



TARSUS
ÜNİVERSİTESİ

T.C.

TARSUS ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**DİZEL VE TRİETİL BORAT YAKITLARI İLE KARIŞIMLARININ
DAMLACIK YANMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

MERT ŞEVKET BİÇER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TARSUS - 2022

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

DİZEL VE TRİETİL BORAT YAKITLARI İLE KARIŞIMLARININ
DAMLACIK YANMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

MERT ŞEVKET BİÇER

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: Doç. Dr. Ata HANLAR

Üye: Doç. Dr. Serhat KARYEYEN

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. / / 2022

Mert Şevket BİÇER

ÖZET
DİESEL VE TRIETİL BORAT YAKITLARI İLE KARIŞIMLARININ
DAMLACIK YANMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

MERT ŞEVKET BİÇER

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ahmet Alper YONTAR

Temmuz 2022, 71 sayfa

Bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında, trietil borat, dizel ve bunların karışımlarının damlacık boyutunda yanması deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Yakıt damlacıklarının yanması sırasında meydana gelen süreçler detaylıca incelenmiştir. Mevcut çalışmada damlacığa ait yanma süreçleri ve bunlara bağlı parametreler detaylıca araştırılmıştır. Damlacıkların alev karakteristikleri ve sıcaklık değişimleri de çalışma kapsamında detaylıca incelenmiştir. Damlacık dinamikleri ve alev görüntüleri arkadan aydınlatmalı görüntüleme sistemi ve kendinden aydınlatmalı görüntüleme sisteminden faydalanılarak, saniyenin 1/1400 hassasiyetinde yüksek hızlı kamera vasıtasıyla kaydedilmiştir. Elde edilen görüntüler damlacık boyutunun değişimini teşhis etmek amacıyla özel olarak geliştirilmiş bir Matlab algoritmasıyla detaylıca işlenmiştir. Damlacıkların boyut değişimini değerlendirmek için D^2 yasasından faydalanılmıştır. Bunlara ek olarak yüksek hassasiyete sahip bir termal kamera kullanılarak karışımların yanma sıcaklıkları ölçülmüştür. Sonuç olarak trietil borat yakıtının dizele ilavesinin yanma sıcaklıklarını yükselttiği ve tutuşma gecikmelerini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Trietil borat eklentisinin damlacık ömründe ve yanma hızında azalmaya sebep olduğu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlardandır.

Anahtar kelimeler: Bor Türevli Yakıtlar, Yanma, Damlacık Yanması, Trietil Borat, Dizel

ABSTRACT
**INVESTIGATION OF DROPLET COMBUSTION BEHAVIORS OF DIESEL,
TRIETHYL BORATE AND THEIR MIXTURES**

MERT ŞEVKET BİÇER

Master Thesis, Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Ahmet Alper YONTAR

July 2022, 71 pages

Within the scope of this master's thesis, the droplet size combustion of triethyl borate, diesel and their mixtures was experimentally carried out. The processes occurring during the combustion of fuel droplets have been studied in detail. In the present study, the combustion processes of the droplet and its related parameters were investigated in detail. The flame characteristics and temperature changes of the droplets were also examined in detail within the scope of the study. Droplet dynamics and flame images were recorded by a high-speed camera with a precision of 1/1400 of a second, using the back-illuminated imaging system and self-illuminating imaging system. The resulting images were processed in detail with a specially developed Matlab algorithm to diagnose the change in droplet size. The D^2 law was used to evaluate the size change of the droplets. In addition, the combustion temperatures of the mixtures were measured using a high-sensitivity thermal camera. As a result, it has been observed that the addition of triethyl borate fuel to diesel increases combustion temperatures and reduces ignition delays. It is among the results obtained within the scope of the study that the addition of triethyl borate causes a decrease in the droplet life time and burning rate.

Keywords: Boron Derrivative Fuels, Combustion, Droplet Combustion, Triethyl Borate, Diesel

ÖNSÖZ

Bu çalışma Tarsus Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır. Bu çalışmamda ve yüksek lisans eğitimim süresince desteklerini benden esirgemeyen, akademik ve sosyal anlamda deneyimlerini paylaşan değerli danışman hocam Doç. Dr. Ahmet Alper Yontar'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, çalışmanın devamlılığı için önemli bir husus olan yazılımın geliştirilmesinde yardımcı olan Doç. Dr. Deniz Üstün'e sağladıkları katkılardan dolayı teşekkür ederim.

Çalışmam esnasında bana maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mert Şevket BİÇER

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
KISALTMALAR	vi
TABLolar LİSTESİ	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
EKLER LİSTESİ.....	x
GİRİŞ	1
Tezin Amacı ve Kapsamı	3

BÖLÜM I

KAYNAK ARAŞTIRMASI

1.1.Damlacık Yanma Analizi	11
1.1.1.Gölge Grafiği Tekniği	11
1.1.2.Schlieren Tekniği.....	13
1.1.3.Kendinden Aydınlatmalı Görüntüleme Tekniği	14
1.1.4.Arkadan Aydınlatmalı Görüntüleme Tekniği.....	15

BÖLÜM II

YAKITLAR VE YANMA

2.1.Yanma Tekniği.....	16
2.2.Sprey ve Atomizasyon	20

BÖLÜM III

MATERYAL VE METOT

3.1.Yakıt Seçimi.....	22
3.2.Yakıt Karışımı Oluşturma	23
3.3.Damlacık Oluşturma ve Ateşleme	25
3.4.Görüntüleme Sistemi kurulumu	29
3.5.Arkadan Aydınlatmalı Görüntüleme.....	29
3.6.Kendinden Aydınlatmalı Görüntüleme Sistemi	31
3.7.Termal Görüntüleme Sistemi	33
3.8.Görüntü İşleme.....	33

BÖLÜM IV

BULGULAR

4.1.Damlacık Çapı Değişimi ve Damlacık Dinamiği.....	35
4.2.Alev Karakteristiği	45
4.3.Tutuşma Gecikmesi.....	52
4.4.Sıcaklık Değişimi	53
4.5.Yanma Hızı	57
SONUÇ ve ÖNERİLER	60
KAYNAKÇA.....	63
EKLER	68
ÖZGEÇMİŞ	71



KISALTMALAR

CO	: Karbon Monoksit
CO₂	: Karbon Dioksit
C_p	: Özgöl Isı (kJ/kg.K)
D	: Çap (mm)
D₀	: İlk çap (mm)
F	: Yakıt
g	: Gaz
H	: Isı salınım oranı (kJ/kg)
k	: Termal İletkenlik (W/m.K)
K	: Yanma Hızı Sabiti (mm ² /s)
l	: Sıvı
m	: Kütle (kg)
NO_x	: Nitrojen Oksit
o	: Oksitleyici
P	: Çevre (mm)
PM	: Partikül madde
r	: Yarı Çap (mm)
T	: Sıcaklık (K)
t	: Zaman (s)
TEB	: Trietil borat
V	: Hacim (mm ³)
λ	: Termal İletkenlik (W/m.K)
ρ	: Yoğunluk (kg/m ³)
υ	: Stokiyometrik Hava/Yakıt Oranı

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Alev tipleri ve kullanım alanları	18
Tablo 3.1. Dizel ve Trietil Borat Yakıtlarının Özellikleri.....	24
Tablo 3.2. Kamera görüntüleme koşulları.....	32



ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Klasik damlacık yanması modeli	5
Şekil 1.2. Gölge Grafiği Sistemi.....	13
Şekil 1.3. Z Tipi Schlieren Sistemi (a) ve damlacık yanması görüntüsü (b).....	13
Şekil 1.4. Doğrudan görüntüleme sistemi ile damlacık yanması	14
Şekil 1.5. Arkadan aydınlatmalı görüntüleme sistemi şematığı	15
Şekil 2.1. Alevin genel yapısı	18
Şekil 2.2. Dizel spreynin ayrışması	20
Şekil 3.1. Trietil borat (a) ve dizel (b) yakıtlarının kimyasal iskelet yapıları.....	23
Şekil 3.2. Hassas terazi	24
Şekil 3.3. Yakıtlar ve yakıt karışımlarının adlandırılmaları	25
Şekil 3.4. Öncü deneylerden termal görüntü	26
Şekil 3.5. Damlacık oluşturmak için kullanılan mikro pipet.	27
Şekil 3.6. Damlacık boyut analizi kalibrasyonu.	27
Şekil 3.7. Ateşleme sistemi şeması (a) ve ark oluşumu (b).....	28
Şekil 3.8. Görüntüleme sistemi ana bileşenleri. (a) 100W LED aydınlatma, (b) Işık difüzörü, (c) Yüksek hızlı kamera ve objektif.	30
Şekil 3.9. Arkadan aydınlatmalı görüntüleme sistemi şeması.....	31
Şekil 3.10. Kendinden aydınlatmalı görüntüleme sistemi şeması	32
Şekil 3.11. Termal kamera (a) ve elde edilen alev görüntüsü (b).....	33
Şekil 3.12. Renkli damlacık görüntüsü (a) ve gri tonlamalı damlacık görüntüsü (b).....	34
Şekil 4.1. DTEB64 damlacık dinamiği; a) faz ayrımı, b) çekirdeklenme, c) genleşme.	36
Şekil 4.2. Damlacık çapı değişimi grafikleri.	38
Şekil 4.3. Dizel (a) ve TEB (b) damlacık yanması sırasında meydana gelen üfleme olayı	39
Şekil 4.4. DTEB19 yakıtının damlacık görüntüleri	40
Şekil 4.5. DTEB28 yakıtına ait damlacık görüntüleri	41
Şekil 4.6. DTEB37 yakıtına ait damlacık görüntüleri	41
Şekil 4.7. DTEB46 yakıtına ait damlacık görüntüleri	42
Şekil 4.8. DTEB55. DTEB64 ve DTEB73 yakıtlarına ait damlacık görüntüleri	43
Şekil 4.9. DTEB82 yakıtına ait damlacık görüntüleri	43
Şekil 4.10. DTEB91 yakıtına ait damlacık görüntüleri	44
Şekil 4.11. TEB damlacığının yanmasına ait alev görüntüleri	45
Şekil 4.12. DTEB19 damlacığının yanmasına ait alev görüntüleri	46
Şekil 4.13. DTEB28 damlacığının yanmasına ait alev görüntüleri	46
Şekil 4.14. DTEB37 damlacığının yanmasına ait alev görüntüleri	47
Şekil 4.15. DTEB37 damlacığının yanmasına ait alev görüntüleri	48
Şekil 4.16. DTEB55, DTEB64, DTEB73 ve DTEB82 damlacıklarının yanmasına ait alev görüntüleri	49
Şekil 4.17. DTEB91 damlacığının yanmasına ait alev görüntüleri	50
Şekil 4.18. Dizel damlacığının yanmasına ait alev görüntüleri	50

Şekil 4.19. Photoshop programıyla piksel yoğunlaştırarak tutuşma tespiti. Orijinal kayıt (a) ve piksel yoğunlaştırılmış görsel (b)	52
Şekil 4.20. Tüm yakıt karışımlarına ait tutuşma gecikmesi değerleri ve artış oranları ..	53
Şekil 4.21. Damlacık ömrü boyunca sıcaklık değişimi	55
Şekil 4.22. Damlacık yanmasına ait maksimum sıcaklık değerleri.....	56
Şekil 4.23. Yakıtlara ait yanma süresi değerleri	58
Şekil 4.24. Yakıtlara ait yanma hızı sabiti değerleri.....	59



EKLER LİSTESİ

	Sayfa
Ek 1. Matlab Kodu.....	68

GİRİŞ

Ateşin keşfi kabaca ifade edilirse insanlık tarihine yön vermiştir. Yanma reaksiyonları, alev şeklinde yayılan ve ısı enerjisinin açığa çıktığı (ekzotermik) redoks tepkimeleridir. Teoride basit görünen bu zincirleme reaksiyon yüzyıllarca ısı, ışık, beslenme gibi temel olguların karşılanması yanında, uygarlığı inşa eden araçların yapımına vesile olmuştur. Ayrıca su, toprak ve havanın yanı sıra evrenin temel unsurlarından biri olarak kabul edilmiştir (Keating,2007:105). Günümüzde sanayide, ulaşımda ve yaşamın bazı temel noktalarında kullanılmakla beraber dünyadaki enerji ihtiyacının büyük bir bölümünün karşılanmasında rol oynamaktadır. Bu nedenle, çeşitli yanma süreçleri ve sistemlerini ilgili fenomenlerle araştırmak ve geliştirmek büyük çaplı çalışmalar yürütülmektedir. Tüm bu çalışmaların arkasındaki motivasyon, enerji üretimini daha güvenli, daha temiz ve daha verimli hale getirme arzusudur.

Her geçen gün gelişen teknolojiye paralel olarak küresel enerji tüketimi de artmaya devam etmektedir. Mevcut enerji ihtiyacı karşılanmaya çalışılırken, çevreye zararlı gazlar ve atıklar yayılmaktadır. Çevre kirliliğinin en büyük nedenlerinden birisi de enerji elde yöntemlerinin ilk sıralarında yer alan yakma sistemlerinin emisyon atıklarıdır. Bu emisyonlar, endüstriyel bacalardan içten yanmalı motorların egzozlarına kadar yanmanın meydana geldiği birçok yerde görülür (Aksay vd.,2005:29). Dünya üzerindeki petrol rezervlerinin tükenmeye başlaması ile birlikte yakma sistemleri üzerinde kullanılan yakıtın miktarını azaltmaya yönelik çalışmalar da hız kazanmıştır.

Sıvı hidrokarbon yakıtlar, katı yakıtlara göre bulunabilirliklerinin yanı sıra, bu yakıtların depolanmasındaki kolaylık ve esneklik nedeniyle enerji elde edilmesinde sıkça kullanılmaktadır. Bu nedenle, uygulamaların çoğunda sıvı yakıt oksitleyici ile karıştırılır ve küçük boyutlu damlacıklar halinde sprey şeklinde yakılır. Bu yanma şekli, dizel motorlar, roket motorları ve gaz türbinleri dahil olmak üzere çeşitli sistemlerin temelini oluşturmaktadır.

Günümüzde petrol türevi yakıtlar, toplam küresel ulaşım yakıtları talebinin %94-95'ini oluşturmaktadır. Nüfus ve ekonomideki büyümenin, artan ulaşım taleplerine yol açması beklenmektedir. ABD Enerji Bilgi İdaresi'nin 2050 yılına kadar yaptığı bir planda, hafif hizmet araçlarının kat ettiği mesafenin 4,5 trilyon kilometreden 5,3 trilyon kilometreye %18 oranında artması ve kamyon araçlarının kat ettiği kilometrenin 617 milyardan %50 artış göstererek 915 milyar kilometre değerlerine ulaşması

beklenmektedir (Energy Information Administration,2016:a.g.i.s.). Küresel yolcu taşımacılığı taleplerinin de 2040 yılına kadar iki katına çıkması bekleniyor (BP,2018,a.g.i.s.).

Ulaşımındaki bu artan talebin elektrikli araçlarla karşılanması pek olası olmadığı düşün lmektedir. Elektrikli araç filosu büyüklüğü, son yıllarda yıldan yıla %50'nin üzerinde bir oranda büyümesine ve 2016'da 2 milyona ulaşmasına rağmen, küresel hafif ticari araç filosunun hala yalnızca %0,2'sini oluşt r yor. BP, küresel binek araç filosunun büyüklüğünü 2040 yılına kadar iki katına çıkararak, %15 olan 300 milyondan fazla elektrikli araç ile 2 milyara ulaşacağını tahmin ediyor (BP,2018,a.g.i.s.). Bu nedenle, motorla çalışan araçlar, yakın gelecekte hala yolcu taşımacılığı için ana mekanizma olmaya devam edecektir.

Dizel, son yıllarda ulaşım için yaygın olarak kullanılan yenilenemeyen enerji kaynaklarından biri olmuştur. T   K'in 2022 resmi verilerine göre Türkiye'de bulunan kayıtlı dizel otomobillerin oranı 2004 yılında %5 dolaylarındayken, 2022 yılında bu oran %37 civarındadır. İçten yanmalı motorlarda dizelin giderek artan kullanımı, zararlı partik l madde (PM'ler) ve nitrojen oksit (NOx) emisyonu , fosil yakıtların tükenmesi ve petrol arama faaliyetleri ve işlenmesi nedeniyle çevresel bozulma gibi büyük sorunlara yol açmaktadır . Biyodizeller , karbon nötrlüğü ile yenilenebilir olarak kabul edildikleri için bu sorunlardan bazılarını çözebilir, çünkü biyodizel hammaddesi olan bitkiler büyüdükçe karbondioksiti (CO₂) emer (Santos vd.,2021:2). Bununla birlikte biyodizeller, geleneksel dizele kıyasla genellikle daha pahalıdır ve daha düşük yakıt ekonomisine sahiptir (Singh vd.,2021:2). Ayrıca biyodizel, otomobil yakıt sistemlerinin kauçuk hortum hatlarına zarar verebilir ve geleneksel dizele kıyasla daha yüksek akma noktaları nedeniyle soğuk iklim şatlarında kullanıma uygun değildir. Biyodizellerin yüksek buharlaşma noktası, yakıt raylarında ve yakıt filtresinde de tıkanmaya neden olabilir. Bu nedenle biyodizeller ticari dizel motorlarda doğrudan kullanılamaz ve gerekli büyük dizel motor modifikasyonları kısa vadede sermaye ve işletme maliyetlerinin artmasına neden olacaktır. Fakat dizelin biyodizele göre daha avantajlı bir yakıt olsa da kirleticiliğı göz ardı edilememektedir. Bu sebeplerden dolayı geleneksel dizel yakıtına oranla daha verimli ve daha çevreci bir yakıtın elde edilmesi büyük önem arz etmektedir.

Püskürtmeli yanmanın ayrıntılı bir şekilde anlaşılması, ilişkili meydana gelen olaylarla birlikte bu süreçlerin detaylı olarak anlaşılmasını gerektirir. Bu nedenle, bu

sistemleri geliştirmek için, yalnızca enerji üretimini artırmak değil, aynı zamanda yakıtları kullanırken yanma kaynaklı kirliliği azaltmak için püskürtmeli yanma ile ilgili temel fiziksel süreçlerin anlaşılması önemlidir. Bu, spreyn ayrı damlacıkların oluşturduğu bir bütün olduğunu göz ardı etmeden, tam spre y yerine tek bir damlacığın davranış yelpazesini keşfederek başarılabılır.

Buna göre, spre y yanma sırasında meydana gelen bahsedilen fiziksel ve kimyasal süreçleri ele almak amacıyla, damlacık yakma hem deneysel hem de teorik olarak çok sayıda araştırmanın konusu olmuştur. Bununla birlikte, daha fazla araştırma ile doldurulması gereken bazı boşluklar vardır. Çok bileşenli yakıtların damlacık yanması, daha fazla anlaşılması gereken bu alanlardan biridir. Mevcut çalışmada çok bileşenli yakıt, iki veya daha fazla sıvı yakıtın veya yanmadan önce hazırlanan yakıt karışımlarının karışımı olarak tanımlanmaktadır. Buna yakıt karışımları, emülsiyonlar ve karışım bileşenlerinin kimyasal reaksiyonundan ziyade fiziksel karıştırmadan kaynaklanan diğer tüm karışımlar dahildir. Bu bağlamda, tek bileşenli yakıt, normal dizel, benzin, etanol ve metanol gibi diğer bileşenlerle karıştırılmadan orijinal haliyle kullanılan normal saf sıvı yakıt anlamına gelir.

Tezin Amacı ve Kapsamı

Spre y yanma sırasında meydana gelen bahsedilen fiziksel ve kimyasal süreçleri ele almak amacıyla, damlacık yakma hem deneysel hem de teorik olarak çok sayıda araştırmanın konusu olmuştur. Bununla birlikte, daha fazla araştırma ile doldurulması gereken bazı boşluklar vardır. Çok bileşenli yakıtların damlacık yanması, daha fazla anlaşılması gereken bu alanlardan biridir. Bu nedenle, mevcut çalışmanın amacı, bu boşlukların bir kısmını doldurmaktır.

Bor, son yıllarda enerji elde etmek için üzerinde çalışmaları yürütölen popüler bir konu haline gelmiştir. Ancak bor hem ateşleme hem de yanma sırasında düşük reaksiyon hızlarından dolayı tahrik sistemlerinde tam potansiyeline henüz ulaşamamıştır. Bor, uzun tutuşma gecikmelerine ve düşük yanma oranlarına sahiptir (King,2007:158; Yeh ve Kuo,1996:537), bu da onu şu anda çoğu pratik cihaz için uygun hale getirmez. King ve Ulas, bunun partiköl yüzeyinde doğal olarak oluşan oksit tabakasını inhibe etmesinden kaynaklanabileceğini öne sürmektedir (King,2007:156; Ulas vd.,2001:1940). Mevcut çalışmada, bir bor türevi olan trietil borat kullanılarak bu durumun önüne geçilmiştir. Bor

halihazırda 250'den fazla üretim alanında katkı maddesi veya ana madde olarak kullanılmaktadır. Süregelen çalışmalar ile birlikte de kullanım alanları ve sektöre katkısı gün geçtikçe artmaya devam edecektir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilmiş olan deneylerden elde edilen verilerin, ilgili sektöre katkı sağlaması muhtemeldir. Özellikle yakma sistemlerinde borun etkisi üzerine yapılacak olan çalışmalara kaynak sağlayacaktır.

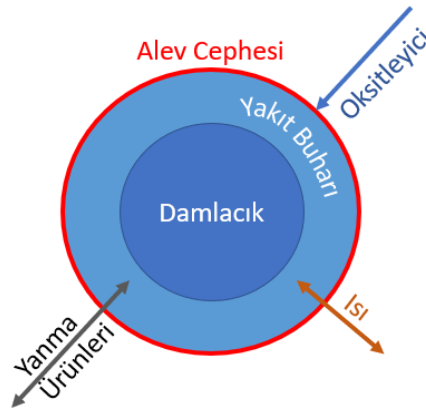
Bu tez çalışmasında bor türevi yakıtların, geleneksel hidrokarbon yakıtlara ilavesinin yanma karakteristiklerine etkisi incelenmiştir. Deneysel olarak gerçekleştirilen çalışmada, Dizel ve trietil borat yakıtları ve bunların farklı oranlarda karışımları yakılarak, elde edilen veriler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Ayrıca, optik teşhis yöntemleri hem niteliksel hem de niceliksel olarak yanma ölçümlerinde en çok uygulanan tekniklerden biridir. Ölçülen sistem içindeki akış alanını bozmaması, çalışılan ortamdaki anlık değişimlerin hızlı ve kesin olarak kaydedilmesi ve diğer ölçüm tekniklerine kıyasla sağladığı büyük veri gibi çeşitli avantajlar nedeniyle artan bir ilgi görmektedir. Bununla birlikte, tek bir optik teknik, her işlem için çalışılan parametre sayısında sınırlıdır. Bu nedenle, mevcut çalışmada damlacık yanmasını incelemek için arkadan aydınlatmalı görüntüleme ve kendinden aydınlatmalı görüntüleme tekniği kullanılmaktadır.

BÖLÜM I

KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bir veya birbiriyle etkileşimli birden fazla küresel damlacığın yanması birçok nümerik çalışmanın konusu olmuştur (Law,1982:182; Sazhin,2017:69-101; Sazhin vd.,2013:559-572). Deneysel çalışmaların kökeni ise daha eski tarihlere dayanmaktadır. İzole edilmiş bir damlacığın yanmasını konu alan ilk deneysel çalışmalar, 1949 yılında Godsave, 1950 yılında ise Godsave'den esinlenen Kumagai ve Isoda tarafından gerçekleştirilmiştir (Godsave,1949:708-709; Isoda ve Kumagai,1950:1). Damlacık yanmasını ve buharlaşmasını içeren, aynı zamanda ilk ve en basit model olan D^2 yasasının elde edildiği çalışmalar ise 1953 yılında Godsave ve yine 1953 yılında Spalding tarafından gerçekleştirilmiştir (Godsave,1953:818-830; Spalding,1953:847-864). Bu teori aynı zamanda damlacık yanmasının klasik teorisi olarak da bilinmektedir. Şekil 1.1'de belirtilen model görülmektedir.



Şekil 1.1. Klasik damlacık yanması modeli

Bu modelde damlacık oksitleyici bir ortama maruz bırakılır. Damlacık yüzeyindeki buharlaşan yakıt çevredeki oksitleyicilerle reaksiyona girer ve ön karışimsız bir alev oluşur. Reaksiyon sebebiyle açığa çıkan ısı hem çevreye yayılır hem de damlacığın tükenene kadar buharlaşmasını sağlayarak yanma reaksiyonunu devam ettirir. Bu bilgiler ışığında aşağıdaki denklemler elde edilir.

Enerji denklemi;

$$r^2 \rho v \frac{d(C_p T)}{dr} = \frac{d}{dr} \left[r^2 \frac{\lambda}{C_p} \frac{d(C_p T)}{dr} \right] - r^2 \dot{H} \quad (1.1)$$

Yakıt denklemi;

$$r^2 \rho v \frac{dm_F}{dr} = \frac{d}{dr} \left[r^2 D \rho \frac{dm_F}{dr} \right] - r^2 \dot{m}_F \quad (1.2)$$

Oksitleyici denklemi;

$$r^2 \rho v \frac{dm_O}{dr} = \frac{d}{dr} \left[r^2 D \rho \frac{dm_O}{dr} \right] - r^2 \dot{m}_O \quad (1.3)$$

Bu bilgiler ışığında bazı varsayımlarda bulunulmuştur. Reaksiyonun stokiyometrik şartlarda gerçekleştiği, damlacığın küresel bir simetriye sahip olduğu, damlacık yanmasının yarı kararlı olduğu varsayılarak elde edilen denklemler basitleştirilmiş ve damlacık yanmasına ait ana parametreler şu şekilde bulunmuştur;

Yanma hızı sabiti;

$$K = \frac{8k_g}{p_l C_{pg}} \quad (1.4)$$

Bu ifade sadece kararlı durum için geçerlidir ve damlacık boyutu değişim eğrisini temsil etmektedir.

Damlacık boyutu denklemi;

$$D^2(t) = D_0^2 - Kt \quad (1.5)$$

Bu ifade ise D^2 yasası olarak bilinmektedir. Zamana bağlı damlacık boyutu değişimi sıfır kabul edilerek damlacık ömrü denklemi şu şekilde elde edilir;

$$t_d = \frac{D_0^2}{K} \quad (1.6)$$

Bahsi geçen denklemler varsayımlar ile elde edildiğinden dolayı gerçek değerlerin değil yaklaşık değerlerin elde edilmesine yardımcı olmaktadır. Isıtma periyodu, kurum

oluşumu ve radyasyon ihmal edilen durumlardandır. İhmal edilen durumlar deneysel saptamalarda büyük bir yüzdeyi temsil etmektedir. Buna göre, klasik damlacık yanma teorisinin kullanımıyla elde edilen değerler, kesin hesaplamalardan ziyade birincil tahmin amaçları için kullanılabilir. D^2 yasası formülizasyonundan sonra damlacık yanması araştırmaları ivme kazanmaya ve popüler bir konu haline gelmeye başlamıştır.

Kumagai ve Isoda (Kumagai & Isoda,1958:523-531), mikro yerçekimi koşulları altında ilk damlacık yakma deneyini gerçekleştirdi. Damlacık, serbest düşüş yapan bir hazne içinde askıya alınarak ve oda içinde ateşlenen damlacığı, haznenin düşey yolunda önceden tanımlanmış belirli bir noktadan geçtiğinde görüntüleyerek deneyleri için mikro yerçekimi ortamını sağlamışlardır. Kaldırma kuvveti ve doğal taşınımın damlacık yanma hızı üzerindeki etkisini ortadan kaldırarak klasik teorinin küresel simetri varsayımlarını kanıtlamayı amaçladılar. Kumagai ve Isoda'nın çalışmaları, düşük yerçekimi koşulları altında gerçekleştirilen damlacık yakma araştırmalarına öncülük etmiştir.

Jackson vd. (Jackson vd.,1992:2017-2033), düşük yerçekimi ortamı yaratmak için bir damla kulesinde gerçekleştirilen kurumlaşan yakıt damlacıklarının yanmasına ilişkin deneysel gözlemler yapmıştır. Serbest düşen *n*-heptan damlacıkları, heptan, monokloroalkanların asılı damlacıkları ve monokloro-oktan ve heptan karışımları incelenmiştir. İlk damlacık çapları 0,4 ila 1,1 mm arasında değişken olarak ölçülmüştür. Sonuçlar, kurumun damlacık buharlaşma oranlarını etkileyebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte alevin küresel simetrisi, damlacık alevi içindeki kurum birikintilerinin daha uzun süre gözlemlenmesine izin vermektedir. Hafif konvektif akışların etkileri, hem asılı damlacıkların etrafındaki doğal konveksiyon varyasyonları hem de desteklenmeyen damlacıkların sürüklenme hızlarındaki varyasyonlar yoluyla da gözlemlenmiştir. Asılı damlacıkların etrafındaki hafif konvektif akışlar, alev parlaklığının, alev içinde kurum birikiminin ve artan damlacık buharlaşma oranlarının azalmasına sebep olmuştur.

Choi ve Kyeong-Okk (Choi & Kyeong-Okk,1996:1243-1249), kurum davranışı üzerindeki damlacık boyutuna bağlı etkileri değerlendirmek için deneyler gerçekleştirdiler. N-heptan yakıtı kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde, damlacık yüzeyi ve alev tarafından sınırlanan bölge içindeki geçici kurum dağılımları, bir tam alan ışık söndürme tekniği ve ardından Abel dönüşümleri kullanılarak tomografik ters çevirme kullanılarak ölçüldü. Sonuç olarak, mikro yerçekimi damlacık alevleri içindeki kurum konsantrasyonlarının, tipik olarak 1 ppm düzeyinde olan normal yerçekimi alevleri için

karşılık gelen değerlerden önemli ölçüde daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca damlacık boyutunun islenme davranışı üzerindeki etkilerini de inceleyen Choi, 1,0 mm ve 1,75 mm'lik yakıt damlacığı çapında deneyler gerçekleştirmiştir. 1,75 mm çapına sahip damlacığın, 1,0 mm çaptaki damlacığa oranla 3 kat daha fazla anlık kurum oranına sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Pan vd. (Pan vd.,2009:1926-1936), mikro yerçekimi altında yanma hızının damlacık boyutuna bağlı olduğunu gözlemledi. Daha büyük bir damlacığın (528 μm) küçük bir damlacığa (445 μm) göre daha kalın bir kurum kabuğu oluşturmuştur. Büyük damlacığın kurum kabuğunun damlacık yakma hızında gözle görülür bir azalmaya neden olduğu görülmüştür.

Bunlar ve benzeri çalışmalar (Manzello vd.,2004:5381-5385; Urban vd.,2004:12-18; Xu vd.,2004:5807-5821), klasik damlacık yanması teorisini geliştirmek için kullanılan kurum oluşumunun olmadığı varsayımının pratik olarak geçerliliğini yitirmesine sebep olmuştur.

Benzer şekilde, normal yerçekimi koşulları altında damlacık yanması çalışmaları da kapsamlı bir şekilde gerçekleştirilmiştir, çünkü gerçek yakıt yanması genellikle normal yerçekimi ortamlarında gerçekleşir. Normal yerçekimi deneyleri, yüzdürme kaynaklı akıştan (örneğin, serbest konveksiyon) yararlanırken, mikro yerçekimi bu avantaja sahip değildir. Aslında mikro yerçekimi altında akışın olmaması, alev ve sıvı yakıt arasındaki damlacık yüzeyinin etrafında bir kurum kabuğunun oluşmasına izin verir (Pan vd.,2009:1930). Normal yerçekimi koşullarıyla ilişkili kaldırma kuvveti ve doğal taşınımın etkilerine rağmen, belirli koşullar altında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, her türlü ölçüm tekniği için esneklik ve uygunluk ayrıcalığına sahiptir. Bu nedenle, 1950'lerin başından günümüze kadar olan süre için damlacık yakma araştırması üzerine yayınlanmış çalışmaların normal yerçekimi koşulları altında gerçekleştirilen deneysel araştırma çalışmalarının kısmının karşılık gelenden daha yüksek olduğu görülmektedir.

Kobayasi (Kobayasi,1955:141-148), atmosferik basınç ve normal yerçekimi altında dizel yakıtının damlacık yanmasını deneysel olarak inceledi. Damlacıkların yanmadan önce bir ilk ısıtma periyoduna sahip oldukları gözlemlendi. Isıtma periyodu, damlacık ömrünün önemli bir bölümünü oluşturan ve ortam sıcaklığıyla birlikte azalan tutuşma gecikmesi ile doğrudan ilişkilidir (ateşleme gecikmesi, damlacığın sıcak ortama ilk yerleştirildiği zamandan, damlacığın tutuştuğu ana kadar ölçülmüştür) (Raslavičius ve

Bazaras,2010a:243-250). Raslavicius ve Bazaras tarafından kullanılan ortam sıcaklığı aralığı 930-1010 K aralığındayken, Kobayasi 901-1268 K'lik bir ortam sıcaklığı aralığı kullanmıştır.

Yanma hızı ve ortam sıcaklığı arasındaki ilişki, normal şartlar ve akustik koşullar altında Saito vd. tarafından incelendi (Saito vd.,1996:669-674). Dizel damlacıkları üzerinde yapılan çalışmada akustik salınımların, salınımsız duruma göre 673-1073 K sıcaklık farklarında artışa neden olduğu ve damlacık yanma hızının arttığı gözlenmiştir. Alev sıcaklığının, akışta salınımlar olmaksızın ortam sıcaklığından bağımsız olduğu bulunmuştur.

Raslavicius ve Bazaras (Raslavičius ve Bazaras,2010b:1049-1054) atmosferik basınç ve normal yerçekimi altında dizel damlacık yanmasını sayısal olarak inceledi. 770-860 K arasında değişen ortam sıcaklığının tutuşma gecikmesinde bir azalmaya neden olduğu çalışmanın ana odak noktası tutuşma gecikmesiydi ve damlacık boyutunun damlacık yanmasını önemli ölçüde geciktirdiği bulundu. Damlacık boyutunun, çalışmada kullanılan en yüksek değerlere kıyasla daha düşük ortam sıcaklıkları için daha önemli bir etkiye sahip olduğu bulundu. Ortam sıcaklığının dizel damlacık yanması üzerindeki etkisinin hem normal yerçekimi hem de daha az ölçüde mikro yerçekimi için çalışıldığı görülebilir. Tutuşma gecikmesi ve yanma hızı, ortam sıcaklığına büyük ölçüde bağlıdır, oysa kurum üretimi yalnızca mikro yerçekimi koşullarında önemli bir sorun haline gelmektedir.

Rasid ve Zhang (Rasid ve Zhang,2019:3403), yüksek hızlı kamera kullanarak dizel bazlı yakıt damlacıklarında is partikül kontaminasyonunun etkileri araştırmışlardır. Damlacık sıvı fazının görselleştirilmesiyle, yüzey distorsiyonu, üfleme ve mikro patlamalar detaylı şekilde incelenmiştir. Sonuç olarak damlacık yüzeyindeki is partikülleri bir kabuk oluşturarak saf dizel damlacığının yanma hızını %17 ve yanma fazının ömrünü %14 azaltmıştır.

Law vd., damlacık ısıtmanın ortaya çıkan yanma davranışı üzerindeki etkisi detaylıca araştırmıştır ve damlacık ömrü ve yanma davranışı üzerinde önemli ölçüde etkili olduğu gösterilmiştir. Tahmini damlacık ısıtma periyodu, toplam damlacık ömrünün yaklaşık %10-20'si olarak bulunmuştur (Law,1976:21; Law ve Sirignano,1977:179).

Javed vd. (Javed vd.,2015:774-787), yüksek ortam sıcaklıklarının ve seyreltik nanopartikül konsantrasyonlarının kerosen bazlı nano akışkan damlacıklarının kendi

kendine tutuşma ve yanma özellikleri üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Silisyum karbür (SiC) fiber üzerinde asılı ağırlıkça %0,1, %0,5 veya %1,0 alüminyum nano partik l içeren izole edilmiş bir kerosen damlası, atmosfer basıncında aniden yüksek bir sıcaklığa (673-1073 K aralığında) maruz bırakılarak normal yerçekimi altında, kendiliğinden tutuşma ve ateşleme gecikmesi özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar, saf kerosen damlacıklarına benzer şekilde, nanopartikül yüklü kerosen damlacıklarının tutuşma gecikme süresinin artan sıcaklıkla katlanarak azaldığını göstermektedir.

Sankaranarayanan vd. (Sankaranarayanan vd.,2019:8), RP-1 vekil yakıtının (RP-1-s), bileşenlerinin ve iki yeni enerjik yakıtın damlacık yanma davranışı araştırmıştır. Testler, asılı damlacık yöntemi kullanılarak ortam atmosferik koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, başlangıç çapı 1,3 mm olan bir damlacık için yanma hızı sabitlerinin, referans yakıtın yaklaşık 3.5, 1.24, 0.92 ve 0,96 katı olduğunu göstermektedir. Çalışma yakıtların enerji yoğunluklarının yanma hızıyla ilişkisi olmadığını göstermektedir.

Pandey ve Basu (Pandey ve Basu,2019:167-179), Ceria nano parçacıkları yüklü etanol-su damlacıklarının yanma özellikleri araştırmışlardır. Deneysel olarak gerçekleştirilen çalışmada, nano partik l içeren ve içermeyen damlacıkların yanma süresi  l e i, arayüz deformasyonlarından kaynaklanan ikincil atomizasyon, damlacık şekli deformasyonları ve alev ısı salınımı incelenmiştir. Heterojen kaynama mekanizmasının damlacık ikincil atomizasyonuna yardımcı olduğu görülmüştür. Fırlatılan alt damlacıkların hareket ederek alev cephesinde buharlaştı ı ve böylece daha fazla ısı salınımına yol açtığı tespit edilmiştir.

Faik ve Zhang (Faik ve Zhang,2018:89-109), çok bileşenli yakıt damlacı ının yanmasının yüksek hızlı arkadan aydınlatması ve gölge grafiği görüntülemesi ile sıvı faz dinamiği incelemesi gerçekleştirmiştir. Baz yakıtın dizel olduğu çalışmada biyodizel/dizel karışımları, suda dizel ve dizelde su emülsiyonları incelenmiştir. Arkadan aydınlatma sistemi ve gölge grafiği kurulumları kullanılarak çekirdeklenmenin, kabarcık oluşumunun, i  dolaşımın, şişirmenin, mikro patlamanın ve ikincil atomizasyonun uzaysal ve zamansal takibi izole edilmiş çok bileşenli yakıt damlacıkları için gerçekleştirilmiştir. Çalışmada incelenen tüm çok bileşenli yakıt karışımlarının damlacıklarında tüm damlacık ömrü boyunca üfleme ve ikincil atomizasyon meydana

geldiği gözlemlenmiştir. Mikro patlamaların ve üflemlerin asıl sebebinin yakıtların birden fazla bileşenli olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Literatür araştırmasında bor ve türevlerine dair damlacık çapında yanma konulu bir çalışmaya rastlanmamıştır.

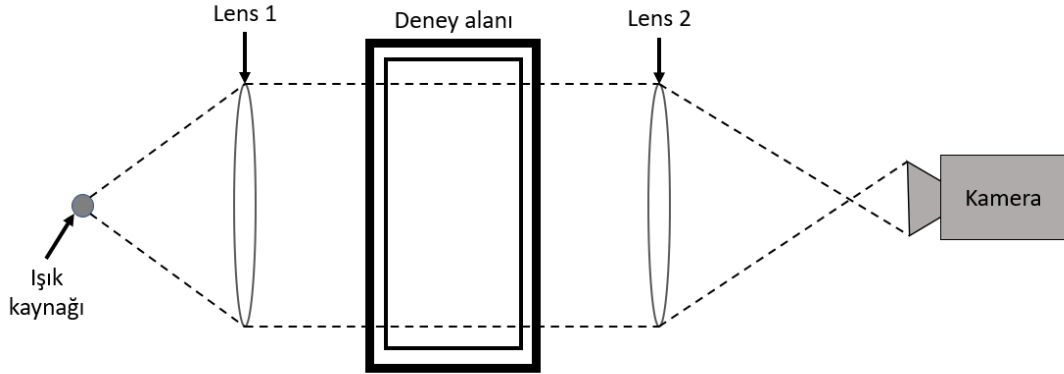
1.1. Damlacık Yanma Analizi

Nümerik metotlar ve simülasyon teknolojilerindeki gelişmelere rağmen damlacığın yanması sırasındaki mevcut parametreleri anlamak ve açıklamak için kullanılabilecek en tutarlı yöntem deneysel çalışmalardır. Gerçekleştirilen ilk damlacık yanması çalışmalarından bu yana birincil olarak optik tanı yöntemlerine başvurulmuştur. Yanma süresinin çok kısa olmasından dolayı optik yöntemlerle deneysel veriler kayıt altına alınıp, detaylı incelemelerle veri takibi yapılmasıyla birlikte daha doğru sonuçlar elde edilebilir. Bunlara ek olarak optik tanı yöntemleri, deney alanına etkisi olamaması ve alevin yansımaları tam olarak kayıt altına alabildiği için damlacık yanması araştırmalarında en çok kullanılan yöntem olmaktadır. Bu sebeplerle, mevcut çalışmada deneye etkisi olmaması ve daha detaylı inceleme fırsatı sunduğundan dolayı optik tanı yöntemi kullanılmıştır. Bu tekniklerin bazı türleri ve bunların özellikleri devam eden kısımda bahsedilmiştir.

1.1.1. Gölge Grafiği Tekniği

Gölge grafiği, hava, su veya cam gibi şeffaf ortamlardaki düzensizlikleri ortaya çıkaran optik bir yöntemdir. Benzer bir işlevi yerine getiren schlieren ve schlieren fotoğrafçılık yöntemleriyle ilgilidir, ancak bunlardan daha basittir. Gölge grafiği bir tür akış görselleştirmesidir. Prensip olarak, şeffaf havadaki bir sıcaklık farkı, farklı bir gaz veya bir şok dalgası insan gözü veya kameralar tarafından görülemez. Ancak, tüm bu bozulmalar ışık ışınlarını kırar, böylece gölge oluşturabilirler. Örneğin bir ateşten yükselen sıcak hava bulutu, düzgün güneş ışığının yakındaki bir yüzeye düşen gölgesi aracılığıyla görülebilir. Gölge grafiği tekniği aydınlatmada bir değişikliğe gerek duymaksızın nesnenin ana hatlarının incelenmesine olanak sağlar. Bunun asıl sebebi ışığın bir noktadan yayılarak bir mercek yardımıyla paralel hale getirilmesi ve akabinde nesnenin üzerine düşürülerek elde edilen görüntünün başka bir mercek yardımıyla yüzeye

(kamera, film, vs.) aktarılması ilkesine dayanmasıdır (Merzkirch,1987:56; Settles,2001:123). Bu kurulum metodu paralel kurulum olarak adlandırılır.



Şekil 1.2. Gölge Grafiği Sistemi

Gölge grafiği tekniği akışkanlar mekaniği, ısı transferi ve yanma alanlarında sıklıkla kullanılmış bir tekniktir. Damlacık yanmasını da kapsayan bir dizi deneysel çalışma yine bu teknik kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Kobayasi, yüksek sıcaklıklı bir fırın içinde asılı duran 0,7-1,7 mm çapındaki damlacıkların hem buharlaşmasını hem de yanmasını izlemek ve görüntülemek için gölge grafiği görüntülemeyi kullandı. Bu yöntem kullanılarak elde edilen görüntüler yardımıyla farklı tek bileşenli ve çok bileşenli yakıtların yanma hızlarını değerlendirebildi (Kobayasi, 1955:141-148).

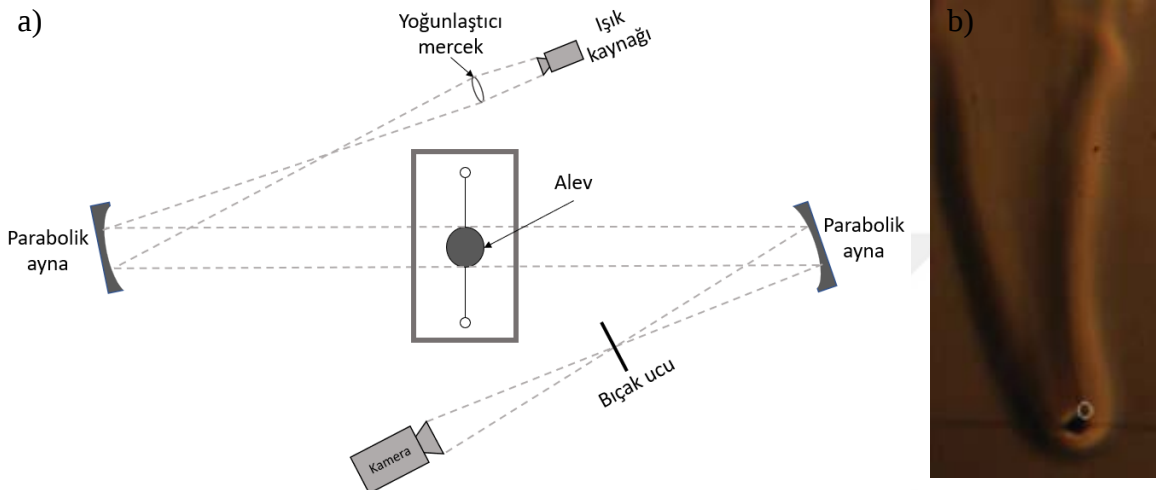
Faeth ve diğerleri, bir yüksek basınç odası içinde asılı duran izole edilmiş dekan damlacıklarının yanmasını incelemek için 100 fps görüntüleme hızında gölge grafiği kullandı (Faeth vd.,1969:9-18).

Tanabe ve diğerleri, duran bir ses dalgasında n-dekan yakıt damlacığının yanması sırasında kurum oluşumunu görselleştirmek için bir lazer ışık kaynağı ile 250 fps'de gölge grafiği kullanmıştır (Tanabe vd.,2005:1957-1964).

Faik ve Zhang, gölge grafiği tekniği ve yüksek hızlı fotoğraf makinesi kullanarak, çok bileşenli dizel yakıtlarının damlacık davranışlarını 10 kat daha büyük görüntü elde ederek incelemiştir (Faik ve Zhang,201889-192).

1.1.2. Schlieren Tekniği

Schlieren tekniği, hava, su, cam gibi ortamlarda normalde görülemeyen yoğunluk gradyanlarını görüntülemek için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Laboratuvar çalışmalarında sıklıkla kullanılan bu teknik basit optik kurulumu ve yüksek çözünürlüğü nedeniyle tercih edilir (Merzkirch, 1987:43).



şekil 1.3. Z Tipi Schlieren Sistemi (a) ve damlacık yanması görüntüsü (b)

Kaynak: (Faik vd.,2018:1085-1098)

şekil 1.3’de görülen Z tipi Schlieren sistemi kurulumu, iki parabolik ayna, bir noktasal ışık kaynağı, bir yüksek hızlı kamera ve bir bıçak ucundan oluşmaktadır. Bu sistemde, ilk ayna (sağ) ışınları ikinci aynaya (sol) yönlendirerek kameraya ulaşmasını sağlar. İkinci aynanın odak noktasına bir bıçak ucu eklenerek ışığın kameraya düzenli olarak ulaşması engellenir. Böylece yoğunluk gradyanındaki varyasyonlar daha belirgin bir hale getirilir ve yüksek kontrastlı bir görüntü elde edilir. Bu tipe ek olarak, literatürde tek ayna çakışık, tek aynalı eksen dışı ve çok geçişli ayna gibi Schlieren sistemlerine rastlanmaktadır. Schlieren tekniği aerodinamik, akışkanlar mekaniği, yanma gibi proseslerde incelemeler yapmak için kullanılmaktadır.

Schlieren görüntüleme tekniği, damlacık yanması araştırmalarında kullanılan ve kullanılmaya devam edilen ilk yöntemlerden biridir. Literatüre bakıldığında bu tekniği kapsayan ilk çalışmaya 1958 yılında rastlanmaktadır. Isoda ve Kumagai, düşen bir oda kullanarak mikro yerçekimi koşulu altında küresel n-heptan ve etanol damlacıklarının yanması üzerine ilk deneysel çalışmayı gerçekleştirmişlerdir. Yanmayı görüntülemek için

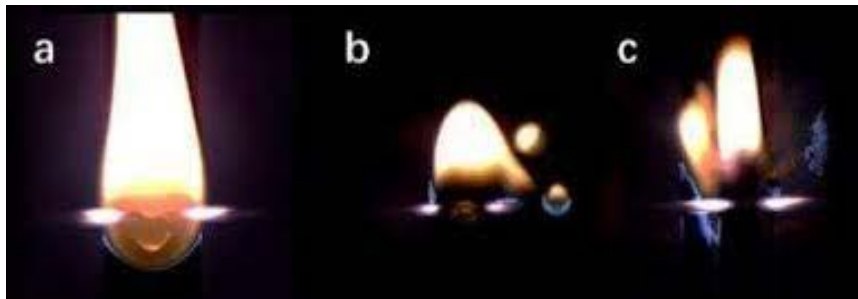
çift alanlı Schlieren tekniği kullanmışlardır. Düşen oda optik eksenine ulaştığında, foto-röle eylemiyle bir kıvılcım ışığı yaratılır. Böylece görüntüleme için yeterli aydınlatma elde edilmiş olur. Ancak araştırma sonucunda bu yöntemin yetersiz olduğunu bildirmişlerdir (Isoda ve Kumagai,1957:726-731).

Ogami ve diğerleri, salınımlı akış, yüksek basınç, mikro yerçekimi koşulları altında 1-bütanol damlacık yanmasını araştırmak için z-tipi iki aynalı Schlieren'i kullandı (Ogami vd.,2009:2175). Sistem bir xenon lamba kullanılarak aydınlatılmıştır ve 250-1000 fps kare işleme hızına sahiptir.

Faik vd. (Faik vd.,2018:1085-1098), biyodizel ile dizelin karıştırılmasının izole edilmiş bir yakıt damlacığının yanması üzerindeki etkisini schlieren tekniği kullanarak incelemişlerdir. Çalışmada, damlacığın arkasına ve kameranın karşısına beyaz ışık difüzörlü iki adet 6 voltluk LED ışık monte edilmiştir ve 55 mm makro uzatma tüp setine sahip lens kullanan bir kamera vasıtasıyla 1000 kare/saniye hızında kayıt alınmıştır.

1.1.3. Kendinden Aydınlatmalı Görüntüleme Tekniği

Doğrudan görüntüleme olarak da bilinen bu teknik, damlacık yakmada yaygın olarak kullanılan görüntüleme yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde, aydınlatma için damlacığı çevreleyen isli alevden yayılan ışık kullanılır. Böylece damlacık ve alev aydınlatması için harici bir ışık kaynağına ihtiyaç duyulmaz.



Şekil 1.4. Doğrudan görüntüleme sistemi ile damlacık yanması

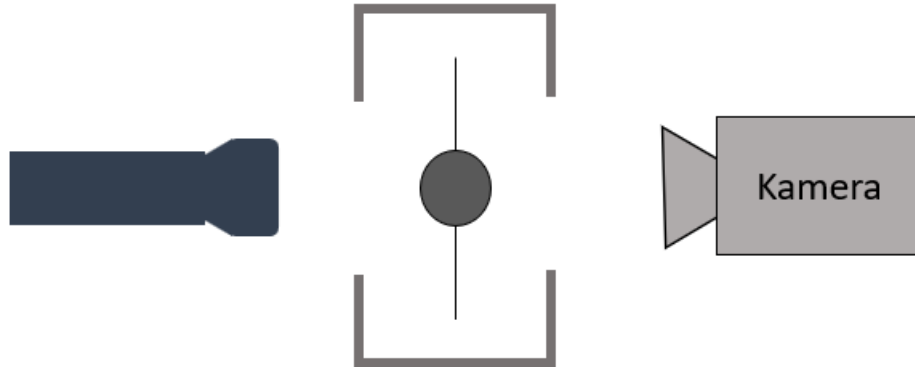
Kaynak: (Zheng vd.,2016:214)

Bae ve Avedisian, JP8 ve türevlerinin alev parlaklık farklarını incelemek için doğrudan görüntüleme tekniğini kullanmıştır (Bae vd Avedisian,2004:148-162). Zheng vd., dizeli su ile farklı oranlarda emülsiyon haline getirerek alev karakteristiklerini

incelerken bu tekniğe başvurmuştur (Zheng vd.,2016:212-217). Shang vd., n-alkan damlacıklarının doğrudan görüntüleme, hem de arkadan aydınlatmalı görüntüleme sistemlerini kullanarak damlacık davranışını detaylıca incelemişlerdir (Shang vd.,2020:16613-16623).

1.1.4. Arkadan Aydınlatmalı Görüntüleme Tekniği

Arkadan aydınlatmalı görüntüleme, yanma sırasında damlacık boyutunun gelişimini izlemek için yaygın olarak kullanılmıştır. İncelenecek obje, şekil 1.5’de görüldüğü gibi ışık kaynağı ve görüntüleme ekipmanının arasına yerleştirilir. Bu teknik damlacığın hatlarının daha keskin görünmesini sağlar. Dolayısıyla damlacık içinde gerçekleşen süreçleri, damlacık ömrünü ve damlacık boyut değişimini daha isabetli inceleme fırsatı sunar. Bu özellikleri, arkadan aydınlatmalı görüntüleme tekniğinin deneysel yanma çalışmalarında sıkça kullanılmasına sebep olmuştur (Ooi vd.,2019:11806; Rasid ve Zhang, 2019:3403).



Şekil 1.5. Arkadan aydınlatmalı görüntüleme sistemi şematiği

BÖLÜM II

YAKITLAR VE YANMA

2.1. Yanma Tekniği

Bir süreç olarak yanma, enerjiyi ısı şeklinde serbest bırakan ve çevredeki ortamda alev şeklinde yayılan son derece hızlı bir ekzotermik reaksiyondur. Yanma, yakıt-oksitleyici karışımı ile başlayan, tutuşma ve alev yayılımı ile devam eden ve yakıt oksidasyonu sonucunda çeşitli kimyasal maddelerin üretimi ile sona eren farklı fiziksel ve kimyasal süreçlerin bir bütünüdür. Yakıt ve oksitleyicinin bulunduğu ve reaksiyona girdiği bölge olması ve yanmada sıcaklığın en yüksek olduğu bölge olması nedeniyle yanmanın esas kısmı alevdir. Alev, yakıt ve oksitleyici arasındaki küçük bir boşlukta hızla yayılan, kendi kendini sürdüren bir reaksiyon olarak tanımlanır.

Doğadan elde edilen yakıtlar hidrokarbon sınıfına mensuptur. İçeriğinde hidrojen ve karbon elementlerini barındıran bu bileşikler hava ile kolayca karıştırılabilirler, kolay izole edilebilirler, lojistik açıdan transferinin kolay olması ve kimyasal enerjisinin kolay açığa çıkarılabilmesi günümüzde en çok tercih edilen enerji kaynağı haline getirmiştir.

Yanma olayının elde edilebilmesi için yakıtın gaz fazında olması gerekmektedir. Sıvı yakıt ısıtarak sıcaklığı yükselir ve faz değiştirerek gaz haline geçer. Gaz fazındaki yakıt nihayet oksijenle tepkimeye girer ve yanma olayı gerçekleşir. Reaksiyon sırasında yakıtta ait elementlerin kendi aralarındaki etkileşimler ve oksijenle girdikleri etkileşimler reaksiyon yapısını doğrudan etkiler.

Bunlara ek olarak yakıt-hava karışım oranları ve yanma ürünlerine göre teorik tam yanma, tam yanma, eksik yanma ve kısmi eksik yanma olarak çeşitlendirilir.

En genel haliyle teorik tam yanma, reaksiyon sonucu ortaya tam yanma ürünleri çıkmaktadır. Bunlar CO_2 , H_2O ve N_2 emisyonlarıdır. Yanma reaksiyonun ihtiyaç duyduğu minimum oksijen koşullarında gerçekleşir. Reaksiyon için gereken hava miktarı teorik hava miktarı olarak adlandırılır. Gerçekte ihtiyaç duyulan havanın teorik hava miktarına oranı ise hava fazlalık katsayısı olarak adlandırılır ve Lambda (λ) ile ifade edilir. Teorik tam yanma durumunda Lambda değeri 1,00'dır. Denklem 2.1'de teorik tam yanma denklemi görülmektedir.

$$C_nH_m + \lambda * O_{min} * (O_2 + 3,76N_2) \rightarrow a * CO_2 + b * H_2O + c * N_2 \quad (2.1)$$

O_{min} değeri reaksiyonun ihtiyaç duyduğu minimum oksijen miktarını ifade eder ve denklem 3.2’de görüldüğü gibi hesaplanır. Burda “n” yakıtın sahip olduğu karbon sayısını, “m” ise hidrojen sayısını ifade etmektedir.

$$O_{min} = \frac{(m + n)}{4} \quad (2.2)$$

Tam yanma durumunda gereken hava miktarı teorik hava miktarından fazladır. Bu durumda hava fazlalık katsayısı 1,00’den büyük ($\lambda > 1$) olarak ifade edilir ve ürünler kısmında O_2 görülür.

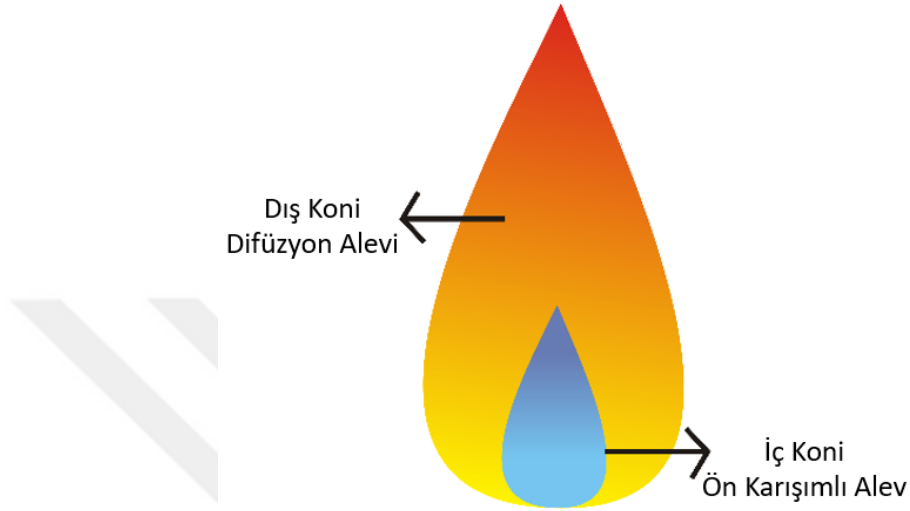
Eksik yanma durumunda ise, hava fazlalık katsayısı değeri 1,00’den küçüktür. Yakıt tam manada oksitlenemediğinden dolayı yanma ürünleri arasında CO gibi eksik yanma ürünleri de bulunur. Eksik yanma olayı enerji sarfiyatına yol açtığı için yanmanın tam olarak gerçekleşmesi istenmektedir. Eksik yanma, yanma veriminin düşmesi, yakıt sarfiyatının artması ve CO ile HC oluşumunu gibi durumlara sebep olmaktadır.

Kısmi eksik yanma, hava fazlalık katsayısından bağımsız olarak gerçekleşmektedir. Bu yanma tipinin sebepleri kısa yanma süreleri ve silindir içi sıcaklıklardır. Silindir içi sıcaklıklardan dolayı CO_2 , H_2O molekülleri ısıl ayrışmaya uğrar ve CO, OH, H radikallerinin ürünler kısmında meydana gelir.

Bir yanma sisteminde serbest oksijen ne kadar fazla ise oksitlenme oranı da doğrusal olarak artış gösterir. Bu durum yakıt sarfiyatında ve emisyon değerlerinde ciddi düşüşlere neden olmaktadır. Bu sebepten dolayı yapısında oksijen barındıran yakıtlar sıklıkla araştırma konusu olmaktadır. Di metil eter ve Etil alkol bu yakıtlara örnek olarak verilebilir. Ayrıca bir yakıt molekülünün kararlı olması yanma reaksiyonunun süresini ve tutuşma gecikmesi süresini arttıracaktır. Bu sebepten yakıt seçiminde daha az kararlı yapıda bir molekül tercih edilmektedir. Metil (CH_3) reaksiyon kinetiği için önemli bir moleküldür. Yakıt seçiminde sıklıkla tercih edilen Metil, daha kontrol edilebilir bir yanmaya neden olmaktadır.

Ayrıca alevler, reaktant tipine, akış durumuna ve diğer faktörlere bağlı olarak farklı kategorilere göre sınıflandırılırlar. Alevler, yakıt/oksitleyici karışımına göre Ön Karışım Alevler ve Difüzyon Alevleri olarak sınıflandırılır. Önceden karıştırılmış

alevler, yakıt ve oksitleyici yanmadan önce iyice karıştırıldığında meydana gelir. Difüzyon alevleri ise yakıt ve oksitleyici ayrı ayrı yanma bölgesinde karşılaşarak hızla reaksiyona girdiğinde meydana gelir. Alevin yapısı, dış koni (difüzyon alevi) ve iç koni (ön karışımli alev) olarak iki kısımda incelenebilir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Alevin genel yapısı

Alevler, akış laminar olduğunda Laminer Alevler ve türbülanslı olduğu durumda ise Türbülanslı Alevler olarak akışın reaktant yapısına göre sınıflandırılır (Ragland ve Bryden,2011:29-33). Alev türleri ve örnekleri Tablo 2.1’de görülmektedir.

Tablo 2.1. Alev tipleri ve kullanım alanları

	Ön Karışımli Alev	Difüzyon Alevi
Laminer Akış	Bunsen Brülörü	Mum Alevi
Türbülanslı Akış	Buji Ateşlemeli Motor	Sıkıştırma ile Ateşlemeli Motor

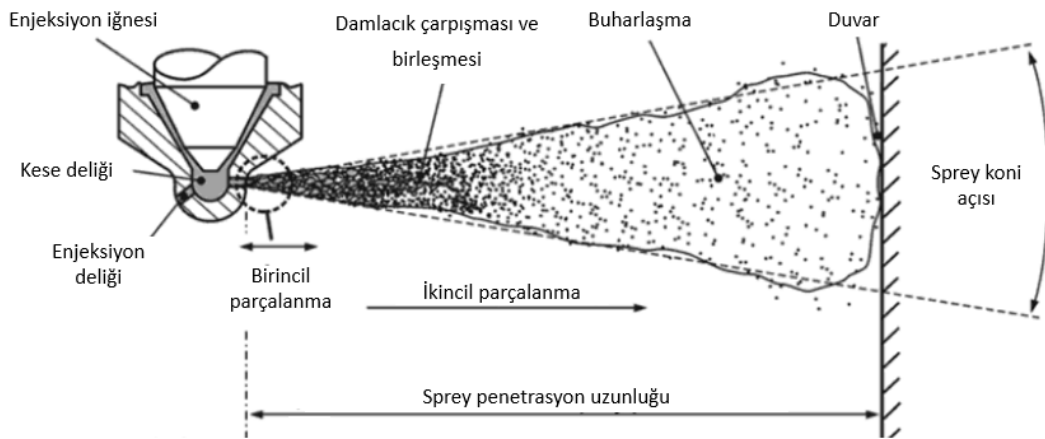
Difüzyon alevleri, yanma yoğunluğunu ve alev yapısını kontrol etmede sağladıkları daha fazla esnekliğe ek olarak, yakıt ve oksitleyiciyi birbirinden uzak tutmanın daha güvenli olması nedeniyle endüstriyel uygulamaların çoğunda tercih edilir. Öte yandan türbülans, laminar akışa kıyasla türbülans tarafından ortaya çıkan karıştırma artışı nedeniyle yanmada laminar akıştan daha fazla tercih edilir (Chigier,1981:359).

Öte yandan, yanma, reaktantların fiziksel durumuna göre sınıflandırılabilir. Homojen yanma terimi, Bunsen alevi gibi oksitleyici ile aynı fiziksel durumda olan yakıtın yanmasını tanımlamak için kullanılır. Heterojen yanma ise yakıt ve oksitleyici başlangıçta farklı fiziksel fazlarda olduğu durumlarda kullanılmaktadır. Buna bir parçasına ait partiküllerin havada yanması örnek olarak verilebilir. Yakma uygulamalarının büyük çoğunluğu yakıtın havada yakılmasına dayandığından; heterojen yanma temelde bu yakıtların yanmasının çok fazlı olması nedeniyle sıvı ve katı yakıtların yanmasında gerçekleşecektir. Ve aynı nedenden dolayı heterojen yanma, homojen yanmadan daha karmaşıktır. Bu nedenle, heterojen yanma boyunca meydana gelen kimyasal ve fiziksel süreçlerin anlaşılması gerekmektedir. Bu bilgiler doğrultusunda, mevcut çalışmanın kapsamı sıvı yakıtların hava içerisinde heterojen yanması olarak tabir edilir.

Yanma biçimlerinin doğasını etkileyebilecek sıvı yakıtların temel özelliği, yakıt-oksitleyici karışımının tutuşma noktasının genellikle sıvı yakıtın buharlaşma noktasından daha yüksek olmasıdır. Buna göre, yanma esas olarak gaz fazında gerçekleşecektir. Yakıtın buharlaşma eğilimine uçuculuk denir. Sıvı yakıtlar uçuculuklarına göre uçucu ve uçucu olmayan yakıtlar olarak sınıflandırılır. Uçucu yakıtlar genellikle buharlaşır ve oksitleyici ile karışır ve daha sonra buji ateşlemeli motorda benzin yanması gibi ön karışımli bir alev şeklinde yanar. Uçucu olmayan yakıtlar genellikle yanma sırasında buharlaşarak difüzyon alev konfigürasyonuna yol açar. Bu tip yakıtlara örnek, sıkıştırma ateşlemeli motordaki dizel yanması örnek olarak verilebilir. Dizel, yüksek basınçlı, yüksek sıcaklıktaki bir havaya spray şeklinde enjekte edilir, böylece sıvı yakıtın büyük kısmı, yerel olarak buharlaşacak ve yanacak daha küçük boyutlu damlacıklar halinde parçalanacaktır. Bu püskürtmeli yanma şekli, genel yanma süreci boyunca aynı anda etkileşime giren farklı fiziksel ve kimyasal süreçleri içerir. Bu etkileşim, bu süreçlerin her birinin doğasını ve mekanizmasını kavramak amacıyla bu tür süreçlerin araştırılmasına ve daha fazla analizinin yapılmasının önemini vurgular.

2.2. Sprey ve Atomizasyon

Yanan sıvı yakıt spreyi, önceden karıştırılmış gaz halindeki bir yakıttan oldukça farklıdır. Sprey olarak sisteme giren yakıt, ana akıma kıyasla rastgele yönlerde ve değişken hızlarda hareket eden ayrıık değişken boyutlu damlacıklar şeklinde bulunur. Yanıcı karışımındaki bu tek biçimli olmama biçimi, alevin püskürterek yayılmasında düzensizliklere yol açar. Sıvı yakıt yanması başlıca dört süreçten oluşur: sprej oluşumu, yakıtın buharlaşması, yanıcı karışım oluşumu ve karışım yanması. Yakıt spreji genellikle yakıtın bir memeden çok yüksek basınçta yanma odasına doğru enjekte edilmesiyle oluşturulur. Nozuldan çıktıktan sonra sıvı Şekil 2.2'de gösterildiği gibi konik bir sprej şeklini alır.



Şekil 2.2. Dizel sprejinin ayrışması

Kaynak: (Baumgarten,2006:68-122)

Sıvı parçalanması ve damlacık oluşumu atomizasyon olarak bilinir. Atomizasyon, sıvının hacimli formundan, gazlı bir ortamda damlacıklar ve diğer küçük parçacıkların diğer fiziksel dağılımlarından oluşan bir spreje dönüştürülmesi olarak tanımlanır. Bu yüksek basınçlı püskürtücüler veya hava destekli atomizörler ile gerçekleştirilebilir. Yanma sistemlerinin çoğu (endüstriyel fırınlar ve içten yanmalı motorlar gibi) atomize edilmeden önce kullanılamayan sıvı yakıtlar ile çalıştığından, yanmada atomizasyon önemli bir konudur. Atomizasyon ile elde edilen yüksek sıvı yüzey-kütle oranı nedeniyle daha yüksek buharlaşma ve karıştırma oranlarına ulaşılmaktadır. Atomizasyon sayesinde bu tür yakma sistemlerinde yanma veriminde artış görülmektedir (Lefebvre ve McDonnell,2017:126).

Atomizasyon sürecinde püskürtölmek üzere yakıt hattına gönderilen sıvı bir yüzey gerilimi altında levha şeklini alır. Püskürtme işlemi devam ettikçe bu yakıt levhası aerodinamik sebeplerle kararsız akış bölgesine girer ve parçalanmaya başlar. Bu parçalanma sonucunda birbirine tutunmuş damlacıkların meydana getirdiğı iplikler oluşur. Ve akabinde iplikler parçalanarak birden fazla damlacık oluştururlar. Püskürtmenin başladığı andan itibaren damlacıkların oluştuğı bu kısma kadar olan oluşum zinciri birincil parçalanma olarak adlandırılır. Oluşan damlacıkların boyutları birkaç mikrondan yüzlerce mikrona kadar değışkenlik gösterir. Oluşan bu damlacıklar aerodinamik kuvvetlere maruz kalmaya devam ederek parçalanabilir veya birleşerek yeni damlacıklar oluşturabilir. Bu sürece ise ikincil parçalanma denir.

Alev şekli damlacık boyutundan doğrudan etkilenir. Büyük damlacıklar genellikle sıvı fazın etrafında bir difüzyon alevi içinde yanarlar. Bu esnada alev cephesinin hemen dışında çok küçük damlacıkların tamamen buharlaşmasından dolayı ön karışımli bir alev görünümü fark edilir (Polymeropoulos ve Das,1975:251). Ayrıca, büyük boyutlu damlacıkların difüzyon yanma durumuna kıyasla, gelişmiş buharlaşma ve önceden karıştırılmış yanma durumunun baskın olması nedeniyle spreynin damlacık boyutunu azaltarak NO_x oluşumunun azaldığı bulunmuştur (Sarv vd.,1983:794). Bu sebeplerle, damlacık boyutunun yanma karakteristikleri ve hatta motor performans karakteristiklerini belirlemedeki bakın rolü göz ardı edilmemesi gereken bir durumdur. Bu nedenle, spreynin tek bileşeninin kapsamlı bir şekilde anlaşılması, daha genel spreynin yapısını açıklamak için yardımcı olacaktır. Bunun nedeni, yakıt spreynin çok sayıda küçük boyutlu damlacığın oluşturduğu bir bütün olmasıdır.

BÖLÜM III

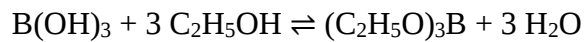
MATERYAL VE METOT

3.1. Yakıt Seçimi

Dizel yanma ile enerji elde etme yöntemlerinde önem arz eden bir yakıttır. Bununla birlikte, dizel yakıtında rastlanan en büyük problem yanma sırasında açığa çıkan CO, NO_x ve diğer kirleticilerdir. Dizel gibi göz ardı edilemeyecek kadar büyük bir enerji kaynağını kullanabilmek ve dizelin sebep olduğu sorunların üstesinden gelebilmek için araştırmacılar uzun yıllardır çalışmalarını devam ettirmektedir. Dizel ile oksijenli yakıtların harmanlanması CO emisyonlarını düşürmeye yarayan yöntemlerden birisidir.

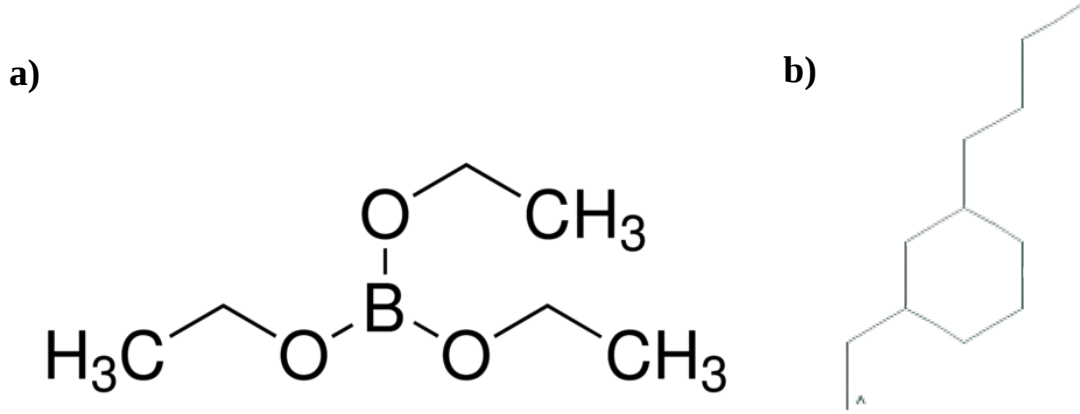
Ülkemizin, dünyadaki bor madeni rezervlerinin %72'sine sahip olduğu düşünülmektedir. Hijyen ürünleri, cam sanayii gibi kullanım alanları dışında, borun kimyasında saklı olan enerji potansiyelini kullanan sistemler sınırlı sayıdadır. Yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle bor parçacıkları, uzun yıllardır sevk sistemlerinde kullanım için ilgi konusu olmuştur. Bor, hidrokarbon yakıtlara kıyasla üç kat daha fazla hacimsel ısı değere sahiptir (Veith ve Pfitzner,2016:262). Ülkemiz açısından çok değerli bir rezerv olan bor elementinin, yüksek enerji içeriği nedeniyle yakma sistemlerinde katkı maddesi olarak kullanılması enerji verimliliğinde gözle görülür bir artışa neden olacağı bilinmektedir. Bunu yanı sıra karbon kaynaklı emisyonlarda azalma trendi gözlemlenecektir. Borun yanması moleküler seviyede gerçekleştiği için yeşil renkli bir alev gözlemlenir. Moleküler düzeydeki yanma olayları atomik seviyedeki yanma olaylarından daha verimlidir ve emisyonların kontrol edilebilir olması açısından büyük avantaj sağlamaktadır.

Trietil borat (TEB), B(OCH₂CH₃)₃ formülüne sahip renksiz bir sıvıdır. Borik asit ve etanolün bir esteridir (Brotherton ve Weber,2000:4). Borik asit ve etanolün asit katalizörü varlığında reaksiyonu ile oluşur. Aşağıda trietil borat denge reaksiyonu görülmektedir.



Oksijence zengin içeriğe sahip ve bor elementi barındıran trietil borat, yüksek enerji içeriğine sahip bir yakıttır. Bu sebeple, dizel ile trietil borat karışımı kirletici sorununa uygun bir çözüm sunmaktadır. Tüm bunlar göz önünde bulundurularak, mevcut

çalışmada dizel ve trietil borat ve bu yakıtların karışımlarının kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 3.1. Trietil borat (a) ve dizel (b) yakıtlarının kimyasal iskelet yapıları

3.2. Yakıt Karışımı Oluşturma

Yakıt harmanlama, belirli performans özelliklerine sahip bir nihai yakıt üretmek için farklı oranlarda karıştırma şeklinde baz yakıtta hidrokarbon yakıtlar, katkı maddeleri veya diğer bileşiklerin eklenmesi işlemi olarak tanımlanmaktadır (Babu ve Subraminian, 2013:3). Bu çalışmada, dizel ve trietil borat yakıtları laboratuvar şartlarında karıştırılarak deneylerde kullanılacak yakıtlar elde edilmiştir. Yakıtlara ait bazı özellikler Tablo 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Dizel ve Trietil Borat Yakıtlarının Özellikleri

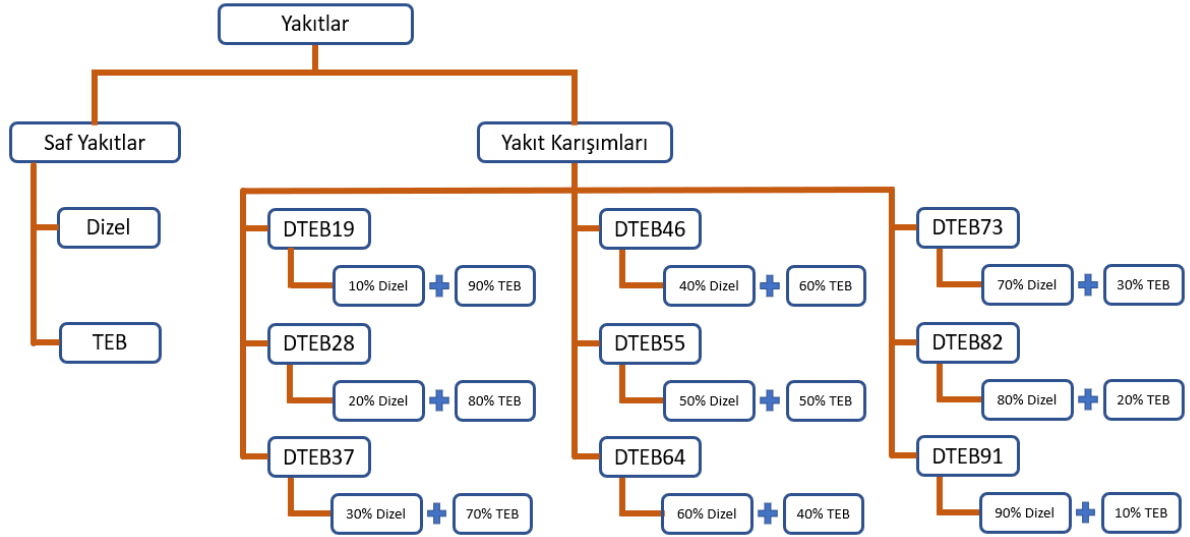
	<i>Trietil borat</i>	<i>Dizel</i>
<i>Formül</i>	$C_6H_{15}BO_3$	$C_{12}H_{23}$
<i>Yoğunluk</i>	0.858 g/cm ³	0.840 g/cm ³
<i>Erime Noktası</i>	188 K	267 K
<i>Kaynama Noktası</i>	391 K	493-673 K
<i>Parlama Noktası</i>	284 K	325 K
<i>Molar kütle</i>	145.99 g·mol ⁻¹	202 g·mol ⁻¹

Kaynak: (Alptekin ve Canakcı, 2008, Sigma Aldrich:a.g.i.s.)

Karışımlar kütlece ve yüzdesel olarak oluşturulmuştur. Kütlece oluşturulmasındaki en önemli neden yoğunluklarının çok yakın değerlere sahip olmasıdır. Ayrıca trietil boratın buharlaşma derecesinin çok düşük olması, dolayısıyla buharlaşması normal şartlar altında çok hızlı gerçekleştiğinden, deneysel kayıpların mümkün olabildiğince önüne geçilmiştir. Karışımlar oluşturulurken Şekil 3.2’de görülen hassas teraziden faydalanılmıştır.

**Şekil 3.2.** Hassas terazi

Trietil Borat yakıtı Sigma-Aldrich Kimyasal ürünlerinden tedarik edilmiştir. Karışımlar ve karışımların isimlendirmeleri Şekil 3.3’de gösterilmektedir.



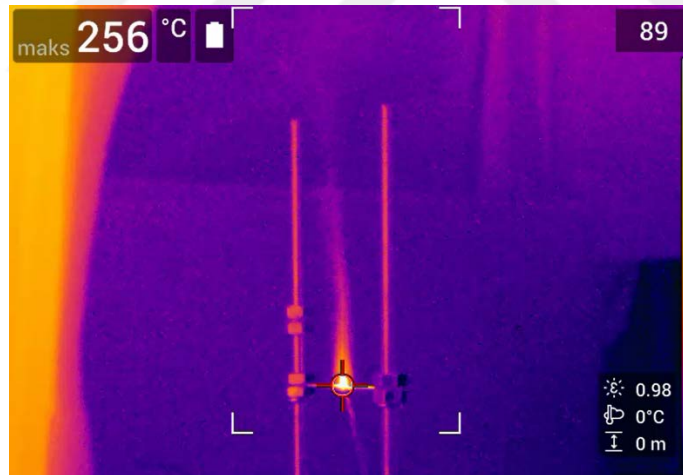
Şekil 3.3. Yakıtlar ve yakıt karışımlarının adlandırılmaları

Karışımların adlandırılmaları yapılırken yakıtları temsil edecek kısaltmalar ve karışım oranlarını temsil edecek sayılar kullanılmıştır. Dizel “D”, trietil borat “TEB” olarak kısaltılmıştır ve sırasıyla ilk rakam dizel oranını, ikinci rakam trietil borat oranını temsil etmektedir. Örnek olarak; %10 dizel ve %90 trietil borat içeren bir karışım DTEB19 olarak isimlendirilmiştir.

3.3. Damlacık Oluşturma ve Ateşleme

Damlacık oluşturmak için kullanılan üç ana yöntem bulunmaktadır. Bunların ilki yakıtın yanma sırasında ince bir yakıt tabakası oluşturmak için dairesel kesitli bir yapı (şırınga vb.) içerisinde verilmesidir (Sankaranarayanan vd.,2019:4). İkinci teknik damlacığın serbest haldeyken yanmasıdır. Bu teknik çok küçük damlacıkların incelenmesinde kullanılmaktadır (C. H. Wang vd.,1984:175-197). Üçüncü ve en sık kullanılan teknik ise ince bir filament üzerinde damlacık süspansiyonunu göstermektedir. Bu teknik, daha kolay ve daha hassas yanma takibi için nispeten sabit bir damlacık konumu sunduğundan, tüm yöntemler arasında en çok kullanılanıdır (Ooi vd.,2019:11809; Pandey ve Basu,2019:174; Rasid ve Zhang,2019:3405; Shang vd.,2020:16613-16623).

Mevcut çalışma için, damlacığı sabitlemek için damlacık süspansiyon yöntemi kullanılmıştır. Çünkü damlacık sıvı-faz dinamiğinin incelenmesi, damlacığın belirli bir konumda sabitlenmesini gerektirir. Bu sebeple herhangi bir dalgalanma veya aşırı hareket olmadan tüm yanma süresi boyunca kamera görüş alanında olması gerekmektedir. Bu, damlacık süspansiyonu ile sağlanır. Aynı nedenle, yanma sırasında meydana gelen iç süreçlerin daha kolay takip edilebilmesi için damlacık boyutunun büyük olması gerekir. Buna göre, artan damlacık boyutu, damlacığı askıya almak için çok ince filament kullanmayı zorlaştırır. Öte yandan, filament malzemesinin dikkatli seçilmesi gerekmektedir. Yanma sırasında damlacık süspansiyonu için uygun olan herhangi bir malzemenin alev sıcaklığından daha yüksek bir erime noktasına sahip olması gerektiği açıktır. Yapılan öncü denemelerde farklı karışımlar denenmiş ve ortalama olarak 523 K yanma sıcaklığına erişilmiştir. Bakır (Cu) tel bu işlem için uygun bulunmuştur. Bakır erime sıcaklığı (1357,77 K), öncü deneylerde elde edilen damlacık yanma sıcaklığının iki katından fazladır. Bu sebeple damlacık süspansiyonu için 1 mm bakır tel kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 3.4. Öncü deneylerden termal görüntü

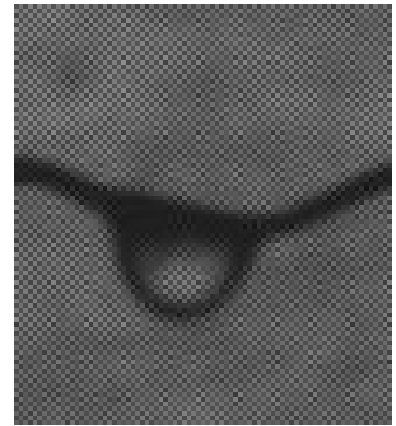
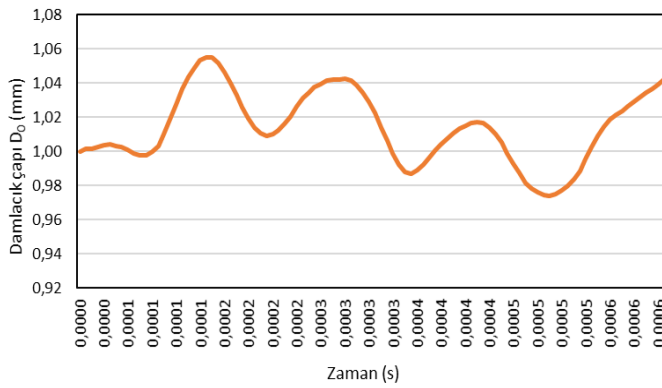
Damlacık oluşturma işlemi, Şekil 3.5'te gösterildiği gibi Micropipette Transferpette® laboratuvar tipi bir mikro pipet kullanılarak gerçekleştirilir. Otomatik pipet, ayarlanabilir ya da belirli sabit miktarlarda ölçümler ve transfer yapabilen cihazdır. Yapıları itibarı ile bir şırınga gibi sıvıları çekip boşaltma işlemi yapabilmektedir. Sıklıkla laboratuvarlarda hassas işlemler için kullanılmaktadır. Bu

sayede 4.15 ± 0.25 μl miktarlarında damlacık oluşturma işleminin yapılabilirliği sağlanmıştır.



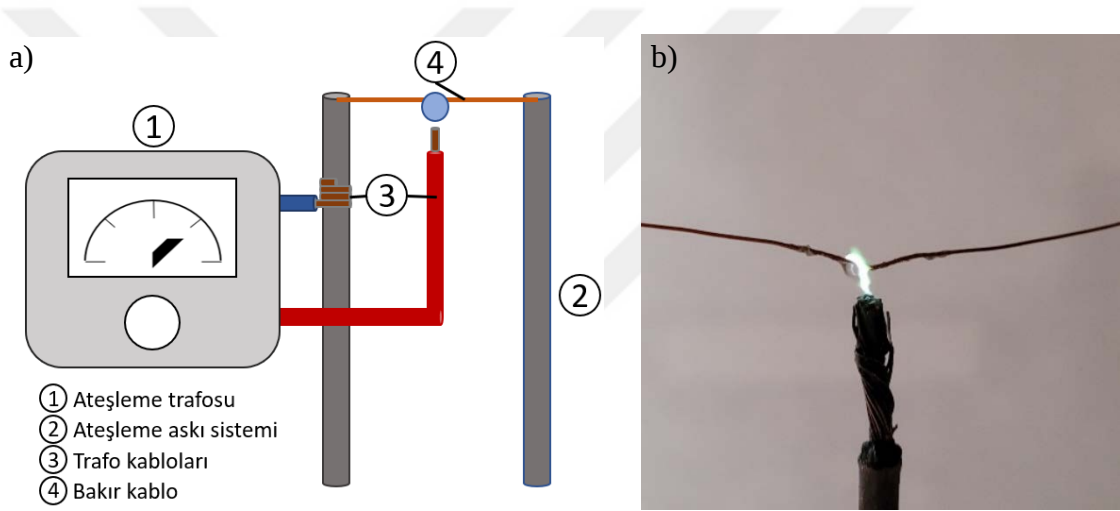
Şekil 3.5. Damlacık oluşturmak için kullanılan mikro pipet

Deneylerde oluşturulan tüm damlacıkların başlangıç çapları, görüntü işleme kullanılarak değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, pratik uygulamalarda gerçek boyuta kıyasla bu nispeten büyük bir damlacık boyutudur. Ancak sıvı fazdaki süreçleri görselleştirmek ve izlemek için gereklidir. Büyük boyutlu damlacıklar geçmişte yapılan araştırmalarda kullanılmış ve günümüzde sürekli olarak damlacık yakma araştırmaları için kullanılmaktadır. Çünkü gerçek boyutlu olana kıyasla daha büyük bir damlacık oluşturmak ve araştırmak daha kolaydır. Bu nedenle, mevcut çalışmada üretilen ve incelenen damlacıklar, gerçek damlacık boyutundan daha büyüktür.



Şekil 3.6. Damlacık boyut analizi kalibrasyonu

Mevcut çalışmada, elektrik arkı ateşleme yöntemi kullanılarak damlacık ateşlemesi gerçekleştirilmiştir. Elektrik arkı, gazların kıvılcım anında ortaya çıkması ile oluşan elektrik olayıdır. Literatürde sıcak tel ile ateşleme (Ghamari ve Ratner,2016:63-70; Hoxie vd.,2014:22-29), ön yanma ile ateşleme (Rasid ve Zhang,2019:3406) ve ısıtıcı buji ile ateşleme (Ooi vd.,2019:11810) tekniklerinin yanında, elektrik arkı gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda damlacığı tutuşturmak için yaygın olarak kullanılmaktadır(Law,1976:17-22; Liu vd.,2015:1711; J. Wang vd.,2021:3). Elektrik arkı, sisteme herhangi bir kütle geçişine neden olmadığından ve buji ateşleme sistemiyle çok yakından ilgili olduğundan çalışma için avantajlı bir sistem olarak değerlendirilmiştir.



Cihaz, bir akü sarj cihazı modifiye edilerek elde edilmiştir. Tel üzerinde asılı duran yakıt damlacıkları, bir ateşleme sistemi tarafından 20 ms aralıklarla sağlanan kısa süreli (1 ms) ve yüksek enerjili (6 kV) kıvılcımlarla atmosfer basıncında tutuşturulmuştur. Damlacık askıya alındıktan sonra, damlacıktan 10 mm uzağa bir negatif uçlu kablo yerleştirilir. Pozitif uçlu kablo ise bakır telin bağlı olduğu askı sistemine tutturulmuştur. Böylece akım iletken olmayan hava tarafından iletildiği anda elektriksel ark oluşur ve akım sırasıyla damlacık ve bakır tel yolunu takip ederek pozitif uca ulaşır. Negatif uç ve bakır tel arasında oluşan ark, damlacığı tutuşma noktasına gelene kadar ısıtarak damlacığın yanmasına neden olur.

3.4. Görüntüleme Sistemi kurulumu

Her ölçüm tekniğinin belirli bir görev için uygun olmasını sağlayan kendi yetenekleri ve sınırlamaları vardır. Bu nedenle, araştırmadan istenen sonuçların elde edilmesi için tekniğin dikkatli bir şekilde seçilmesi gerekmektedir. Mevcut çalışmada, dizel ve trietil borat karışım damlacıklarının yanmasına ait süreçler, yüksek hızlı ve termal görüntüleme kullanılarak araştırılmaktadır. Damlacığın ömrü boyunca şekli ve boyut değişikliği, alev boyu, alev sıcaklığı ve alev çapı gibi bazı durumları aynı anda incelemek için tek bir görüntüleme tekniği kullanmak uygun değildir. Bu nedenle, farklı odaklama seviyelerinde damlacık yanmasını incelemek için mevcut çalışmada sırayla iki görüntüleme tekniği kullanılmıştır. Teknikler, aşağıda ana optik bileşenlerinin açıklamasıyla birlikte sunulan arkadan aydınlatma ve kendinden aydınlatmalı görüntüleme teknikleridir. Tüm deney düzenekleri ve açıklamaları devam eden bölümlerde belirtilmektedir.

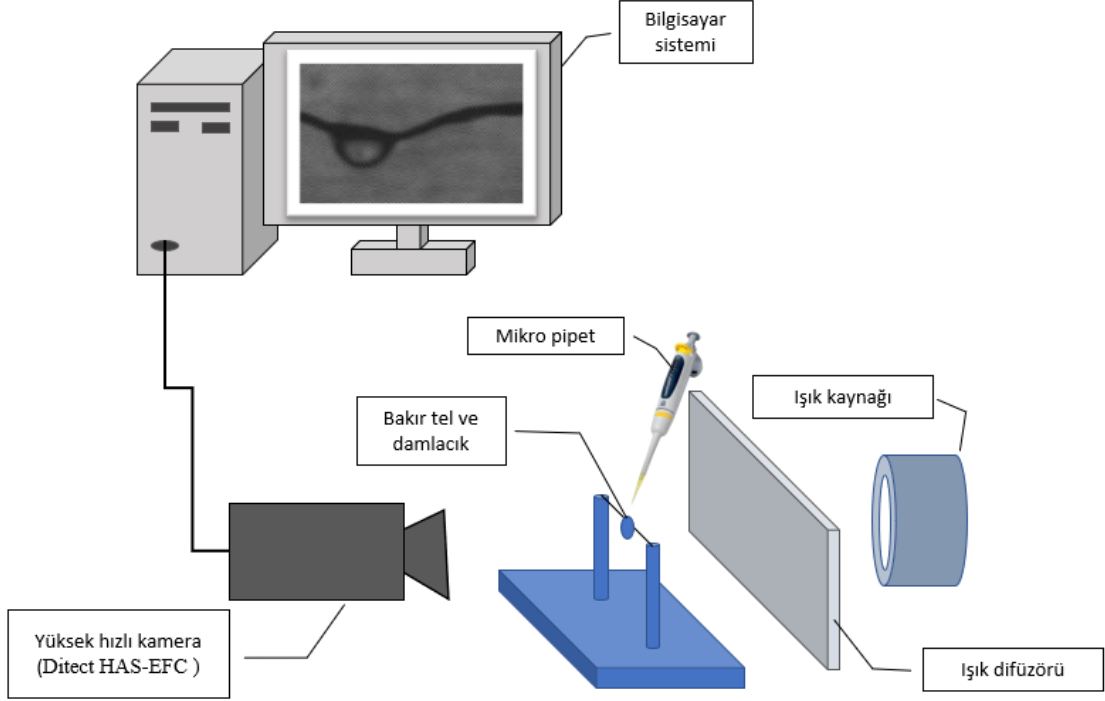
3.5. Arkadan Aydınlatmalı Görüntüleme

Mevcut çalışmada, damlacık sınırlarının keskin kenarlarının elde edilmesi için arkadan aydınlatmalı görüntüleme kullanılmıştır. Arkadan aydınlatmalı görüntüleme için optik kurulumun ana bileşenleri Şekil 3.8’de gösterilmektedir. Gerekli büyütmeyi elde etmek için yüksek hızlı kamera ile manuel lens içeren bir objektif kullanılmıştır. Objektife ait özellikler tablo 3.2’de gösterilmektedir. Görüntüleme için gereken arka ışığı oluşturmak için bir plazma LED aydınlatıcı (a) kullanılır. Aydınlatma 100W gücünde NOAS marka led projektör kullanılarak yapılmıştır. Işık yoğunluğunu azaltmak için ışık kaynağı ile damlacık arasına yarı saydam beyaz ışık difüzörü (b) monte edilmiştir.



Şekil 3.8. Görüntüleme sistemi ana bileşenleri. (a) 100W LED aydınlatma, (b) Işık difüzörü, (c) Yüksek hızlı kamera ve objektif

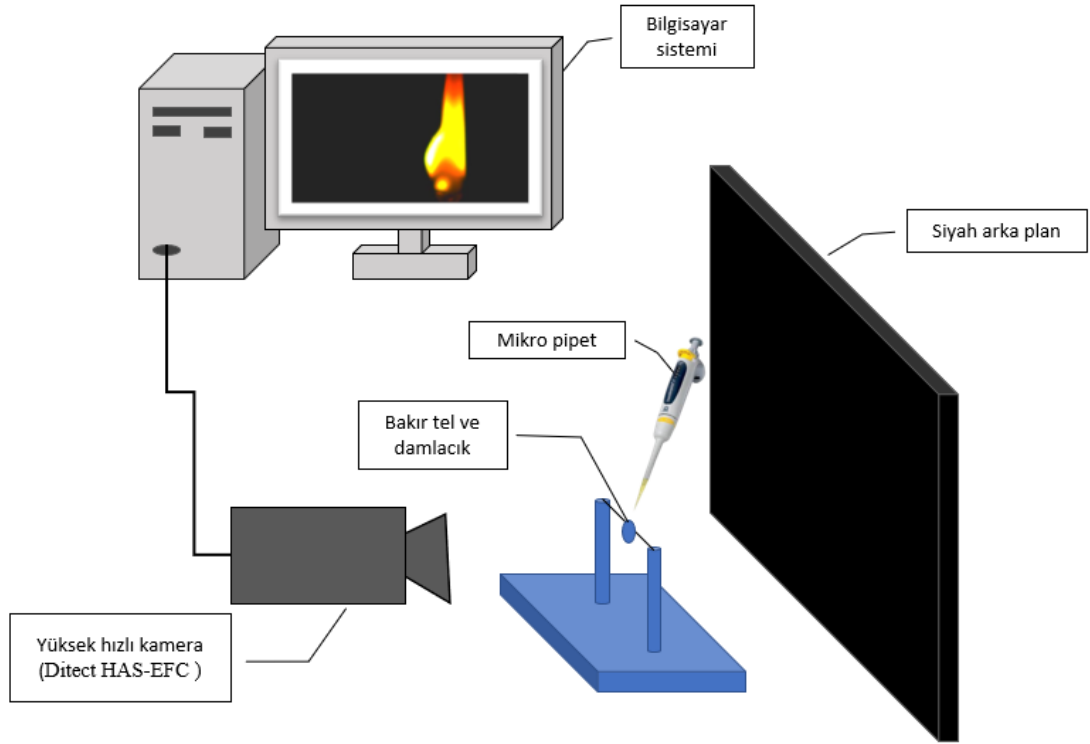
Bu optik kurulum kullanılarak 10x büyütme oranına erişilebilmektedir. Bu nedenle, damlacık ömrü boyunca değişimlerinin takibi daha detaylı şekilde yapılmıştır. Sisteme ait şema Şekil 3.9’da görülmektedir.



Şekil 3.9. Arkadan aydınlatmalı görüntüleme sistemi şeması

3.6. Kendinden Aydınlatmalı Görüntüleme Sistemi

Mevcut çalışmada, damlacıklara ait alev uzunluğu ve alev çapı görsellerinin elde edilebilmesi için kendinden aydınlatmalı görüntüleme sisteminden faydalanılmıştır. Bu sisteme ait görüntüleme sistem bileşeni olarak sadece Şekil 3.8 (c)'de görülen yüksek hızlı kamera ve objektif kullanılmıştır. Tekniğin prensibi gereği LED aydınlatmaya ve ışık difüzörüne ihtiyaç duyulmamıştır.



Şekil 3.10. Kendinden aydınlatmalı görüntüleme sistemi şeması

Açıklanan teknikler, Şekil 3.7 (c)'de gösterilen tek bir 2560x2048 pixel çözünürlüklü Ditect HAS-EFC Yüksek Hızlı Renkli Kamera kullanılarak ardışık olarak yürütülmüştür. Kamera görüntüleme koşulları, her teste göre değişmiştir ve elde edilen büyütme oranı ve uzamsal çözünürlük ile birlikte Tablo 3.2'de listelenmiştir. Elde edilen görüntüler, özel olarak oluşturulmuş ve geliştirilmiş Matlab algoritmaları kullanılarak analiz için (JPEG) dosya formatında saklanır. İşleme yapısı ve prosedürleri bir sonraki bölümde açıklanmıştır.

Tablo 3.2. Kamera görüntüleme koşulları

Sistem	Zoom	Diyafram	Odak	Çözünürlük	FPS
Arkadan Aydınlatma	S.N	F1.4	x1	600*800	1400
Kendinden aydınlatma	69 mm	F22	x10	600*800	1400

3.7. Termal Görüntüleme Sistemi

Mevcut çalışmada, damlacıklara ait alev sıcaklıkları ve görünmeyen alev uzunluğu görsellerinin elde edilebilmesi için termal görüntüleme sisteminden faydalanılmıştır. Görüntüleme sistemi bileşeni olarak FLIR E96 marka termal kamera kullanılmıştır. Kamera ± 2 K (Kelvin) veya ± 2 % hata oranına sahiptir ve 600x800 pixel görüntü elde edebilmektedir.

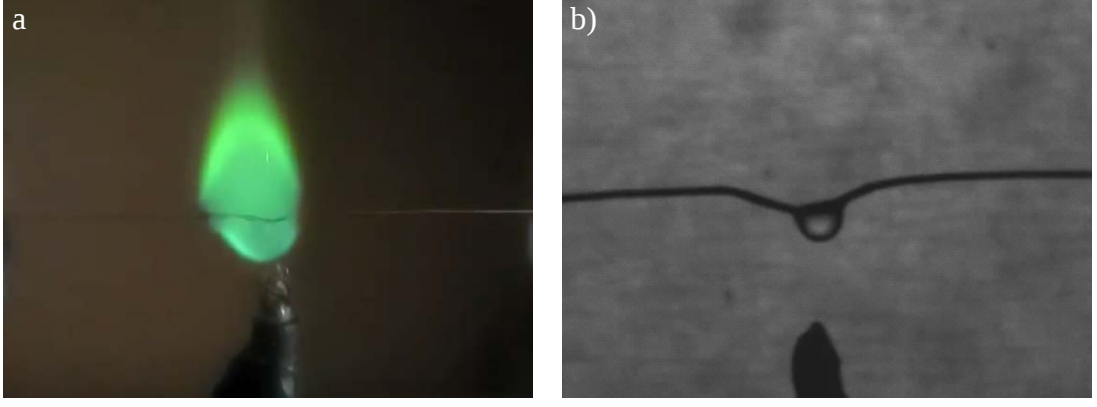


Şekil 3.11. Termal kamera (a) ve elde edilen alev görüntüsü (b)

3.8. Görüntü İşleme

Görüntü elde etme, deneysel çalışmada son işlemdir ve aynı zamanda görüntü işleme için gereken ilk işlemdir. Görüntü işleme, tam analizin gerçekleştirilmesi için esastır, çünkü görüntü kendi başına bir anlam ifade etmemektedir. Asıl amaç görüntü içinde yer alan bilgilerdir. Bu sebeple görüntüleri veriye dönüştürmek gerekmektedir. Bu nedenle, elde edildikten sonra, gerekli özellikleri çıkarmak için görüntüler üzerinde sırayla bir dizi işlem gerçekleştirilir.

Öncelikle görüntü iyileştirme işlemi yapılır. Görüntü iyileştirme, belirli uygulamalar için orijinalinden daha uygun bir görüntü elde etmek için görüntü işleme sürecidir. Bu süreç, verimli bilgisayar destekli analiz için görüntü kontrastını ve nesne netliğini geliştirerek gerçekleştirilir. Bununla birlikte, görüntü iyileştirme kriterleri bir standarta sahip değildir. Görüntü işleme uygulamasına bağlı olduğundan genellikle öznelidir. Bu nedenle, mevcut çalışmada görüntü iyileştirme, ilk önce görüntüyü renkli formatından gri tonlamalı formata Şekil 3.12'de gösterildiği gibi dönüştürerek gerçekleştirilir.



Şekil 3.12. Renkli damlacık görüntüsü (a) ve gri tonlamalı damlacık görüntüsü (b)



BÖLÜM IV

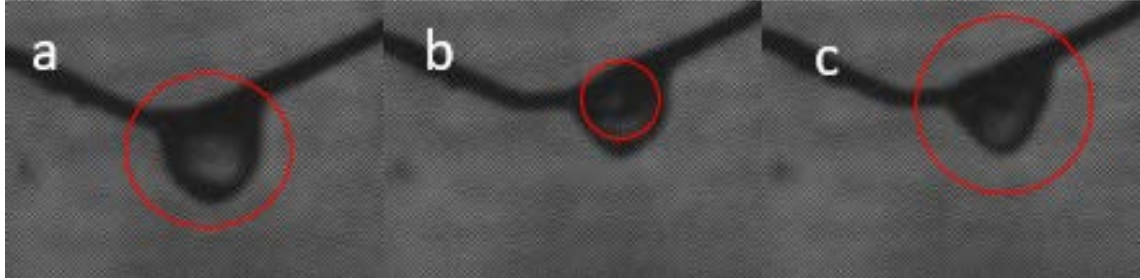
BULGULAR

Bu bölümde incelenen iki saf yakıt (dizel ve TEB) ve bunların yüzdece karışımlarından oluşan dokuz ayrı karışım yakıta ait elde edilen veriler detaylıca incelenecektir. Çok bileşenli yakıt karışımları, bölüm 3.2’de açıklanan prosedürlere göre deneylerden önce laboratuvarında hazırlanmıştır. Testler her yakıt için birçok kez yapılmıştır ve her kurulum için her durumda beş başarılı test seçilerek işlenmek üzere kaydedilmiştir. Görüntüler JPEG formatında saklanmıştır ve bölüm 3.8’da açıklanan işleme prosedürleri izlenerek özel olarak yazılmış Matlab algoritmalarına göre işlenmiştir. Bu algoritmaların akış şemaları Ek 1’de gösterilmiştir. Elde edilen parametreler devam eden bölümlerde daha ayrıntılı olarak tartışılmaktadır. Deney düzeneklerine ait şematik diyagramlar Şekil 3.9 ve Şekil 3.10’da gösterilmiştir. Damlacık, bölüm 2.3’te açıklanan bakır tel üzerinde süspanse edilmiştir. Bu tel, kameraya göre damlacık konumunun daha kolay kontrolü için bir standının üzerine yerleştirilir. Bu deney boyunca damlacık yanmasını izlemek için 3.5 ve 3.6 bölümlerinde açıklanan optik kurulumla arkadan aydınlatmalı görüntüleme ve kendinden aydınlatmalı görüntüleme kullanılmıştır. Bu teknikler hem damlacığın hem de karşılık gelen alevin sınırlarının keskin bir şekilde görselleştirilmesinin faydalarını sunar. Bu sınırlar daha sonra damlacık yanma ilerlemesine göre damlacık boyutu gelişimini ve alev boyutu varyasyonunu izlemek ve hesaplamak için kullanılmıştır. Bunlara ek olarak termal kameradan faydalanılarak sıcaklık değişimleri gözlemlenmiştir.

4.1. Damlacık Çapı Değişimi ve Damlacık Dinamiği

Çok bileşenli yakıt damlacığının yanması, üfleme, alt-damlacık oluşumuna yol açan ikincil atomizasyon ve genel damlacık ömrü boyunca bazen mikro patlama ile karakterize edilir. Bu süreçlerin çok bileşenli yakıt damlacıklarının yanması üzerindeki başlangıcı, gelişimi ve etkisinin daha fazla anlaşılması gerekmektedir. Gerçek püskürtme içindeki yakıt damlacıklarının boyutu düşünüldüğünde, püskürtmeli yanma sırasında bu süreçleri incelemek oldukça zordur. Bu sebeple, boyut olarak daha büyük ve izole edilmiş bir damlacık oluşturularak bu fenomen incelenebilir. Yanma sırasında damlacık yüzeyinin ve çevreleyen ortamın büyütülmüş görselleştirilmesi, üfleme ve mikro patlama

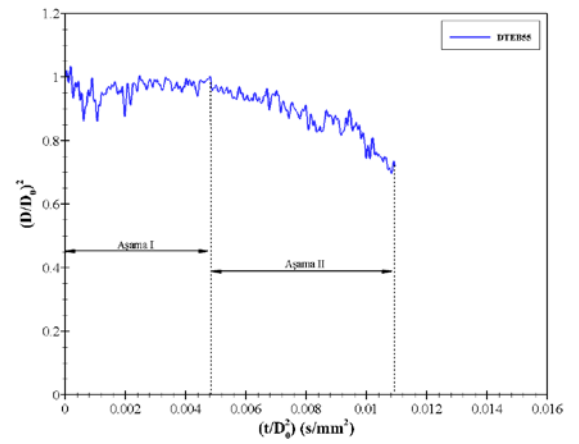
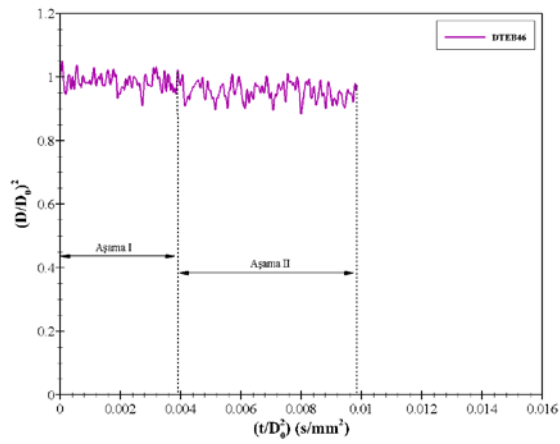
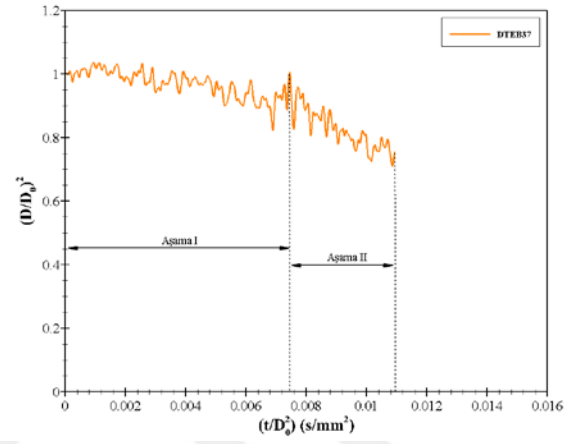
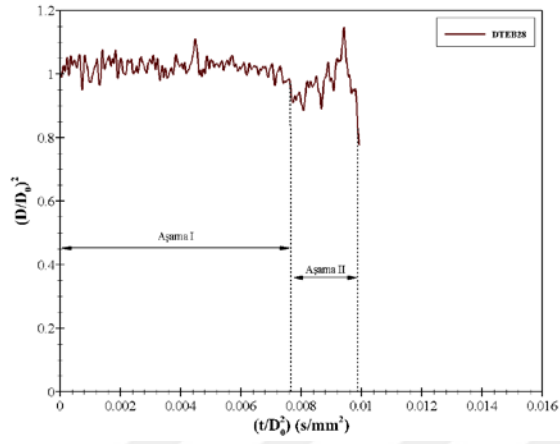
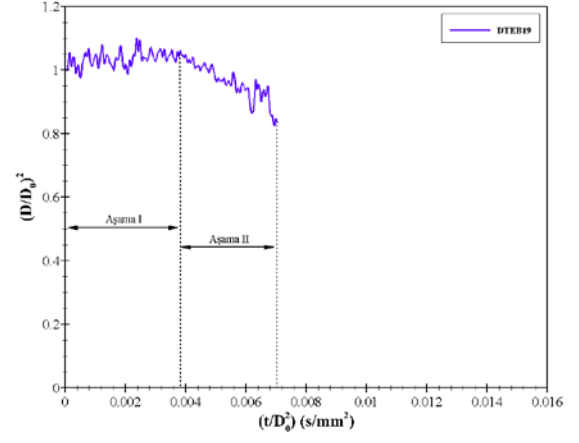
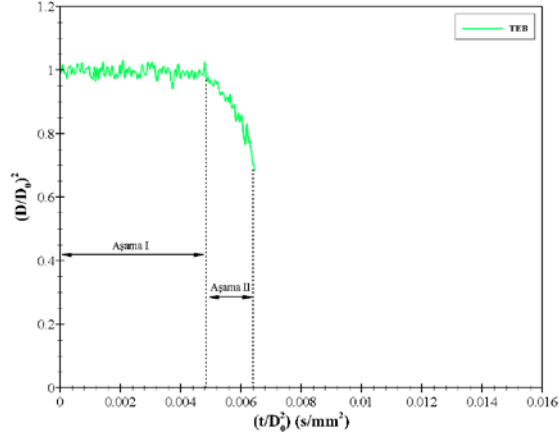
oluşumu ve dolayısıyla ana damlacığın ikincil atomizasyonundan dolayı alt damlacık oluşumu hakkında daha derinlemesine bilgi edinebilmemizi sağlayacaktır.

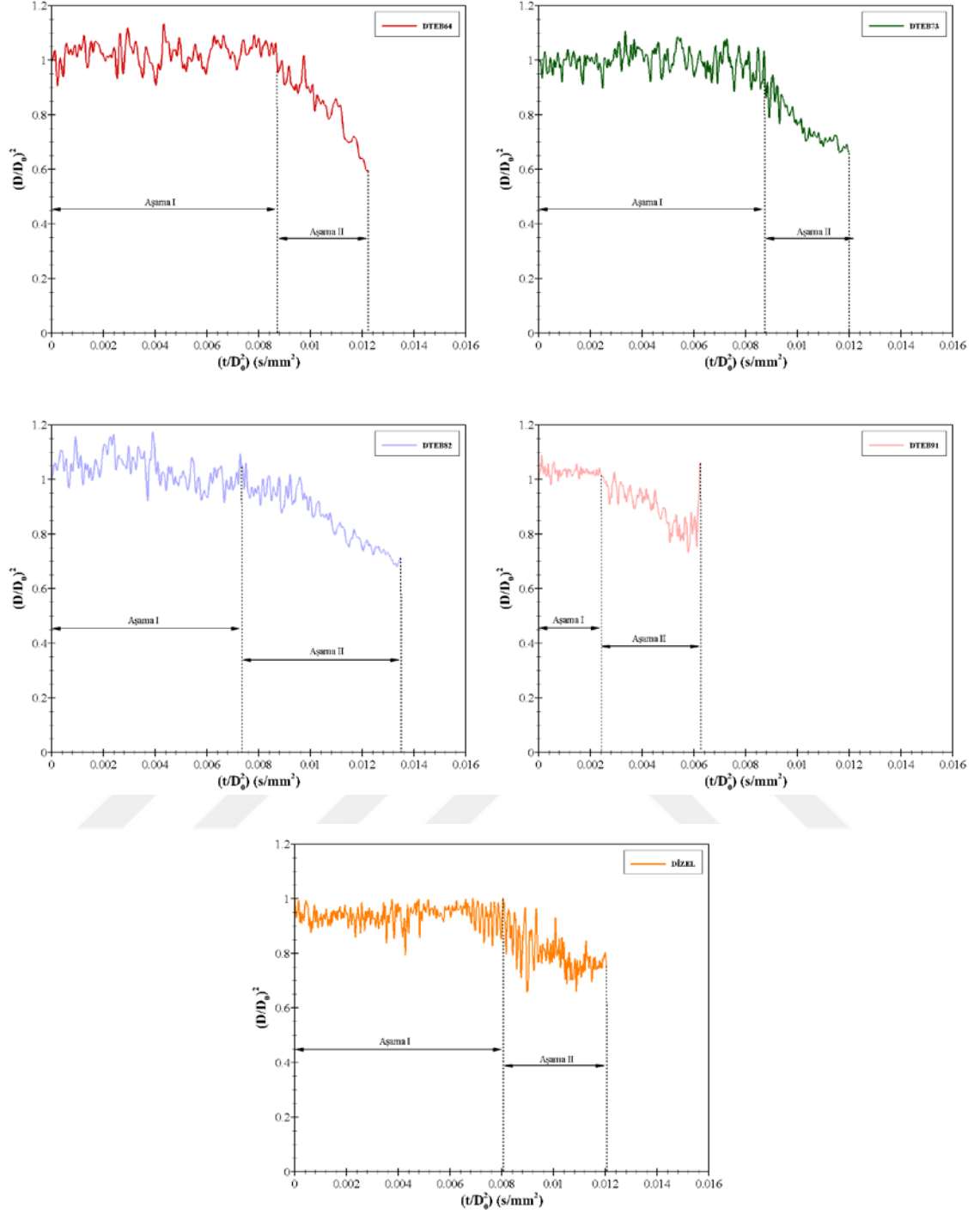


Şekil 4.1. DTEB64 damlacık dinamiği; a) faz ayrımı, b) çekirdeklenme, c) genişleme

Mevcut çalışmada test edilen tüm yakıtlar için zamanla damlacık boyutunun değişimi bu bölümde gösterilmektedir. Bunlar, çok bileşenli yakıtlar olarak TEB ve dizel karışımları ve ek olarak tek bileşenli yakıtlar olan dizel ve TEB'tir. Damlacık boyutu evrimi, çapının karesi cinsinden ifade edilir. Yanma sırasında damlacık görüntüleri kullanılarak takip edilmiş ve kaydedilmiştir. Damlacık boyutu, yakıtlar arasındaki karşılaştırmada ilk damlacık boyutu değişiminin etkisini ortadan kaldırmak için damlacık başlangıç çapının karesi ile sadeleştirilmiştir. Ani yanma süresi de toplam damlacık ömrü ile normalize edilerek yakıtlar arasındaki yanma süresi farkının etkisi ortadan kaldırılmıştır. Böylece, test edilen tüm yakıtlar için damlacık yanma davranışının değerlendirilebilirliği, zaman alanını birleştirerek daha uygun hale getirildi. Şekil 4.2'de listelenen tüm yakıtlar, tam yanmadan geçen, yani başlangıç boyutundan tükenene kadar olan damlacıklardır. Şekil 4.2'nin ilk satırından başlayarak yakıtların boyut gelişimini gösterilmektedir. Sırasıyla saf TEB ile başlayarak karışımların TEB oranlarının azalacağı, dizel oranının artacağı şekilde sıralanmıştır. Böylece yakıtların damlacık ömrü üzerindeki etkileri daha takip edilebilir olacaktır.

Bir damlacığın ömrü boyunca çap küçülmesi iki aşamadan oluşmaktadır. Aşama I olarak ifade edilen kısım, damlacıkta faz ayrımı, şişme-büzülme ve buharlaşma mekanizmalarının görüldüğü ısınma sürecidir. Aşama II kısmı ise buharlaşmanın şişme-büzülme döngüsünün önüne geçmesiyle başlar (Pandey ve Basu,2019:175; Shang vd.,2020).

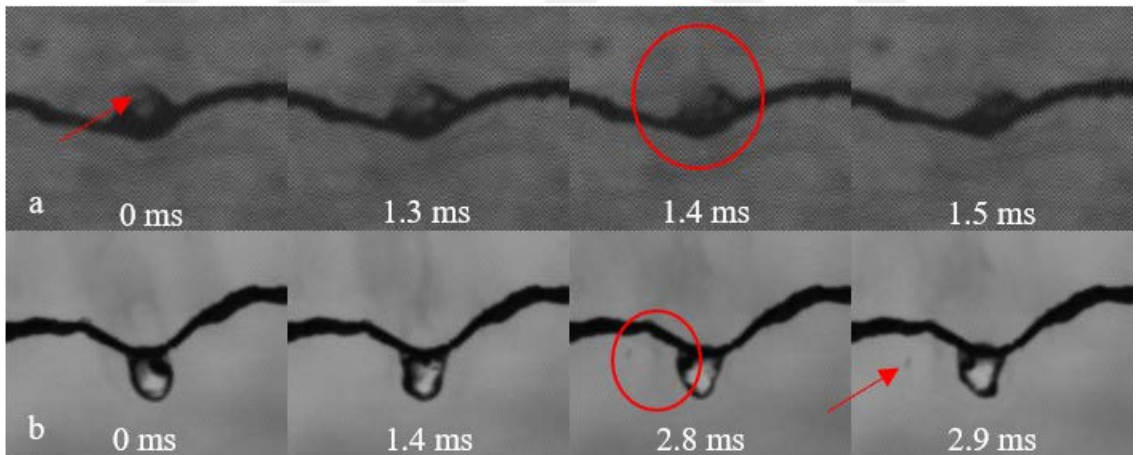




Şekil 4.2. Damlacık çapı değişimi grafikleri

Dizel ve TEB ile karşılaştırıldığında; dizel yoğunluklu yakıt karışımlarına gelindikçe damlacık ömründe artış olduğu fark edildi. Bu, çok bileşenli karışımlardaki daha az uçucu bileşenin ısıtılması ve daha erken buharlaşmasıyla ilgilidir. Bu bileşenler damlacık içinde kaynamaya ve buharlaşmaya başlar ve buhar oluşumuyla artan iç basınç nedeniyle damlacık boyutunun artmasına neden olur (Lasheras vd.,1981:293-305).

Mevcut çalışmada dizel TEB yakıtına göre daha az uçucu bileşendir. Bu nedenle, TEB önce buharlaşacak ve dizelin damlacık merkezinde birikmesine neden olacaktır. Bu, dizel ve TEB arasında bir tür çekirdeklenme ve faz ayrımı ile sonuçlanmaktadır. Belirli bir süre sonra, TEB'in tükenmesi ve dizel birikimi nedeniyle karışımın konsantrasyonları değişecek ve yeni bir yüksek dizel konsantrasyonu karışımı oluşacaktır. Bu nedenle dizel, konsantrasyon gradyanı nedeniyle damlacık yüzeyine doğru hareket etmektedir. Bununla birlikte, damlacık yüzeyinde dizel, TEB'dan daha yüksek bir sıcaklıkta buharlaşacaktır. Bu, damlacık yüzey sıcaklığının artmasına ve buna bağlı olarak damlacık içindeki sıcaklığın da artmasına neden olacaktır. Sonuç olarak, bu damlacık içinde sıkışan dizel kaynamaya başlayacak ve damlacığın genişlemesine neden olan kabarcıklar üretecektir. Bu genişlemenin, damlacık ömrünün ikinci yarısında ve TEB'tan ziyade dizel ve karışımlarda meydana geldiği görülmektedir. Bu durum dizelin bileşenleriyle ilgili olabilir. Dizel yakıtı, farklı uçuculuklara sahip farklı bileşenlerin oluşturduğu bir karışım olduğu için, dizel damlacığının çok bileşenli yakıt damlacıklarına benzer şekilde davranmasını sağlar.

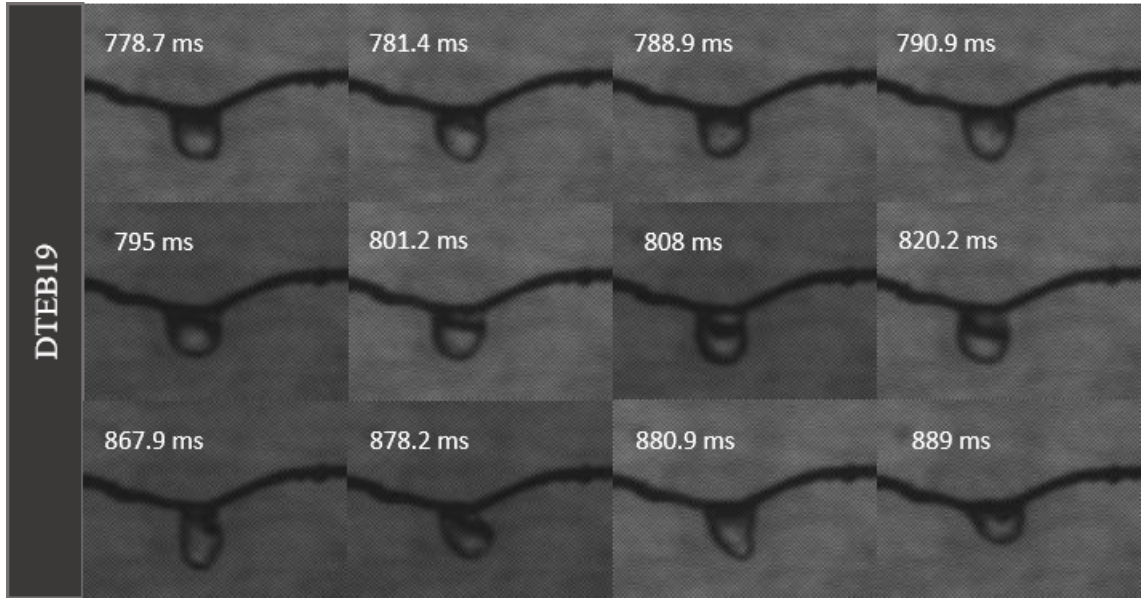


Şekil 4.3. Dizel (a) ve TEB (b) damlacık yanması sırasında meydana gelen üfleme olayı

Dizel damlacığındaki üfleme olayları, dizel ve TEB damlacıkları içindeki heterojen çekirdeklenmeyle ilgilidir. Bu heterojen çekirdeklenme, damlacık tarafından kapsanan bakır tel bölümünde hapsedilmiş gaz cepleri ve beklenmedik kirletici partiküller veya bakırın kendisinin ısınmasından kaynaklı etkisi gibi birçok nedenden dolayı gerçekleşebilir.

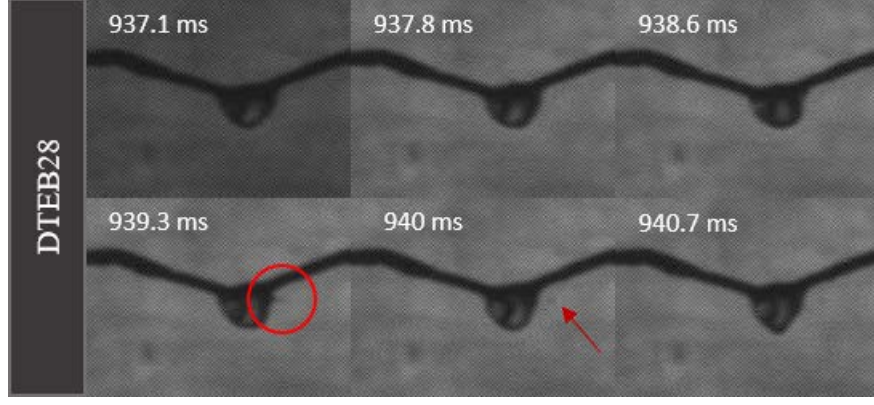
Genellikle üfleme süreci, damlacık yüzeyinden bir alt damlacık oluşmasıyla devam etmektedir. Bu alt damlacık oluşumu ikincil atomizasyon olarak adlandırılır. Bu durum

üfleme olayının kendisi nedeniyle ya da üfleme sonrası damlacık geri tepmesi nedeniyle gerçekleşir. İkincil atomizasyonun nedenine rağmen, yüzey alanını artırarak sıvı yakıtın buharlaşmasını ve hava-yakıt karışımını geliştirdiği için oluşumu yakıt spreyinin genel yanma verimliliği için faydalıdır. Bu nedenle, çok bileşenli yakıt karışımının ikincil atomizasyon eğilimini incelemek ve karışımın farklı oranlarının bu eğilim üzerindeki etkisini değerlendirmek önemlidir.



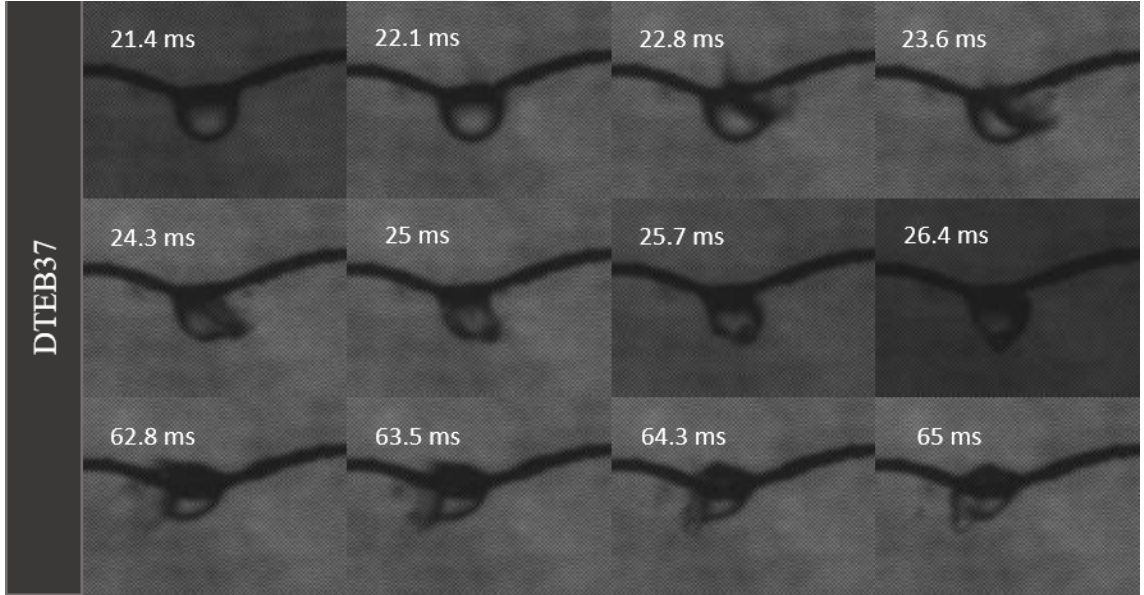
Şekil 4.4. DTEB19 yakıtına ait damlacık görüntüleri

Şekil 4.4 üfleme meydana geldikten sonra DTEB19 damlacığının geri tepmesini göstermektedir. Bu geri tepme, damlacık sıvı yüzey gerilimi ile buhar jeti püskürmesi tarafından oluşturulan kuvvetler arasındaki etkileşimin bir sonucudur.



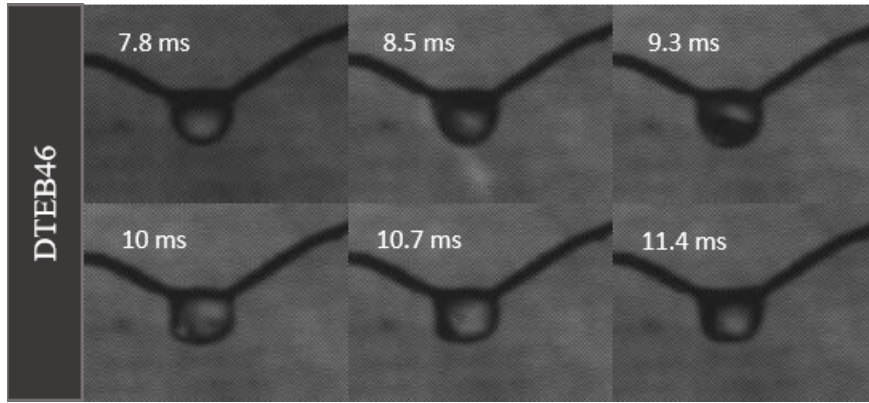
Şekil 4.5. DTEB28 yakıtına ait damlacık görüntüleri

Şekil 4.5, yanma sırasında bir DTEB28 yakıt damlacığından alt damlacık oluşum prosesini göstermektedir. Bu alt damlacığın, üflemeden sonra damlacık geri tepmesinden sonra oluştuğu görülmektedir.



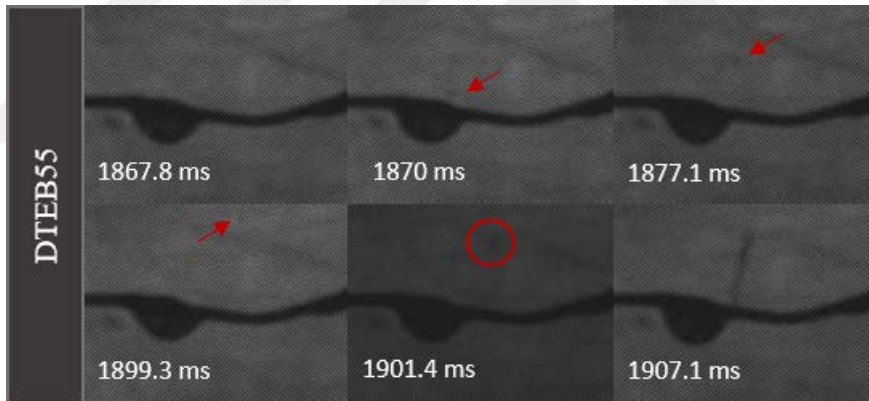
Şekil 4.6. DTEB37 yakıtına ait damlacık görüntüleri

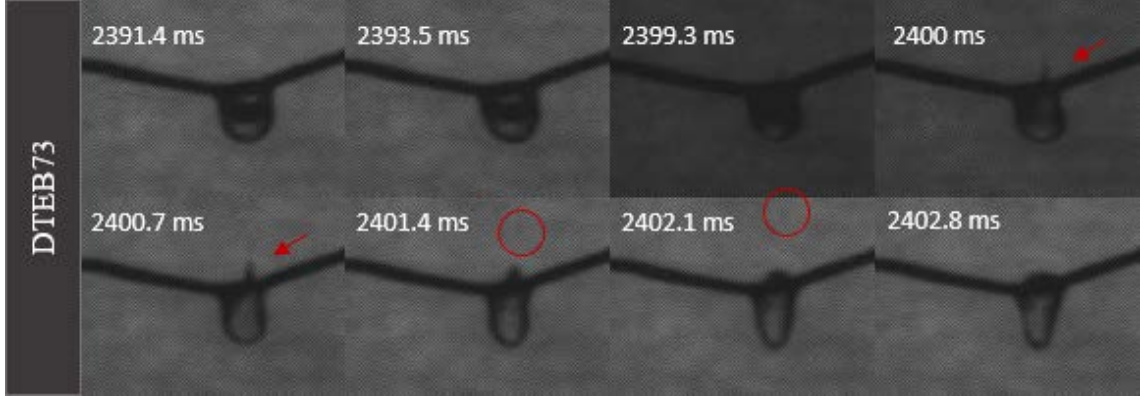
DTEB37 yakıtının mevcut çalışmanın konu edindiği tüm yakıtların aksine şiddetli mikro patlamalara ve yüksek üfleme oranlarına sahip bir yakıt olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.6'da görüldüğü gibi 21.4 ms ve 22.1 ms periyodunda herhangi bir çekirdeklenme durumuna rastlanmamıştır. 22.8 ms ve 62.8 ms periyodunda ise ani bir mikro patlamalar meydana gelmiş ve sonrasında ikincil atomizasyona yoğun şekilde maruz kalarak damlacık boyutu ani bir küçülme yaşamıştır.



Şekil 4.7. DTEB46 yakıtına ait damlacık görüntüleri

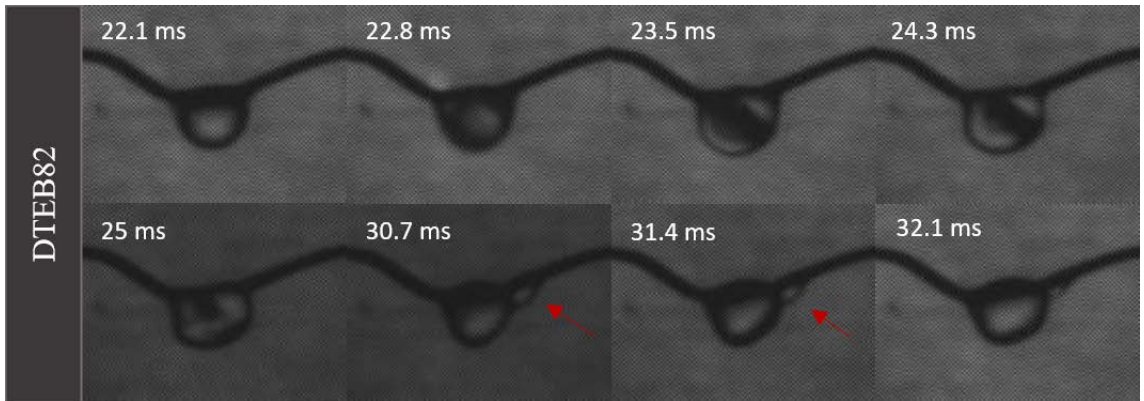
Şekil 4.7’de damlacığı ateşlemek için kullanılan arkın damlacık üzerindeki etkisi görülmektedir. Damlacığın üzerinden geçen elektrik akımı, distorsiyona uğramasına ve üfleme olayına benzer bir davranış sergilemesine sebep olmuştur.





Şekil 4.8. DTEB55, DTEB64 ve DTEB73 yakıtlarına ait damlacık görüntüleri

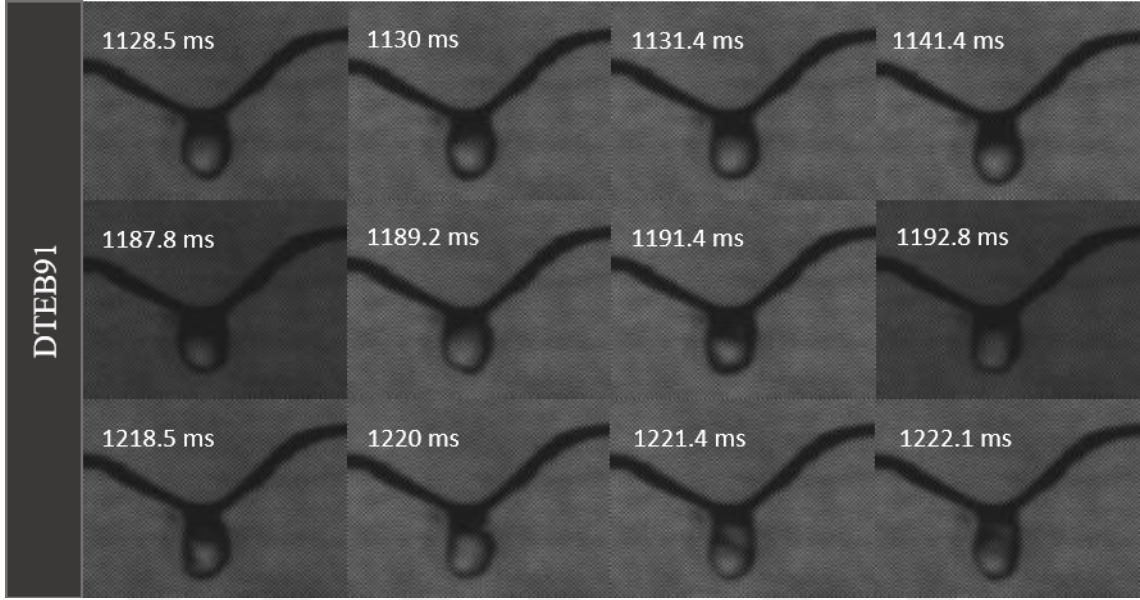
Şekil 4.8’de DTEB55, DTEB64 ve DTEB73 yakıtlarının damlacık davranışları görülmektedir. Bu üç karışım yakıtına ait damlacıklar birbiriyle çok benzer davranışlar sergilemişlerdir. Her bir damlacık öncelikli olarak bir faz ayrımına uğramıştır. Bunun sonucunda üfleme durumu ve ikincil atomizasyon gözlemlenmiştir. DTEB28 yakıtının ikincil atomizasyonu sonucu oluşan damlacık nispeten küçüktür ve oluşumundan kısa bir süre sonra yanma sonucu açığa çıkan ısıya maruz kalarak buharlaşmıştır. Mevcut üç yakıtın durumunda ise alt damlacık tamamen buharlaşmadan önce tutuşabilmesi için boyut olarak oldukça büyüktür ve bir süre kendi çevresindeki aleve dayanabilmiştir. DTEB64 ve DTEB73 durumları için alt damlacık kamera açısından çıktığı için yanma süresi takip edilememiştir. Ancak DTEB55 yakıt damlacığından kopan alt damlacığın yaklaşık olarak 5.7 ms süresince yandığı ve sonrasında ardında bir miktar is bıraktığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.9. DTEB82 yakıtına ait damlacık görüntüleri

Şekil 4.9’da görüldüğü gibi DTEB82 yakıtı tutuşmasından kısa bir süre sonra faz ayrımına uğradığı açıkça görülmektedir (22.8 ms, 23.5 ms, 24.3). Bu faz ayrımının

sonucu olarak bir üfleme olayı meydana gelmiş ve bir alt damlacık oluşmuştur. Diğer durumların aksine bu alt damlacık yanma bölgesinden uzaklaşmamıştır. Alt damlacık talin çok yakınında olduğu için tel ile damlacık arasında adezyon kuvveti ve damlacığın boyutu sebebiyle sistemden hızla ayrılamadığı için ana damlacıkla arasındaki kohezyon kuvvetleri galip gelmiştir. Ana damlacık ve alt damlacık birleşmeksizin yanmaya devam etmiştir. Bu durum literatürde görülen komşu iki damlacığın yanmasına benzetilebilir.



Şekil 4.10. DTEB91 yakıtına ait damlacık görüntüleri

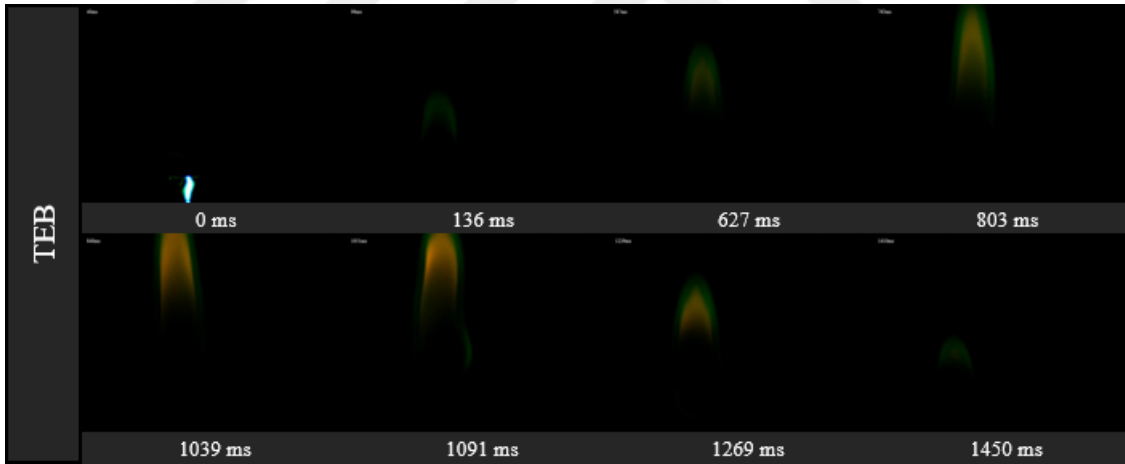
Şekil 4.10'da DTEB91 yakıtının damlacığı görülmektedir. Yakıt konsantrasyonu sebebiyle yanmanın TEB yakıtı kısa süre içerisinde yanarak tükenmiştir. Geride kalan dizel herhangi bir ikincil atomizasyona, faz ayrımına veya mikro patlamaya maruz kalmamıştır. Başka bir tabirle saf dizel yakıtına benzer bir davranış sergilemiştir. Fakat diğer durumların aksine damlacığın uzun süre boyunca tel üzerinde salınımında artış gözlemlenmiştir. Bu duruma TEB yakıtının hızlıca yanarak tükenmesinin sebep olduğu düşünülmektedir. TEB yanarken açığa çıkan ısı damlacığın büyük bir kısmını oluşturan dizelin termofiziksel özelliklerinde küçük değer farkları yaratarak tel ile arasındaki adezyon kuvvetlerinin azalmasına ve akabinde damlacığın salınım yapmasına neden olduğu düşünülmektedir.

Genel olarak, mevcut çalışmada incelenen tüm çok bileşenli yakıt karışımlarının damlacıkları, üfleme ve ikincil atomizasyon yaşamıştır. Bu üfleme durumlarının sayısı ve yoğunluğu, çok bileşenli yakıt karışımlarının her biri için değişkenlik göstermiştir. Ek olarak, yakıt karışımının oranına rağmen, neredeyse tüm damlacıklarda üfleme öncesinde

ve sırasında nispeten aynı davranışlar gözlemlendi. Mevcut bölümde incelenen damlacık dinamiklerinin aleve etkisi devam eden bölümde incelenecektir.

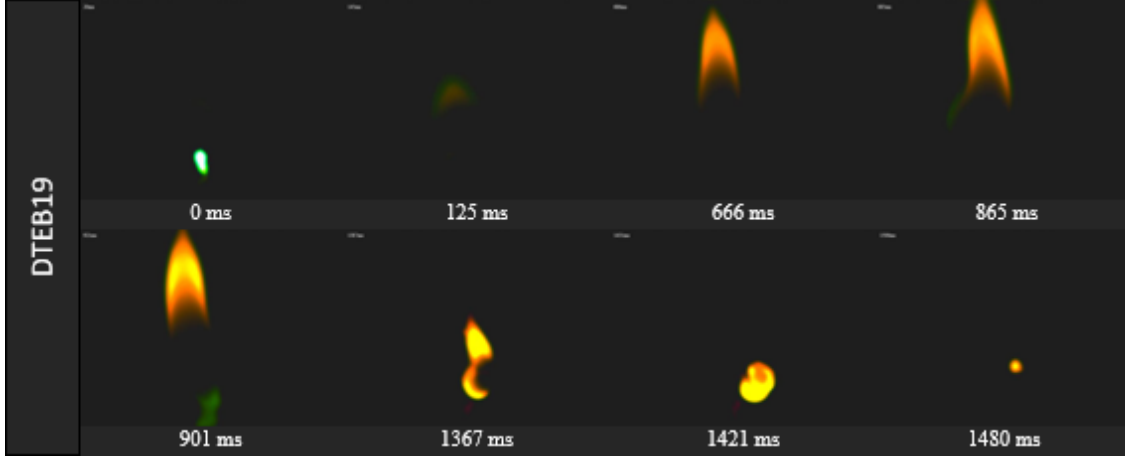
4.2. Alev Karakteristiği

Mevcut bölümde tüm yakıtların yakıt damlasının tutuşmasından doğan parlak alevin örnek görüntülerini gösterilmektedir. İlk görüntüler damlacığı tutuşturan arkın görüldüğü andır ve bu nedenle başlangıç anı ($t = 0$ ms) olarak ifade edilir. Şekillerde görüldüğü gibi, alev sınırları iyi tanımlanmıştır ve hem damlacıktan hem de çevreleyen ortamdan kolayca ayırt edilir, bu da genel yanma süresi boyunca alev boyutundaki değişimi izleme ve çıkarım yapma fırsatı verir. Ayrıca resimlerde görüldüğü gibi nispeten sessiz bir ortamda çalışılarak zorlanmış konveksiyon etkisi ortadan kaldırılmıştır. Ancak deneyler normal yerçekimi koşullarında yapıldığından doğal taşınım ve kaldırma kuvvetinin önüne geçilememiştir.



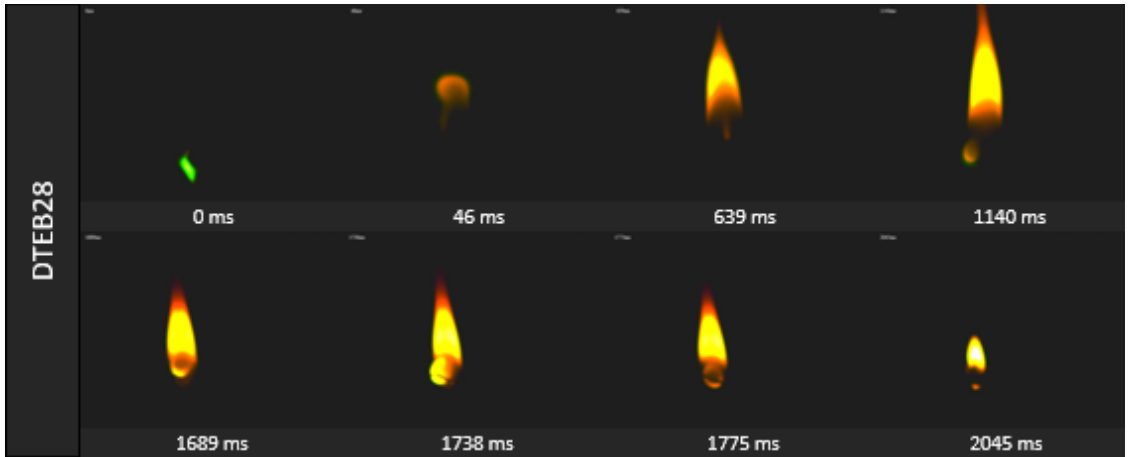
Şekil 4.11. TEB damlacığının yanmasına ait alev görüntüleri

Şekil 4.11'de görüldüğü üzere, TEB yanmasına ait görüntülerde başlangıçtan 803 ms periyoduna kadar bor yanmasında gözlenen karakteristik yeşil alev göze çarpmaktadır. Yanma devam ettikçe hidrokarbon kaynaklı sarı alevin yaptığı ışıma yeşil alevin önüne geçmektedir ve yeşil alev, alev dış konisinin çevresinde görülmektedir. Yanma boyunca alevde şiddetli salınım ve üfleme meydana gelmemiştir. Fakat 1091 ms periyodunda partikül kaynaklı olduğu düşünülen tek bir üfleme durumu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.12. DTEB19 damlacığının yanmasına ait alev görüntüleri

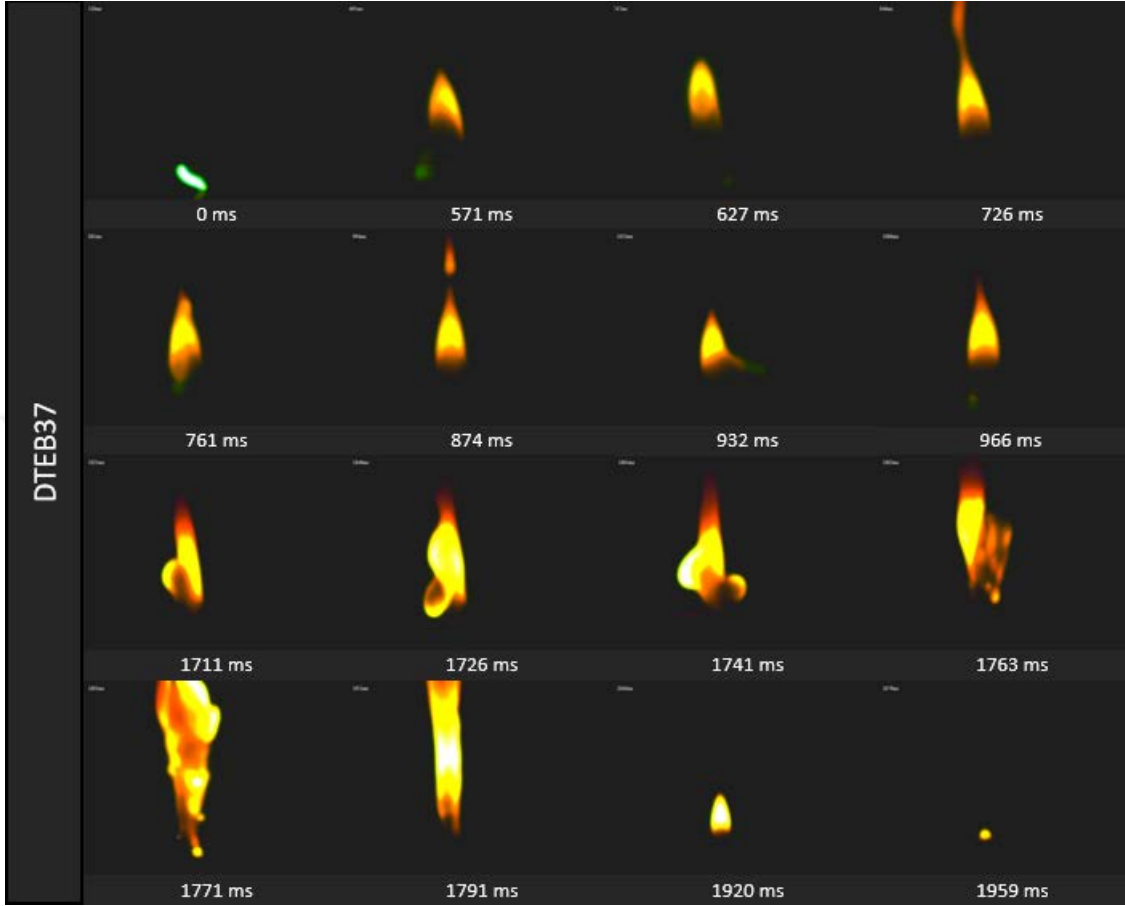
DTEB19 yakıtına ait görüntülerde 125 ms periyodunda yeşil alev tekrar görülmektedir. 666 ms periyoduna gelindikçe dizel yakıtı TEB alevinin sağladığı sıcaklık sayesinde buharlaşarak yanmaya başlamıştır. TEB yakıtı neredeyse tükendiği için 666 ms periyodunda maksimum boyutuna ulaşmıştır ve sonraki kısımda yeşil alev gözlemlenmemiştir. 865 ms ve 901 ms periyotlarında ise TEB yakıtından arda kalan bor partiküllerinin mikro patlamalara sebep olduğu görülmektedir. 1367 periyoduna gelindikçe gerçekleşmiş olan mikro patlamalar damlacığın küçülmesine sebep olmuştur ve alev 1421 ms periyodunda iyice küçülmüş olan damlacığın çevresinde yoğunlaşmıştır.



Şekil 4.13. DTEB28 damlacığının yanmasına ait alev görüntüleri

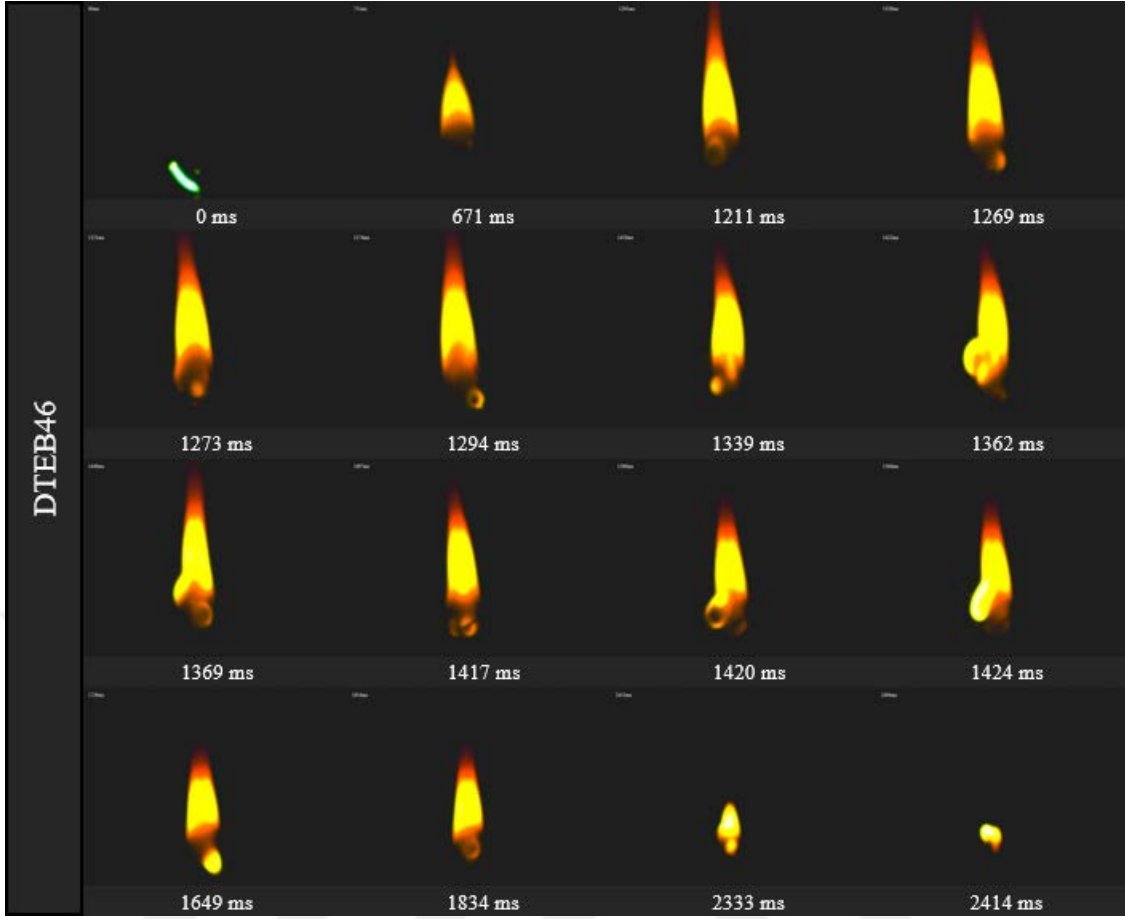
DTEB28 yakıtında, 46 ms periyodunda üfleme etkisi sebebiyle bir salınım gözlemlenmiştir. Bu durumlar 1140 ms ve 1738 ms periyotlarında kolaylıkla görülebilmektedir. Damlacık ömrünün her diliminde sıklıkla meydana gelen üfleme

durumunun yanında ise 1689 ms ve 1775 ms periyotlarında damlacıktan kopan daha küçük çaplı damlacıkların yanarak tükenmesi gözlemlenmiştir.



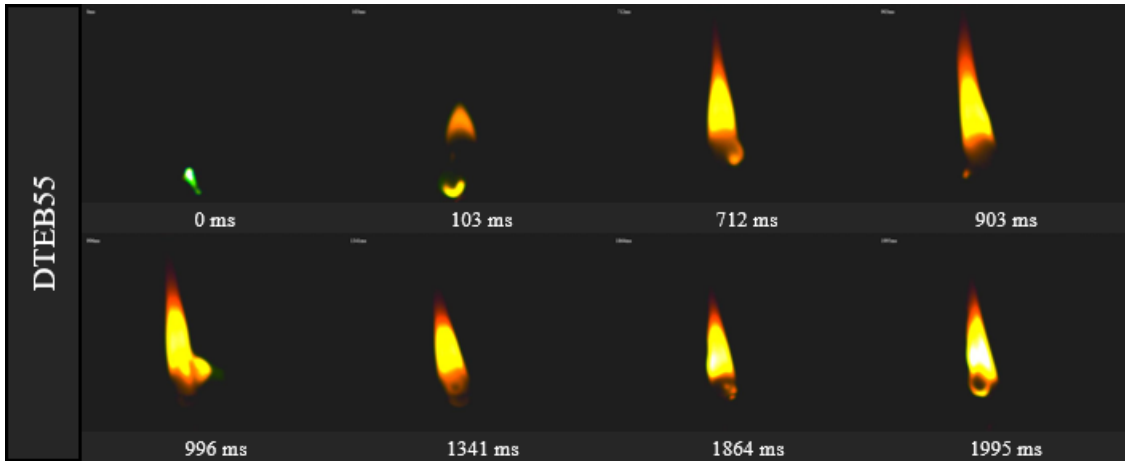
Şekil 4.14. DTEB37 damlacığının yanmasına ait alev görüntüleri

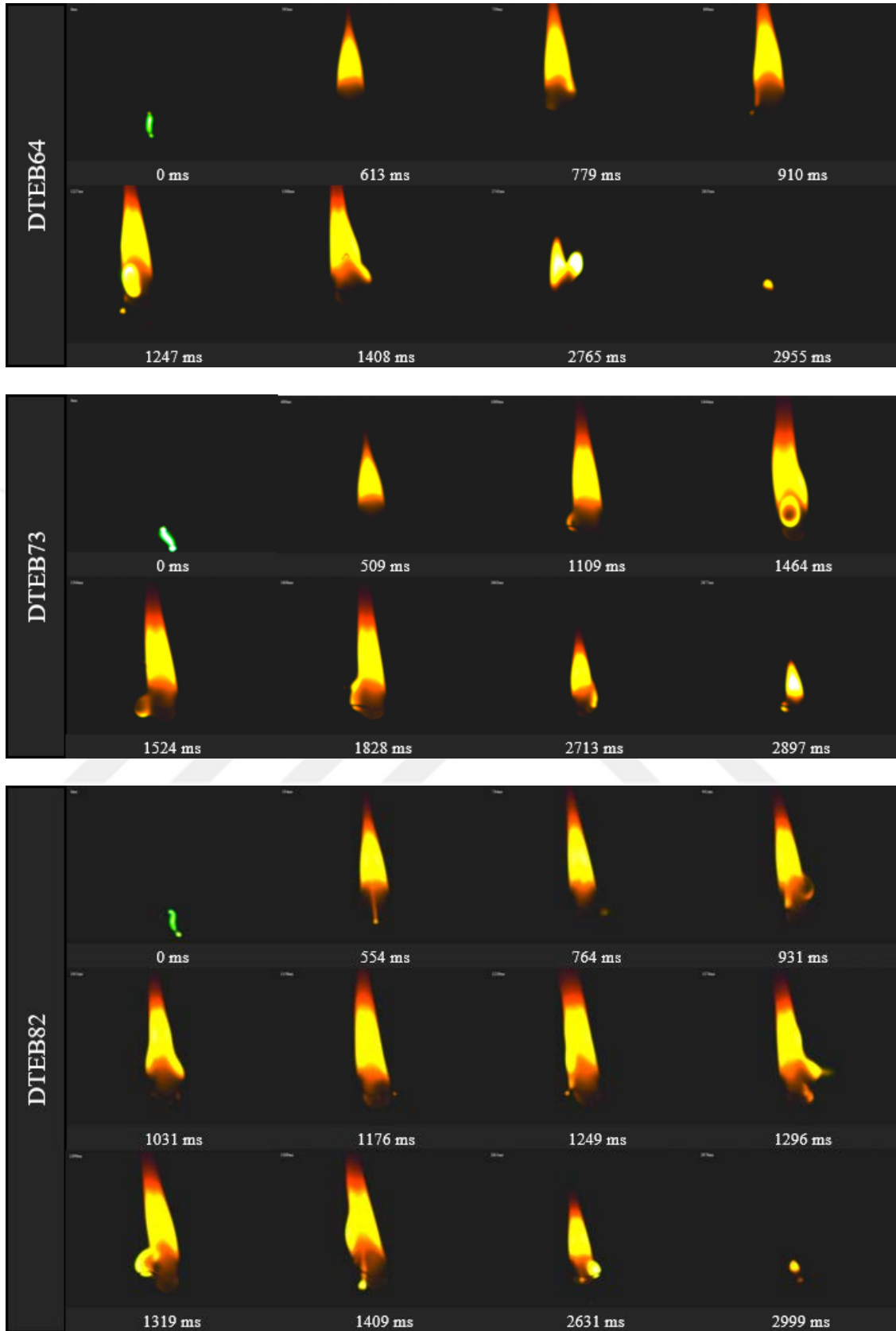
DTEB37 yakıtının yanması en fazla mikro patlamanın, salınımın ve kopmaların gözlemlendiği vakadır. Bor partikülü kaynaklı mikro patlamaların sıkça gerçekleşmesi göze çarpmaktadır (571 ms, 627 ms, 761 ms, 932 ms ve 966 ms) ve bu patlamalar sonucu alevde aşırı salınım sonucu kopmalar gözlemlenmiştir (726 ms ve 874 ms). 1711 ms ve 1741 ms aralığında birçok üfleme olayı gözlemlenmiştir ve bu durumlar alev boyutunda karasızlığa neden olmuştur. Daha sonra ise damlacıkta meydana gelen buhar jeti olayı (1763 ms) damlacığın yüzey gerilimini yitirmesine neden olmuş ve ani buharlaşan yakıt infilak etmiştir. Deneyler süresince en kaotik yanma DTEB37 yakıtında gözlemlenmiştir.



Şekil 4.15. DTEB37 damlacığının yanmasına ait alev görüntüleri

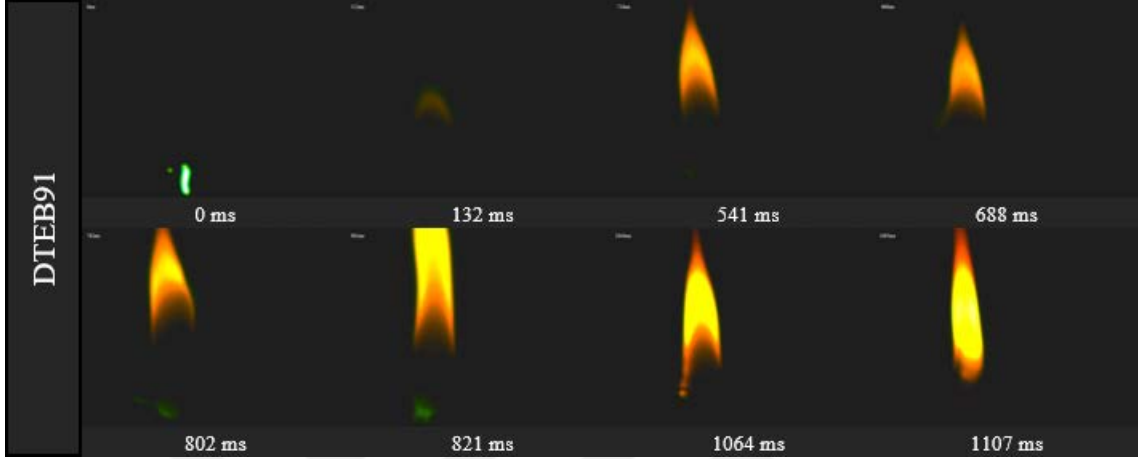
DTEB46 yakıtında DTEB37 yakıtına benzer olarak kısa zaman dilimlerinde ve art arda gerçekleşen üflemler ve mikro patlama olayları gözlemlenmiştir. Bu durumların sıklıkla gerçekleşmesi ana damlacıktan daha küçük çaplı damlacıkların kopmasına neden olmuştur (1211 ms, 1294 ms, 1362 ms).





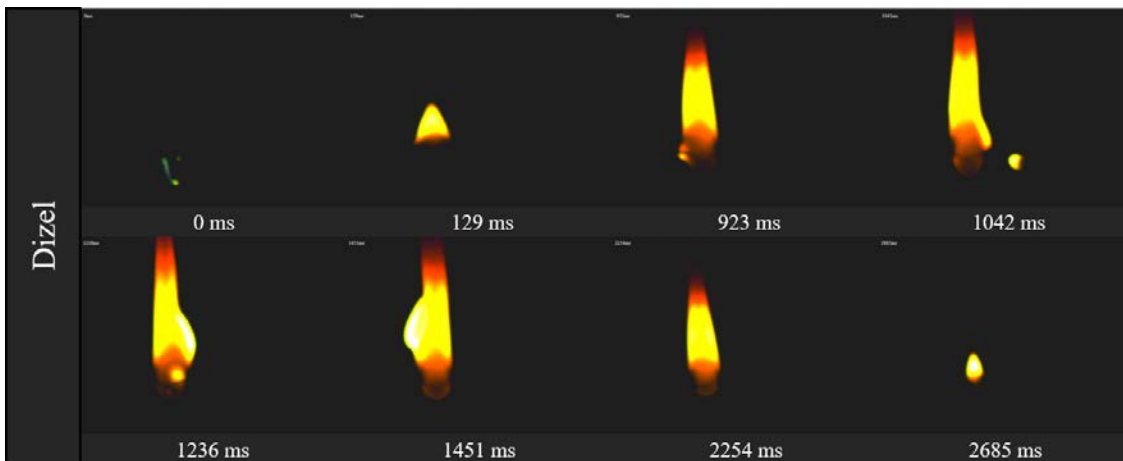
Şekil 4.16. DTEB55, DTEB64, DTEB73 ve DTEB82 damlacıklarının yanmasına ait alev görüntüleri

DTEB55, DTEB64, DTEB73 ve DTEB82 yakıtlarının alev karakteristiklerinin birbirine çok benzer olduğu görülmektedir. TEB borat konsantrasyonunun azalmasıyla, daha önce gözlenmiş olan mikro patlama ve üfleme olaylarında azalma olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.17. DTEB91 damlacığının yanmasına ait alev görüntüleri

DTEB91 yakıtının içerdiği az miktardaki TEB'in 132 ms periyodunda hızlıca yandığı görülmektedir. Çok kısa bir zaman diliminde görülen yeşil alevin akabinde dizel içerisinde hapsolmuş bor partikülleri mikro patlamaya sebep olmuştur (688 ms, 802 ms, 821 ms). Bu patlamalardan sonra 1064 ms noktasından başlayarak 1107 ms noktasına kadar süren bir salınım gözlemlenmiştir.



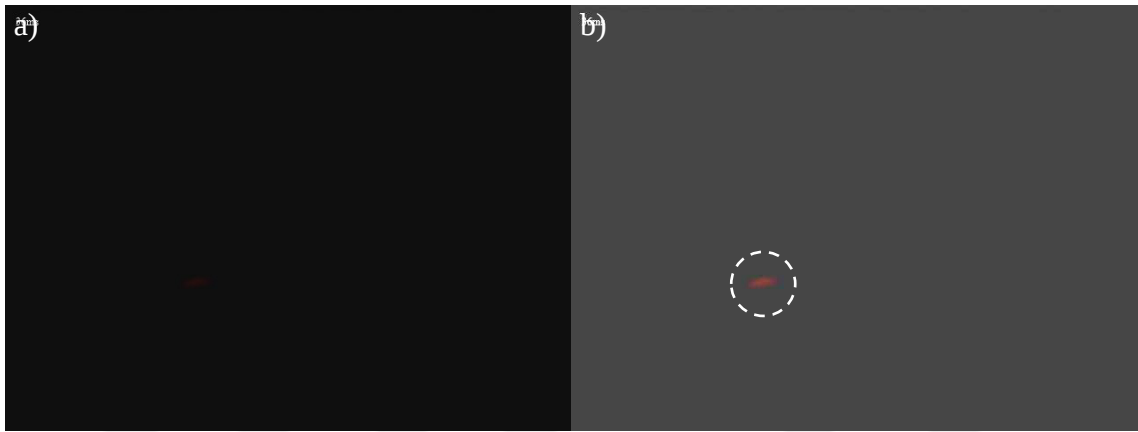
Şekil 4.18. Dizel damlacığının yanmasına ait alev görüntüleri

Dizel yakıtına ait görüntülerde 0 ms ve 923 ms zaman aralığındaki görüntüler alev yayılmasını gösterirken, 923 ms sonrasındaki görüntüler alevin maksimum boyutlarını gösterir. Damlacık üfleme sürecinin parlak alevin şekli ve görünümü üzerindeki etkisi, 1042 ms ve 1451 ms zamanlarındaki görüntülerde görülmektedir. Tam damlacık buharlaşması ve yakıt tüketimi nedeniyle alev büzülmesi ve sönmesi sırasıyla 2254 ms ve 2685 ms zaman periyotlarında gösterilmektedir.

Genel olarak, tek bileşenli yakıt damlacıklarında, ömürleri boyunca üfleme ve ikincil atomizasyon oluşumları yaşanmamıştır. Ancak Şekil 4.11 ve Şekil 4.18'de gösterildiği gibi hem saf dizel hem de saf TEB damlacıklarının sonunda bazı garip üfleme olayları meydana gelmiştir. Bunun dışında ise karışım yakıtların heterojen hacimler olması sebebiyle damlacık yüzeyinde bozulmalar, partikül tabanlı mikro patlamalar, üflemler ve alevlerde şiddetli salınımlar gözlemlenmiştir.

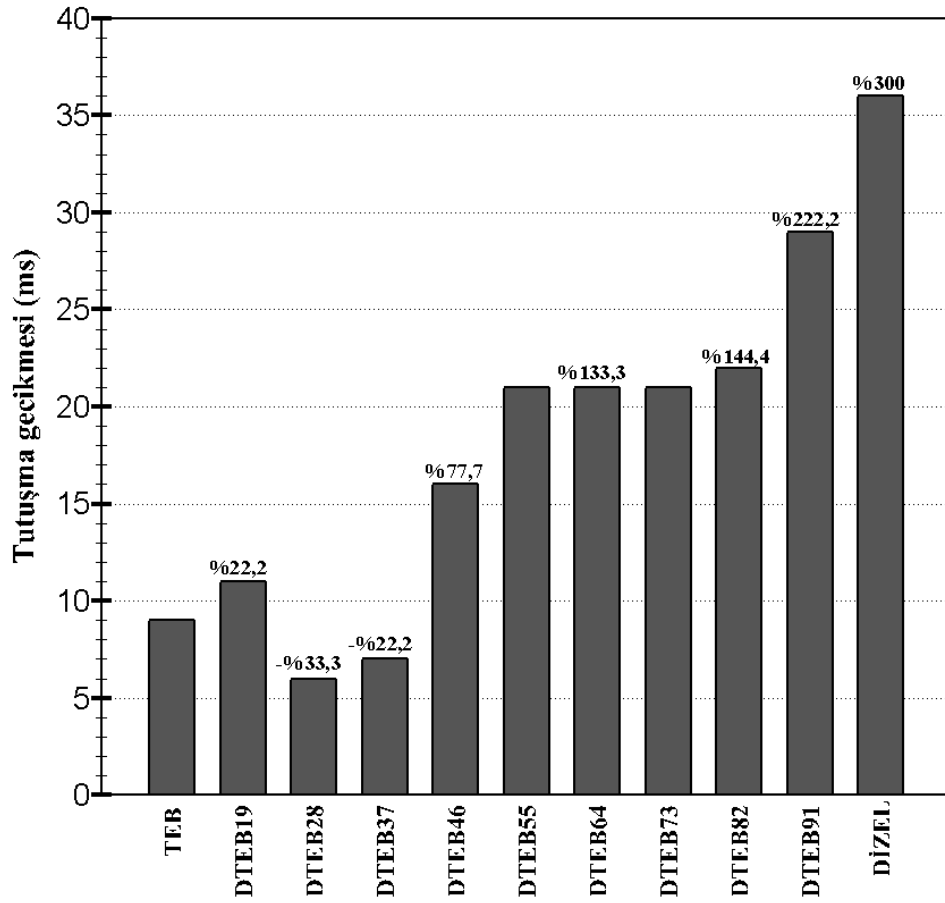
4.3. Tutuşma Gecikmesi

Bu çalışmada, bir damlacığın tutuşma gecikmesi, ateşlemenin başlaması ile yanmanın başlaması (yani, şekil 4.19’da gösterildiği gibi alevin ilk görünümü) arasındaki süre ölçülerek elde edilmiştir. Tutuşma gecikme süresi esas olarak fiziksel ve kimyasal gecikmelerden etkilenir. Fiziksel gecikme, yakıtın buharlaşması, moleküler difüzyon ve yakıt-hava karıştırma işlemi için geçen süreyi içerirken, kimyasal gecikme, yakıt ve hava arasındaki n yanma reaksiyonlarıyla ilişkilidir (Singh vd.,2019:114).



şekil 4.19. Photoshop programıyla piksel yoğunlaştırarak tutuşma tespiti. Orijinal kayıt (a) ve piksel yoğunlaştırılmış görsel (b)

Elde edilen görüntülerle hassas bir şekilde tutuşma gecikmesi tespiti yapılabilir. Saniyenin 1/1400 hassasiyetinde kaydedilen görüntüler ile ateşleme ve tutuşma arasındaki sreler isabetli bir şekilde yapılabilir. şekil 4.19’da saf dizel yakıtına ait ateşleme ve tutuşma görselleri görülmektedir. Tespitin daha isabetli yapılabilmesi için Adobe Photoshop programından faydalanılmıştır. Dizel yakıtının bir örnek olarak kullanıldığı görselde dizel damlacığına ait görseller ateşleme anından itibaren pikselleri yoğunlaştırılarak incelemeye alınmıştır. Tutuşma anına ait görselin milisaniye biriminden süresi tutularak ateşlemeyi başlatan ark kıvılcımı ile arasındaki süre hesaplanmış ve tutuşma gecikmesi tespit edilmiştir. Bu prosese tüm yakıtlar dahil edilerek şekil 4.20’de görülen veriler elde edilmiştir.



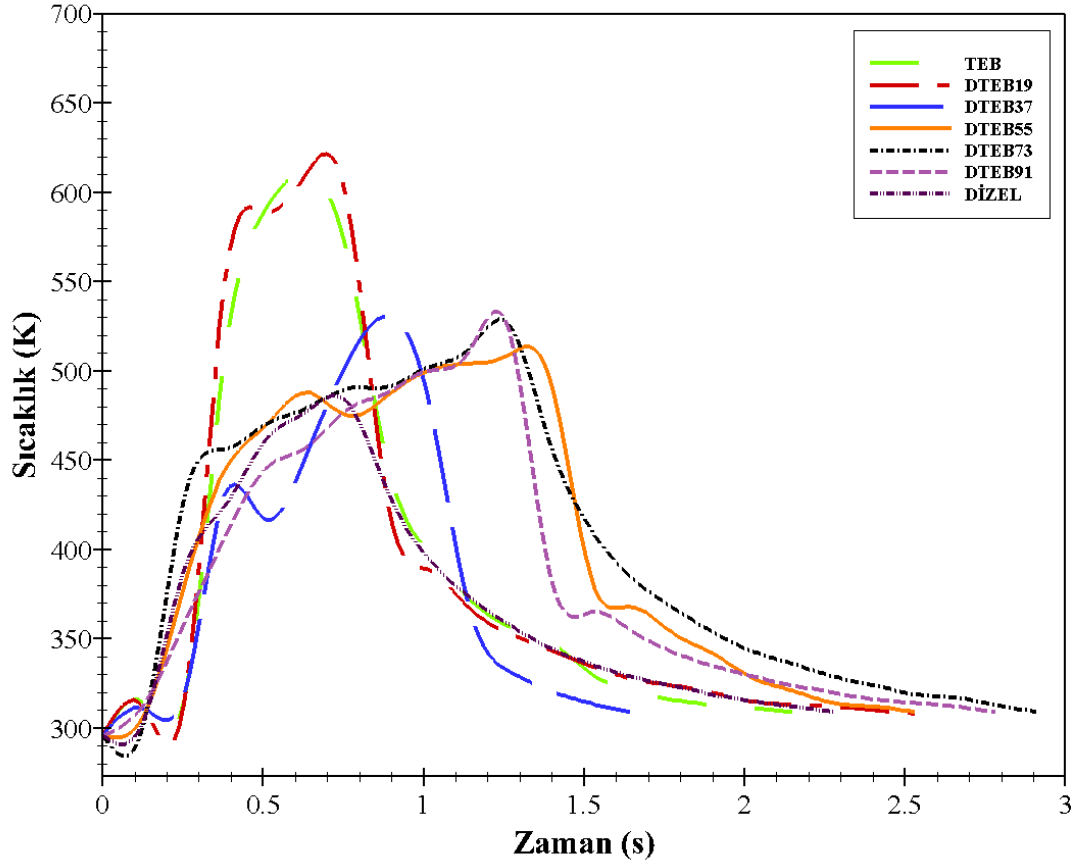
Şekil 4.20. Tüm yakıt karışımlarına ait tutuşma gecikmesi değerleri ve artış oranları

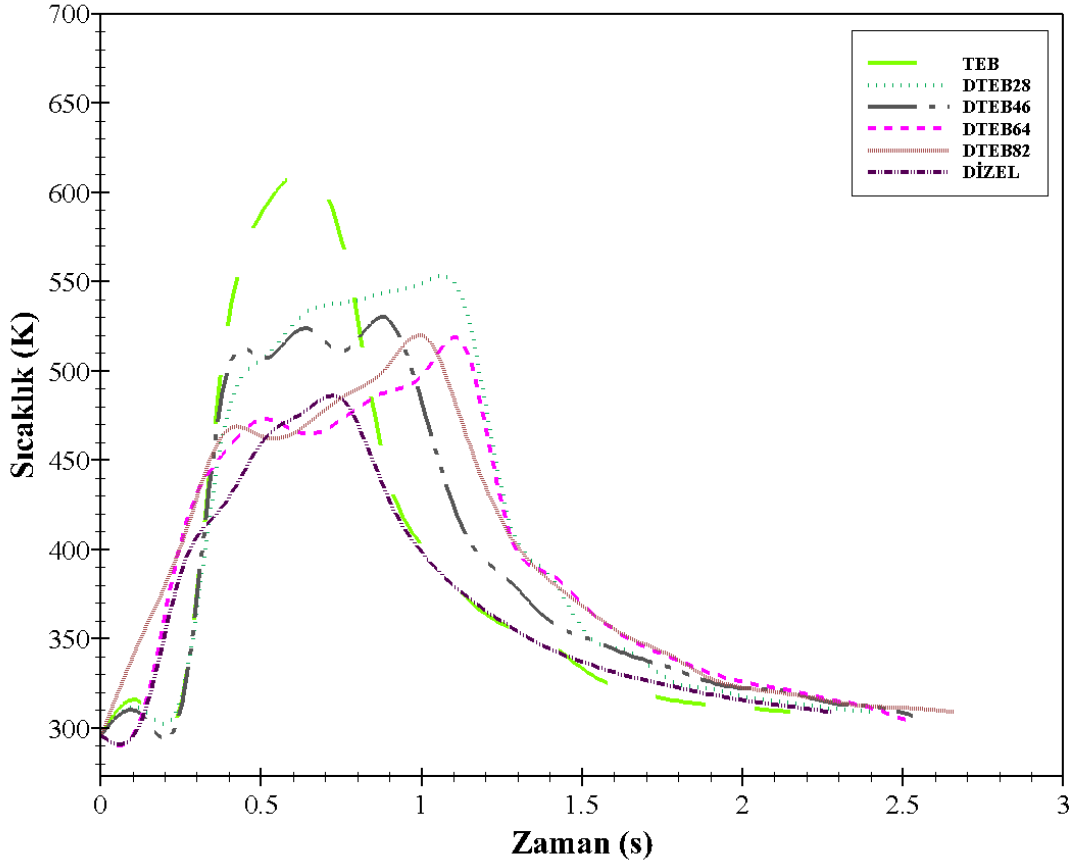
Şekil 4.20 dizel damlacıklarının tutuşma gecikmesi üzerinde TEB ilavesinin etkisini göstermektedir. Şekilde gösterilen iki saf yakıt damlası arasındaki tutuşma gecikme periyodu karşılaştırıldığında, dizelin tutuşma gecikmesi TEB'tan %300 daha uzun sürmektedir. Bunun sebebi bölüm 3.1.'de de bahsedilen buharlaşma sıcaklıklarıyla ilgilidir. TEB'in buharlaşma sıcaklığı dizelin buharlaşma sıcaklığının neredeyse yarısıdır. Bölüm 2'de de bahsedildiği gibi sıvı fazdaki yakıtın yanması için öncelikle gaz fazına geçiş yapması gerekmektedir. TEB yakıtının gaz faza geçişinin normal şartlar altında (298 K ve 1 atm basınç) daha hızlı gerçekleşmesi tutuşma gecikmesi süresini önemli oranda düşürmektedir.

4.4. Sıcaklık Değişimi

Mevcut çalışmada damlacık yanması sırasındaki alev sıcaklıkları termal kamera vasıtasıyla kaydedilmiştir. Termal kamera ölçüm yapılan bölgede maksimum sıcaklık

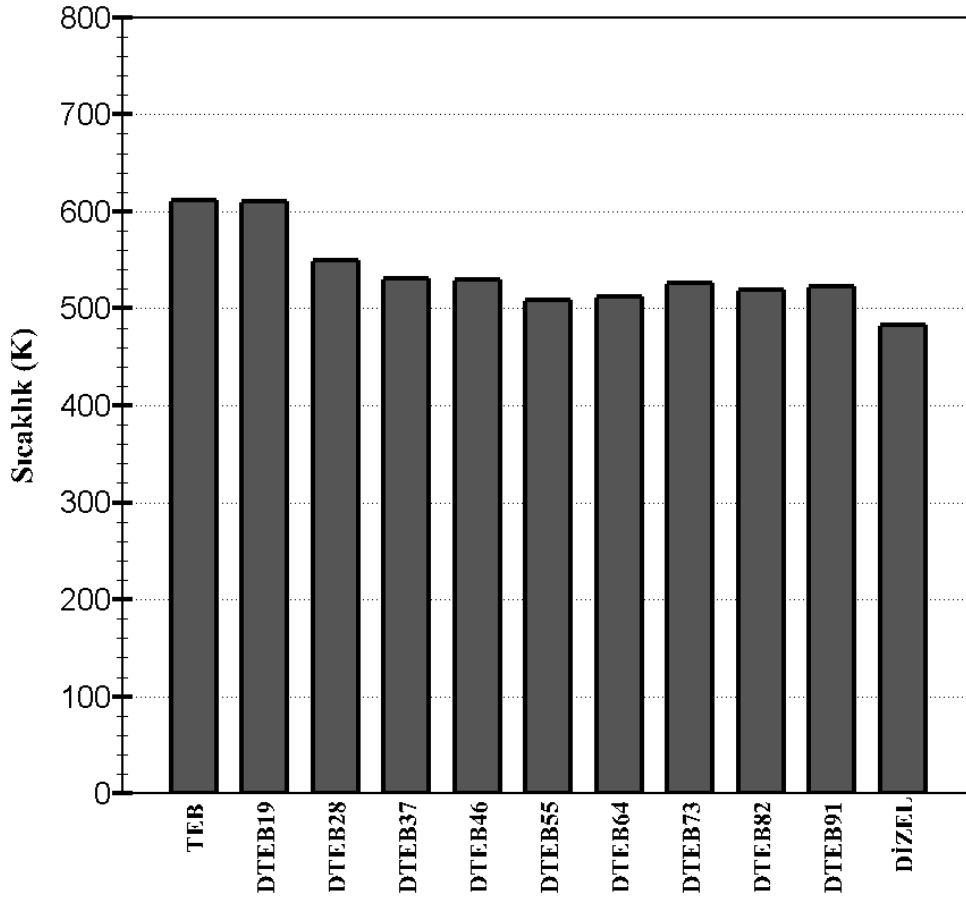
değerini algılamaya odaklanmaktadır. Termal kameraya ait lazer algılayıcısı; ilk olarak damlacık yüzeyine, sonrasında ise damlacık alevine odaklanmaktadır. Termal kamera üzerinde anlık olarak elde edilen veriler işlenerek alev sıcaklığı ve zaman arasındaki ilişki gözlemlenmiştir. Şekil 4.21’de yakıtlara ait sıcaklık eğrileri görülmektedir.





Şekil 4.21. Damlacık ömrü boyunca sıcaklık değişimi

Damlacıklara ait sıcaklık grafikleri; yakıt sayısının fazlalığı, değerlerin birbirine yakın olması gibi sebeplerden dolayı karışıklığın önlenmesi amacıyla ayrı iki grafik halinde şekil 4.21’de sunulmaktadır. Aynı zamanda damlacıklara ait maksimum sıcaklık değerleri ise 4.22’de sunulmaktadır.



Şekil 4.22. Damlacık yanmasına ait maksimum sıcaklık değerleri

Sıcaklık eğrileri ve sütun grafiği incelendiğinde en yüksek alev sıcaklığının TEB'in sahip olduğu görülmektedir. En yüksek alev sıcaklığının test yakıtları içerisinde hidrojen/karbon oranı en yüksek olan TEB'de görülmüş olması beklenen bir durumdur. Atmosfer şartlarında ilk ateşleme anından maksimum sıcaklığa çok hızlı bir şekilde ulaşıldığı gözlenmiştir. En stabil maksimum alev sıcaklık trendi ise en uzun süre yanma davranışı sergileyen dizel yakıt damlacığında gözlenmiştir. Grafiklerde maksimum alev sıcaklıklarının yanma süresinin orta ve son kısımlarına doğru oluştuğu görülmektedir.

Maksimum alev sıcaklıkları açısından yakıtlar karşılaştırıldığında; damlacıktaki TEB konsantrasyonu azaldıkça maksimum alev sıcaklığının düştüğü bir trend elde etmek mümkündür. Ancak maksimum sıcaklık noktaları her bir yakıt için farklı zaman noktalarına karşılık gelmektedir. TEB'in maksimum sıcaklığına çok kısa bir sürede ulaşması, yakıtın yüksek reaktivitesine ve bünyesinde çokça metil grubu bulundurmasına atfedilebilir.

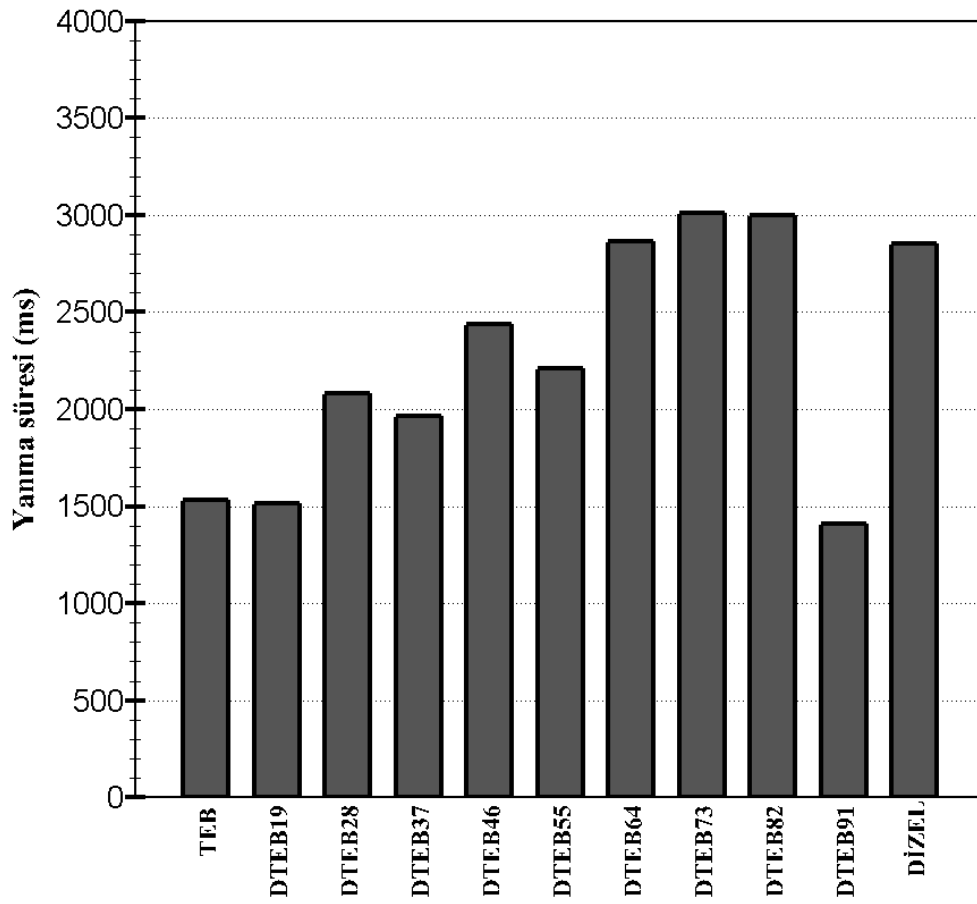
4.5. Yanma Hızı

Çok bileşenli yakıt damlacıklarının yanma hızı, denklem 1.6'da gösterilen tek bileşenli yakıt damlacıklarının aynı prensibine göre değerlendirilmiştir. Bir yakıt damlacığının yanma hızı, yakıtın ne kadar hızlı yandığının bir ölçüsüdür ve esas olarak sürekli buharlaşma ve yanma sürecinden etkilenir. Yanan bir damlacığın yanma hızı, damlacık yakma deneysel koşulu altında buharlaşan damlacık çapının zamansal değişiminin ölçülmesiyle belirlenebilir (Ghamari ve Ratner,2016:65; Singh vd.,2019:108-116). Bu ilk damlacık çapının karesinin tutuşmadan alev sönmesine kadar değerlendirilen toplam damlacık ömrüne bölünmesiyle elde edilir. Bu nedenle, damlacık yanma hızının değerlendirilmesi için yalnızca sonuna kadar başarılı bir şekilde ilerleyen damlacıklar dikkate alınmalıdır. Bunun nedeni, çok bileşenli yakıt damlacıklarının bazılarında damlacıkların patlamaya devam etmesi ve tam yanmanın gerçekleşmemesidir. Bununla birlikte tüm karışımlar için, gerçekleştirilen deneysel testlerin miktarına rağmen, tam buharlaşma ve yanma için tüm damlacıklarda tam yanma yerine mikro patlama gözlemlendi. Buna göre, damlacık boyutu evrim eğrisinin zamanla eğimi değerlendirilmiş ve bu yakıt karışımı için yanma hızı olarak kabul edilmiştir. Bu varsayım, yanma hızı sabitinin, damlacık boyutu gelişimini yanma süresi ile ilişkilendiren denklem 1.5'e göre gerçekleşir.

Çalışmada kullanılan damlacıkların tamamı bölüm 3.3'te de belirtildiği gibi ortalama olarak 4.15 µl olacak şekilde enjekte edilmiştir. Damlacıklara ait başlangıç çaplarının aynı değere sahip olduğu ve damlacıkların küresel simetrik olduğu kabul edilmiştir. Denklem 4.1'den faydalanılarak hacmi bilinen bir kürenin çapı elde edilmiştir.

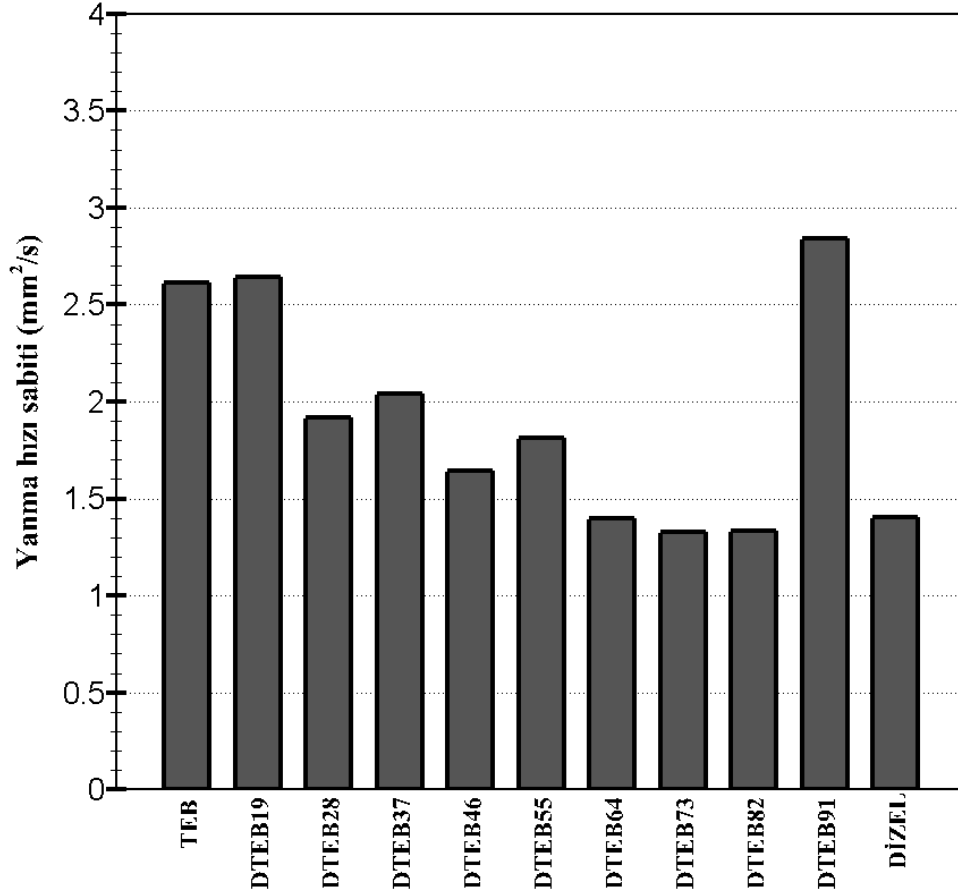
$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad (4.1)$$

Küresel damlacığın çapı 4.1 denklemini kullanılarak; yaklaşık olarak 2 mm olarak hesaplanmıştır. Bu damlacık çapı tüm yakıtlar için geçerlidir ve D_0 ifadesini temsil etmektedir. Ayrıca damlacıkların yanma süreleri yüksek hızlı kamera ile elde edilen kendinden aydınlatmalı görüntüler işlenerek bulunmuştur. Burada elde edilen veriler ise t ifadesini temsil etmektedir. Şekil 4.23'de yakıtlara ait yanma süreleri görülmektedir.



Şekil 4.23. Yakıtlara ait yanma süresi değerleri

Denklem 1.6'dan faydalanılarak damlacıklara ait yanma hızı sabiti değerleri şu şekilde elde edilmiştir;



Şekil 4.24. Yakıtlara ait yanma hızı sabiti değerleri

Bu çalışmada yakıtlara ait yanma hızı sabitleri, damlacıkların yanma süresi durumları dikkate alınarak elde edilmiştir. Şekil 4.24 incelendiğinde DTEB19 en yüksek yanma hızı sabitine sahiptir. Bu durum yakıtın oksijence zengin olmasıyla, metil köklerinin sayısının fazlalığıyla ve hidrojen/karbon oranıyla doğrudan ilişkidir. Yakıtın sahip olduğu oksijen miktarının ve hidrojen/karbon oranının artması yanma hızı sabitinde artışa neden olmaktadır. Bu durumu sıcaklık eğrilerini gösteren şekil 4.21 de desteklemektedir. TEB yüksek reaktiviteye sahip bir bileşiktir. Bu durumdan dolayı yakıt hızlı bir şekilde tutuşarak tükenmektedir. Dizel ise kompleks iskelet yapısı sebebiyle reaktivitesi TEB'a göre düşüktür. Bu nedenle en düşük yanma hızı sabiti değerine sahip olduğu görülmüştür.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Mevcut çalışma, tek bileşenli ve çok bileşenli yakıt damlacığının yanmasının nicel analizinin yapılması maksadıyla yüksek hızlı kamera ve termal kamera kullanılarak deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Arkadan aydınlatmalı görüntüleme, kendinden aydınlatmalı görüntüleme ve termal görüntüleme teknikleri kullanılarak damlacık yanmasına ait görüntüler elde edilmiştir. Ardından görüntü işleme prosesi gerçekleştirilerek görüntüler sayısal verilere dönüştürülmüştür. Ana yakıtların dizel ve TEB olduğu çalışmada, 2 tek bileşenli ve 9 çok bileşenli olmak üzere 11 farklı yakıt üzerinde çalışılmıştır.

Arkadan aydınlatmalı görüntüleme sistemi, damlacığın ana hatlarını ve dinamiklerini incelemek için etkili bir yöntemdir. Sistem damlacıkların gerçek boyutunun 10 katına kadar büyütülebilmesine olanak sağlamıştır. Böylece damlacıklar üzerinde daha detaylı incelemeler yapıldı. Damlacığın hareketleri yüksek hızda kayıt altına alınarak, ikincil atomizasyonları ve salınımları rahat bir şekilde ayırt edilebildi.

Kendinden aydınlatmalı görüntüleme sistemi, alev karakteristiklerini tespit edebilmek için basit ve kullanışlıdır. Alevin kendi parlaklığı sayesinde herhangi bir dış müdahaleye gerek duymaksızın görüntüler yüksek hızlı kamera vasıtasıyla kaydedilmiştir. Böylelikle damlacık içi süreçlerin aleve etkileri detaylıca incelenebilmiştir.

Yukarıda bahsedilen optik kurulumlar kullanılarak, izole edilmiş çok bileşenli yakıt damlacıklarının yanması sırasında alev salınımı, çekirdeklenme, kabarcık oluşumu, iç sirkülasyon, üfleme, mikro patlama ve ikincil atomizasyonun takibi gerçekleştirildi. Bu, damlacığın yanma başlangıcından alt damlacık oluşumuna kadar önemli detayların takip edilebilmesi ayrıcalığını sağladı. Böylece elde edilen veriler ışığında şu sonuçlara ulaşılmıştır;

1. Tek bileşenli damlacıklar, ömürleri boyunca üfleme ve ikincil atomizasyon olayları yaşamamıştır. Bununla birlikte hem saf TEB hem de saf dizel damlacıklarının sonunda bazı beklenmedik üfleme ve mikro patlama olayları meydana gelmiştir. Bu olayların, dizel ve TEB damlacıkları içindeki heterojen çekirdeklenmeyle ilgili olduğu düşünülmektedir.
2. Genel olarak, mevcut çalışmada incelenen tüm çok bileşenli yakıt karışımlarının damlacıkları, üfleme ve ikincil atomizasyon yaşamıştır. Üfleme olaylarının tüm

damlacık ömrü boyunca meydana gelebildiği görülmüştür. Bu üflemlerin sayısı ve yoğunluğu, çok bileşenli yakıt karışımlarının her türü için değişkendir.

3. Yakıt karışımının türü fark etmeksizin, neredeyse tüm damlacıklarda üfleme öncesinde ve sırasında benzer durumlar gözlemlendi. Üfleme oluşumunun ilk işareti damlacık boyutundaki artıştır. Bu artış, üflemeden önce damlacık içindeki kabarcık büyümesine bağlanır. Bu kabarcık, damlacık yüzeyinin bu kuvvete dayanamadığı ana kadar damlacık yüzeyinin ince tabakasını içten dışa doğru itmeye devam eder, böylece damlacıkta lokal yırtılmalar meydana gelir ve kabarcık içindeki buhar bir jet şeklinde dışarı çıkar. Damlacıktan buharın salınması, yanan damlacıkta ani boyut küçülmesine ve şekil bozulmasına neden olur. Üfleme şiddetine göre damlacık şeklini ve boyutunu koruyabilir fakat güçlü bir üfleme damlacığının alt damlacıklar oluşturmaya veya infilak etmesine sebep olabilir.
4. İkincil atomizasyon tarafından üretilen alt damlacıkların sayısının ve boyutunun, karışım oranıyla bir ilgisi tespit edilememiştir. DTEB37 karışımı diğer karışımlara kıyasla en kaotik yanmaya sahiptir. Tamamen yanmadan önce birçok mikro patlamaya ve yüzey distorsiyonuna maruz kalmıştır. İkincil atomizasyon kısmı, toplam damlacık ömrünün küçük bir yüzdesini temsil eder. Ancak bu küçük yüzde, yakıt buharlaşmasını ve yakıt-hava karışımını artırmak için önemlidir. Hava-yakıt karışımının gelişmesi ise yakıt spreyinin genel yanma verimliliği için faydalıdır. Bu nedenle, bu süreyi artırmak da önemlidir. Bu durum DTEB37 yakıtını diğer yakıtlardan daha önemli bir konuma getirmektedir.
5. Tutuşma gecikmesi artışının, damlacık içerisindeki TEB konsantrasyonu artışıyla ters orantılı olduğu gözlemlenmiştir. TEB'in yakıt içerisindeki oranı arttıkça tutuşma gecikmesinde gözle görülür bir azalma olmuştur. TEB'in buharlaşma sıcaklığının düşük olması bu durumun en önemli sebebidir. Tutuşma gecikmesi özellikle yüksek devirlerde çalışan motorlar için önemli bir parametredir. Yakıtın erken tutuşabilmesi yanmanın verimiyle ve dolayısıyla motorun performansı ile doğrudan ilişkilidir. Bundan dolayı TEB tutuşma gecikmesi açısından iyileştirici bir katkı maddesi olarak kullanılabilir. Ayrıca DTEB28 ve DTEB37 yakıtlarına

ait değerler genel trende aykırı olduğu gözlemlenmiştir. Bu değer farkları çevresel koşullar ve deneysel hatalara atfedilir.

6. Karışımdaki TEB konsantrasyonunun yanma sıcaklığı artışıyla doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Yanma sıcaklığı reaksiyon açısından önemli bir parametredir. Özellikle kirletici emisyonlardan biri olan partikül madde veya bir diğer adıyla is oluşumu sıcaklık artışıyla beraber azalma göstermektedir. TEB bu durum için de iyileştirici bir katkı maddesi olarak kullanılabilir. Ayrıca içeriğinde bulunan oksijen sebebiyle karbon monoksit gibi zehirli özelliği bulunan ve kirletici olan eksik yanma ürünlerinde azalmalara sebep olacaktır.
7. DTEB91 yakıtına ait damlacık ömrü grafiği ve yanma hızı değerleri genel trende aykırı olmakla beraber veriler birbirini destekler niteliktedir. DTEB91 yakıtı için gerçekleştirilen üç ayrı deneyden elde edilen veriler birbirini doğrulamaktadır. Damlacığın yanması sırasında meydana gelen yüksek orandaki salınımın damlacığın yanmasının sonlanmasına neden olduğu düşünölmektedir.

Gerçekleştirilen alışma ile literatürde çokça eksiği bulunan trietil borat ve yanması daha detaylı anlaşılması gereken dizel yakıtlarının damlacık yanması konusunda eksikliklerin giderilmesi bakımından katkı sağlanmıştir.

Bu araştırma süresince edinilen tecrübeler ışığında gerçekleştirilebilecek potansiyel çalışmalar ve iyileştirmeler şu şekilde sıralanabilir;

- Üç bileşenli dizel karışımları denemek.
- Alev görüntüsü işleme yaparak problemin kimyasal tarafını incelemek.
- Dizel emisyonlarının TEB katkısı ile değişimlerini araştırmak.
- Çevresel koşulların (basınç, sıcaklık) damlacık dinamikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi.
- İkincil atomizasyon ile meydana gelen alt damlacıklar için üç boyutlu analiz yapılması.

KAYNAKÇA

- Aksay, C. S., Ketenoglu, O., & Kurt, L. (2005). *Küresel Isınma ve İklim Değişikliği*.
- Bae, J. H., & Avedisian, C. T. (2004). Experimental study of the combustion dynamics of jet fuel droplets with additives in the absence of convection. *Combustion and Flame*, 137(1–2), 148–162.
<https://doi.org/10.1016/J.COMBUSTFLAME.2004.02.003>
- Baumgarten, Carsten. (2006). *Mixture formation in internal combustion engines*. 294.
- BP. (2018). *BP Energy Outlook – 2018 edition*.
- Chigier, N. (1981). *Energy, combustion, and environment*.
- Choi, M. Y., & Kyeong-Okk, L. (1996). Investigation of sooting in microgravity droplet combustion. *Symposium (International) on Combustion*, 26(1), 1243–1249.
[https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(96\)80341-9](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(96)80341-9)
- Duarte Souza Alvarenga Santos, N., Rückert Roso, V., Teixeira Malaquias, A. C., & Coelho Baêta, J. G. (2021). Internal combustion engines and biofuels: Examining why this robust combination should not be ignored for future sustainable transportation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 148, 111292.
<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.111292>
- Energy Information Administration, U. (2016). *International Energy Outlook 2016*.
www.eia.gov
- Faeth, G. M., Dominicus, D. P., Tulpinsky, J. F., & Olson, D. R. (1969). Supercritical bipropellant droplet combustion. *Symposium (International) on Combustion*, 12(1), 9–18. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(69\)80387-5](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(69)80387-5)
- Faik, A. M. D., & Zhang, Y. (2018). Multicomponent fuel droplet combustion investigation using magnified high speed backlighting and shadowgraph imaging. *Fuel*, 221, 89–109. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2018.02.054>
- Faik, A. M. E. D., Zhang, Y., & Hanriot, S. de M. (2018). Droplet Combustion Characteristics of Biodiesel–Diesel Blends using High Speed Backlit and Schlieren Imaging. 40(13–14), 1085–1098. <https://doi.org/10.1080/01457632.2018.1457209>
- Ghamari, M., & Ratner, A. (2016). Combustion characteristics of diesel and Jet-A droplets blended with polymeric additive. *Fuel*, 178, 63–70.
<https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2016.03.052>
- Godsave, G. A. E. (1949). Combustion of Droplets in a Fuel Spray. *Nature*, 164(4173), 708–709. <https://doi.org/10.1038/164708b0>
- Godsave, G. A. E. (1953). Studies of the combustion of drops in a fuel spray—the burning of single drops of fuel. *Symposium (International) on Combustion*, 4(1), 818–830. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(53\)80107-4](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(53)80107-4)

- Hoxie, A., Schoo, R., & Braden, J. (2014). Microexplosive combustion behavior of blended soybean oil and butanol droplets. *Fuel*, 120, 22–29. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2013.11.036>
- Isoda, H., & Kumagai, S. (1950). Combustion of Fuel Droplets. In *Z. Kristall.* (Vol. 164).
- Isoda, H., & Kumagai, S. (1958). New aspects of droplet combustion. *Symposium (International) on Combustion*, 7(1), 523–531. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(58\)80087-9](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(58)80087-9)
- Jackson, G. S., Avedisian, C. T., & Yang, J. C. (1992). Observations of soot during droplet combustion at low gravity: heptane and heptane/monochloroalkane mixtures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 35(8), 2017–2033. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(92\)90203-5](https://doi.org/10.1016/0017-9310(92)90203-5)
- Javed, I., Baek, S. W., & Waheed, K. (2015). Autoignition and combustion characteristics of kerosene droplets with dilute concentrations of aluminum nanoparticles at elevated temperatures. *Combustion and Flame*, 162(3), 774–787. <https://doi.org/10.1016/J.COMBUSTFLAME.2014.08.018>
- Keating, E. L. (2007). *Applied combustion*. CRC Press/Taylor & Francis.
- KING, M. K. (2007). Boron Ignition and Combustion in Air-Augmented Rocket Afterburners, 155–164. <https://doi.org/10.1080/00102207208952516>
- Kobayasi, K. (1955). An experimental study on the combustion of a fuel droplet. *Symposium (International) on Combustion*, 5(1), 141–148. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(55\)80021-5](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(55)80021-5)
- Kumagai, S., & Isoda, H. (1957). Combustion of fuel droplets in a falling chamber. *Symposium (International) on Combustion*, 6(1), 726–731. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(57\)80100-3](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(57)80100-3)
- Lasheras, J. C., Fernandez-Pello, A. C., & Dryer, F. L. (1981). On the disruptive burning of free droplets of alcohol/n-paraffin solutions and emulsions. *Symposium (International) on Combustion*, 18(1), 293–305. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(81\)80035-5](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(81)80035-5)
- Law, C. K. (1976). Unsteady droplet combustion with droplet heating. *Combustion and Flame*, 26(C), 17–22. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(76\)90053-5](https://doi.org/10.1016/0010-2180(76)90053-5)
- Law, C. K. (1982). Recent advances in droplet vaporization and combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 8(3), 171–201. [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(82\)90011-9](https://doi.org/10.1016/0360-1285(82)90011-9)
- Law, C. K., & Sirignano, W. A. (1977). Unsteady droplet combustion with droplet heating—II: Conduction limit. *Combustion and Flame*, 28(C), 175–186. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(77\)90023-2](https://doi.org/10.1016/0010-2180(77)90023-2)
- Lefebvre, A. H. (Arthur H., & McDonell, V. G. (n.d.). *Atomization and sprays*. Retrieved June 9, 2022.

- Liu, Y. C., Xu, Y., Avedisian, C. T., & Hicks, M. C. (2015). The effect of support fibers on micro-convection in droplet combustion experiments. *Proceedings of the Combustion Institute*, 35(2), 1709–1716.
<https://doi.org/10.1016/J.PROCI.2014.07.022>
- Manzello, S. L., Yozgatligil, A., & Choi, M. Y. (2004). An experimental investigation of sootshell formation in microgravity droplet combustion. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(24), 5381–5385.
<https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2004.07.008>
- Merzkirch, W. (1987). *Flow Visualization - 2nd Edition*.
- Ogami, Y., Sakurai, S., Hasegawa, S., Jangi, M., Nakamura, H., Yoshinaga, K., & Kobayashi, H. (2009). Microgravity experiments of single droplet combustion in oscillatory flow at elevated pressure. *Proceedings of the Combustion Institute*, 32(2), 2171–2178. <https://doi.org/10.1016/J.PROCI.2008.05.008>
- Ooi, J. B., Yap, J. H., Tran, M. V., & Leong, J. C. K. (2019). Experimental Investigation on the Droplet Burning Behavior of Diesel-Palm Biodiesel Blends. *Energy and Fuels*, 33(11), 11804–11811.
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b02259>
- Pan, K. L., Li, J. W., Chen, C. P., & Wang, C. H. (2009). On droplet combustion of biodiesel fuel mixed with diesel/alkanes in microgravity condition. *Combustion and Flame*, 156(10), 1926–1936.
<https://doi.org/10.1016/J.COMBUSTFLAME.2009.07.020>
- Pandey, K., & Basu, S. (2019). High vapour pressure nanofuel droplet combustion and heat transfer: Insights into droplet burning time scale, secondary atomisation and coupling of droplet deformations and heat release. *Combustion and Flame*, 209, 167–179. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.07.043>
- Polymeropoulos, C. E., & Das, S. (1975). The effect of droplet size on the burning velocity of kerosene-air sprays. *Combustion and Flame*, 25(C), 247–257.
[https://doi.org/10.1016/0010-2180\(75\)90091-7](https://doi.org/10.1016/0010-2180(75)90091-7)
- Ragland, K. W., & Bryden, K. M. (2011). Combustion Engineering. *Combustion Engineering*. <https://doi.org/10.1201/B11548>
- Rasid, A. F. A., & Zhang, Y. (2019). Combustion characteristics and liquid-phase visualisation of single isolated diesel droplet with surface contaminated by soot particles. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37(3), 3401–3408.
<https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.08.023>
- Raslavičius, L., & Bazaras, Ž. (2010a). *Prediction of multi-component effects on ignition delay of oxygenated diesel fuel blends*.
- Raslavičius, L., & Bazaras, Ž. (2010b). Variations in oxygenated blend composition to meet energy and combustion characteristics very similar to the diesel fuel. *Fuel Processing Technology*, 91(9). <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.03.011>

- Saito, M., Hoshikawa, M., & Sato, M. (1996). Enhancement of evaporation/combustion rate coefficient of a single fuel droplet by acoustic oscillation. *Fuel*, 75(6), 669–674. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(95\)00314-2](https://doi.org/10.1016/0016-2361(95)00314-2)
- Sankaranarayanan, A., Lal, S., Namboothiri, I. N. N., Sasidharakurup, R., Chowdhury, A., & Kumbhakarna, N. (2019). Droplet combustion studies on two novel energetic propellants, an RP-1 surrogate fuel, and their blends. *Fuel*, 255. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115836>
- Sarv, H., Nizami, A. A., & Cernansky, N. P. (1983). Droplet Size Effects on NO_x Formation in a One-Dimensional Monodisperse Spray Combustion System. *Journal of Engineering for Power*, 105(4), 791–796. <https://doi.org/10.1115/1.3227483>
- Sazhin, S. S. (2017). Modelling of fuel droplet heating and evaporation: Recent results and unsolved problems. *Fuel*, 196, 69–101. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2017.01.048>
- Sazhin, S. S., al Qubeissi, M., Kolodnytska, R., Elwardany, A. E., Nasiri, R., & Heikal, M. R. (2013). Modelling of biodiesel fuel droplet heating and evaporation. *Fuel*, 115, 559–572. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2013.07.031>
- Settles, G. S. (2001). *Schlieren and Shadowgraph Techniques : Visualizing Phenomena in Transparent Media*. 376.
- Shang, W., Yang, S., Xuan, T., He, Z., & Cao, J. (2020). Experimental studies on combustion and microexplosion characteristics of n-alkane droplets. *Energy and Fuels*, 34(12), 16613–16623. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c02904>
- Sigma-Aldrich Chemicals. (n.d.). *Triethyl borate* 99 150-46-9. Retrieved May 16, 2022.
- Singh, D., Sharma, D., Soni, S. L., Inda, C. S., Sharma, S., Sharma, P. K., & Jhalani, A. (2021). A comprehensive review of biodiesel production from waste cooking oil and its use as fuel in compression ignition engines: 3rd generation cleaner feedstock. *Journal of Cleaner Production*, 307, 127299. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.127299>
- Singh, G., Esmaeilpour, M., & Ratner, A. (2019). The effect of acetylene black on droplet combustion and flame regime of petrodiesel and soy biodiesel. *Fuel*, 246, 108–116. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2019.02.115>
- Spalding, D. B. (1953). The combustion of liquid fuels. *Symposium (International) on Combustion*, 4(1), 847–864. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(53\)80110-4](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(53)80110-4)
- Tanabe, M., Kuwahara, T., Satoh, K., Fujimori, T., Sato, J., & Kono, M. (2005). Droplet combustion in standing sound waves. *Proceedings of the Combustion Institute*, 30(2), 1957–1964. <https://doi.org/10.1016/J.PROCI.2004.07.019>
- Ulas, A., Kuo, K. K., & Gotzmer, C. (2001). Ignition and combustion of boron particles in fluorine-containing environments. *Combustion and Flame*, 127(1–2), 1935–1957. [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(01\)00299-1](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(01)00299-1)

- Urban, B. D., Kroenlein, K., Kazakov, A., Dryer, F. L., Yozgatligil, A., Choi, M. Y., Manzello, S. L., Lee Ook, K., & Dobashi, R. (2004). Sooting behavior of ethanol droplet combustion at elevated pressures under microgravity conditions. *Microgravity - Science and Technology 2004* 15:3, 15(3), 12–18. <https://doi.org/10.1007/BF02870960>
- Veith, J., & Pfitzner, M. (2016). Combustion of Boron Particles in Premixed Methane/Air Flames. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 41(2). <https://doi.org/10.1002/prep.201500069>
- Wang, C. H., Liu, X. Q., & Law, C. K. (1984). Combustion and microexplosion of freely falling multicomponent droplets. *Combustion and Flame*, 56(2), 175–197. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(84\)90036-1](https://doi.org/10.1016/0010-2180(84)90036-1)
- Wang, J., Zhang, H., Zhang, Q., Qiao, X., Wang, X., Ju, D., & Sun, C. (2021). Flame spread and combustion characteristics of two adjacent jatropha oil droplets. *Fuel*, 285, 119077. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2020.119077>
- Xu, G., Ikegami, M., Honma, S., Ikeda, K., Dietrich, D. L., & Struk, P. M. (2004). Sooting characteristics of isolated droplet burning in heated ambients under microgravity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(26), 5807–5821. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2004.05.038>
- Yeh, C. L., & Kuo, K. K. (1996). Ignition and combustion of boron particles. *Progress in Energy and Combustion Science*, 22(6), 511–541. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(96\)00012-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(96)00012-3)
- Zheng, L., Faik, A., & Zhang, Y. (2016). Flame colour analysis for the droplet combustion of water-in-diesel emulsions. *Costa Del Sol, Spain*, 212–217.

EKLER

Ek 1. Matlab Kodu

```
clear;close all;

ctr=1;

for i=1:3415

    if i<10

        fileName=['D:\Work\kodlar\DM11\File_0000\File__000' num2str(i) '.jpg'];

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

        fileName=['D:\Work\kodlar\DM11\File_0000\File__00' num2str(i) '.jpg'];

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

        fileName=['D:\Work\kodlar\DM11\File_0000\File__0' num2str(i) '.jpg'];

    else

        fileName=['D:\Work\kodlar\DM11\File_0000\File__' num2str(i) '.jpg'];

    end

    Igray = rgb2gray(imread(fileName));

    fasf=Igray;

    a12=imcomplement(fasf);

    a1=im2double(a12);

    c=0.5;

    %%LOGARITHMIC TRANSFORMATION%%

    S=c*log(1+a1);

    %%CANNY EDGE DETECTION%%

    BW4 = edge(S,'Canny',0.35) ;

    [centers, radii] = imfindcircles(BW4,[10 50],'ObjectPolarity','bright','Sensitivity',0.8);
```

```

clf;

if ~isempty(radii)

    r(ctr)=radii(1);

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

    ctr=ctr+1;

end

imshow(a1);

h = viscircles(centers,radii);

pause(0.000001);

end

plot(r)

A=r;

x=1:(ctr-1);

B = smoothdata(A,'gaussian',20);

subplot(1,2,1);plot(x,A,'-o');

subplot(1,2,2);plot(x,B,'-x');

legend('Original Data','Smoothed Data')


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');
```



ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Mert Şevket Biçer

Öğrenim Durumu :

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lisans	Otomotiv Mühendisliği	Tarsus Üniversitesi	2015-2020
Tz. Yüksek Lisans	Makine Mühendisliği	Tarsus Üniversitesi	2020-2022

ESERLER (Makaleler ve Bildiriler)

1. YONTAR, A. A., AYAZ, T., DEĞİRMENCİ, H., SOFUOĞLU, D. BİÇER. M. Ş. (2020). Numerical Investigation of the Effect of Ignition Advance Change for Gasoline-Methane Mixture on Performance and Emission Characteristics
2. YONTAR, A. A., DEĞİRMENCİ, H., SOFUOĞLU, D. BİÇER. M. Ş. (2020). Investigation Of Soot Formations For Different Fuel Mixtures Based On Hydrogen-Enriched Methane In Reverse Flow Combustion System
3. YONTAR, A. A., AYAZ, T., DEĞİRMENCİ, H., SOFUOĞLU, D. BİÇER. M. Ş. (2020). Numerical Investigation Of The Flow Characteristics Of The Multi-Stage Tesla Valve In Laminar And Turbulent Flow Conditions Depending On Velocity Changes