



## MOTOR ALEVİ GELİŞİMİNDE TÜRBÜLANS PARAMETRELERİ VE BASINÇ DEĞİŞİMLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İNCELENMESİ

Dinçer BURAN\*\* ve Hasan Basri SANDAL\*

Dumlupınar Üniversitesi, Simav Teknik Eğitim Fak. Mak. Eğitimi Bölümü, 43500 Simav-KÜTAHYA  
\*[dincerburan@hotmail.com](mailto:dincerburan@hotmail.com), \*\*[hb\\_sandal@hotmail.com](mailto:hb_sandal@hotmail.com)

(Geliş Tarihi: 14. 05. 2010, Kabul Tarihi: 17. 08. 2010)

**Özet:** Bu çalışmada, farklı motor çalışma koşulları altında, silindir içerisindeki türbülansın alev gelişimi ve basınç artışı üzerindeki etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Çalışmada tek silindirli, buji ateşlemeli, optik silindir kafasına sahip bir motordan, düzlemsel ışık tabakası tekniği uygulanarak 1500 dak<sup>-1</sup> motor devrinde 0,1 milisaniye aralıklarla çekilmiş stokiyometrik metan-hava karışımına ait alev gelişim fotoğrafları kullanılmıştır. Görüntü işleme teknikleri kullanılarak, metan alev fotoğraflarına ait alev konturları elde edilmiştir. Alev kontur verilerine spektral analiz metodu uygulanarak, alev yüzeyindeki kıvrımlığın matematiksel çözümlenmesi yapılmıştır. Yapılan analizler neticesinde alev ait toplam uzunluk ölçeği, alev fırça kalınlığı ve ortalama alev yarıçapı ölçülmüştür. Ayrıca görüntülerle eş zamanlı olarak ölçülmüş basınç verilerinden, indike ortalama efektif basınç ve yanmış kütle oranı değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen türbülans parametreleri ve basınca bağlı parametreler, iki farklı emme portu bağlantı açısı (0° ve 40° girdap) ve iki farklı buji konumu (merkezden ve orta radyüsten ateşleme) için krank açısına bağlı olarak karşılaştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlar, silindir içerisinde oluşturulan girdap'ın, silindirdeki akışkanın türbülans şiddetini artırdığı dolayısıyla alev fırça kalınlığını da artırarak yanmayı hızlandırdığını göstermiştir. Sonuçlar; ayrıca silindir içerisinde ortaya çıkan eddylerin yapıları (şiddetleri ve büyüklükleri) ve bujiye göre konumlarının yanma süreçleri açısından oldukça önemli olduğunu ortaya çıkarmıştır. Basınç verilerindeki atımlarla türbülans parametrelerindeki değişimler arasında da bir ilişki olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Alev fırça kalınlığı, Buji konumu, Girdap, Toplam uzunluk ölçeği, Türbülans.

## THE INVESTIGATION OF THE CORRELATION BETWEEN TURBULENT PARAMETERS AND PRESSURE VARIATIONS DURING ENGINE FLAME DEVELOPMENT

**Abstract:** The objective of this study was to investigate the effects of turbulence in cylinder on flame and pressure development under various engine running conditions. In the study, mie scattered laser sheet methane-air flame images, captured from a single cylinder optically accessed spark ignition engine operated at 1500 rpm, were used. The time between frames was 0,1 milliseconds. Contours of methane flames were subtracted from images using visualization techniques. A mathematical treatment of wrinkles of flame surface was predicted applying the spectral analysis method to the samples of flame contours. Integral length scale, flame brush thickness and mean flame radius were measured from the spectral analysis of flame images. In addition, indicated mean effective pressure and mass fraction burned values were calculated from the pressure data measured simultaneously with flame images. Turbulent parameters and pressure related parameters were than compared depending on crank angle for the engine running conditions of two different swirling flow conditions (0° and 40° swirl ports) and two different spark plug location (central and mid-radius ignition).

Findings showed that the swirl created in cylinder had an effect of increasing the turbulent intensity of fluids, thereby accelerating the combustion speed by means of increasing the turbulent flame brush thickness. Results also showed that the eddy structures (by means of their intensity and scale) appeared in cylinder and their positions with respect to the spark plug were quite important in terms of combustion phases. A relationship was also found between pulses in pressure data and variations in turbulent parameters.

**Keywords:** Flame brush thickness, spark plug location, swirl, integral length scale, turbulence.

### GİRİŞ

Buji ateşlemeli motorlarda buji tırnak aralığında başlayıp en uzak silindir duvarında son bulan alev

gelişimi pek çok araştırmaya konu olmuştur. Emme supabı vasıtası ile silindire alınan ve bu esnada bir önceki çevrimden kalan artık gazlarla da karışan hava-yakıt karışımı daha sonra sıkıştırılır. Normal çalışma

şartları altında; yanma, sıkıştırma stroğunun sonuna doğru yüksek gerilimin etkisiyle buji elektrotları arasında oluşan ve nanosaniyeler içerisinde sıcaklığı 6000 K'ne kadar çıkan plazma dış yüzeyinden başlar (Maly ve Vogel, 1976). İlk olarak plazma dış yüzeyine komşu yakıt - hava molekülleri reaksiyona girer ve normal alevdekinden çok daha hızlı enerji açığa çıkar. Gelişmeye başlayan alev, yaklaşık olarak küresel ve küçük kıvrımlara rağmen kısmen düzgün bir dış yüzeye sahiptir. Alev büyüdükçe, buji tırnakları arasındaki türbülanslı akış bölgesiyle etkileşime başlar. Bu etkileşim sonucunda alev dış yüzeyindeki kıvrımlar artar ve hatta alev merkezi bujiden uzak bir noktaya doğru sürüklenebilir (Beretta vd, 1983, Gatowski vd, 1984). Türbülanslı alev fırça kalınlığı olarak adlandırılan alev dış yüzeyindeki kıvrımların kalınlığı ve şekli, alevin büyüklüğüne, yakıtın cinsine, silindir içi türbülans şiddetine ve yakıt-hava karışımına bağlı olarak değişim gösterir. Deneysel olarak ölçülmüş alev fırça kalınlığı ve toplam uzunluk ölçeği gibi türbülans parametrelerine ait veriler, termodinamik modeller açısından da kritik öneme sahiptirler (Verhelst ve Sheppard, 2009).

Motor alevinin gelişimi türbülanslı bir ortamda gerçekleşir. Türbülansın etkisi alevi kıvrarak uzatmak (türbülansın derecesine bağlı olarak) ve böylece yüzey alanını büyütme dolayısı ile efektif alev hızını artırmaktır. Yanma hızındaki artışın ana sebebi girdap oluşumunun türbülans şiddetini artırmasıdır. Genel olarak buji ateşlemeli motorların yanma odalarındaki akışkana bir dönme hareketi verilmesinin amacı, hız dalgalanmalarını artırmak suretiyle yanma oranı ve tutuşabilirlik sınırını yükseltmektir.

Alev gelişimi, karışımın durumu ve bileşeninin yanı sıra başlangıçta buji yakınındaki akışkan hareketinden etkilenir (Heywood, 1998). Buji yakınındaki akışkan hareketinin ateşleme ve fakir yanma limiti üzerinde pek çok etkisi vardır. Buji elektrotları arasındaki hava hızı arttıkça karışımın tutuşma ihtimali yükselir (Arcoumanis vd, 1983). Şayet hızın şiddeti çok büyükse tutuşabilirlik mümkün olmaz. Büyük akış hızlarında alev elektrotlardan uzağa sürüklenerek temas alanı azalır ve böylece elektrotlara olan ısı kaybı düşer (Pischinger ve Heywood, 1990).

Silindir içi hava hareketlerinin rolü motor çevriminin ilk safhalarında başlar. Emme stroğu esnasında, silindire giren hava, silindir içerisinde büyük ölçekli eddylerden oluşan akış yapıları meydana getirir. Bu yapılar aynı zamanda, taze hava ile bir önceki çevrimden kalan gazlarla karışma şeklini ve silindir içerisinde veya silindir dışına olabilecek ısı transferi oranını belirler. Ortaya çıkan akış alanı, ateşleme için gerekli şartların ve karışımın hazırlanmasında oldukça önemli rol oynar. Akış alanı etkisini yanma esnasında ısı transferi, alev tepesi sıcaklığı ve termal gerilmeler üzerinde göstermeye devam eder. Yanma periyodunun sonlarına doğru ise, akışkan hareketlerinin yapısı kirlenici emisyonların seviyesi bakımından belirleyici rol oynar. Silindir içerisindeki akış alanı aynı zamanda çevrimler arası fark bakımından da büyük önem taşır (Basha ve Gopal, 2009).

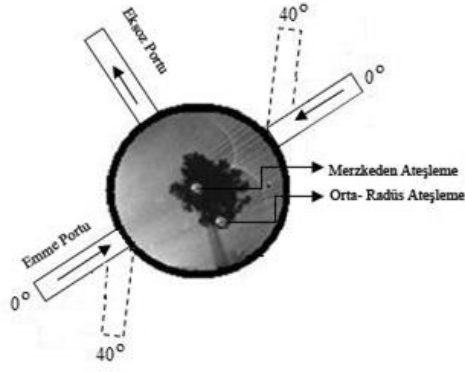
Buji ateşlemeli motorlarda yanma olayı, maksimum güç ve torku elde etmek için ÜÖN'ya göre uygun şekilde yerleştirilmelidir. Alevin gelişme ve yayılma süresi genellikle 30°-90° krank açısı kadardır. Başlangıçta küçük fakat ölçülebilir yanmış kütle oranı periyodu "alev gelişim açısı" olarak adlandırılır ve genellikle % 1, % 5 ve % 10 yanmış kütle oranı olarak gösterilir. Alevin yapısı yanma odası boyunca alev ilerledikçe gelişmesine devam eder. "Hızlı yanma açısı" olarak adlandırılan ve karışımın büyük bir bölümünün yandığı periyot yanma odası içerisindeki şartlardan önemli ölçüde etkilenir. Bu açı alev gelişiminin sona erdiği (genellikle yanmış kütle oranının %10 olduğu bölüm) ve yanmanın sona erdiği (genellikle yanmış kütle oranının %90 olduğu bölüm) periyotlar arasında kalan bölüm olarak tarif edilir (Heywood, 1998).

Buji ateşlemeli motorlarda optimum buji avansı ortalama çevrime göre ayarlanır. Ortalamadan daha hızlı yanan çevrimler, aşırı avans, yavaş yanan çevrimler ise gecikmiş avans durumunu gösterirler. Çok az sayıda çevrim optimum buji avansı ile yanmasını tamamlar. Bu da motorda güç ve verim kaybına sebep olur (Galloni, 2009). Özellikle yanmanın ilk aşamalarında, alevin rastgele yer değiştirmesinin çevrimler arası farkın oluşumunda önemli rol oynadığı gözlenmiştir (Stone vd, 1996).

Bu çalışmada; buji ateşlemeli, metanla çalışan optik silindir kafasına sahip tek silindirli bir motordan, iki farklı buji konumu ve iki farklı emme manifoldu giriş açısında düzlemsel ışık tabakası yöntemiyle çekilmiş alev gelişim fotoğrafları kullanılmıştır. Alev fotoğraflarına görüntü işleme teknikleri ve spektral analiz metodu uygulanarak, çevrim boyunca alev için türbülans parametreleri (toplam uzunluk ölçeği, alev fırça kalınlığı gibi.) ve alev geometrik parametreleri tespit edilmiştir. Çalışmada, krank açısına bağlı olarak türbülansın alev gelişimine ve basınca bağlı parametrelere etkisinin araştırılması amaçlanmıştır.

## **TÜRBÜLANS PARAMETRELERİNİN TESPİTİNDE KULLANILAN SİLİNDİR İÇİ ALEV GELİŞİM FOTOĞRAFLARI**

Bu çalışmada, tek silindirli buji ateşlemeli optik bir motordan düzlemsel ışık tabakası tekniği kullanılarak çekilmiş (Buran, 1998), iki boyutlu metan alev gelişim fotoğraflarının analizi yapılmıştır. Alev fotoğraflarının çekilmesinde kullanılan deney düzeneği ve deney metodu (Buran, 1999) isimli kaynakta ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Bu çalışmada iki farklı emme portu bağlantısında (0° ve 40°) ve iki farklı ateşleme konumunda (merkezden ve orta radyüsten) elde edilmiş stokiyometrik 2 boyutlu metan alev görüntüleri kullanılmıştır. Alevin silindir içerisindeki konumu port bağlantılarına ve buji konumlarına göre şematik olarak Şekil 1'de gösterilmiştir. Kullanılan alev fotoğraflarının çekildiği motorun devri 1500 dak<sup>-1</sup> olup, seçilen krank açısı aralığında 0,1 milisaniye (0,9° krank mili açısı) aralıklarla alev gelişim fotoğrafları görüntülenmiştir.



Şekil 1. Port açıları ve buji pozisyonlarına göre silindirik içerindeki alevin konumu.

## METODOLOJİ

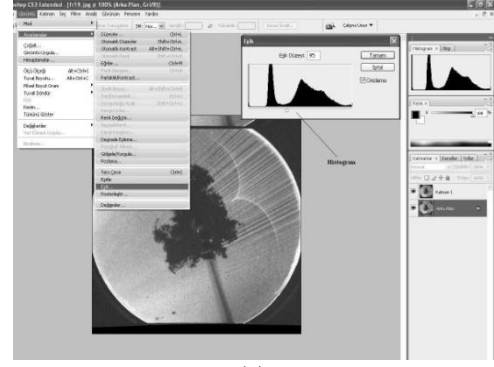
### Görüntü İşleme ve Analiz Teknikleri

İki boyutlu metan alev görüntülerinin işlenmesinde Photoshop CS3 yazılımı, tespit edilen alev konturlarından türbülans parametrelerinin hesaplanmasında ise Hicks (1994) tarafından geliştirilen Spectral Analiz metodu kullanılmıştır.

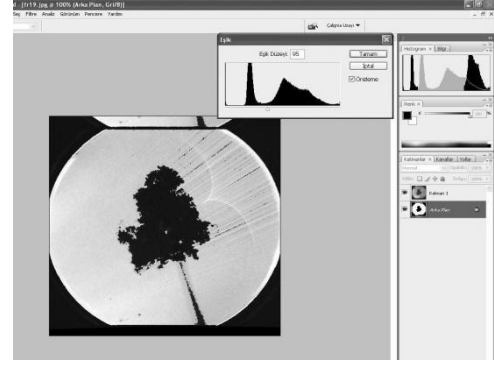
### Görüntü işleme tekniği

Çalışmada kullanılan bütün fotoğraflar ilk olarak 512x512 resim boyutunda sayısallaştırılmıştır. Bu boyuttaki alev fotoğraflarının çözünürlüğü 0,15 mm olarak ölçülmüştür. Sayısallaştırılan resimler JPEG formatında kaydedilmiş ve daha sonra Photoshop programında alev cephesine ait konturlar tespit edilmiştir. Alev konturlarının tespiti için uygulanan işlem basamakları aşağıda açıklanmıştır.

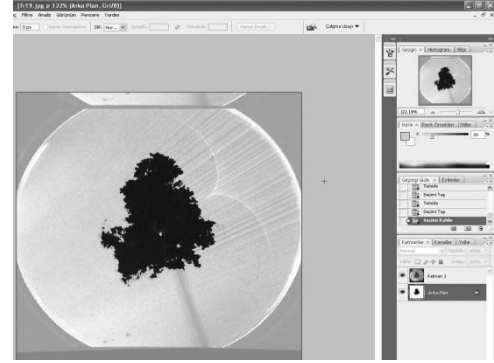
- Eşikleme (Thresholding): Eşikleme işlemi, görüntü işlemenin önemli aşamalarından biridir. Özellikle görüntü içindeki nesnenin kapalı ve ayrık bölgelerinin belirginleştirilmesinde kullanılır. Eşikleme işlemi, uygun eşik değeri tahmin edilerek nesnelerin arka planı ile nesne hatlarının siyah ve beyaz olarak ortaya çıkarılmasını içermektedir. Bu çalışmada uygun eşik değeri tahmin edilirken, histogram kullanımının yanı sıra işlenmemiş görüntü katmanı ile eşik değeri girildikten sonraki katman üst üste çakıştırılmak suretiyle en uygun eşik değeri tespit edilmiştir. Eşik değerinde karar kılındıktan sonra, görüntü üzerinde gerekli görülen temizleme işlemleri (alev dışındaki tüm siyah pikseller) manuel olarak yapılmıştır. Alev görüntüsü üzerinde gerçekleştirilen bu aşamalar Şekil 2’de ayrı ayrı gösterilmiştir.
- Alev konturlarının bulunması: Alev yüzey kıvrımlarının karakterize edilebilmesi, alev cephesine ait kontur koordinatlarının tespitini gerektirir. Bu aşamada, eşik değeri atanarak siyah/beyaz renkte elde edilmiş alev fotoğrafından,



(a)



(b)



(c)

Şekil 2. (a) Eşik değerinin tahmin edilmesi, (b) Eşik değeri atanmış görüntü, (c) Temizlenmiş alev görüntüsü.

Photoshop programına ait modüller kullanılmak suretiyle alev sınırları tespit edilir. Bu modül fotoğraftaki başlıca parlaklık alanlarının geçiş yerlerini bulur ve bu bölgeleri 1 pixel kalınlığında siyah renkte piksellerle Şekil 3’te gösterildiği gibi belirler. Elde edilen fotoğraf matrisi TIFF formunda kaydedilmiştir.

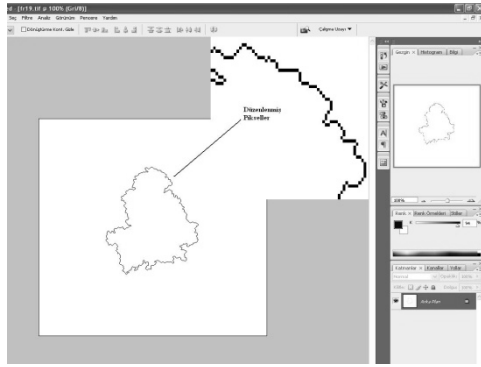
- Alev kontur piksellerinin sıraya dizilmesi: Öncelikle görüntüye ait verilerin herhangi bir Fortran programı tarafından okunabilmesi için bir C programı yardımıyla fotoğraf matrisindeki üst ve alt bilgiler dosyadan silinerek, dosya TIFF formundan ASCII formuna dönüştürülmüştür. Görüntü dosyasında, iki boyutlu matris şeklinde yer alan veriler, Fortran programlama dilinde yazılmış basit bir iz takip programı yardımıyla, önce x-y koordinat serisine dönüştürülerek sıraya dizilen alev sınır piksel koordinatları, daha sonra milimetre ölçeğinde gerçek

koordinatlara dönüştürülmüş ve ASCII kodunda veri dosyası olarak kaydedilmiştir.

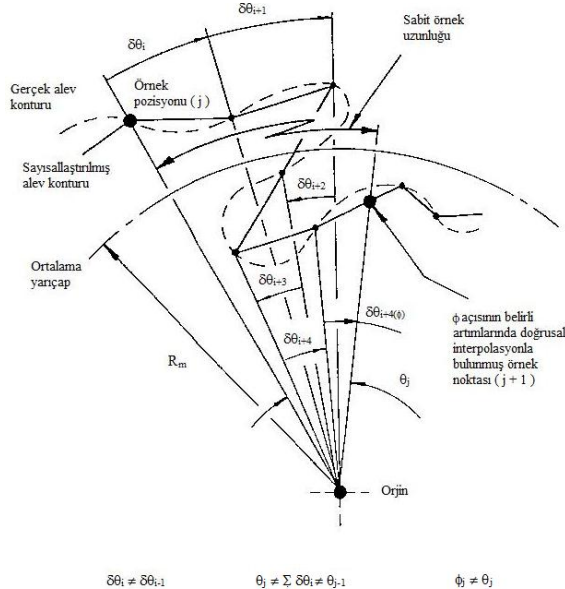
### Görüntü analiz tekniği

Alev yüzey kıvrımlarının karakterize edilmesi türbülanslı alev yapısı hakkında derinlemesine bilgi verebildiği gibi aynı zamanda motor çalışma şartlarına bağlı olarak alev yüzey kıvrımlılığının çevrim boyunca değişimi hakkında da önemli bilgiler verebilmektedir. Bu tip bilgiler özellikle teorik yanma modellerinin geliştirilmesi için oldukça önem taşımaktadır (Peters, 1986, Verhelst ve Sheppard, 2009).

Bu çalışmada, alev yüzey kıvrımlılığının karakterize edilmesi ve alev yüzeyindeki spektral özelliklerinin açıklanmasında kullanılan etkili metotlar (Zur Loye ve Bracco, 1987, Mandelbrot, 1977) arasında yer alan, Hicks (1994) tarafından geliştirilmiş “spektral analiz metodu” uygulanmıştır.



Şekil 3. Alev konturlarının bulunması.



Şekil 4. Spektral analiz metodunun şematik diyagramı (Hicks, 1994).

Spektral analiz metodu kabul edilen ortalama alev konturundan ölçülen alev kıvrımlarının sapmalarının şiddetini ( $a_j$ ) bulmak amacıyla alev konturunun bağımsız sabit bir koordinatın fonksiyonu olarak yeniden örneklendirilmesi esasına dayanır. Bu metot

Şekil 4’de şematik olarak gösterilmiştir. Alev kıvrımlarının ortalama alev konturundan sapmalarının şiddetini ( $a_j$ ) hesaplamak için ölçülen yerel alev yarıçapından ( $R_j$ ) ortalama yarıçap çıkartılmıştır. Ortalama alev yarıçapına ait orijin seçiminden kaynaklanabilecek belirsiz yığılmaları önlemek amacıyla, verilere ikinci dereceden polinom eğilim çizgisi uygulanarak filtre edilmiş ve bunun sonucunda durağan bir sinyal elde edilmiştir. Güç dağılımı yoğunluk (PSD) fonksiyonu açısal mesafeye  $j(R_m\phi)$  karşılık gelen  $a_j$  değerlerine hızlı Fourier dönüşüm tekniği uygulanarak elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen serinin otokorelasyonu hesaplanarak alev kıvrımlarının toplam uzunluk ölçeği ( $L$ ) bulunmuştur. Türbülanslı alev fırça kalınlığının ölçüsü olan  $a'$  ise doğrudan  $a_j$  serisinin standart sapması hesaplanarak bulunmuştur.

### Silindir İçi Basınç Verilerinin Analizi

Alev gelişim görüntüleri ile eş zamanlı olarak ölçülen silindir içi basınç verilerinden, her bir çevrime ait maksimum silindir basıncı, maksimum silindir basıncının olduğu krank açısı, indike ortalama efektif basınç (İÖEB) ve yanmış kütle oranı (YKO) değerleri hesaplanmıştır.

Basınç-krank açısı verileri, basınç-hacim verilerine dönüştürülerek indike ortalama efektif basınç (İÖEB) aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır.

$$iOE B = \frac{W}{V_{ef}} \quad (1)$$

Burada;  $V_{ef}$  efektif süpürme hacmini ve  $W(= \int P dv)$  her çevrimdeki indike işi göstermektedir.

Yanmış kütle oranı (YKO), kütle kaybının portlu motorlarda yüksek olması dolayısıyla kompresyon basınç verileri, yanma basınç verilerinden çıkartılarak, Rassweiler ve Withrow (1938) tarafından geliştirilen metot modifiye edilmiş ve aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır.

$$YKO = \frac{\sum_0^i \Delta(P_c - P_m)}{\sum_0^N \Delta(P_c - P_m)} \quad (2)$$

Burada  $\Delta P_c$  yanma basıncındaki değişimi,  $\Delta P_m$  kompresyon basıncındaki değişimi,  $N$  toplam krank açısı artışını göstermektedir.

### BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, tek silindirli, buji ateşlemeli optik silindir kafasına sahip bir motordan, düzlemsel ışık tabakası yöntemi kullanılarak çekilmiş metan alev fotoğraflarının spektral analiz metoduna göre analizleri yapılarak, bir çevrim boyunca aleve ait türbülans ve alev geometrik parametreleri tespit edilmiştir. Hesaplanan türbülans parametreleri (toplam uzunluk ölçeği ( $L$ ), alev fırça kalınlığı ( $a'$ ), toplam zaman ölçeği ( $\tau_a$ ) ve ortalama alev yarı çapı( $R_m$ )), krank açısının fonksiyonu şeklinde

incelenmiştir. Görüntülerden elde edilen türbülans parametreleri ile yanma fotoğrafları çekilirken eş zamanlı olarak ölçülmüş silindir içi basınç verilerinden hesaplanmış basınca bağlı motor performans parametrelerinin (indike ortalama efektif basınç (İOEB), yanmış kütle oranı (YKO), yanmış kütle oranı değişim miktarı, tepe basıncı ve pozisyonu gibi) çevrim boyunca değişimleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu çalışmada silindir içi aksel akışkan döngüsünün (girdap) ve buji konumunun yanma üzerindeki etkilerinin ortaya çıkartılması amaçlanmıştır. Bulgular Sandal (2009) kaynağından üretilmiştir.

Bu maksatla, her bir motor çalışma şartı için bağlı olarak hızlı ve yavaş yanmayı temsil eden iki çevrim; girdap ve buji konumuna göre ise toplam 8 çevrim ve bu çevrimlere ait 249 kare yanma fotoğrafı analiz edilmiştir. Öncelikle seçilen çevrimlerin teşhisini kolaylaştırmak amacıyla, her bir çevrime bir anma kodu verilmiştir. Bu kodlama sistemi Tablo 1'de gösterilmiştir.

Çevrim anma kodu beş karakterden oluşmaktadır. İlk karakter buji konumunu (M: merkez, O: orta radyüs), 2. ve 3. karakterler girdap durumunu (00: 0° girdap, 40: 40° girdap) ve son iki karakter ise çevrim sıra numarasını göstermektedir. Sıra numarası 01 olan, (aynı şartlardaki diğer çevrime göre) hızlı yanan çevrimi, 02 olan ise yavaş yanan çevrimi temsil etmektedir. Bu çalışmada analiz edilen, Tablo 1'de belirtilen motor çalışma şartlarında çekilmiş iki boyutlu silindir içi alev gelişim fotoğraflarından bazıları Şekil 5 ve 6'da verilmiştir. Her fotoğraf karesinin altında verilen değer, o fotoğrafın çekildiği krank açısını göstermektedir.

Şekil 7 (a)'da indike ortalama efektif basınç ve tepe basıncı arasındaki ilişki, Şekil 7 (b)'de ise tepe basıncı

ve tepe basıncı konumu arasındaki ilişki seçilen çevrimler için gösterilmiştir. Burada dolu semboller hızlı, boş semboller ise aynı şartlardaki diğer çevrime göre yavaş yanan çevrimleri göstermektedir. Şekil 7 (a)'da, indike ortalama efektif basıncın maksimumuna çıkan bir eğri oluşturduğu tepe basıncının düşük ve yüksek değerleri için ise İOEB'nin düştüğü görülmektedir. Yine aynı grafikten, hızlı çevrimlerin yavaş çevrimlere göre yüksek tepe basıncının olduğu tarafta yer aldığı gözlenmektedir. Şekil 7 (b)'de ise grafiğin sol üst köşesine doğru (aşırı avans) yanma hızlanırken, sağ alt köşeye doğru (gecikmiş avans) yavaşladığı gözlenmektedir. Hızlı çevrimler için tepe basıncı daha yüksek değerle birlikte, bu çevrimlerde maksimum basıncın yavaş çevrimlere göre ÜÖN'ya daha yakın gerçekleştiği söylenebilir.

### Silindir İçi Aksel Akışkan Hareketinin (Girdap) Alev Gelişimine Etkisi

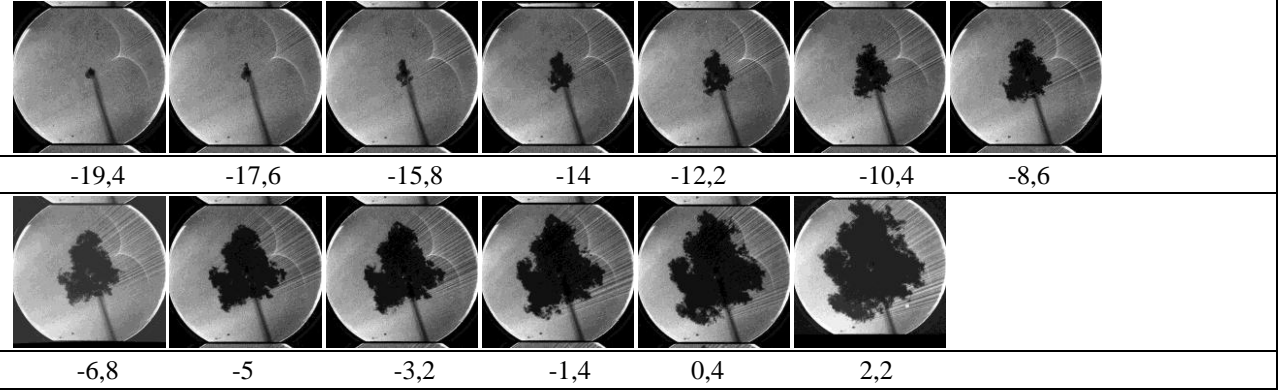
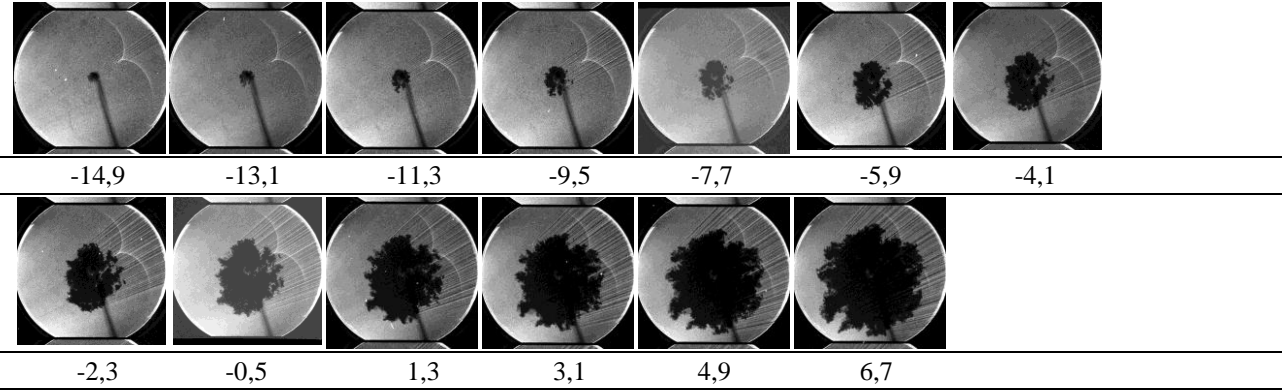
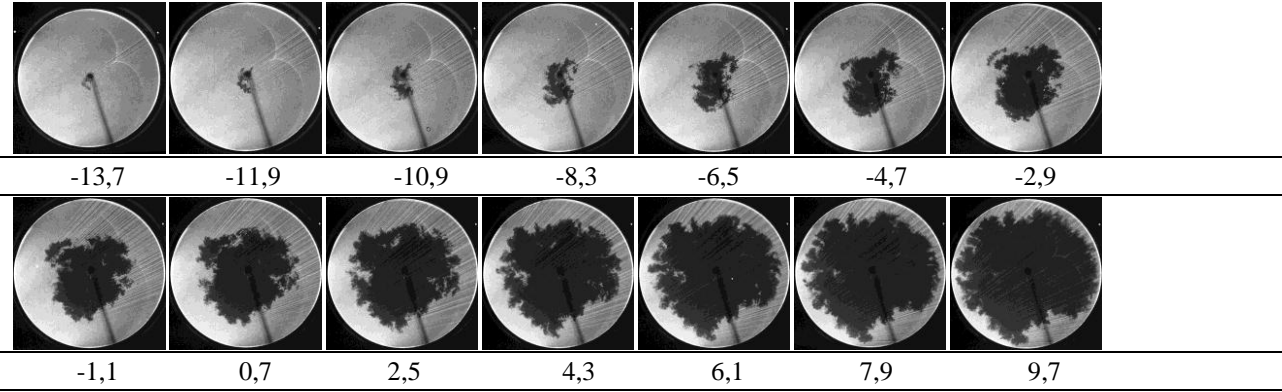
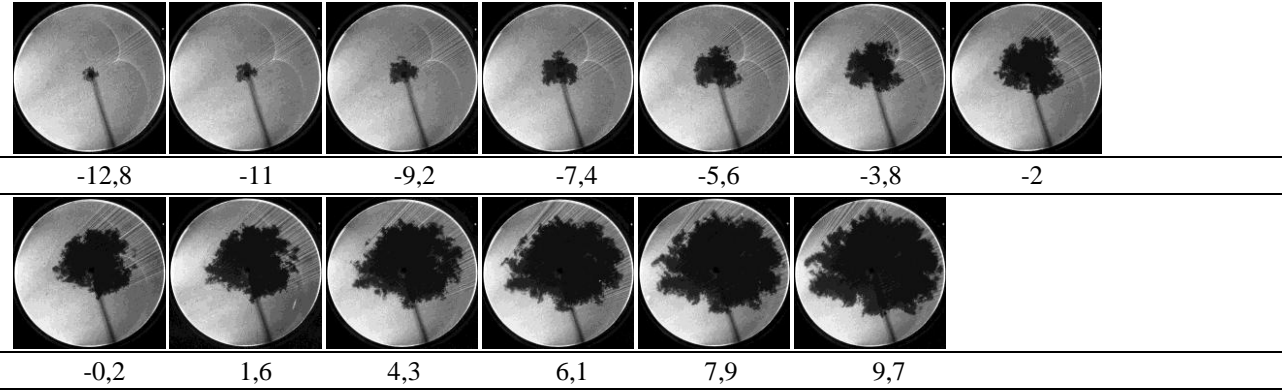
Motor silindiri etrafında dönen aksel akışkan hareketi girdap olarak adlandırılır. Uygun şiddetteki girdap, yanma hızında artışa sebep olur. Bu durum, silindir içerisindeki türbülans şiddetinin (bu çalışmada akışkanın türbülans şiddetinin alev üzerinde oluşturduğu etkinin ölçüsü alev fırça kalınlığı (a') olarak adlandırılmıştır) artmasının bir sonucudur (Hill ve Zhang, 1994).

### Merkezden ateşleme halinde girdap etkisi

Merkezden ateşleme, stokiyometrik karışım oranı, 1500 dak<sup>-1</sup> motor devrinde, 0° ve 40° girdap portları kullanılarak ölçülmüş, hızlı ve yavaş çevrimlere ait silindir içi basınç verilerinin krank açısına bağlı değişimi Şekil 8 (a)'da, yanmış kütle oranlarının ateşleme sonrası krank açısına göre değişimleri ise Şekil 8 (b)'de verilmiştir.

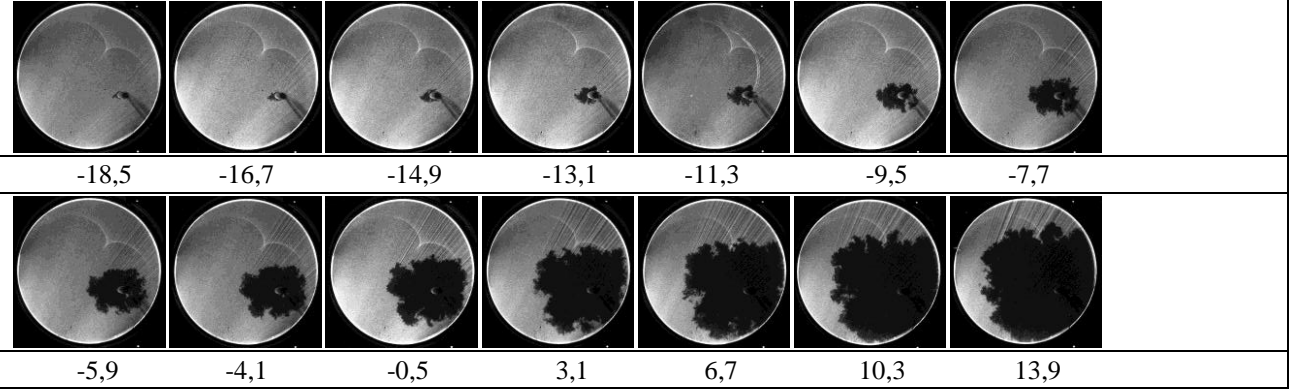
**Tablo.1** Çevrim kodları ve bu kodlara ilişkin motor çalışma ve deney şartları

Çevrim Anma Kodu	Buji Konumu	Girdap	Avans	Motor çalışma ve deney şartları
M0001	Merkez	Yok	23°	Motor devri: 1500 dak <sup>-1</sup> Hava debisi: 6,9 g/s $\lambda=1.0$ (Stokiyometrik) Fotoğraflar arasındaki zaman farkı: 0.1 ms Fotoğraflar arasındaki krank açısı farkı: 0,9° KMA Fotoğraf Çözünürlüğü: 0.15 mm Basınç Çözünürlüğü: 0.2° KMA
M0002	Merkez	Yok	23°	
M4001	Merkez	40°	20°	
M4002	Merkez	40°	20°	
O0001	Orta Radyüs	Yok	23°	
O0002	Orta Radyüs	Yok	23°	
O4001	Orta Radyüs	40°	23°	
O4002	Orta Radyüs	40°	23°	

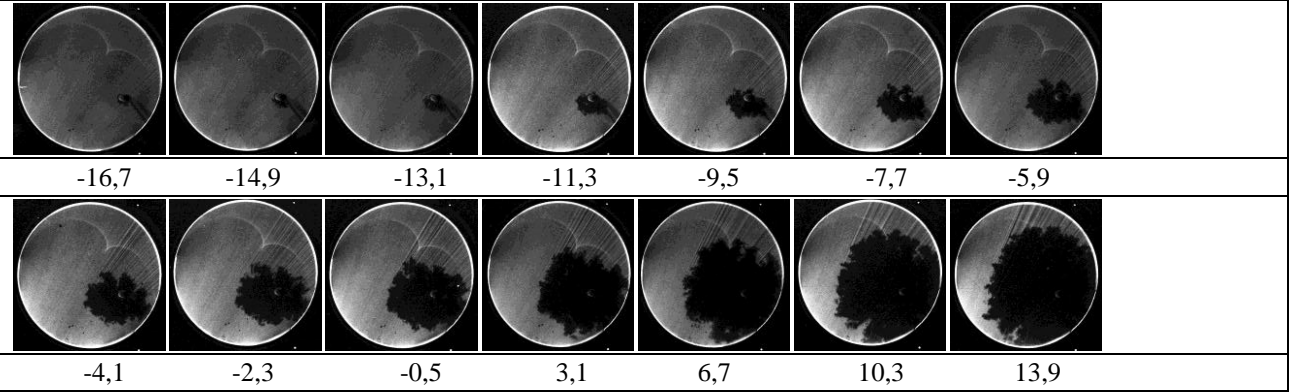
**M0001****M0002****M4001****M4002**

Şekil 5. Tablo 1’de belirtilen motor çevrimlerine ait merkezden ateşleme halinde iki boyutlu metan alev gelişim fotoğrafları.

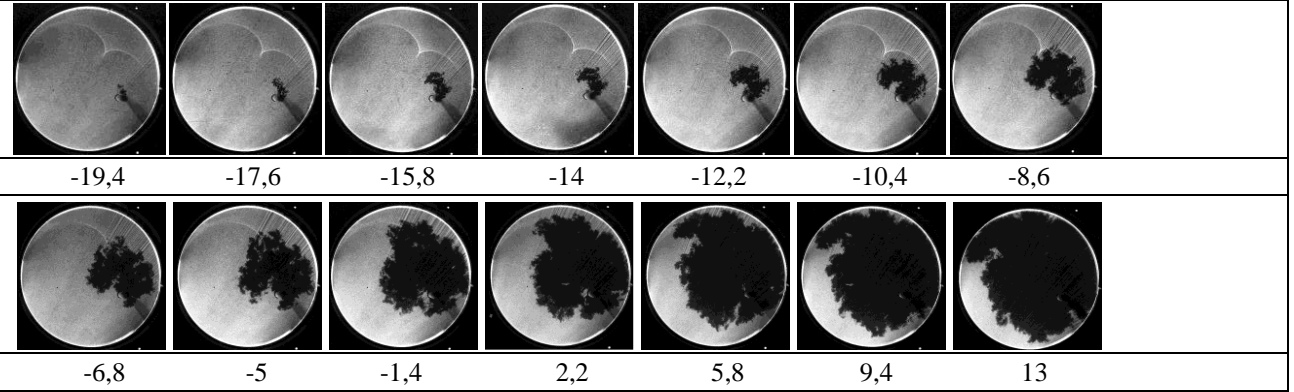
**O0001**



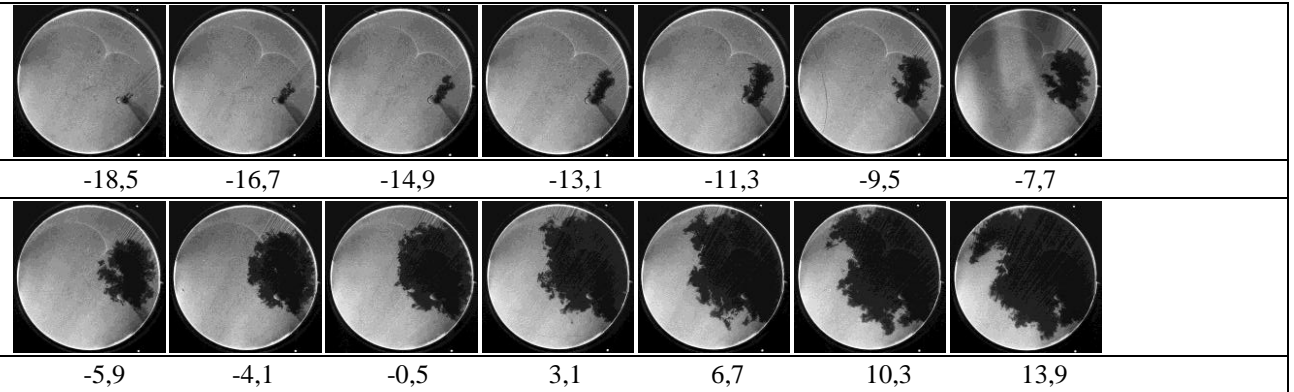
**O0002**



**O4001**



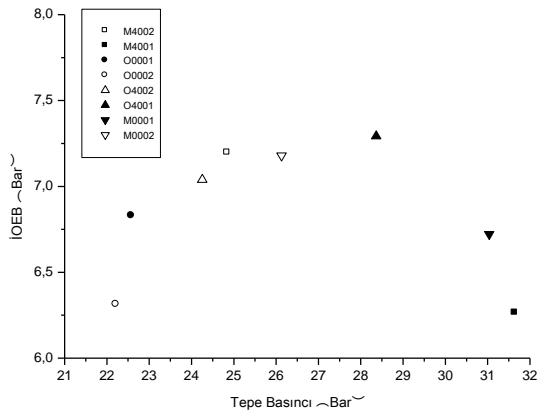
**O4002**



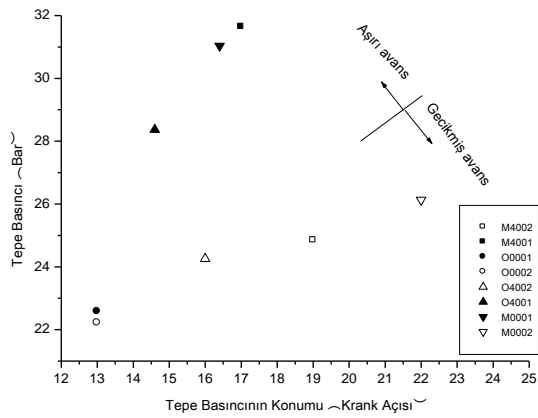
**Şekil 6.** Tablo 1’de belirtilen motor çevrimlerine ait orta radyüsten ateşleme halinde iki boyutlu metan alev gelişim fotoğrafları.

Burada, çevrimler arası fark açıkça görülmekle birlikte, girdap şartlarından bağımsız olarak, hızlı ve yavaş yanan çevrimlerin tepe basınçlarının kendi aralarında birbirlerine yakın değerler gösterdiği gözlenmektedir. İncelenen çevrimlerin motor performans grafiği (Şekil 7 (a)) üzerindeki konumlarından,  $0^\circ$  ve  $40^\circ$ 'lik portlarla hızlı yanan çevrimlere ait indike ortalama efektif basınç değerlerinin, yavaş çevrimlerinkine nazaran daha düşük olduğu, yani yavaş çevrimlerin optimum güç değerine daha yakın oldukları görülmektedir. Bu durumun, Şekil 7 (b)'deki hızlı çevrimlerin, grafiğin aşırı avans bölümünde yer almaları nedeniyle normalden daha önce/hızlı yandıkları için tepe basıncının artmasından kaynaklandığı ve yavaş yanan (gecikmiş avanslı) çevrimlere göre tepe basıncı pozisyonunun ÜÖN ya daha yakın olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 8 (b)'den verilen bir ateşleme sonrası krank açısında en fazla yanmış kütle için  $40^\circ$ 'lik girdap durumunda, en az yanmış kütle için ise  $0^\circ$ 'lik girdap durumunda gerçekleştiği görülmektedir. Bu grafikte girdap'ın yanmayı olumlu yönde etkilediği ve bu etkinin daha çok alev gelişim açısında meydana geldiği açıkça gözlenmektedir. Girdap'ın alev çekirdeğinin ilk gelişim



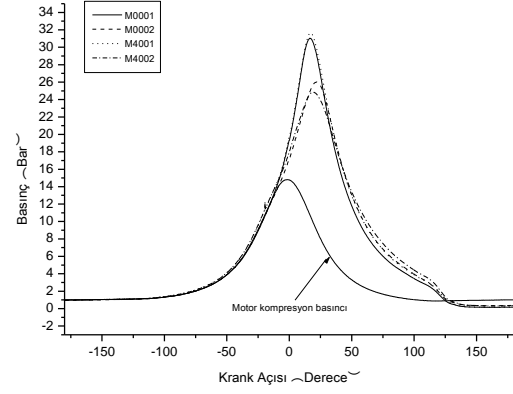
(a)



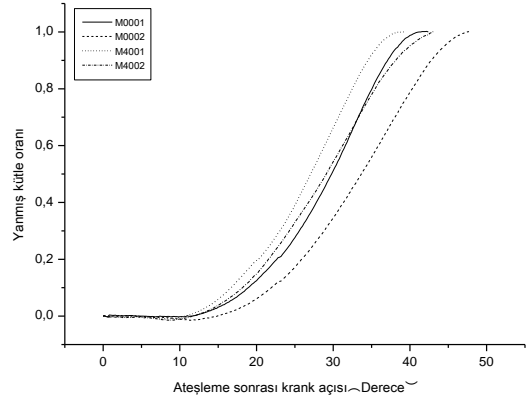
(b)

Şekil 7. (a) İOEB ve tepe basıncı arasındaki ilişki, (b) Tepe basıncı ve tepe basıncı konumu arasındaki ilişki.

evresindeki olumlu katkısını, Şekil 9'da verilen ortalama alev yarıçapının ateşleme sonrası krank açısına bağlı değişim grafiği üzerinde de görmek mümkündür.

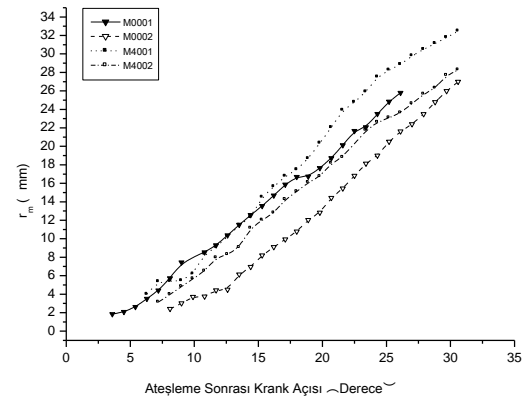


(a)



(b)

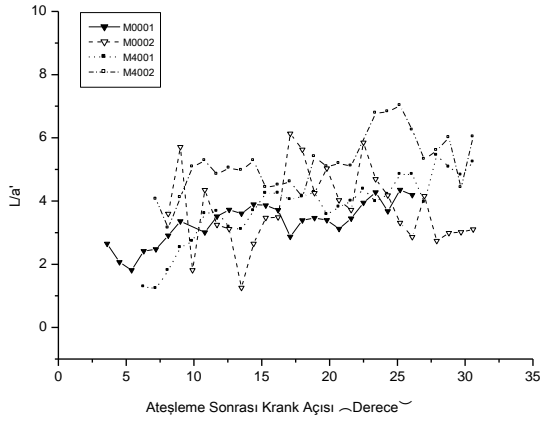
Şekil 8. Merkezden ateşleme durumunda krank açısına bağlı (a) silindir içi basıncın, (b) yanmış kütle oranlarının değişimleri.



Şekil 9. Merkezden ateşleme halinde, ortalama alev yarıçapının ateşleme sonrası krank açısına bağlı olarak değişimi.



Toplam uzunluk ölçeğinin ( $L$ ), türbülans şiddetine (alev fırça kalınlığı= $a'$ ) oranı şeklinde tanımlanan, aynı zamanda eddy ömrünü gösteren toplam zaman ölçeği ( $\tau_a=L/a'$ ) ile ateşleme sonrası krank açısı arasındaki ilişki Şekil 10'da verilmiştir. Genel olarak toplam zaman ölçeğinin, alev gelişiminin ilk evrelerinde hızla arttığı, tam gelişmiş değerine ulaştıktan sonra bu artışın yavaşladığı veya azaldığı gözlenmektedir. Hızlı çevrimler için toplam zaman ölçeği yaklaşık olarak  $L/a' \approx 3,5$  civarında tam gelişmiş değerine ulaşmaktadır. Burada hızlı çevrimlere ait sinyallerin salınım genliklerinin yavaş çevrimlerin genliklerine nazaran daha düşük olduğu dikkat çekmektedir.



**Şekil 10.** Toplam zaman ölçeğinin ( $L/a'$ ) ateşleme sonrası krank açısına bağlı olarak değişimi.

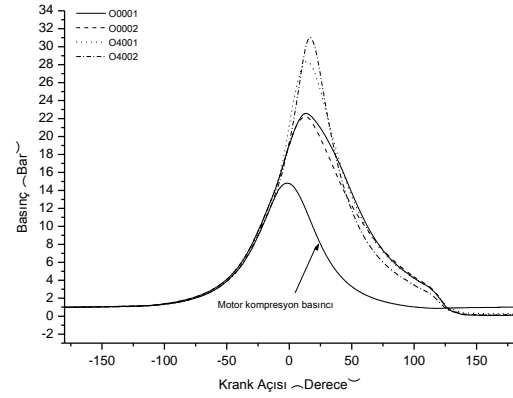
Yapılan incelemeler sonunda, merkezden ateşleme halinde girdap'ın alev gelişimini olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Özellikle alev gelişiminin ilk evrelerinde, girdap'ın yanmayı hızlandırarak daha istikrarlı bir yanma periyodunun ortaya çıkmasına sebep olduğu anlaşılmaktadır.

### Orta Radyüsten Ateşleme Halinde Girdap Etkisi

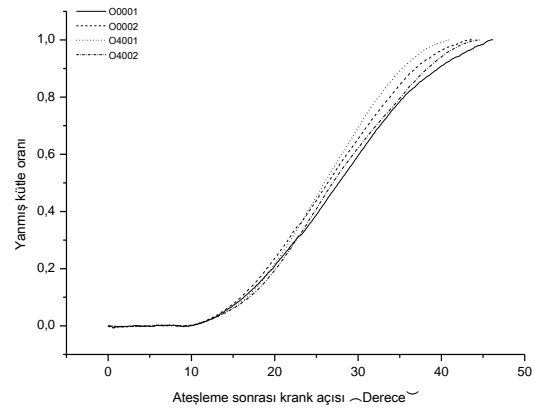
Orta radyüsten ateşleme, stokiyometrik karışım oranı,  $1500 \text{ dak}^{-1}$  motor devrinde,  $0^\circ$  ve  $40^\circ$  girdap portları kullanılarak ölçülmüş, hızlı ve yavaş çevrimlere ait silindir içi basınç verilerinin krank açısına bağlı değişimi Şekil 11 (a)'da, yanmış kütle oranlarının ateşleme sonrası krank açısına göre değişimleri ise Şekil 11 (b)'de verilmiştir.

Girdap ile birlikte tepe basınçlarının fark edilebilir derecede arttığı aynı zamanda çevrimler arası farkın azaldığı gözlenmektedir. Burada incelenen çevrimlere ilişkin motor performans grafiğinden (Şekil 7) O4001 ve O4002 kodlu çevrimlerin girdap olmayan durum için seçilen her iki çevrime göre daha yüksek güç ürettiği ve optimum yanma bölgesine daha yakın yer aldığı görülmektedir. Şekil 11(b)'de verilen yanmış kütle oranı eğrileri, bujinin silindir orta radyüsüne yerleştirilmesi ile özellikle alev gelişim açısında görülen çevrimler arası farklılıkların önemli ölçüde azaldığını ortaya çıkarmaktadır. Yine aynı şekilden, girdap ile

birlikte toplam yanma süresinin de kısaldığı gözlenmektedir.



(a)



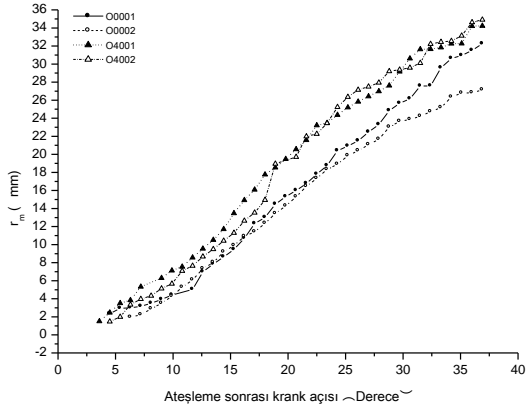
(b)

**Şekil 11.** Orta radyüsten ateşleme durumunda krank açısına bağlı (a) silindir içi basıncı, (b) yanmış kütle oranlarının değişimleri.

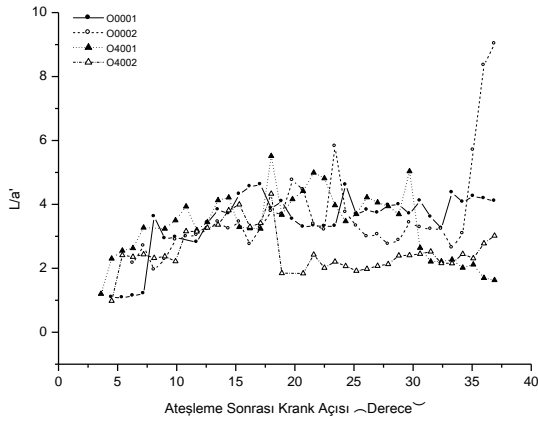
Orta radyüsten ateşleme şartlarında girdap'ın alev gelişimi üzerindeki olumlu katkısı, Şekil 12'de verilen ortalama alev yarıçapının ateşleme sonrası krank açısına bağlı değişimi eğrilerinde de görülmektedir. Burada özellikle üst ölü nokta civarında (ateşleme sonrası yaklaşık  $18^\circ$ - $20^\circ$  krank mili açısı) girdap şartlarındaki yavaş çevrime (O4002) ait alev büyüklüğündeki artış dikkat çekmektedir.

Ateşleme silindir orta radyüsünden yapıldığı takdirde,  $0^\circ$  ve  $40^\circ$  emme portlarının kullanıldığı motor çalışma şartları altında, toplam zaman ölçeğinin ateşleme sonrası krank açısına bağlı olarak değişimi Şekil 13'te verilmiştir. Farklı çalışma şartları ve yanma karakteristiklerine sahip çevrimlere ait toplam zaman ölçeklerinin, alev gelişim periyodu boyunca (%0-%10 YKO) birbirine benzer gelişim eğilimi gösterdiği, ancak hızlı yanma periyodu (%10-%90 YKO) içerisinde alev silindir içerisinde ortaya çıkan farklı eddy yapıları ile karşılaşmış olması nedeniyle,  $L/a'$  sinyallerine ait salınım genliğinde artış olduğu gözlenmektedir. O4002 kodlu çevrim için ortalama alev yarıçapında  $18^\circ$ - $20^\circ$  krank mili açısından sonra görülen fark edilir

derecedeki artışın (Şekil 12), belirtilen krank açısından sonra  $L/a'$  değeri ve değişim genliğindeki azalmadan kaynaklandığı düşünülmektedir.



**Şekil 12.** Orta radyüsten ateşleme şartlarında, ortalama alev yarıçapının ateşleme sonrası krank açısına bağlı olarak değişimi.



**Şekil 13.** Orta radyüsten ateşlemede, toplam zaman ölçeğinin ( $L/a'$ ) ateşleme sonrası krank açısına bağlı olarak değişimi.

### Alev Gelişiminin Silindir İçi Basınç Artışına Etkisi

Alev gelişimi boyunca türbülans parametrelerindeki değişim ile silindir içerisinde ölçülen basınç artışı arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarabilmek amacıyla, basınç verilerinden hesaplanan yanmış kütle oranı eğrisindeki krank açısına bağlı değişim miktarı hesaplanmıştır. Bu maksatla seçilmiş tipik bir çevrime (O4001) ait veriler göz önüne alınmıştır. Yanmış kütle oranındaki değişim miktarını hesaplamak için aşağıdaki (3) numaralı eşitlik kullanılmıştır.

$$(YKO)_{\text{değişim miktarı}} = \frac{(YKO)_i - (YKO)_{i-1}}{(YKO)_{i+1} - (YKO)_i}$$

$$(i = \theta_{(YKO=0)}, \dots, \theta_{(YKO=1)}) \quad (3)$$

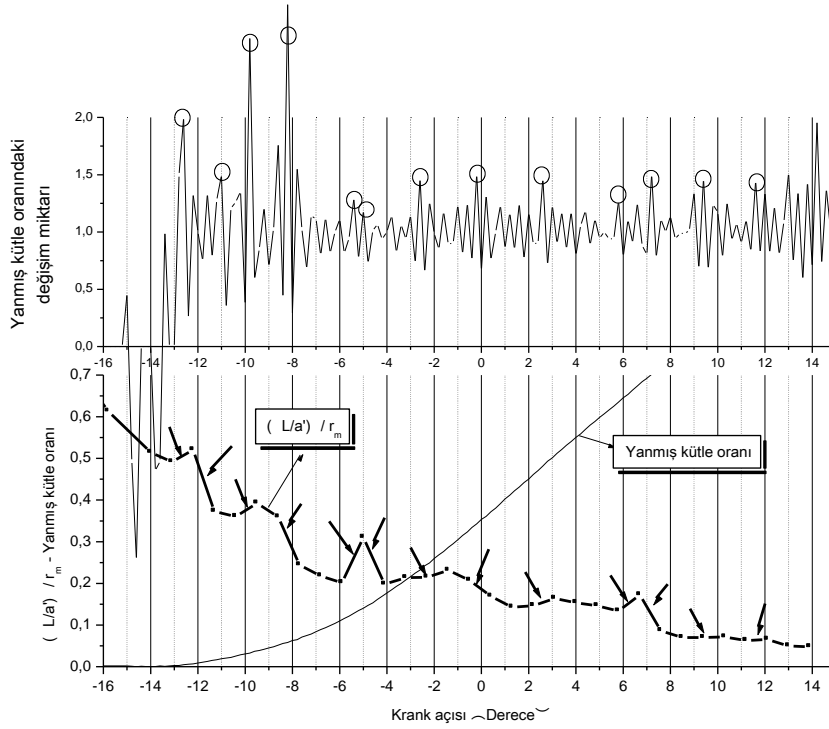
Bu eşitlikte,  $\theta_{(YKO=0)}$  ateşlemenin yapıldığı krank açısını,  $\theta_{(YKO=1)}$  ise silindire alınan kütlelerin tamamının yandığı krank açısını göstermektedir. Hesaplanan

değerlerin krank açısına bağlı değişiminin grafiği Şekil 14'de verilen yanmış kütle oranı değişim miktarı sinyalini ortaya çıkarmıştır. Bu sinyalde çevrim boyunca belirli krank açılarındaki "atım"ların görüldüğü dikkat çekmektedir. Atımların ortaya çıktığı noktalar "o" sembolü ile işaretlenmiş olup, yanmış kütle oranındaki anlık artışların olduğu krank açısını göstermektedir.

Tespit edilen atımlar ile silindir içerisindeki türbülans arasındaki ilişki, alev cephesi üzerinde etkili olan büyük ölçekli eddylerin küçük ölçekli eddylere oranı şeklinde tanımlanmış olan toplam zaman ölçeğinin krank açısına bağlı değişimine bakılarak açıklanmaya çalışılmıştır. Toplam zaman ölçeğini alev büyüklüğü ile ilişkilendirmek amacıyla  $L/a'$  değerleri ortalama alev yarıçapına bölünerek normalleştirilmiştir. Elde edilen değerlerin krank açısına bağlı değişimi Şekil 14'de verilmiştir. Burada  $(L/a')/r_m$  değerlerinin alev gelişimi boyunca üstel olarak azalma eğilimi gösterdiği ve bu eğilime göre belirli periyotlarla artan ve azalan salınımlar (şekil üzerinde oklarla gösterilmiş bölümler) olduğu gözlenmektedir. Artan salınım alevin büyük ölçekli eddylerin etkisi altında kaldığını, azalan salınım ise büyük eddylerin parçalanarak küçük ölçekli eddylere dönüştüğü ve o bölgedeki karışımın yanarak büyük eddy'nin kaybolduğu periyodu göstermektedir. Bir başka ifadeyle,  $(L/a')/r_m$  eşitliğinde pozitif salınım halinde L etkin durumdayken, negatif salınımda a' daha etkin hale gelmiştir. Burada not edilmesi gereken en önemli nokta ise,  $(L/a')/r_m$  değerlerinde gerek pozitif gerekse negatif salınımların gerçekleştiği krank açısı aralıkları ile (YKO) değişim miktarı sinyalindeki atımların gerçekleştiği krank açıları arasında pozitif bir korelasyonun varlığıdır. Kısaca aleve ait türbülans parametrelerindeki değişim ile silindir içi basınç değişimi arasında bir ilişki olduğu açıkça görülmektedir. Benzer ilişkinin varlığı diğer çevrimler için de test edilmiştir.

### SONUÇLAR

Bu çalışmada, farklı motor çalışma koşulları altında, silindir içerisindeki türbülansın alev gelişimi ve basınç artışı üzerindeki etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla tek silindirli, buji ateşlemeli, optik silindir kafasına sahip bir motordan, düzlemsel ışık tabakası tekniği uygulanarak çekilmiş stokiyometrik metan-hava karışımına ait alev gelişim fotoğraflarına görüntü işleme teknikleri ve spektral analiz metodu uygulanarak, alev yüzeyindeki kıvrımlığın matematiksel çözümlemesi yapılmıştır. Alev fotoğrafları ve görüntülerle eş zamanlı olarak ölçülmüş basınç verilerinden elde edilen türbülans parametreleri ve basınca bağlı parametreler, iki farklı emme portu bağlantı açısı ( $0^\circ$  ve  $40^\circ$  girdap) ve iki farklı buji konumu (merkezden ve orta radyüsten ateşleme) için krank açısına bağlı olarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar kısaca aşağıda özetlenmiştir.



**Şekil 14.** Tipik bir çevrim için  $(L/a')/r_m$ , yanmış kütle oranı ve yanmış kütle oranındaki değişim miktarının krank açısına bağlı olarak değişimi.

- Motor silindiri içerisinde oluşturulan aksel akışkan döngüsünün, her iki buji konumunda alev gelişimini olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir. Bu durum girdap ile birlikte silindir içerisindeki türbülans şiddeti artışı ve daha homojen bir türbülans ortamının oluşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Çalışmanın yapıldığı motor için en iyi performansın girdap ile birlikte silindir orta radyüsünden ateşleme yapıldığında gerçekleştiği görülmüştür. Belirtilen şartlarda özellikle alev gelişim periyodunda görülen çevrimler arası fark azalmış, yanma süresi kısalmıştır.
- Toplam zaman ölçeği  $(L/a')$  yaklaşık olarak 3,5 - 4 civarında tam gelişmiş değerine ulaşmaktadır. Hızlı yanan çevrimlere ait  $L/a'$  değerlerindeki değişim genliğinin yavaş çevrimlerin genliklerine nazaran daha düşük olduğu dikkat çekmektedir.
- $(L/a')/r_m$  değerlerindeki pozitif veya negatif salınımların gerçekleştiği krank açısı aralıkları ile yanmış kütle oranı değişim miktarındaki anlık artışların olduğu krank açıları arasında pozitif bir korelasyonun varlığı söz konusudur. Bir başka ifadeyle, basınç sinyalindeki anlık artışların, alev ait türbülans parametrelerindeki değişimlerin neticesinde ortaya çıktığı tespit edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- Arcoumanis, C., Bicen, A. F., and Whitelaw, J. H., Squish and Swirl-Squish Interaction in Motored Model Engines, *Journal of Fluids Engineering*, 105, 105-111, 1983.
- Basha, S.A. and Gopal, K.R., In-cylinder fluid flow, turbulence and spray models-A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1620-1627, 2009.
- Beretta, G. P., Rashidi, M., and Keck, J. C., Turbulent Flame Propagation and Combustion in Spark Ignition Engines, *Combustion and Flame*, 52, 217-245, 1983.
- Buran, D., Turbulent Flame Propagation in a Methane Fuelled Spark Ignition Engine, *Ph.D. Thesis, The University of Leeds*, (1998).
- Buran, D., Visualisation of flame images in a Methane fuelled spark ignition engine, *ULIBTK'99 12. Turkish National Conference on Thermal Sciences and Technologies*, Sakarya, September 8-10, 1999.
- Galloni, E., Analyses about parameters that affect cyclic variation in a spark ignition engine, *Applied Thermal Engineering*, 29, 1131-1137, 2009.
- Gatowski, J. A., Heywood, J. B., and Deleplace, C., Flame Photographs in a Spark Ignition Engine, *Combustion and Flame*, 56, 71-81, 1984.

Heywood, B. J., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw Hill International Editions, 1998.

Hicks, R.A., *Turbulent Flame Structure and Autoignition in Spark Ignition Engines*, *Ph.D Thesis, The Dept. of Mech. Eng., The University of Leeds*, 1994.

Hill, P.G., and Zhang, D., *The Effects of Swirl and Tumble Combustion in Spark-Ignition Engines*, *Peog. Energy Combust. Sci.*, 20, 373-429, 1994.

Maly, R., and Vogel, M., *Ignition and Propagation of Flame Fronts in Lean CH<sub>4</sub>-Air Mixtures by the Three Modes of the Ignition Spark*, *Proceedings of Seventeenth International Symposium on Combustion, The Combustion Institute*, 821-831, 1976.

Mandelbrot, B. B., *Fractals*, W. H. Freeman, San Francisco, 1977.

Peters, N., *Laminar Flamelet Concepts in Turbulent Combustion*, *The Combustion Institute*, 1231-1250, 1986.

Pischinger, S., and Heywood, J. B., *How Heat Losses to the Spark Plug Electrodes Affect Flame Kernel Development in an SI-engine*, *SAE paper*, No. 900021, 1990.

Rassweiler, G. M., and Withrow, L., *Motion Pictures of Engine Flames Correlated with Pressure Cards*, *SAE Trans.*, 83, 185-204, 1938.

Sandal, H.B., *Buji Ateşlemeli Metanla Çalışan Bir Motorda Türbülansın Alev Gelişimine Etkisinin İncelenmesi*, *Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2009.

Stone, C.R., Brown, A.G. and Beckwith, P., *Cycle-by-cycle variations in spark ignition engine combustion – Part II: Modelling of flame kernel displacements as a cause of cycle-by-cycle variations*, *SAE Paper*, No. 960613, 1996.

Verhelst, S. and Sheppard, C.G.W., *Multi-zone thermodynamic modelling of spark ignition engine combustion – An overview*, *Energy Conversion and Management*, 50, 1326-1335, 2009.

Zur Loye, A. O. and Bracco, F. V., *Two-Dimensional Visualisation of Ignition Kernels in an I.C. Engine*, *Combustion and Flame*, 69, 59-69, 1987.



**Dinçer BURAN**, 1965 Sultandağı doğumludur. 1987 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makina Eğitimi Bölümünden mezun oldu. 1991 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Yüksek Lisans ve 1998 yılında Leeds Üniversitesi (İngiltere) Makina Mühendisliği Bölümünde doktora eğitimini tamamladı. 1999 yılında Dumlupınar Üniversitesi Simav Teknik Eğitim Fakültesi Makina Eğitimi Bölümüne Yardımcı Doçent olarak atandı. Halen aynı bölümde Otomotiv Eğitimi Anabilim Dalı Başkanı olarak görev yapmakta olup, buji ateşlemeli motorlarda yanma ve alternatif yakıt kullanımı konularında çalışmaktadır.



**Hasan Basri SANDAL**, 1981 Kahramanmaraş doğumludur. İlk ve orta öğrenimini Kahramanmaraş'da tamamladı. 2007 yılında Dumlupınar Üniversitesi Simav Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümünden mezun oldu. 2009 yılında Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans eğitimini tamamladı.