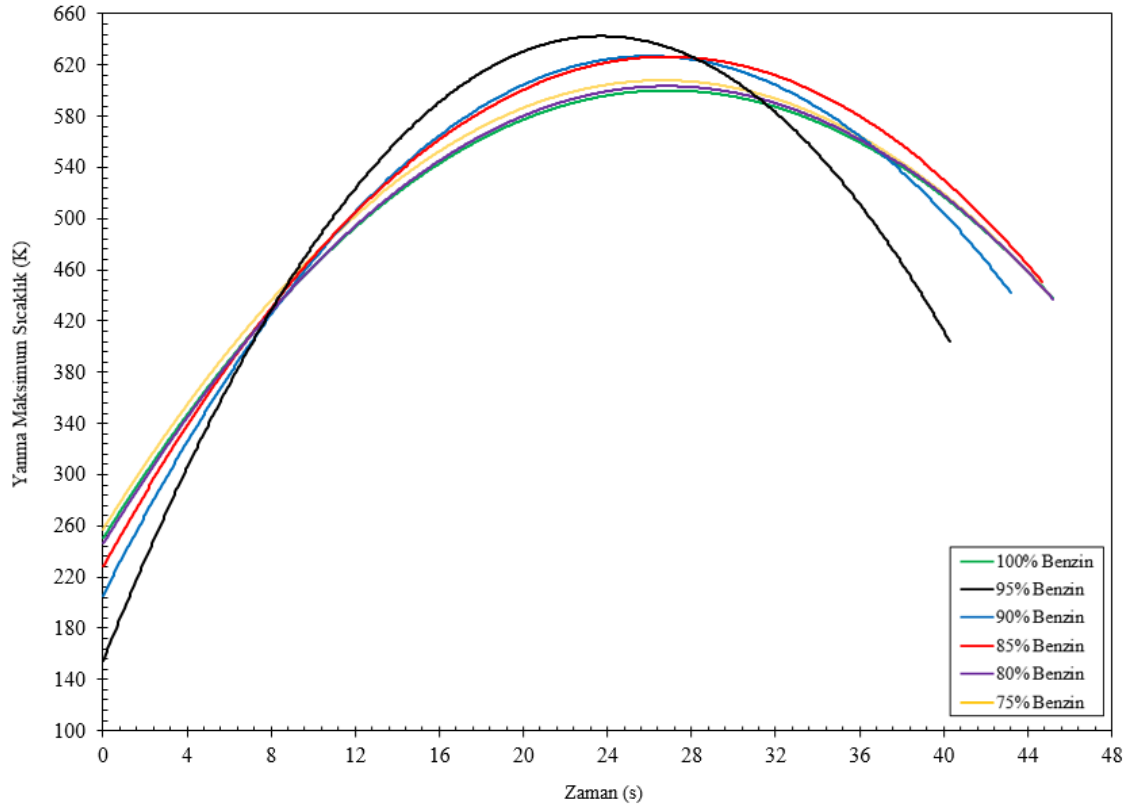
Şekil 4.17. 6 lt/dk Debide Bunsen Brülörde Karışım Yakıtların Davranışları

Debi değerinin 7.5 lt/dk olduğu koşullarda gerçekleştirilen beş farklı yakıt çeşidi için deneylerin görseli Şekil 4.18’de yer almaktadır. Gaz akış hızı ile yanma hızının oranından kaynaklı alev yükselmeleri gözlemlenmeye başlamıştır. nceki debilerde gözlemlenen ışımalar debinin artmasıyla artış göstermektedir. Alev sıcaklığının yükselmesiyle paralel gerçekleşen bor parçacıklarının yanma sonucu sıçrama davranışında da artış gözlemlenmiştir.



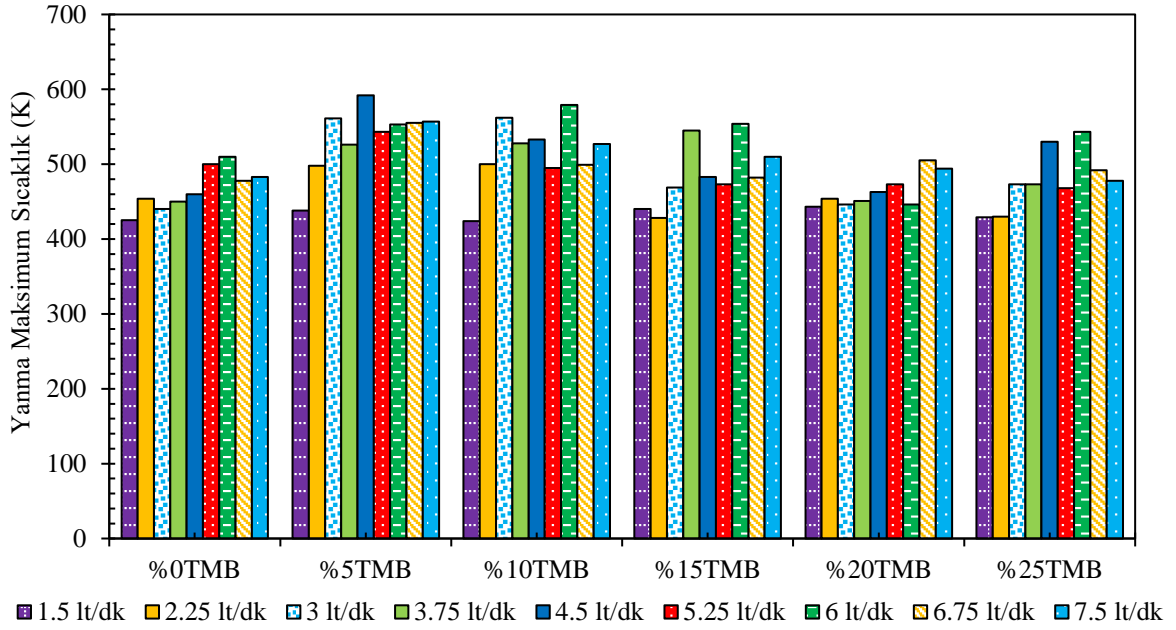
Şekil 4.18. 7.5 lt/dk Debiye Bunsen Brülörde Karışım Yakıtların Davranışları

4.5 lt/dk debi ile bunsen brülörüne erişen karışım yakıt içerisinde, yüzdeler olarak benzin miktarının yanma esnasında gözlemlenen maksimum sıcaklık verilerini içeren grafik Şekil 4.19’da yer almaktadır. Tüm yakıtlar arasında en yüksek yanma sıcaklığı %100 benzin yakıtına ait sıcaklıktır. Yanma süresi 37.51 s olduğu anda %100 benzin yakıtının sıcaklığı termal kameradan 721 K olarak okunmuştur. Yakıt karışımlarının yanma esnasında ulaştıkları maksimum sıcaklık değerlerinin dağılımları incelendiği zaman genel olarak dengeli bir sıcaklık dağılımı yaşandığı görülmektedir. İncelenen yakıtların yanma esnasında ulaştıkları en düşük sıcaklık değeri ise 454 K iken %95 benzin içeren yakıtta ait kaydedilmiştir.



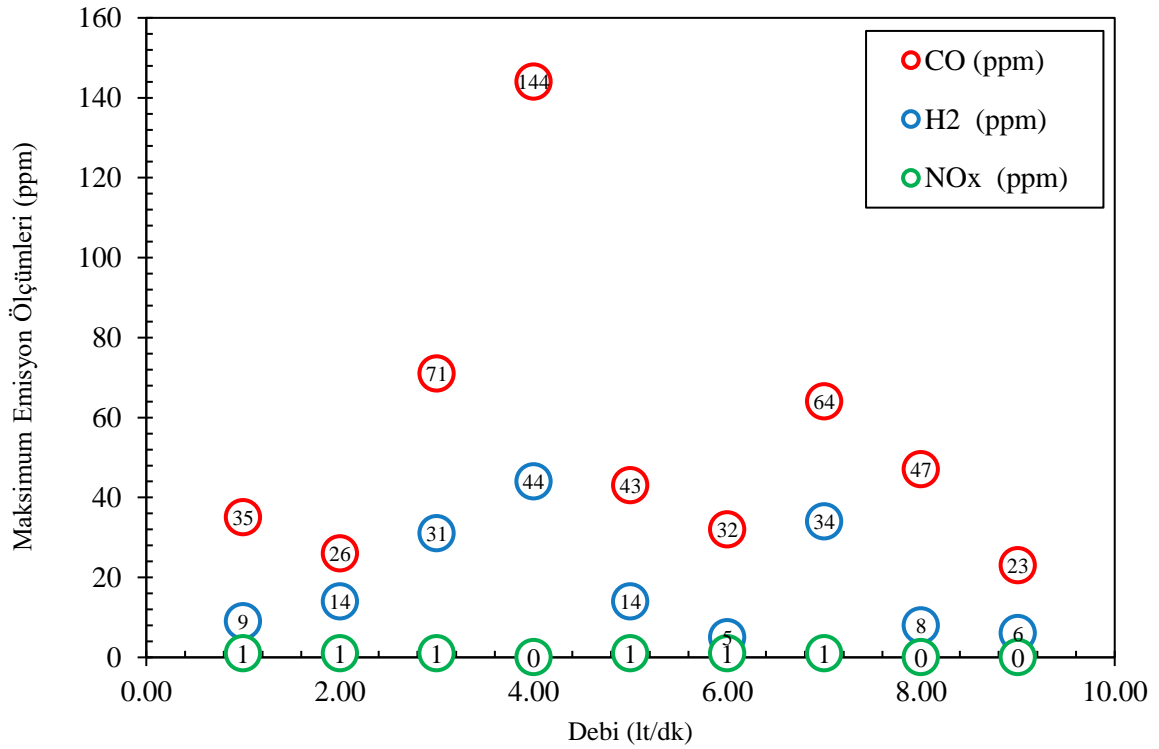
Şekil 4.19. 4.5 lt/dk Debi İçin Karışım Yakıtların Yanma Maksimum Sıcaklık (K) Değerleri

Şekil 4.20’de tüm yakıtların hacimsel oranları için gerçekleştirilmiş debi değerleri için termal kamera aracılığıyla ölçümü gerçekleştirilmiş sıcaklık değerlerinin grafiği yer almaktadır. Deneyler esnasında ölçülen en yüksek sıcaklık %95 benzin yakıtı için 4.5 lt/dk debide 592 K olarak ölçülmüştür. 6 lt/dk debi için yakıt karışımlarında gözlemlenen sıcaklık değerleri genel değerler arasında üst sınıra yakın gözlemlenmiştir.



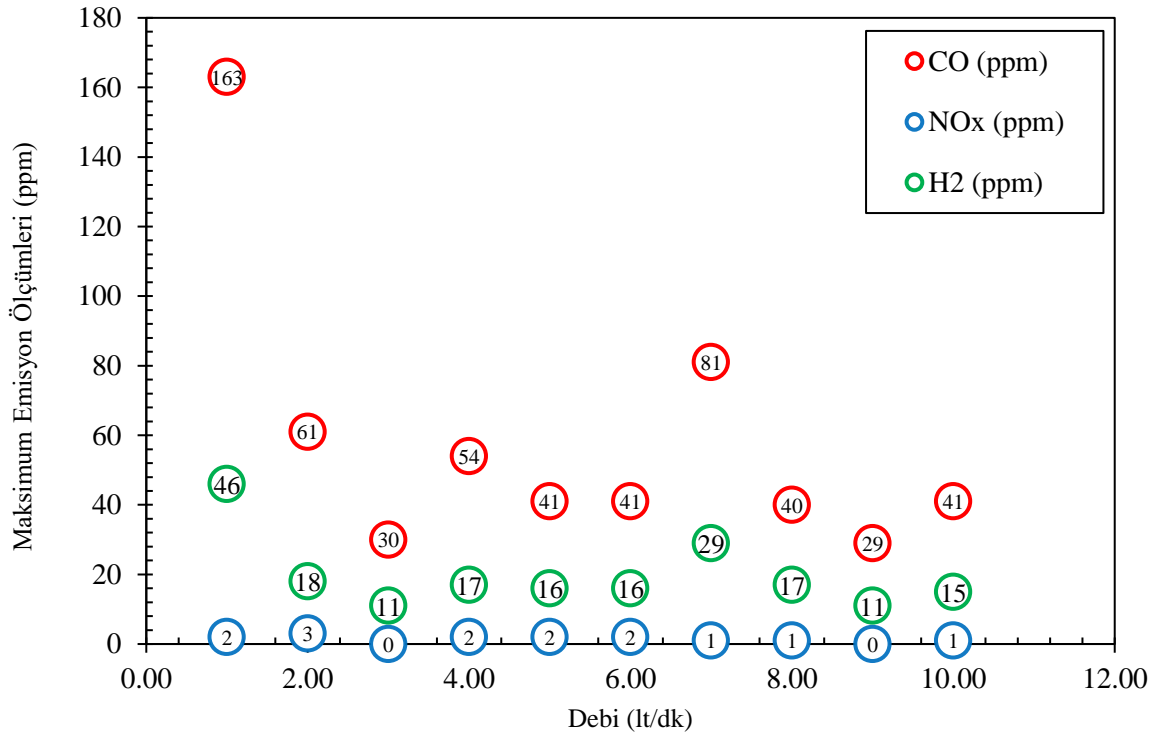
Şekil 4.20. Karışım Yakıtlarının Debiye Bağlı Maksimum Alev Sıcaklığı Değişimleri

Bunsen brülöründe ön karışımli olarak gerçekleştirilen deneylerde OT10B yakıtı için yanma esnasında CO, NO, NO_x, SO₂ ve H₂ emisyon gazlarına ait değerler Şekil 4.21’de yer almaktadır. Emisyon ölçümü 0.75 lt/dk, 1.5 lt/dk, 2.25 lt/dk, 3.00 lt/dk, 3.75 lt/dk, 4.5 lt/dk, 5.25 lt/dk, 6.00 lt/dk, 6.75 lt/dk ve 7.50 lt/dk debileri için kaydedilmiştir. Yanma sonucu açığa çıkan emisyon gazlarında CO gazının emisyon okumasında saptanması mevcut yakıtın faydalı işe çevrilmeden çıktığını gösteren bir emisyon gazı çeşididir. Benzer şekilde emisyon okumalarında H₂ gazının görülmesi yanma ortamının ihtiyaç oranından daha düşük oksijen barındırdığını göstermektedir. Yeterli oksijen bulunarak yanmanın gerçekleştiği ortamlarda H₂ gazı çoğunlukla gözlemlenmezken aynı oranda H₂O çıktısı görülmesi beklenmektedir. NO_x emisyonu ise dünya atmosferde bulunan N₂ gazının yanma ortamına dahil olarak oksijen ile tepkimesi sonucunda oluşmaktadır. En yüksek CO miktarının ölçüldüğü 3.75 lt/dk debide emisyon oluşumu 144 ppm’dir.



Şekil 4.21. Bunsen Brülöründe 0T10B Yakıtının Maksimum Emisyon Ölçümler

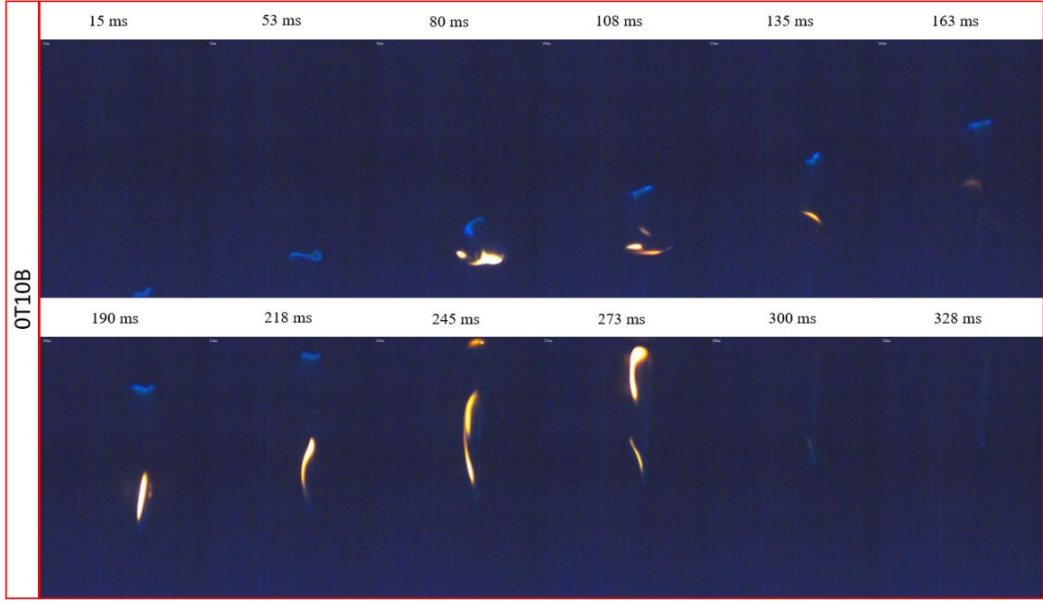
Maksimum alev sıcaklık değerleri incelenmek üzere Şekil 4.22’de yer almaktadır. Burada 5T95B yakıtına ait en yüksek sıcaklık değeri 4.5 lt/dk debi görülmüştür. 0.75 lt/dk, 1.5 lt/dk, 2.25 lt/dk, 3 lt/dk, 3.75 lt/dk, 4.5 lt/dk, 5.25 lt/dk, 6 lt/dk, 6.75 lt/dk ve 7.5 lt/dk debilerde emisyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Gözlemlenen en yüksek sıcaklık değerine sahip olan 5T95B yakıtının farklı debilerde okunan emisyon ölçüm değerleri Şekil 4.22’de yer almaktadır. 1.5 lt/dk debi için maksimum CO emisyonu oluşumu 163 ppm olarak kaydedilmiştir. Zengin yakıt karışımı oluşturan LPG ve TMB yakıtlarının yanma tepkimesinden kaynaklandığı saptanmıştır. Deney esnasında kaydedilmiş maksimum H₂ emisyon ölçümü de CO ile benzer şekilde 1.5 lt/dk için gözlemlenmiştir.



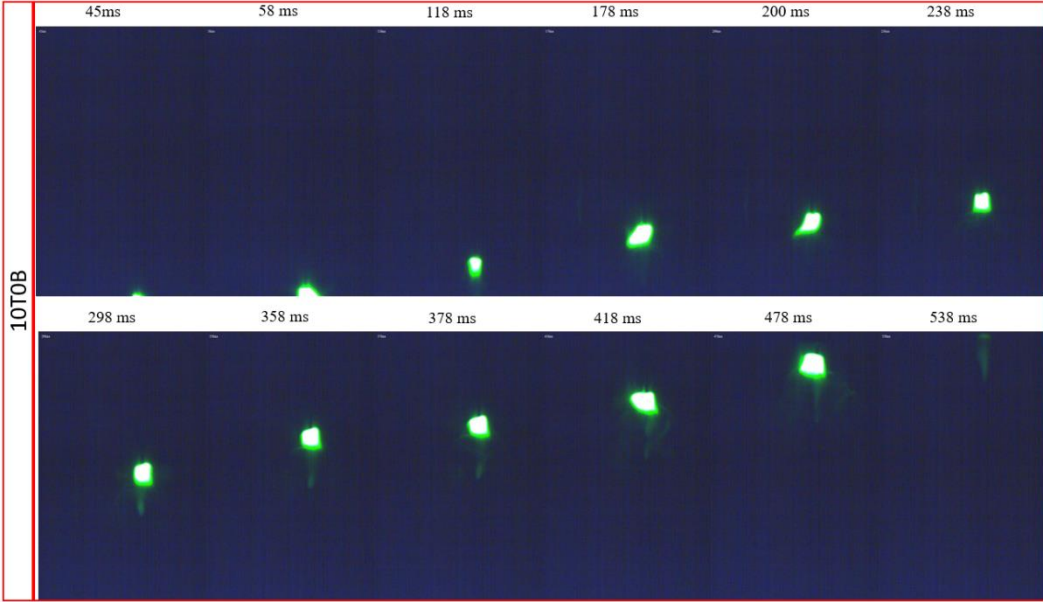
Şekil 4.22. Bunsen Brülöründe 5T95B Yakıtının Maksimum Emisyon Ölçümleri

4.3. Kanal Yanma Deneyi Sonuçları ve Değerlendirilmesi

0T10B ve 10T0B karışım yakıtları için sırasıyla Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’de kanal içi yanma deneyi esnasında yüksek hızlı kamera aracılığı ile alınmış görseller yer almaktadır. Kanal üst yüzeyinden damlatılan yakıtın özgül ağırlığı ile aşağı yönde hareket sonucu kanal iç yüzeyinde ıslanma yüzeyini meydana getirmektedir. Deney düzeneğinde ve kanalın alt kısmında yer alan yüksek voltajlı arkın teması sırasında yukarı yönde kanal yanma test düzeneği yukarı yönde alev alan davranış sergilemektedir. Kanal yanma deneysel test düzeneğinde incelenen 0T10B ve 10T0B yakıtlarının boy ölçüsü 140 mm olan kanal boyunu tamamlama süreleri sırasıyla 228 ms ve 498 ms’dir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda 0T10B yakıtı için yanma hızı 0.281 m/s hesaplanırken, 10T0B yakıtında yanma hızı 0.614 m/s olarak hesaplanmıştır. Kanal içerisinde alev hızı ölçümleri gerçekleştirirken yakıtlar arasındaki 10T0B yakıtının %33.64 daha hızlı olması yakıt içeriğinde yer alan bor partiküllerinin ıslanma yüzeyi oluşturmasıdır. Yakıtların viskozite değerlerine bağlı olarak 10T0B yakıtının viskoz bir yakıt olmasından kaynaklı olarak kanal içi yayılım göstermeksizin yanma davranışı göstermektedir.



Şekil 4.23. OT10B Yakıtı Kanal Yanma Birleşik Görşel



Şekil 4.24. 10T0B Yakıtı Kanal Yanma Birleşik Görşel

SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Tez kapsamında benzin-trimetil borat yakıtlarının farklı oranlardaki karışımlarından oluşan yakıtlar deney sistemlerinde incelenmiştir. Testlerde 3 farklı deneysel test düzeneğinde 5 farklı yakıt incelenmesi tamamlanmıştır. Gerçekleştirilen deneyler neticesinde elde edilen veriler bu tezin sonuçlar bölümünde ayrıntılı bir biçimde açıklanmıştır.

Tez kapsamında damlacık test düzeneğinde farklı oranlarda karıştırılmış benzin ve TMB karışımı damlacık yakıtları incelenmiştir. Karışımı damlacık yakıtlarının yanma davranışlarında, saf haldeki karakteristik özelliklerini korudukları saptanmıştır. Benzin damlacık yakıtı yanma esnasında daha küçük koni açıları oluşturarak sivri bir geometride yanmakta ve sarı-kırmızı-beyaz tonlarında ışımlar görülmektedir. TMB damlacık yakıtı ise damlacık formuna yakın olacak şekilde yanma davranışını sürdürmekte ve yeşil ışımlar yapmaktadır. Oluşturulan karışım yakıtlarda, TMB yakıtının öncelikli olarak yandığını göstermiştir. Karışımı yakıtlar ise kendi içerisinde değerlendirildiğinde minimum yanma süresine sahip 10T0B damlacık yakıtı olduğu saptanmıştır. Benzin ilaveli yakıtların ise sönme davranışı sergilemeye başladığı esnada büyük çoğunlukla benzin yakıtının yanması gözlemlenmektedir. Hacimsel oranları değişen karışım yakıtlarının bünyesinde barındırdığı yakıtın yüzdesel açıdan fazlalığına bağlıdır. Hacimsel oran fazlalığına sahip yakıtların yanma karakteristiğinde yönelmeler olduğu belirlenmiştir. TMB damlacık yakıtının öncelikli yanma davranışının tutuşma gecikmeleri sürelerine paralel olarak en düşük tutuşma gecikmesi süresi 0.000714 ms 10T0B damlacık yakıtına ait olduğu gözlemlenmiştir. TMB damlacık yakıtının ilavesiyle karışımı damlacık yakıtlarında tutuşma gecikmesini azaltıcı yönde etki etmiştir. Tutuşmanın gerçekleşmesinin ardından damlacıkların yanma sürelerinde 0T10B damlacık yakıtının azalarak sönme davranışı gösterirken, 10T0B damlacık yakıtı ani sönme davranışı göstermiştir. Yakıt içerisinde TMB yüzdesi artış gösterdikçe yanma sürelerinde doğrusal olarak artış olduğu tespit edilmiştir. Damlacık yakıtı deneylerinde oluşan alevlerin maksimum sıcaklık değerleri yakıt karışımı içerisindeki TMB oranına bağlı olarak artış gösterdiği saptanmıştır. İskelet yapısında açıkça görülen, TMB damlacık yakıtının içeriğinde barındırdığı metil gruplarından kaynaklı sıcaklık artışı gözlenmesine neden olmuştur. Benzin yakıtına kıyas ile H/C oranının yüksek olması da destekleyici özellik olarak düşünülmektedir. SiC teli üzerine asılan damlacık yakıtının yanması sırasında gösterdikleri boyutsal-geometrik değişimler incelendiğinde, 0T10B damlacık yakıtının buharlaşma mekanizmasının baskınlığı yanma sonucu açığa çıkan is oluşumunu etkilemiştir.

Damlacık yüzeyinde görülen şişme ve büzülme hareketleri sonucunda yakıtın hızla yanarak tükenmesi sonucu sönme eğilimi sergilemiştir. 10T0B yakıtı ise içeriğinde barındırdığı metil gruplarının yüksek uçuculuk özelliği taşımıştır. Benzin yakıtına kıyas ile 10T0B damlacık yakıtının düşük olan kaynama sıcaklığı neticesinde buharlaşma mekanizmalarına baskın biçimde etki ettiği görülmüştür. Karışımli damlacık yakıtlarının içerdiği yakıt türleri nedeniyle düşük kaynama sıcaklığına sahip TMB yakıtının buharlaşma mekanizması etkisiyle şişme ve büzülme davranışları sergileyerek tükenmesinin ardından, benzin yakıtı içeriği kaynaklı is mekanizmalarının etkisiyle sönme yaşandığı gözlenmiştir.

Bunsen beki deney sisteminde incelemesi gerçekleştirilen ve LPG yakıtına %5'lik oranlar ile eklenen TMB yakıtının ön karışımli ve difüzyon yanma olarak incelenmesi sonucunda, bor elementinin moleküler düzeyde tam yanması sonucu yeşil ışımlar yaptığı saptanmıştır. Gözlemlenen yeşil ışımlar karışım yakıtının içeriğindeki TMB oranıyla doğru orantılı olarak ışıma tonu yoğunluğunu arttırmıştır. Yakıt homojenitesi için ultrasonik test cihaz prosesi uygulanmasına rağmen yakıt içerisinde bulunan bor partiküllerinin sarı ışımlar ile mikropatlama görülmüştür. Bor partiküllerinin giderek artması yanma davranışı esnasında alev salınımı ve alev kopmaları üzerinde etkili olmuştur. Bunsen beki iç koni alev boyu ölçümlerinde; 2.25 lt/dk debide TMB katkısının artması sonucu iç koni alev boyunda artışlar tespit edilmiştir. %100 benzin yakıtında 26.07 mm olarak ölçülen iç koni alev boyu, %90 benzin yakıtında 34.82 mm olarak ölçülmüştür. Laminer alev hızı incelemesi yapıldığında zengin yakıt karışımı şartlarında TMB ilavesi ile laminer alev hızının azalmasına sebep olduğu bulgulanmıştır. Bunsen bekinde gerçekleştirilen 4.5 lt/dk debi değerinde sahip akışta gerçekleştirilen deneyler esnasında kaydedilen maksimum alev sıcaklık değerleri %100 benzin için kaydedilmiştir. TMB yakıtının sahip olduğu kalorifik değeri oksijenle tepkimeye girmesi durumunda değeri düşüşü yaşamaktadır. Deneylerin değişken parametrelerinden olan debi bilgilerine bağlı emisyon ölçümleri için %100 benzin yakıtı merceğe altına alınmıştır. %100 benzin yakıtına ait emisyon ölçüm sonuçları; H₂ ve CO emisyonunun 3.75 lt/dk debi değerinde açığa çıkan CO emisyonunun 144 ppm, H₂ emisyonu ise 44 ppm değerindedir. Gerçekleştirilen deneylerde gözlemlenen en yüksek CO emisyon çıktısı %100 benzin yakıtına ait şartlarda kaydedilmiştir. Debi ölçüsü nedeniyle gerçekleştirilen püskürtme işlemi doğrudan yakıt içerisine sirayet etmesi dolayısıyla emisyon ölçülerinde yüksek değeri okumaları yaşanmaktadır.

Kanal alev hızı deneylerinde kullanılan 10T0B ve 0T10B yakıtlarının hız karşılaştırmaları sonucunda yakıtların kimyasal içerik kaynaklı farklı yanma hızları

gözlemlendiği düşünölmektedir. 10T0B için ölçölen hız 0.614 m/s iken, 0T10B için 0.281 m/s hesaplanmıştır.

Tez kapsamında gerçekteştirilen çalışmalar neticesinde TMB ilavesinin karışımlı yakıtlarda kullanılabileceği gibi saf yakıt olarak değerlendirilebileceği düşünölmektedir. İçerisinde bulunan bor partiköllerinin yanma esnasında saçılma davranışı yapması nedeniyle kesikli yanma sistemlerinde ana yakıtlara ilave yakıt olarak kullanılabileceği, sürekli yanma sistemlerinde ana yakıt olarak yüksek kalorifik değerleriyle dikkate değer iyileştirmeler sağlayacağı ön görölmektedir. Ülkemiz bor rezervleri göz önünde bulundurulması durumunda enerji bağımsızlığı yönünden kritik önem sağlayacaktır.



KAYNAKÇA

- Al-Ghussain, L. (2019). Global Warming: Review on Driving Forces and Mitigation. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 38(1), p. 13-21.
- Ambekar, A., Maurya, A. K., and Chowdhury, A. (2018). Droplet Combustion Studies of Nitromethane and its Blends. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 93: p. 431-440.
- 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.
- Clanet, C., and Searby, G. (1996). On the “Tulip Flame” Phenomenon. *Combustion and Flame*, 105(1-2), p. 225-238.
- Demirbaş, A. (2005). Hydrogen and Boron as Recent Alternative Motor Fuels. *Energy Sources*, 27(8), p. 741–748.
- Ding, S., Dang, YG, Li, XM, Wang, JJ ve Zhao, K. (2017). Yeni Bir Gri Çok Değişkenli Model Kullanarak Yakıt Yanmasından Kaynaklanan Çin CO₂ Emisyonlarını Tahmin Etmek. *Temiz Üretim Dergisi*, 162, s. 1527-1538.
- 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.
- Ediz, N. and Özdağ, H. (2001). Bor Mineralleri ve Ekonomisi. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, 2: s. 133-151.
- Etimaden, 2020. Eti Mine Works General Management. 20 Mayıs 2022 tarihinde <http://www.etimaden.gov.tr> adresinde erişildi.
- Hosmane, N. S., (2011). *Boron science. New Technologies and Applications*, U.S.A., p. 385-491.
- Hu, S., Gao, J., Gong, C., Zhou, Y., Bai, D. X., Li, Z. S., and Alden, M. (2018). Assessment of Uncertainties of Laminar Flame Speed of Premixed Flames As Determined Using A Bunsen Burner at Varying Pressures. *Applied energy*, 227: p. 149-158.

- IEA IEA. CO₂ Emissions from Fuel Combustion 2017 - Highlights. *International Energy Agency*. p.1–162.
- Karakaya, E., Sofuoğlu, E., (2015). İklim değişikliği müzakerelerine bir bakış: 2015 Paris iklim zirvesi. *In International Symposium on Eurasia Energy Issues*, 28, s. 30.
- Langan, K. (2010). A Computational Study of Two Dimensional Laminar Premixed Combustion of Methane and Some Biofuels (Doctoral dissertation, The University of Iowa).
- MEU (Republic of Turkey Ministry of Environment and Urbanization) Turkey's 7th National Communication of Turkey under UNFCCC (2018). 20.05.2022 tarihinde https://unfccc.int/sites/default/files/resource/496715_Turkey-NC7-1-7th%20National%20Communication%20of%20Turkey.pdf adresinden erişildi.
- Miglani, A., Basu, S., & Kumar, R. (2014). Insight Into Instabilities in Burning Droplets. *Physics of Fluids*, 26(3): p. 032101.
- Miglani, A., Nandagopalan, P., John, J., and Baek, S. W. (2016). Disruptive Combustion Behavior of Gelled Ethanol Fuel Droplets. *In 18th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems-Asia (ILASS-Asia 2016), Chennai, India*.
- Owen, K., and Coley, T. ,(1990). *Automotive fuels handbook*, U.S.A.
- Sandall, E., Kalman, J., Quigley, J. N., Munro, S., & Hedman, T. D. (2017). A Study of Solid Ramjet Fuel Containing Boron–Magnesium Mixtures. *Propulsion and Power Research*, 6(4), 243-252.
- Saxena, S. (Ed.), (2016). *Handbook of Boron Nanostructures*, CRC Press, U.S.A., p. 77-101.
- Schechter, W. H. (1954). *Production of Trimethyl Borate*, U.S. Patent No. 2,689,259. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- 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.

- Sivan, J., Haas, Y., Grinstein, D., Kochav, S., Yegudayev, G., and Kalontarov, L. (2015). Boron Particle Size Effect on B/KNO₃ Ignition By A Diode Laser. *Combustion and Flame*, 162(2), p. 516-527.
- Xiao, H., Wang, Q., He, X., Sun, J., and Shen, X. (2011). Experimental Study on the Behaviors and Shape Changes of Premixed Hydrogen–Air Flames Propagating in Horizontal Duct. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(10): p. 6325-6336.
- Yang, S. Y., Naser, N., Chung, S. H., and Cha, J. (2015). Effect of Temperature, Pressure and Equivalence Ratio on Ignition Delay in Ignition Quality Tester (IQT) Diesel, n-Heptane, and Iso-Octane Fuels Under Low Temperature Conditions. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 8(3): p. 537-548.



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(radii)
```

```
    r(ctr)=radii(1);
```

```
    C(ctr,:)=centers(1,:);
```

```
    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. Alev İç Koni Test Kodu

```
clc; % Clear the command window.
```

```
close all; % Close all figures ( )
```

```
clear; % Erase all existing variables. Or clearvars if you want.
```

```
workspace; % Make sure the workspace panel is showing.
```

```
format short g;
```

```
format compact;
```

```
fontSize = 25;
```

```
toplam=0;
```

```
%=====
```

```
% Get the name of the image the user wants to use.
```

```
for i=1:10
```

```
if i<10
```

```
    baseFileName=[ ];
```

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

```
    baseFileName=[ ];
```

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

```
    baseFileName=[ ];
```

```
else
```

```
    baseFileName=[ ];
```

```
end
```

```
%baseFileName = 'File_0006.jpg';
```

```

% Get the full filename, with path prepended.

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

fullFileName = fullfile( );

%=====
=====

% Read in a demo image.

grayImage = imread(fullFileName);

% Get the dimensions of the image.

% numberOfColorChannels should be = 1 for a gray scale image, and 3 for an RGB color
image.

[ ] = size(grayImage)

if numberOfColorChannels > 1

    % It's not really gray scale like we expected - it's color.

    % Use weighted sum of ALL channels to create a gray scale image.

    grayImage = rgb2gray(grayImage);

    % ALTERNATE METHOD: Convert it to gray scale by taking only the green channel,
    % which in a typical snapshot will be the least noisy channel.

    % grayImage = grayImage(:, :, 2); % Take green channel.

end

% Display the image.

subplot(2, 2, 1);

imshow(grayImage, []);

axis on;

axis image;

```

```

caption = sprintf( );

title( );

drawnow;

hp = impixelinfo();

% Set up figure properties:

% Enlarge figure to full screen.

set( );

% Get rid of tool bar and pulldown menus that are along top of figure.

% set( );

% Give a name to the title bar.

set( )

drawnow;

T = adaptthresh( );

% binarize the image.

binaryImage = imbinarize( );

% Make sure there is only one blob

binaryImage = bwareafilt( );

% Display the image.

subplot(2, 2, 2);

imshow(binaryImage, []);

axis on;

axis image;

```

```

caption = sprintf( );

title( );

drawnow;

hp = impixelinfo();

% Label the image

labeledImage = bwlabel( );

% Make measurements of bounding box

props = regionprops( );

width = props.BoundingBox(3);

height = props.BoundingBox(4);

% Display it with the box overlaid on it.

subplot( );

imshow( , []);

axis on;

axis image;

caption = sprintf( );

title(caption, 'FontSize', fontSize, 'Interpreter', 'None');

drawnow;

hp = impixelinfo();

hold on;

rectangle( );

%message = sprintf('The width = %f.\nThe height = %f', width, height);

%uiwait( );

```

```
% Calculate the area using bwarea().  
  
area1 = bwarea( );  
  
% Calculate the area in pixels using sum()  
  
area2 = sum(binaryImage(:));  
  
%message = sprintf( );  
  
%uiwait( );  
  
%o=size[ ]  
  
o(i)=height/width  
  
toplam=toplam+o(i);  
  
end  
  
oran=toplam/50;
```

Ek 3. Maksimum Sıcaklık Test Kodu

```
clc;clear;close all;

tic;

% import the video file

obj = VideoReader( );

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("%i. Resim Dosyası Oluşturuldu...\n",x);

end

fprintf("*****\n");

fprintf("*** Video dosyasından resimler oluşturuldu **\n");

fprintf("*****\n");

fprintf("*****\n");

fprintf("*** Resim Kesme İşlemi Başlatılıyor **\n");

fprintf("*****\n");

for i=1:frames
    Sx = num2str(i);
    Strc = strcat( );
    cd Frames;
    I = imread(Strc);
    cd ..;

    I2 = imcrop( );

    cd CutFrames

    imwrite( );

    cd ..;

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

end

fprintf("*****\n");

fprintf("*** Resim Kesme İşlemi Tamamlandı **\n");

fprintf("*****\n");

```

```

fprintf("*****\n");

fprintf("***   Resim Okuma İşlemi Başlatıldı   **\n");

fprintf("*****\n");

warning ('off', 'Images:initSize:adjustingMag');

for i=1:frames

    baseFileName=[ ];

    %baseFileName = 'File_0006.jpg';

    % 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( );

    % title( );

    % figure;

    % picture=imbinarize(picture);

    % imshow( );

    % title( );

    picture=~picture;

    g=strel( );

    picture=imclose(picture,g);

```

```
% figure;  
  
% imshow(picture);  
  
title( );  
  
picture=imread(fullFileName);  
  
% imshow(picture);  
  
m=ocr(picture);  
  
[~,cc]=size(picture);  
  
picture=imresize( );  
  
if size(picture,3)==3  
    picture=rgb2gray(picture);  
  
end
```

```
threshold=graythresh( );  
  
picture=~im2bw( );  
  
picture=bwareaopen( );  
  
% imshow(picture);
```

```
if cc>2000  
    picture1=bwareaopen( );  
  
else  
    picture1=bwareaopen( );  
  
end
```

```

% figure,imshow(picture1);

picture2=picture-picture1;

% figure,imshow( );

picture2=bwareaopen( );

% figure,imshow(picture2);

[L,Ne]=bwlabel(picture2);

propied=regionprops( );

%hold on

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

%  rectangle ( )

%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( );
% imshow(n1);

x=[];

%totalLetters=size( );
%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( );
final_output=[ ];
end

end

m=ocr(picture);
disp( );
d(i)=( );
k(i)=0.0430622*i;
end
xlswrite( )

```

```
xlswrite( )  
fprintf("*****\n");  
fprintf("** Resim Okuma İşlemi Tamamlandı **\n");  
fprintf("*****\n");  
toc;
```

