



Trietil borat, benzin ve trietil borat-benzin karışımının yanma özelliklerinin incelenmesi

Duygu Sofuoğlu ^{1,*}, Hüseyin Değirmenci ², Ahmet Alper Yontar ³

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 06500, Türkiye

²Tarsus Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mersin, 33400, Türkiye

³Tarsus Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mersin, 33400, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

İlk gönderi 7 Ekim 2023

Kabul 21 Ocak 2024

Online 29 Mart 2024

Araştırma Makalesi

DOI: 10.30728/boron.1372584

Anahtar kelimeler:

Benzin
Bor
Damlacık
Trietil borat
Yanma

ÖZET

Son yıllarda geleneksel yakıtların yerine alternatif yakıt arayışları, artan bir öneme sahiptir ve bu bağlamda bor türevli yakıtlar, yeni nesil enerji kaynakları için umut vadeden bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Buna istinaden bu çalışma, geleneksel bir yakıt olan benzinle yeni nesil bir yakıt olan trietil boratın (TEB) saf ve karışık formdaki damlacıklarının yanma özelliklerini incelemektedir. Çalışmada, yakıt damlacık çapının, alev yapısının ve alev sıcaklığının zaman içindeki evrimi, yüksek hızlı kamera ve termal kamera cihazlarıyla gözlemlenmiştir. Deneylerde referans olarak benzin yakıtı kullanılmış ve ayrıca, kütle bazında TEB eklenerek %20TEB, %40TEB, %60TEB ve %80TEB yakıt karışımları hazırlanmıştır. Yüksek hızlı kamera görüntülerinin analizi, TEB içeren yakıt damlacıklarının yanma işlemi sırasında benzin yakıtından farklı olarak geniş bir ışısız bölgeye sahip olduğunu göstermiştir. Saf ve karışık yakıtlardan elde edilen alevlerde, en yüksek alev sıcaklığı %80TEB karışımındaki damlacıklarda kaydedilmiştir. Ayrıca, en kısa yok olma süresi yine %80TEB karışımında gözlemlenmiştir. Deneyler sonucunda, en kısa tutuşma gecikmesinin %60TEB yakıt damlacıklarında, en uzun tutuşma gecikmesinin ise saf benzinde olduğu incelenmiştir. Genel olarak, TEB ilavesinin benzinle karşılaştırıldığında tutuşma gecikmesini azalttığı, toplam yok olma süresini artırdığı ve yanma sırasındaki sıcaklığı yükselttiği belirtilmiştir. Araştırmada incelenen yakıt damlacıklarının boyutsuz kare damlacık çapının $(D/D_0)^2$ zamana bağlı değişiminin eğrileri, genellikle D^2 -yasasına uygun özellikler sergilemiştir.

Investigation of combustion properties of triethyl borate, gasoline and triethyl borate-gasoline mixture

ARTICLE INFO

Article History:

Received October 7, 2023

Accepted January 21 2024

Available online March 29, 2024

Research Article

DOI: 10.30728/boron.1372584

Keywords:

Copper
Gasoline
Boron
Droplet
Triethyl borat
Combustion

ABSTRACT

In recent years, the search for alternative fuels to replace traditional fuels has been of increasing importance and in this context, boron-derived fuels are considered as a promising alternative for next generation energy sources. Accordingly, this study investigates the combustion characteristics of pure and mixed droplets of triethyl borate (TEB), a new generation fuel, and petrol, a conventional fuel. In the study, the evolution of the fuel droplet diameter, flame structure and flame temperature over time were observed with high-speed camera and thermal camera devices. In the experiments, petrol fuel was used as a reference and 20%TEB, 40%TEB, 60%TEB and 80%TEB fuel blends were prepared by adding TEB on a mass basis. Analysis of high-speed camera images showed that TEB-containing fuel droplets have a large non-luminous region during the combustion process, unlike gasoline fuel. In the flames obtained from pure and mixed fuels, the highest flame temperature was recorded in droplets of 80%TEB mixture. In addition, the shortest extinction time was again observed in the 80%TEB mixture. As a result of the experiments, it was found that the shortest ignition delay was observed in 60%TEB fuel droplets and the longest ignition delay was observed in pure gasoline. In general, it was reported that the addition of TEB decreased the ignition delay, increased the total extinction time and increased the temperature during combustion compared to gasoline. The curves of the time-dependent variation of the dimensionless square droplet diameter $(D/D_0)^2$ of the fuel droplets examined in the study generally exhibited characteristics in accordance with the D^2 -law.

1. Giriş (Introduction)

Teknolojinin ilerlemesi ve nüfusun artması enerjiye olan talebin hızını artırmaktadır. Küresel ısınmaya

ve iklim değişikliklerine neden olan fosil yakıtların oluşturduğu sera gazlarının toplumsal ve çevresel zararları nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarının

*Corresponding author: duygu.sofuoğlu@gazi.edu.tr

kullanımı bir zorunluluk haline gelmiştir. Tüm alanlarda olduğu gibi, özellikle yoğun enerji tüketimi olan ısı makinelerinde, yakıt tüketiminin ve emisyon oluşumunun azaltılması açısından ar-ge çalışmaları artan bir ivme ile devam etmektedir. Bu çabanın kamusal alandaki yansımaları; çoklu yakıt karışımı uygulamaları, sentetik yakıt geliştirme gibi yakıt üretim süreçleri ile kendine yer bulmaktadır [1]. Uzay-havacılık sanayi, otomotiv, sevk sistemleri ve diğer birçok kamusal alanda çoklu karışım yakıtlar kullanılmaktadır [2]. Bu alanlarda kullanılan yakıtlar, birçok hidrokarbon türünün karmaşık bileşenlerinden oluşmaktadır. Genelde bu bileşenler n-alkanlar, dallı veya izo-alkanlar, aromatikler, polisiklik alkanlar, olefinler, naftenler, parafinler ve oksijenli hidrokarbonlar gibi kimyasal temel yapılardan oluşmaktadır. Bir hidrokarbon yakıtın kimyasal özellikleri; yakıtın tutuşma, yanma davranışı, atomizasyon sistemleri ve emisyon çıktıları ile karakterize edilmektedir. [3,4]. Bu verileri alabileceğimiz en temel araştırma metodu damlacık yanma testidir. Çünkü mevcut anlayışın temelleri, damlacıkların buharlaşması üzerine yapılan çalışmalara dayanmaktadır. Tekli ve çok bileşenli yakıtların damlacık skalasında buharlaşma sürecinin, atomizasyon mekanizmalarının açık bir şekilde temelde gözlemlenmesi bu metodu güvenli kılarak öne çıkarmaktadır. Literatürde damlacık boyutunda birçok çalışma yapılmıştır. Xu ve Avedisian [5] benzin, n-bütanol ve n-bütanol+benzin yakıtlarının damlacık skalasında yanma davranışını incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda, n-bütanolün benzine katkı maddesi olmasıyla yanma performansını arttırdığını ve yakıt tüketimini azalttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, bütanolün benzine karşılaştırıldığında daha az is oluşturma eğiliminde olduğunu gözlemlemişlerdir Pan ve arkadaşları [6] dizel/biyodizel karışımına eklenen alkollerin (metanol, etanol ve propanol) yanma kalitesini arttırdığını, ön ısıtma gecikmesini ve is oluşumunu azalttığını bildirmişlerdir. Bütanolün is oluşumu eğiliminin benzine göre daha düşük olması nedeniyle, benzin ile harmanlanarak kullanımının emisyonları azaltmak için önemli olduğunu açıklamışlardır. Botero ve arkadaşları [7] dizel ve biyodizel tekil yakıtları ile dizel-etanol, biyodizel-etanol, dizel-biyodizel çoklu karışım yakıtların damlacık boyutunda yanma davranışını araştırmışlardır. Dizel ve biyodizele etanolün eklenmesi ile damlacığın kararlı yanma davranışı sergileyerek mikro patlamalara neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Uçuculuk, yakıt damlacıklarının mikro patlamaları, makro patlamaları, buharlaşma hızı ve iç buhar kabarcığı dinamikleri arasında önemli bir faktördür. Rao ve arkadaşları [8], damlacık boyutunda karışım yakıtların uçuculuk farklarının yanma davranışı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında yüksek uçuculuğa sahip etanol ve bütanol, düşük uçuculuğa sahip jet A-1 yakıtları kullanılmıştır. Araştırmalarında bileşenler arasında nispeten düşük uçuculuk farkı olan karışımların, mikro patlamalara sadece kabarcık genişlemesiyle katkıda bulunduğunu tespit etmişlerdir. Buna karşılık yüksek uçuculuk farkı olan karışımlar için, hem

kabarcık genişlemesi hem de ara yüzdeki kararsızlık damlacıkta yol açmış ve damlacık parçalanmasını hızlandırmıştır. Park ve arkadaşları [9], benzin ve dizel yakıt karışımının damlacık atomizasyonuna etkisini ve emisyon özelliklerini incelemişlerdir. Karışımda benzin miktarının artmasıyla küçük çaplı damlacık sayısının arttığını ve buna bağlı olarak yüzey geriliminden kaynaklı kararsızlıkların oluşumunu gözlemlemişlerdir.

Yanma reaksiyonlarında kimyasal yapısında oksijen içeren hidrokarbonların kullanılması, geleneksel hidrokarbon yakıtlara kıyasla emisyonlarının azaltılmasında önem arz etmektedir [10]. Ayrıca, oksijen içeren hidrokarbonlar kimyasal yapıları nedeniyle daha düşük bir termal değere sahiptir. Bu durum aynı enerji seviyesine ulaşmak için oksijensiz hidrokarbonlardan neredeyse iki kat daha fazla oksijen içeren hidrokarbon tüketilmesi anlamına gelmektedir [11] Bu noktada, bor içeren yeni nesil oksijen içeriğine sahip yakıtlar, uygulanabilir çözüm olarak yerini almaktadır. Öte yandan kimyasal yapısında yüksek hidrojen içeriği [12,13] barındıran TEB ($C_6H_{15}BO_3$) gibi organobor türevlerinin enerji kaynağı olarak faydalanmak amacıyla çalışmalar sürdürülmektedir. TEB'in yapılarıdaki oksidasyon kalitesini yüksek kılan metil kökleri [14,15] bünyesinde bulunan oksijen ve borun sahip olduğu yüksek kimyasal enerji özellikleri yakma sistemleri için önem arz etmektedir. Ayrıca TEB (H/C:~2,50) geleneksel yakıt olan benzinden (H/C:~2,25) daha çok karbon başına hidrojen sayısına sahiptir. Bu özellikler TEB'i enerjistik açıdan öne çıkarmaktadır. Isı makinelerinde organobor türevi içeren hidrokarbonların sağlıklı oksidasyonu ile daha yüksek sıcaklıkların ve dolayısıyla daha yüksek termal verimliliklerin sağlanabileceği düşünülmektedir. Değirmenci ve arkadaşları [16] trimetil borat, metanol ve etanol yakıtlarının yanma ve atomizasyon davranışlarını damlacık ölçekli yanma testleri ile incelemişlerdir. Ayrıca çalışmalarında saf trimetil borat yakıtına kütlece %20, %40, %60 ve %80 oranlarında alkol ilavesinin etkisini araştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda trimetil boratın alkollerle oluşturduğu tüm karışım oranlarında kararlı alev oluşumları ortaya çıkardığını gözlemlemişlerdir. Yontar ve arkadaşları [17], geleneksel yakıtlar (dizel ve benzin) ve yeni nesil yakıtlar (trietil borat ve trimetil borat) yakıtlarının yanma davranışını damlacık deneyleri ile incelemişlerdir. Çalışmalarında, en yüksek alev sıcaklığının ve en kısa yok olma süresinin Trimetil borat damlacığında oluştuğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca araştırmalarında en kısa tutuşma gecikmesi trimetil borat damlacığında, en uzun tutuşma gecikmesi süresi ise dizel yakıt damlacığında ölçülmüştür. Yontar ve arkadaşları [18] dizel, trimetil borat ve dizel+trimetil borat yakıtları ile damlacık boyutunda yanma testleri yapmışlardır. Yakıt karışımlarında dizel yakıtına %20, %40, %60 ve %80 oranında trimetil borat yakıtı eklenmiştir. Çalışmanın sonucunda, karışımda dizel miktarının artmasıyla damlacık bozunması ve yarım küre geometrisinde yüksek sapmalar olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, trimetil borat ilavesinin tutuşma gecikmesini azalttığını

ve sönme süresini kısalttığını vurgulamışlardır.

Literatürde, saf trietil Borat (TEB) gibi yeni nesil organobor türevli yakıtlar üzerine yapılan yanma deneylerinin kısıtlı olduğu gözlemlenmekte olup damlacık yanma testleri şu ana kadar sadece çalışma grubumuz tarafından ele alınmıştır. Bu çalışmaların, belirli oranlarda benzin gibi geleneksel yakıtlar içerisinde eklenmesi durumunda ortaya çıkabilecek davranışların karakterizasyonunun sağlam temellere oturtulması ileriki araştırmalar için kritik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, organobor türevli alternatif yakıtların geleneksel yakıtlara ek yakıt olarak eklendiğinde katalitik etkilerin veya yeni ideal yakıt arayışlarının yanı sıra yanma karakterizasyonunun incelenmesi de önemli bir unsurdur. Bu perspektiften yola çıkarak, mevcut literatürde bulunan sınırlı sayıda çalışmanın paralelinde, farklı oranlardaki TEB ve benzin karışımlarının damlacık yanma testinde ki etkisi bu çalışmada deneysel olarak araştırılmıştır. Bu deneysel çalışmada damlacık testleri, benzin yakıtına ek olarak yüksek reaktiviteye sahip olan TEB yakıtı seçilerek gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada benzin, TEB ve benzin+TEB karışımı yakıtların damlacıklarının yanma davranışları karşılaştırmalı olarak araştırılmıştır. Deneylerde, saf ve karışımı yakıtların alev davranışındaki değişimini incelemek için yüksek hızlı kamera yakıt damlacıklarının sıcaklıklarını ölçmek için ise termal kamera kullanılmıştır. Yüksek hızlı kameradan kaydedilen görüntüler, tutuşma gecikmesi, yok olma süresi, mikro patlamalar ve damlacık yapısındaki değişiklikler gibi damlacık alevini etkileyen atomizasyon davranışlarını gözlemlenmiştir.

2. Malzeme ve Yöntemler (Material and Methods)

Deneylerde kullanılan TEB yakıtı Acros Organics firmasından (%97 saflık) satın alındı. Yakıt karışımları, kütle itibarıyla; %20 Trietil borat-%80 Benzin (%20 TEB), %40 Trietil borat -%60 Benzin (%40TEB), %60 Trietil borat -%40 Benzin (%60TEB) ve %80 Trietil borat -%20 Benzin (%80TEB) olarak hazırlandı. Saf birincil yakıtlar ise; Trietil borat (%100TEB) ve Benzin (%0TEB) kullanıldı. Karışımların bileşimini kütlece belirlemek için WL-2002L Dijital Hassas Terazi (2 kg/0,01 gr) kullanıldı. Deneylerde kullanılan yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Yakıt özellik tablosu [12,13,20] (Fuel specification table [12,13,20]).

Özellikler	Benzin	TEB
Molekül formülü	C_8H_{18}	$C_6H_{15}BO$
Moleküler ağırlığı (gr/mol)	114	146
Alevlenme noktası (K)	261	284
Kaynama noktası (K)	372	391
Yoğunluk 213 K (gr/cm³)	0,691	0,858
Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı (K)	669	-
Adyabatik alev sıcaklığı (K)	2266	-
Stokiyometrik karışım için hava yakıt oranı	14,7	15,47

İlk adımda, deneyler için 2 ml'lik polipropilen tüpler içerisine yakıt numuneleri ilave edilerek bir sızdırmazlık bandıyla iyice kaplandı. Hazırlanan karışım yakıtların homojen bir şekilde karışmasını sağlamak için en az bir saat ultrasonik banyoda bekletildi [19]. Ultrasonik banyonun ısınmasını önlemek ve tüp içindeki yakıt buharlaşmasını en aza indirmek için belirli periyotlarda buz takviyesi yapılarak ultrasonik banyonun 10-15 °C bandında olması sağlandı. Karıştırılan yakıtlar daha sonra damlacık yanma testine alınmış ve sırasıyla incelenmiştir. Deneyler, normal yerçekimi altında, stabil atmosferik koşullarda (25±5 °C, 1 atm ve %53 bağıl nem) gerçekleştirildi.

Çalışmada, alev sıcaklığı ve en yüksek alev sıcaklıklarındaki değişiklikleri tespit etmek için, termal kamera kullanıldı. Termal kameraya ait teknik özellikler Tablo 2'de sunulmaktadır. Testlerden önce FLIR E96 23° termal kamera, termokuplu bir ısı plakası üzerinde kalibre edildi.

Tablo 2. Termal kamera teknik özellikleri (Thermal camera technical specifications).

Teknik Özellikler	Değer
Marka	FLIR
Model	E96 23°
Çözünürlük	2640 × 480 piksel
Spektral Aralık	7,5–14 µm
Termal Hassasiyet	30°C'de (86°F) <40 mK

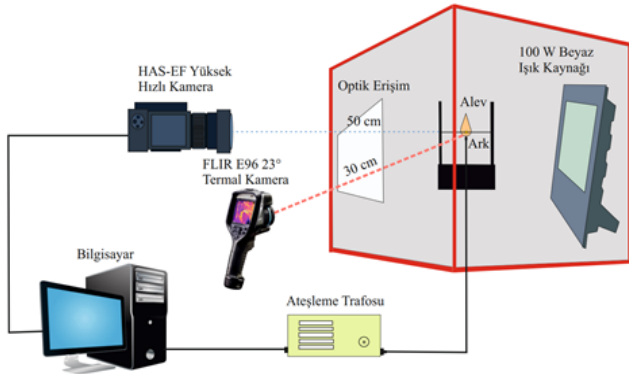
Damlacık deney alanı, rüzgâr, ışık gibi dış etmenlerin alev üzerindeki etkisini azaltmak için 550mm x 250mm x 400mm boyutlarındaki kapalı dikdörtgen prizma bir bölmede gerçekleştirildi. Belirtilen prizma, sadece veri kaydının yapıldığı optik erişimin sağlandığı bir pencere açıklığına sahiptir. Bu pencere açıklığına bir yüksek hızlı bir kamera entegre edildi ve alev 50 cm mesafede konumlandırıldı. Yüksek hızlı kameraya ait teknik özellikler Tablo 3'de sunulmaktadır.

Tablo 3. Yüksek hızlı kamera teknik özellikleri (High-speed camera technical specifications).

Teknik Özellikler	Değer
Marka	Ditect
Model	HAS EFC
Çözünürlük	2560x2048 piksel
FPS	14000
Lens Tipi	2/3 "Format F1.4 Açıklık M46xp0,75 Filtre Boyutlu Manual İris Ayarlı Lens
Lens Odak Mesafesi	11,5-69 mm
Lens Değişiminin İletimi	400-800 nm

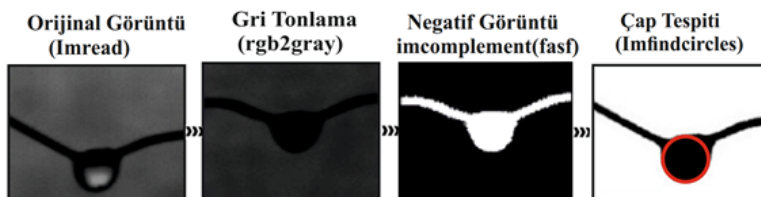
Deneylerde tüp içerisinden alınan yakıt damlacıklarının sabit hacim ile asılması için tek kanallı bir adet mikropipet kullanıldı. 50 µm çapında bir seramik SiC (silüsyum karbür) tel üzerine asılan damlacıklar

4,15±0,25 µl hacminde ve 2±0,1 mm eşdeğer çapında oluşturuldu. Deneylerde kullanılan SiC seramik tel, serbest elektron üretmediği ve düşük termal iletkenliğe sahip olduğu için tercih edilmiştir [21]. Damlacıklar seramik tel üzerinde asılı kaldıktan sonra, telin altına alternatif bir elektrik kaynağı yerleştirildi. Yakıt damlacıklarının ateşleyici ile temasını engellemek için elektrik ark ateşleyici ile (2±0,1 mm) bir mesafe bırakıldı. Asılı yakıt damlacıklarının ateşlenmesi, 20 ms kademeli bir ateşleme trafosundan sağlanan 1ms'lik, 6 kV kısa süreli ve yüksek enerjili kıvılcım kullanılarak sağlandı. Deney kurulumu Şekil 1'de detaylı olarak gösterilmektedir.



Şekil 1. Damlacık deney düzeneği (Droplet experimental setup).

Yüksek hızlı kamera kayıt işlemi iki farklı yöntemle gerçekleştirildi. İlk yöntem, canlı alev görüntülerini benzin, TEB ve benzin+TEB yakıtlarının atmosferik davranışlarını yüksek hızlı bir kamera kullanarak siyah bir arka plan üzerinde kaydederek canlı bir şekilde incelememize olanak tanır. İkinci yöntem ise damlacık yüzey gerilemeleri gibi önemli olayların zaman içindeki gelişimini tam olarak yakalamak için kayıt sırasında 100W LED beyaz ışık kaynağı kullanılarak siyah-beyaz görüntülerin elde edildiği bir durumdur. Elde edilen bu görüntüler daha sonra MATLAB 9.4'ün görüntü analizi araç kutusunda yerleşik bir kenar algılama yöntemi kullanılarak yeniden işlendi. Yüksek hızlı kameradan kaydedilen bu görüntülerin yoğunluğu artırıldı ve eşitleme tekniği kullanılarak ikili görüntülere dönüştürüldü. Görüntü analiz sürecini özetleyen şematik bir görsel Şekil 2'de sunulmaktadır. Bu zaman döngüsü verileri, yanma işlemi sırasında anlık damlacık çapı D'ye (öngörülen alan-eşdeğer küre çapı olarak tanımlanır) karşılık gelen verileri elde etmek için

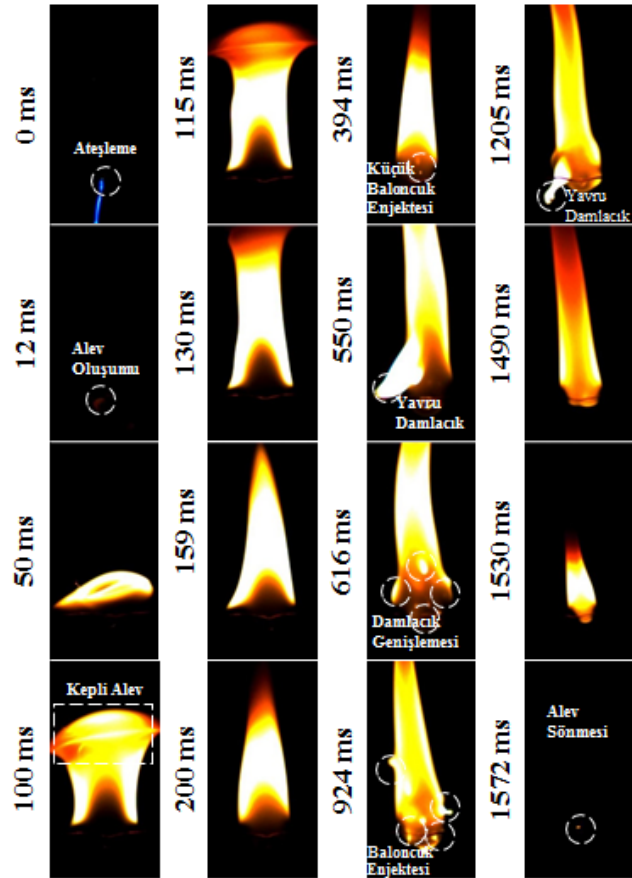


Şekil 2. Yanma ve damlacık bozulması için damlacık görüntü işleme şeması (Droplet image processing scheme for combustion and droplet degradation).

kullanıldı. İlk damlacık çapı 2,1±0,1 mm olacak şekilde damlacık regresyon oranının $(D/D_0)^2$ belirlenmesindeki bağıl hata ±%1 olarak hesaplanmıştır. MATLAB 9.4 kullanılarak her bir damlacık için benzer kenar algılama tespiti gerçekleştirildi. Önceki çalışmamızda, görüntü işleme süreci, alev atomizasyonunun karakterizasyonu, damlacık davranışı ve hata oranı hesaplamaları ayrıntılı olarak açıklanmıştır [22,23].

3. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

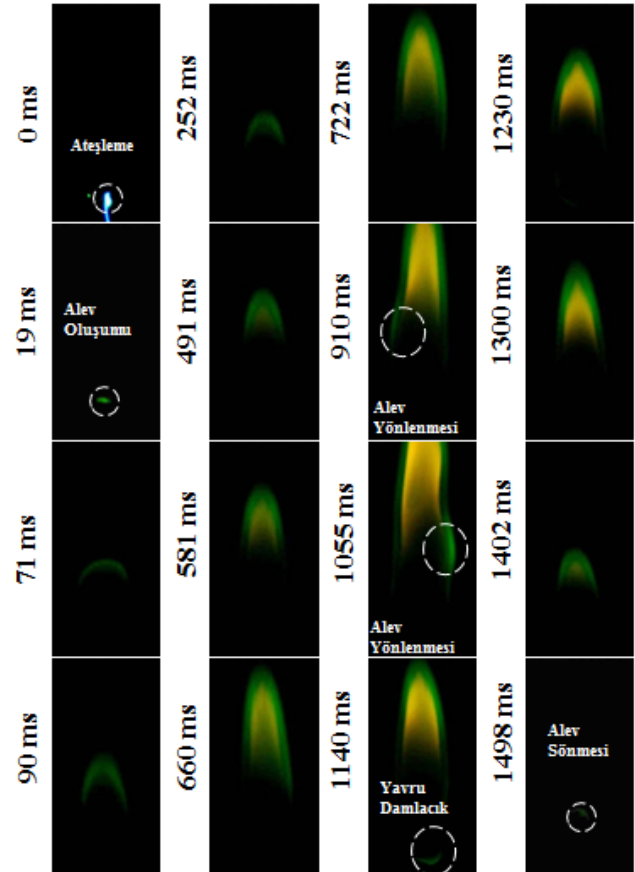
Bu çalışmada, benzin, TEB ve benzin+TEB damlacık boyutunda yanma davranışları araştırılmıştır. Yüksek hızlı kamera ile elde edilen görüntüler analiz edilerek yakıt damlacıklarının yanma süreci esnasında sergiledikleri davranışlar gözlenmiştir. Damlacık deneylerinde benzin kullanımına ait damlacık davranış görüntüleri Şekil 3'de verilmiştir. Benzinin yanma işlemine ilişkin damlacık davranışları incelendiğinde, ilk ışığa katmanın 12 ms seviyesinde görüldüğü tespit



Şekil 3. Benzin (%0TEB) damlacıklarının yanma evreleri (Combustion phases of gasoline (0%TEB) droplets).

edilmiştir. Devam eden yanma sırasında, benzin alevi güçlü bir ışımaya ve yüksek bir deformasyonlu büyüme eğilimi sergilemiştir. İlk ışımaya katman oluşumundan 120 ms'ye kadar alev çok geniş bir yayılım trendine girmiştir. Bu aşamada alev, mantar şeklini andıran şapkalı bir yapıda gelişim göstermiştir. Bu şapkalı alev türü, 130 ms bandında bozulmaya uğramış ve 150 ms den sonra hem iç koni hem de dış koniden oluşan bir yapı meydana gelmiştir. Bu yapı, deformasyonu belirli seviyelerde tutarak 400 ms'ye kadar yanma davranışını korumuştur. Daha sonra damlacık içerisindeki kaynamaya bağlı olarak alevde yüksek miktarda küçük damlacık atımları gözlenmiştir. Başlangıçta oluşan küçük damlacıklar; alevde dış ortama sıçrama hareketi ya da alevin içindeki dış konide yukarı doğru bir hareket sergilemiştir. Kaynayan damlacıkların sayısı arttıkça mikro patlamaların tetiklenme sayısı da artmıştır. Damlacık çaplarının büyümesiyle birlikte birçok noktada alevden dışa doğru sıçramalar ve alevde yavru damlacıkların ayrılması gözlenmiştir. Bu yüksek yoğunluktaki ayrışma işlemi, uzun süre benzin alevinin yanmasını kaplamış ve alevin deformasyonuna ve boy artışına neden olmuştur. Sıçrayan kabarcıklar, doğal konvektif alandaki alev bölgesine doğru hareket ederek alev yapısını kesintiye uğratmamıştır. Yüksek miktarda damlacık kopması sonrasında alev hızlı bir sönme eğilimi göstermiş ve damlacık yakma işlemi 1600 ms bandında tamamlanmıştır. Benzin damlacığının yanmasında yüksek yoğunluklu sarı, beyaz ve kırmızı parlama bölgeleri gözlemlenmiştir. Kısa sürede oluşan ve yanma işlemini kısa sürede tamamlayan benzin damlacığı alevi, yanma süreci boyunca kararsız bir davranış sergilemiştir. Alev üzerinde meydana gelen yoğun akkor rengindeki lüminesans, is oluşum seviyesinin yüksek olduğunu göstermektedir [24]. Benzin damlacığındaki alevin görüntüleri incelendiğinde, sarıdan kırmızıya doğru bir renk değişiminin olduğu görülmektedir. Bu değişikliğin nedeni, hidrokarbon bazlı bu yakıtların damlacıklarının eksik yanmanın meydana geldiği parlak alev bölgesinde kalması ve bunun sonucunda doğal konveksiyonla taşınmayan is parçacıklarının damlacık yüzeyinde toplanıp kümelenmesidir. Katı madde olarak davranan is partikülleri, damlacık yüzeyinde mikron boyutlu toplanmış partikül topaklanmalarının meydana gelmesi sonucu yarı katı gözenekli bir kabuk meydana gelmektedir [25]. Bu dahili sıvı faz difüzyonunu yani damlacıktan gaz fazına geçiş hızını baskılamıştır. Buharlaşma artık yüzey boyunca sınırlı olduğundan, sıvı damlacık çekirdeğinde dahili olarak tutulan sıvının sıcaklığının artmasıyla damlacık yüzey sıcaklığı da artmıştır. Yanma ilerledikçe is kabuğunun daha yoğun aglomerasyonu, yakıt buharlarının çevreden kaçmaya çalışmasını daha da engellemiştir [26]. Sonuç olarak, kabarcık oluşumu için çekirdekleşme bölgelerinin yoğunluğu ve boyutu kademeli olarak artmıştır. Benzin için özellikle 400 ms-1300 ms yanma aralığında şiddetli olmayan boyun çıkarma ve bu boyunların parçalanması sonucu yavru damlacık oluşumu gözlemlenmiştir. Bu dalgalanmalar yavru damlacıkların oluşmasına ve bu yapıların alev yapısından ayrılmasına neden olmuştur.

TEB damlacık yanması incelendiğinde, benzin damlacık yanmasına göre daha düşük ışımaya ile yanma davranışı sergilediği Şekil 4'te gösterilmektedir. Benzin damlacıklarında görülen yoğun sarı ve turuncu lüminesans dizisinin aksine, özellikle ilk alev oluşumu aşamasında daha yoğun bir yeşil ışık davranışı tespit edilmiştir. Borun oksijenle reaksiyonu sonucu alev, yeşil bir renge sahip olmaktadır. Alev oluşum bölgesinde ki bu durum, moleküler yapının geometrisinden kaynaklanmaktadır. Bu bağlamda moleküler oluşumu yönlendirmek ve kontrol altına almak daha kolaydır [12]. Alev ilk olarak 19 ms'de yeşil renkli ışımaya katmanla gözlenmiş daha sonrasında iç koninin karanlık olduğu 580 ms'ye kadar gelişme davranışı sergilemiştir. TEB'in 580 ms ile 1300 ms arasındaki alev davranışı, çok fazla deformasyon olmaksızın kararlı bir alev eğilimi göstermiştir. TEB bünyesindeki oksijen yapıları, alevin benzinden farklı olarak daha kararlı bir yapı sergilemesine ve daha az deformasyona uğramasına neden olmuştur. Yaklaşık 580 ms den sonra alevin iç kısmı sarı ışımaya olarak görülmeye başlamış ve öncesinde baskın olan yeşil kısım ise sarı bölgenin dış hatında ince bir alev duvarına dönüşmüştür. Buradaki sarı alev rengi, difüzyon yanması nedeniyle bağlı is oluşumundan kaynaklanmaktadır. TEB damlacığının yanması sırasında karşılaşılan koyu sarı renkli ışımaya bölgesi, bor ve oksijen kimyasına bağlı hidrokarbon yapılarından kaynaklanmaktadır [12,13]. Yakıt kimyasında bulunan metil grupları hızlı reaksiyona girerek oksidasyon sürecini hızlandırırken,



Şekil 4. %100TEB damlacıklarının yanma evreleri (Combustion phases of 100%TEB droplets).

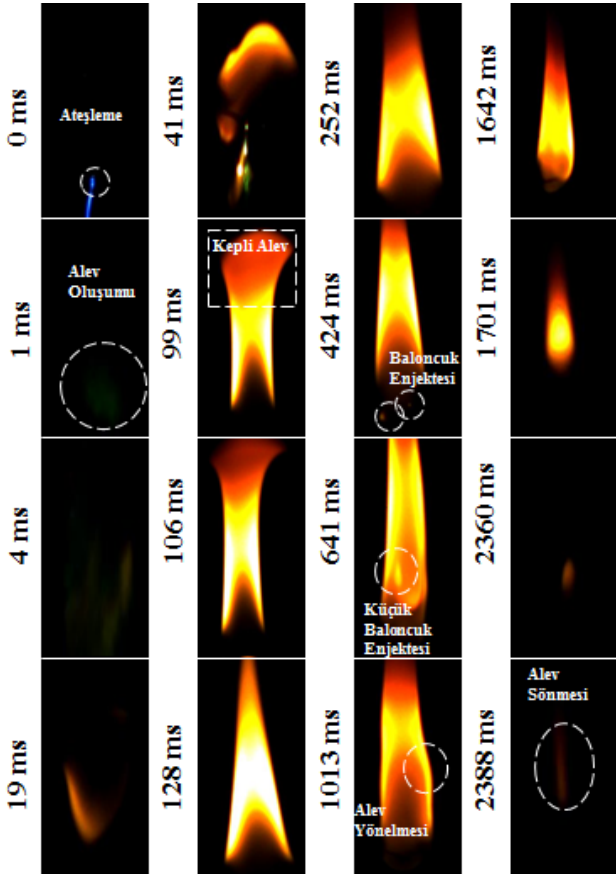
metilen grupları ise alev davranışına farklı şekillerde etki etmektedir. Metilen yapıları hızlı bir şekilde formaldehit, hidroksimetil gibi yapılara dönüşmektedir [27]. Alev içerisinde görülen koyu sarı renkli bölgenin oluşmasının sebeplerinden biri de TEB bünyesindeki metilen gruplarıdır. Bünyesinde oksijen barındıran TEB'in alev özellikleri benzinle karşılaştırıldığında, ışımayan alev bölgesinin oldukça geniş olduğu, alev boyunun kısaldığı ve parlaklığının arttığı görülmektedir. TEB damlacığının yanma sürecinde koyu sarı bölgenin oluşması ve damlacık yapısında deformasyonun başlaması ile birlikte alev üzerinde birtakım ayrışmalar ve yavru damlacık saçılımları meydana gelse de bu davranışların gerçekleşme yoğunluğunun benzin damlacıklarına göre çok düşük seviyede olduğu tespit edilmiştir. Yaklaşık 660 ms bandında tamamen gelişen TEB damlacık alevi, yaklaşık 1500 ms de sönme eğilimindedir. Genel olarak kararlı bir davranış sergileyen TEB alevi, sınırlı sayıda deformasyon göstermiştir. Ayrıca, sarı iç bölgeyle de belirtildiği gibi belirli bir süre boyunca is oluşumu tespit edilmiştir.

%20TEB katkılı damlacık yanması görüntüleri Şekil 5'de sunulmaktadır. %20TEB damlacık görüntüleri incelendiğinde, %100TEB damlacık yanmasına göre yüksek parlaklıkta yanma davranışı sergilediği görülmektedir. Ayrıca TEB damlacıklarında görülen yoğun yeşil ışımaya dizisinden tamamen farklı olarak, özellikle ilk alev oluşumu aşamasında daha yoğun bir yeşil ışık davranışı tespit edilmiştir. Alev ilk olarak

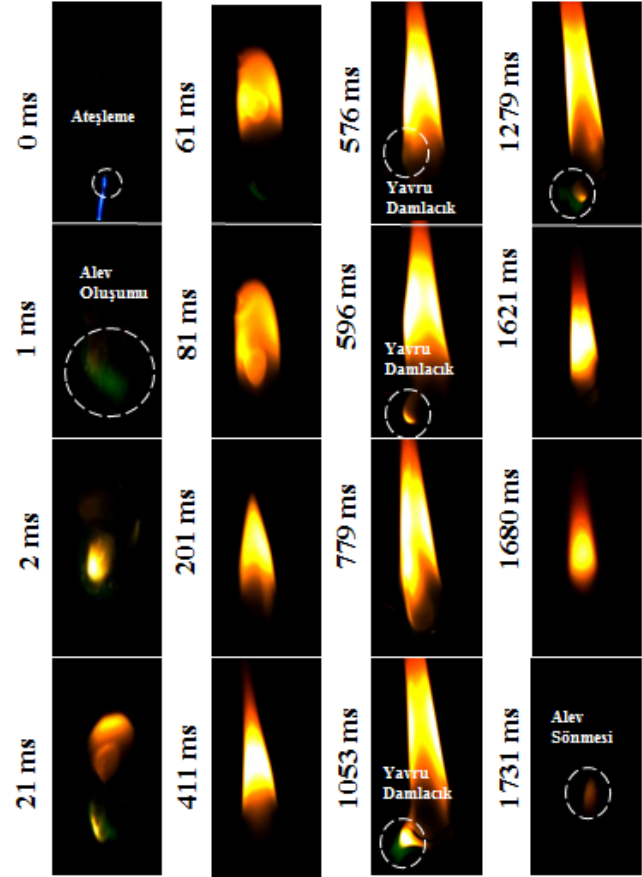
1 ms'de yeşil ışıklı bir katmanla görünür kılınmıştır. Benzin ve TEB yakıtlarından farklı olarak %20TEB oranında, alt yarım kürede alev zarfının TEB ile başladığı ve daha sonra üst yarıkürede yanmanın gerçekleştiği görülmektedir. Daha sonra damlacık 19 ms'de turuncu bir renkte ışımaya başlamıştır. TEB damlacık içerisinde 41 ms'de görülüp yanması tamamlanmıştır. Damlacık alevi 99 ms aşamasına kadar geniş bir alana yayılmıştır. Bu süre zarfında alev, tıpkı bir mantar şeklini andırarak şekilde gözlemlenmiştir. Bu şapkalı alev tipi 106 ms bandında bozulmaya uğramış ve 128 ms'den sonra hem iç koni hem de dış koniden oluşan bir yapı meydana getirmiştir. İç koni ise TEB'te olduğu gibi 252 ms zamanına kadar karanlık bir gelişim göstermiştir.

424 ms–1642 ms yanma aralığında %20TEB damlacığı, benzin yakıtı ile benzer gelişim sergilemiştir. Canlı alev görüntülerinde benzinden farklı olarak boyun çıkarma ve bu boyunların parçalanması görülmemiştir. %20TEB ilaveli damlacıkta, damlacığının yanması sırasında yüksek yoğunlukta sarı, beyaz ve kırmızı ışımaya bölgeleri oluşmuştur. %20TEB yakıtı genel olarak değerlendirildiğinde, yanma süreci boyunca benzin yakıtına göre daha kararlı bir davranış sergileme eğilimindedir.

%60TEB eklentili damlacığın yanma davranışı Şekil 6'te yer almaktadır. %60TEB canlı alev görüntüleri incelendiğinde, %20TEB karışımından farklı olarak yanma süresi boyunca daha yoğun bir



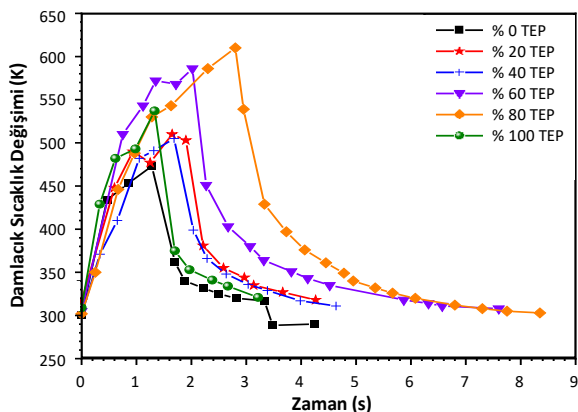
Şekil 5. %20TEB damlacıklarının yanma evreleri (Combustion phases of 20%TEB droplets).



Şekil 6. %60TEB damlacıklarının yanma evreleri (Combustion phases of 60%TEB droplets).

yeşil ışımaya dizisi tespit edilmiştir. Yanma süresince %60TEB yakıtının, alev boyunun daha kısa olduğu görülmüştür. Bu durumun yüksek oksijen içeriğinden kaynaklanmaktadır. Alev, ilk olarak 1 ms'de yeşil ışımaya tabaka ile görülmüştür. Daha sonra damlacığın 2 ms içinde turuncu renkte ışımaya gerçekleşmiştir. 81 ms'ye kadar olan yanma sürecinde, alev geniş bir yayılım göstererek sarı ve turuncu renkte bir ışımaya eğilimi sergilemiştir. Bu genişleyen alev yapısı 201 ms'den sonra daha istikrarlı bir şekilde ilerlemiş ve alev uzunluğu artmıştır. Genele bakıldığında alev gelişiminin %20TEB eklentisinden daha kararlı bir yapı sergilediği tespit edilmiştir. Bu kararlı yapının karışımdaki TEB miktarının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yanma sürecinde 411 ms-1279 ms yanma aralığında, şiddetli boyun çıkarma ve bu boyunların parçalanması sonucunda yavru damlacık oluşumu sergilendiği görülmüştür. Bu dalgalanmalar yavru damlacıkların oluşmasına ve bu yapıların alevden ayrılmasına neden olmuştur. Canlı alev yapısında TEB ışımalarının, boyun çıkarma ve yavru damlacık oluşturma safhalarında gerçekleştiği görülmektedir. %60TEB karışımının son parlama bölgesi 1731 ms'de görülmüş ve yanma tamamlanmıştır.

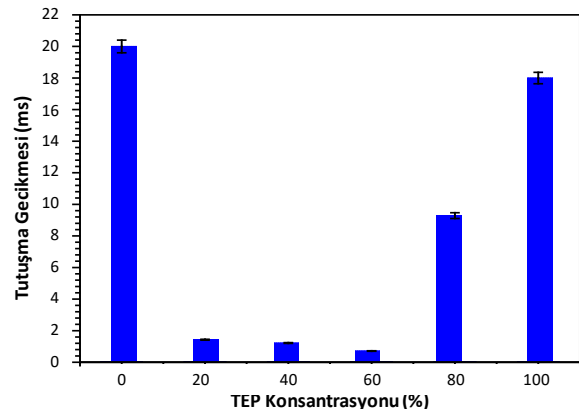
Damlacık yanması sırasında alev sıcaklığı ile süre arasındaki ilişki Şekil 7'de gösterilmektedir. En yüksek sıcaklıklara odaklanan termal kameranın lazer sensörü; önce damlacık yüzeyi ile daha sonra tamamen damlacık alevi ile temas halindedir. Eğriler incelendiğinde en yüksek alev sıcaklığına %80TEB katkılı damlacık için ulaşıldığı (~610 K) ve bu sıcaklığa atmosfer koşullarında ilk tutuşma anından itibaren (~3 s) ulaşıldığı görülmüştür. En yüksek alev sıcaklıklarının, yanma süresinin ortalarına doğru olduğu grafikte görülmektedir. Yakıt damlacıklarının alev sıcaklığındaki artışlar, reaktanların belirli bir entalpi içeriği için ürün karışımının ortalama özgül ısı ile ilişkilidir [28]. Ortalama özgül ısı değerindeki azalma, nihai alev sıcaklığındaki artışa karşılık gelmektedir [29]. Yakıtlar en yüksek alev sıcaklıkları açısından karşılaştırıldığında sırasıyla %80TEB, %60TEB, %100TEB, %20TEB, %40TEB, %0TEB olarak sıralanmaktadır. Ancak en yüksek sıcaklık



Şekil 7. Benzine TEB ilavesinin alev sıcaklıklarına etkisi (Effect of TEB addition to gasoline on flame temperatures).

noktaları her yakıt için farklı zaman noktalarına karşılık gelmektedir. Test yakıtları incelendiğinde en düşük sıcaklık benzin yakıtında görülmektedir. Tekil test yakıtları arasında en yüksek H/C oranına sahip TEB'in yüksek alev sıcaklığında görülmüş olması şaşırtıcı değildir. İlgili çeken ana nokta, %80 TEB'in diğer test yakıtlarına kıyasla çok uzun süre yüksek sıcaklık değerini korumasıdır. Bu durumun TEB nin yüksek reaktivitesi ve diğer test yakıtlarından daha fazla sayıda metil grubunu bünyesinde bulundurması ile ilişkili olduğu düşünülmektedir.

Geleneksel yakıt-hava karışımları için tutuşma gecikmesi süresi ölçümleri, yakıtların oktan değerleri, setan değerleri, ortam sıcaklığı ve basınç değerleri ile iyi bir uyum gösterme eğilimindedir. Damlacık yakıtların tutuşma gecikme süreleri Şekil 8'de sunulmuştur. Yakıtlar kendi aralarında kıyaslandığında en yüksek tutuşma gecikmesinin benzin yakıtında en düşük tutuşma gecikmesinin ise %60TEB yakıtında olduğu görülmektedir. Hidrokarbon bazlı yakıtlar incelendiğinde; daha uzun tutuşma gecikme süresine sahip yakıtlar, daha yüksek oktan sayılarına ve daha düşük setan sayılarına sahip olma eğilimindedir [30]. Ayrıca bu değerler artan kaynama ve parlama noktası değerlerinde azalmaya karşılık gelmektedir. Yakıtların kimyasal yapıları incelendiğinde, yakıtın kimyasal yapılarının tutuşma gecikmesine etkisi olduğu görülmektedir. Bu noktada daha fazla metilen ve aromatik yapı içeren benzin için tutuşma gecikmesi yüksek düzeyde iken, yapısında daha az metilen içeren ve aromatikler içermeyen TEB'in tutuşma gecikmesi benzine göre daha düşüktür. Çünkü kimyasal yapıdaki metil sayısı doğrudan reaksiyon hızını artırmaktadır. Yakıtların H/C oranı değişimi tutuşma gecikmesi üzerinde önemli bir parametredir [31]. TEB yakıtının H/C oranının benzin yakıtından fazla olması, en yüksek tutuşma gecikmesinin benzin yakıtında gerçekleşeceğini kanıtlar. Grafik incelendiğinde, TEB ilavesi arttıkça oksijen miktarı da artmakta ve karışım oksijen varlığından faydalanmaktadır. %80TEB yakıtında, yapı içerisinde oksijen ve metilen gruplarının artmasıyla, yakıt karışımı yüksek oksijen içeriğini tolere edememektedir. Dolayısıyla bu

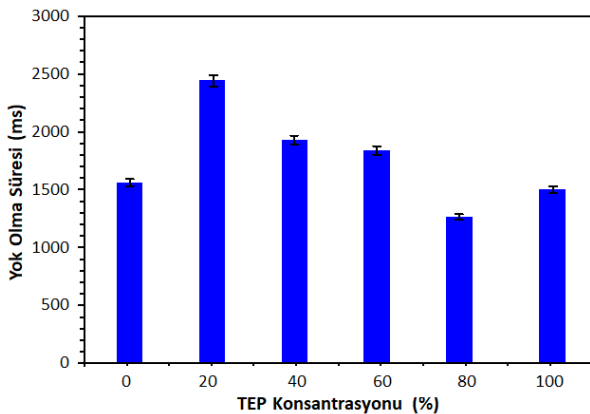


Şekil 8. Tutuşma gecikmesi süresi değişimi (Ignition delay time variation).

durum tutuşma gecikmesini arttırmaktadır. Karışım oranlarına bağlı tutuşma gecikmesi kıyaslandığında en düşük tutuşma gecikmesinin %60TEB yakıtında olduğu görülmektedir. Bu özellikleriyle TEB, içten yanmalı motorlarda kullanıldığında yanma süreçlerini hızlandırabilir, ısı kayıpları ve yakıt tüketimini azaltabilir. Benzer şekilde TEB, benzine belirli oranlarda ilave edilerek tutuşma gecikmesi kısaltılabilir ve birim zamandaki yanma oranı artırılabilir.

Yakıtların yok olma sürelerindeki değişim Şekil 9'da gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde en yüksek yok olma süresinin %20TEB yakıtında, en düşük yok olma süresinin ise %80TEB yakıtında olduğu görülmektedir. Bor içeren yakıt damlacıklarının yok olma süresinin daha kısa olmasının sebebi oksidant-reaktant karışımı içerisindeki reaktantın fazla oksijen içeriğidir [32]. Bu sonuç literatür ile uyum içerisindedir ve yok olma süresinin gizli ısı buharlaşmasından daha az, yakıtın kimyasal yapısında bulunan oksijen içeriğinden daha fazla etkilendiğini kanıtlamaktadır [33,34]. Grafik incelendiğinde, karışımli yakıtlarda TEB ilavesi arttıkça yok olma süresinin kısaltıldığı görülmektedir. %20TEB eklentili damlacık canlı alev görselinin yanma davranışı Şekil 5'de verilmiştir. Canlı alev görüntüleri incelendiğinde, yavru damlacık ve yavru damlacık atımı hareketleri görülmektedir. %60TEB yakıt karışımının canlı alev görüntüleri incelendiğinde ise bu yapıların var olduğu Şekil 6'da açıklanmıştır. Yavru damlacık, boyun verme ve yavru damlacık saçılımı gibi parametreler damlacık atomizasyonunun önemli bir göstergesidir. Bu bağlamda sistem içerisinde atomizasyon sayısı arttıkça yok olma süresi azalmaktadır.

Damlacık boyutunda meydana gelen süreçler (sıvı faz sirkülasyonu, yüzey gerilmesi, şekil salınımları, buhar-sıvı ara yüzündeki kararsızlıklar gibi) toplu olarak alev sönmesi, uçuculuk ve kirlenici oluşumu gibi büyük ölçekli olayları etkilemektedir [35]. Yakıt damlacıkları, yanma sırasında farklı zamana bağlı ölçeklerde meydana gelen iç kaynama kaynaklı kabarcık püskürmeleri nedeniyle önemli hacimsel şekil salınımları sergilemektedir [36]. Bu salınımlar, ana damlacığı periyodik olmayan bir şişme-büzülme döngüsüne sokmaktadır. Bu oluşumlar yakıt damlacığının damlacık regresyon eğrilerinde

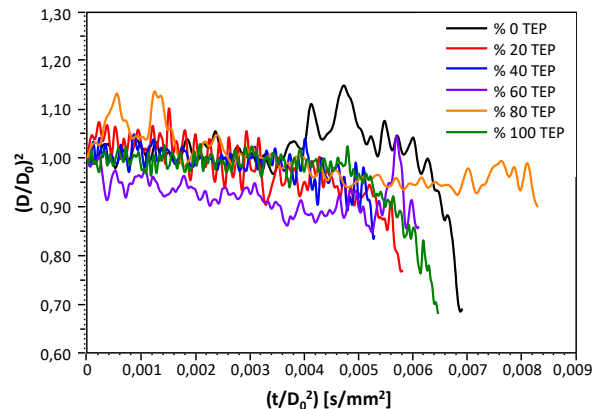


Şekil 9. Yok olma süresi değişimi (Extinction time variation).

damlacık $(D/D_0)^2$ boyutsuz oranındaki dalgalanmalara karşılık gelmektedir. D^2 yasası eğrilerinin her bir yakıt damlacığı için benzer özellikler sergilemediğini ortaya koymaktadır. Bir damlacığın tüm yaşam döngüsü iki farklı eğilimden meydana gelmektedir [37]. İlk eğilim aşaması, şişme-büzülme ve buharlaşma mekanizmalarının birbiri ile rekabet ettiği ısınma sürecinden oluşmaktadır. İkinci eğilim aşaması ise damlacık buharlaşmanın şişme-büzülme döngüsünün önüne geçmesi ile ilerlediği aşamaları içermektedir [38,8].

Benzin ve TEB damlacıklarının etkin mekanizmanın şişme-büzülme döngüsü Şekil 10'da görülmektedir. Tüm yakıtlarında damlacık atomizasyon mekanizmasında; ilk davranış aşaması için yoğunlukla yüzey dalgalanmalarının ve şişme-büzülme döngüsünün, ikinci davranış aşaması için çap küçülmesiyle birlikte şiddetli yüzey salınımlarının olduğu görülmektedir.

Damlacık içerisinde buharlaşma mekanizmasının etkili olmamasının nedeni, yakıtların yüksek kaynama noktalarından dolayı buharlaşma hızının genleşme mekanizması ile rekabet edememesinden kaynaklanmaktadır. TEB karışım damlacıklarının benzin damlacıklarına göre iskelet yapılarında daha fazla metil bulundurmaları hızlı bir şekilde yanmalarına ve hızlı bir şekilde değişimlerine neden olmuştur. İlk davranış aşaması için damlacık grafiği incelendiğinde, en uzun sürenin %20TEB yakıtında en kısa sürenin ise %40TEB yakıtında gerçekleştiği belirlenmiştir. İkinci davranış aşamasını en uzun sürede tamamlayan %0TEB, ikinci davranış aşamasını en kısa tamamlayan yakıt ise %60TEB yakıtı olmuştur. Grafik incelendiğinde benzin damlacığında ilk davranış aşaması için, yüksek genliğe sahip damlacık genleşmelerinin sık meydana geldiği görülmektedir. Bunun nedeni, yüksek uçuculuk oranı ve düşük kaynama noktası sebebiyle benzin damlacığının daha büyük çaplara doğru genişlemesidir. İkinci davranış aşamasında ise şiddetini artıran hacimsel şekil salınımları, damlacığın merkezinde kaymalara ve şiddetli damlacık deformasyonlarına neden olmuştur. TEB damlacığı ise hem ilk davranış



Şekil 10. Normalleştirilmiş damlacık çaplarının karesinin normalleştirilmiş zamana bağlı değişimi (Normalised time dependent variation of the square of normalised droplet diameters).

aşaması hem de ikinci davranış aşamasında nispeten daha kararlı bir çap küçülmesi sergilemiştir. %100TEB yakıt damlacığı sahip olduğu istikrarlı yanma davranışından dolayı ilk eğilim aşamasının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Benzin açısından olaya bakıldığında kısa karbon zincirli damlacıklarda genleşme ve buharlaşma arasındaki rekabette buharlaşma hızı daha baskın bir rol oynamaktadır [38]. Bu durumda benzinde daha çabuk tükenme ve daha yüksek damlacık şekil değişimi anlamına gelmektedir. Metil yapıları kararsız yapılardır ve hızlı bir şekilde reaksiyona girme eğilimindedir [14,15]. Bu nedenle hızlı bir şekilde tükenerek yeni türlerin oluşmasını sağlamaktadır. TEB ve farklı oranlardaki TEB eklentili yakıt damlacıklarının arasındaki davranış farklılığının sebebi ise kimyasal yapıdaki metil sayılarının farklı olmasından kaynaklıdır.

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada benzin, TEB ve benzin+TEB yakıt damlacıklarının yanma davranışı ve ikincil atomizasyon mekanizmaları kendi aralarında kıyaslanarak sunulmuştur. Deneyler, damlacık skalasında gerçekleştirilmiş ve normal yerçekimi altında oda sıcaklığında ve atmosfer basıncında yapılmıştır. Yakıt damlacıklarının difüzyon alevinin boyu ve yanma mekanizması açısından karşılaştırıldığında en kararlı yanma davranışı %100TEB yakıtında oluşmuştur. Ayrıca karışım yakıtlarda, TEB oranının artırılmasıyla alev kararlılığının damlacık üzerinde arttığı görülmüştür. Damlacık yakıtların tutuşma gecikme süreleri karşılaştırıldığında %0TEB>%100TEB>%80TEB>%20TEB>%40TEB>%60TEB şeklinde olduğu görülmüştür. Deney şartlarında yakıtların tutuşma gecikmesinin kimyasal yapıdaki zincir sayısına, metil sayısına ve yapıda bulunan oksijen seviyesine bağlı olduğu belirlenmiştir. TEB yakıtı tüm karışım oranlarında benzin yakıtına göre tutuşma gecikmesini azaltıcı bir yönde etki etmiştir. Yok olma süresinde ise karbon ve hidrojen bağları arasındaki enerjiye ve bağ türlerine göre değiştiği gözlemlenmiştir. Tüm yakıtların damlacık atomizasyon mekanizmasında; ilk davranış aşaması için yoğunlukla yüzey dalgalanmalarının ve şişme-büzülme döngüsünün, ikinci davranış aşaması için çap küçülmesiyle birlikte şiddetli yüzey salınımlarının oluştuğu tespit edilmiştir.

Yazar Katkısı Beyanı (Author Contribution Statement)

Duygu Sofuoğlu: Kavramsallaştırma, metodoloji, veri düzenleme, yazma-orijinal taslak hazırlama, görselleştirme, araştırma, doğrulama, yazma-inceleme ve düzenleme.

Hüseyin Değirmenci: Metodoloji, veri düzenleme, yazma-orijinal taslak hazırlama, yazma-inceleme ve düzenleme.

Ahmet Alper Yontar: Metodoloji, veri düzenleme, yazma-orijinal taslak hazırlama, doğrulama, yazma-inceleme ve düzenleme.

Teşekkürler (Acknowledgement)

Yazarlar, bu araştırmaya TÜBİTAK 120M844 projesi ve Tarsus Üniversitesi BAP MF.20.001–BAP MF.21.005 projeleri aracılığıyla mali destek sağlayan TÜBİTAK'a (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) ve Tarsus Üniversitesi'ne şükranlarını sunarlar.

Kaynaklar (References)

- [1]. Shahir, S. A., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Imran, A., Fattah, I. R., & Sanjid, A. (2014). Feasibility of diesel-biodiesel-ethanol/bioethanol blend as existing CI engine fuel: An assessment of properties, material compatibility, safety and combustion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 379-395. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.029>.
- [2]. Yusaf, T., Fernandes, L., Abu Talib, A. R., Altarazi, Y. S. M., Alrefae, W., Kadrigama, K., ... & Laimon, M. (2022). *Sustainable aviation-Hydrogen is the future. Sustainability*, 14(1), 548. <https://doi.org/10.3390/su14010548>.
- [3]. Edwards, T., Colket, M., Cernansky, N., Dryer, F., Egolfopoulos, F., Friend, D., & Williams, S. (2007). Development of an experimental database and kinetic models for surrogate jet fuels. *45th AIAA aerospace sciences meeting and exhibit*, 770. <https://doi.org/10.2514/6.2007-770>.
- [4]. Westbrook, C. K., Pitz, W. J., Herbinet, O., Curran, H. J., & Silke, E. J. (2009). A comprehensive detailed chemical kinetic reaction mechanism for combustion of n-alkane hydrocarbons from n-octane to n-hexadecane. *Combustion and Flame*, 156(1), 181-199. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2008.07.014>.
- [5]. Xu, Y., & Avedisian, C. T. (2015). Combustion of n-butanol, gasoline, and n-butanol/gasoline mixture droplets. *Energy & Fuels*, 29(5), 3467-3475. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b00158>.
- [6]. Pan, K. L., & Chiu, M. C. (2013). Droplet combustion of blended fuels with alcohol and biodiesel/diesel in microgravity condition. *Fuel*, 113, 757-765. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.029>.
- [7]. Botero, M. L., Huang, Y., Zhu, D. L., Molina, A., & Law, C. K. (2012). Synergistic combustion of droplets of ethanol, diesel and biodiesel mixtures. *Fuel*, 94, 342-347. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.10.049>.
- [8]. Rao, D. C. K., Karmakar, S., & Basu, S. (2017). Atomization characteristics and instabilities in the combustion of multi-component fuel droplets with high volatility differential. *Scientific Reports*, 7(1), 8925. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09663-7>.
- [9]. Park, S. H., Youn, I. M., Lim, Y., & Lee, C. S. (2013). Influence of the mixture of gasoline and diesel fuels on droplet atomization, combustion, and exhaust emission characteristics in a compression ignition engine. *Fuel Processing Technology*, 106, 392-401. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.09.004>.
- [10]. Shi, X., Pang, X., Mu, Y., He, H., Shuai, S., Wang, J., ... & Li, R. (2006). Emission reduction potential of using ethanol-biodiesel-diesel fuel blend on a heavy-duty

- diesel engine. *Atmospheric Environment*, 40(14), 2567-2574. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.12.026>.
- [11]. Jain, A., Joseph, K., Anthonysamy, S., & Gupta, G. S. (2011). Kinetics of oxidation of boron powder. *Thermochimica Acta*, 514(1-2), 67-73. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2010.12.004>.
- [12]. Saxena, S. (2016). Introduction to Boron Nanostructures. *Handbook of Boron Nanostructures*, 1. <https://doi.org/10.1201/b20934>.
- [13]. Hosmane, N. S. (Ed.). (2011). *Boron science: New technologies and applications*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b11199>.
- [14]. Marder, T. B., & Lin, Z. (Eds.). (2008). *Contemporary metal boron chemistry I: Borylenes, boryls, borane sigma-complexes, and borohydrides* (Vol. 130). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-77837-0>.
- [15]. Young, G., Sullivan, K., Zachariah, M. R., & Yu, K. (2009). Combustion characteristics of boron nanoparticles. *Combustion and Flame*, 156(2), 322-333. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2008.10.007>.
- [16]. Değirmenci, H., Küçükosman, R., & Yontar, A. A. (2024). An experimental study on droplet-scale combustion and atomization behavior in pure ethanol, methanol, and trimethyl borate, and their blends. *Fuel*, 357, 129716. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129716>.
- [17]. Yontar, A. A., Sofuoğlu, D., Değirmenci, H., Ayaz, T., & Üstün, D. (2023). Investigation of combustion characteristics on triethyl borate, trimethyl borate, diesel, and gasoline droplets. *Energy*, 266, 126440. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126440>.
- [18]. Yontar, A. A., Özgüner, A. G., Adıgüzel, M. A., & Üstün, D. (2022). Combustion characteristics of trimethyl borate, diesel, and trimethyl borate-diesel blend droplets. *Journal of the Energy Institute*, 105, 221-231. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2022.09.006>.
- [19]. Gan, Y., & Qiao, L. (2012). Radiation-enhanced evaporation of ethanol fuel containing suspended metal nanoparticles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(21-22), 5777-5782. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2012.05.074>.
- [20]. Owen, K., & Coley, T. (1990). *Automotive fuels handbook*. 5571174.
- [21]. Anderson, E. K., Koch, J. A., & Kyritsis, D. C. (2008). Phenomenology of electrostatically charged droplet combustion in normal gravity. *Combustion and Flame*, 154(3), 624-629. <https://doi.org/10.1016/J.COMBUSTFLAME.2008.05.005>.
- [22]. Küçükosman, R., Yontar, A. A., & Ocakoglu, K. (2022). Nanoparticle additive fuels: Atomization, combustion and fuel characteristics. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 165, 105575. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105575>.
- [23]. Küçükosman, R., Değirmenci, H., Yontar, A. A., & Ocakoglu, K. (2023). Combustion characteristics of gasoline fuel droplets containing boron-based particles. *Combustion and Flame*, 255, 112887. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2023.112887>.
- [24]. Liu, F., Hua, Y., Wu, H., Lee, C. F., & Wang, Z. (2018). Experimental and kinetic investigation on soot formation of n-butanol-gasoline blends in laminar coflow diffusion flames. *Fuel*, 213, 195-205. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.106>.
- [25]. Miglani, A., & Basu, S. (2015). Coupled mechanisms of precipitation and atomization in burning nanofluid fuel droplets. *Scientific Reports*, 5(1), 15008. <https://doi.org/10.1038/srep15008>.
- [26]. 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>.
- [27]. Osborn, M. J., Talbert, P. T., & Huennekens, F. M. (1960). The structure of "active formaldehyde" (N5, N10-methylene tetrahydrofolic acid)1. *Journal of the American Chemical Society*, 82(18), 4921-4927. <https://doi.org/10.1021/ja01503a043>.
- [28]. Glassman, I. (1996). Chemical thermodynamics and flame temperatures, *Combustion* (pp. 1-33). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-285852-9.X5000-0>.
- [29]. Glassman, I., Yetter, R. A., & Glumac, N. G. (2014). *Combustion*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-05402-9>.
- [30]. Naser, N., Yang, S. Y., Kalghatgi, G., & Chung, S. H. (2017). Relating the octane numbers of fuels to ignition delay times measured in an ignition quality tester (IQT). *Fuel*, 187, 117-127. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.09.013>.
- [31]. Petrukhin, N. V., Grishin, N. N., & Sergeev, S. M. (2016). Ignition delay time—an important fuel property. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 51(6), 581-584. <https://doi.org/10.1007/s10553-016-0642-0>.
- [32]. Sarathy, S. M., Oßwald, P., Hansen, N., & Kohse-Höinghaus, K. (2014). Alcohol combustion chemistry. *Progress in Energy and Combustion Science*, 44, 40-102. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2014.04.003>.
- [33]. Chen, Z., He, J., Chen, H., Geng, L., & Zhang, P. (2021). Comparative study on the combustion and emissions of dual-fuel common rail engines fueled with diesel/methanol, diesel/ethanol, and diesel/n-butanol. *Fuel*, 304, 121360. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121360>.
- [34]. Jamrozik, A., Tutak, W., Pyrc, M., Gruca, M., & Kočiško, M. (2018). Study on co-combustion of diesel fuel with oxygenated alcohols in a compression ignition dual-fuel engine. *Fuel*, 221, 329-345. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.098>.
- [35]. Basu, S., & Miglani, A. (2016). Combustion and heat transfer characteristics of nanofluid fuel droplets: A short review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 96, 482-503. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.01.053>.
- [36]. Miglani, A., & Basu, S. (2015). Effect of particle concentration on shape deformation and secondary atomization characteristics of a burning nanotitania

dispersion droplet. *Journal of Heat Transfer*, 137(10), 102001. <https://doi.org/10.1115/1.4030394>.

- [37]. Bello, M. N., Pantoya, M. L., Kappagantula, K., Wang, W. S., Vanapalli, S. A., Irvin, D. J., & Wood, L. M. (2015). Reaction dynamics of rocket propellant with magnesium oxide nanoparticles. *Energy & Fuels*, 29(9), 6111-6117. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b00905>.
- [38]. Shang, W., Yang, S., Xuan, T., He, Z., & Cao, J. (2020). Experimental studies on combustion and microexplosion characteristics of N-alkane droplets. *Energy & Fuels*, 34(12), 16613-16623. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c02904>.