



Dizel Motorlarında Tutuşma Gecikmesini Etkileyen Faktörlerin İncelenmesi

Investigation of Factors Affecting on The Ignition Delay in Diesel Engine

Metin GÜMÜŞ¹, A. Korhan BİNARK²

1) Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye,

ORCID: 0000-0002-0945-6827, mgumus@marmara.edu.tr

2) İstanbul Sabahattin Zaim Ünv., Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye,

ORCID: 0000-0001-7504-7127, ahmet.binark@izu.edu.tr

Geliş Tarihi: 17/01/2024 – **Kabul Tarihi:** 04/04/2024

DOI: 10.55205/joctensa.21202380

ATIF: Gümüş, M., Binark, A. K., (2023). Dizel Motorlarında Tutuşma Gecikmesini Etkileyen Faktörlerin İncelenmesi. Cihannüma Teknoloji Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2 (1), 10-43.

Öz

İçten yanmalı motorlarda ekonomikliğin sağlanması, çevre sağlığı yönünden problem oluşturan hava kirliliğinin ve motor gürültüsünün azaltılması için yanma olayının önemli noktaları bilinmelidir. Dizel motorlarında yanma olayı püskürtme ile başlayıp, pek çok sayıda parametrenin topluca etkisi altında cereyan eden ve gerçekte egzoz içinde bile kısmen devam eden karmaşık bir olaydır. Yanma olayı üç ayrı safha halinde incelenmektedir. Bunlar tutuşma gecikmesi, ani yanma ve kumandalı (kontrollü) yanma safhalarıdır. Tutuşma gecikmesi yakıt püskürtmenin başladığı andan silindir basıncının yüksek hızda arttığı ana kadar geçen süredir. Tutuşma gecikmesi süreci; yanmayı, dizel vuruntusunu ve buna bağlı olarak motorun performansını ve gürültüsünü, bununla birlikte is teşekkülü gibi yanmanın daha sonraki safhalarını da etkilemektedir. Tutuşma gecikmesinin buharlaşma süresinden daha uzun olması durumunda, buharlaşan yakıt ve hava karışımı aniden yanarak yanma hızı ve buna bağlı olarak basınç yükselme hızı çok yüksek olur. Bu oluşum, dizel vuruntusu olarak adlandırılır. Dizel vuruntusunun en önemli sonuçlarında birisi motor parçalarında oluşan titreşimler ve titreşimlerden mütevellit motor gürültüsüdür. Bu çalışmada; tutuşma gecikmesini etkileyen önemli faktörlerin (sıkıştırma oranı, püskürtme avansı, emme havası sıcaklığı, hava fazlalık katsayısı) tutuşma gecikmesi üzerindeki etkileri deneysel olarak belirlenerek tutuşma gecikmesinin kontrollü değiştirilmesi sağlanmıştır. Ayrıca deney sonuçlarından yararlanılarak tutuşma gecikmesini etkileyen ana faktörlerin etkileri tek safhalı yarı ampirik denklemle ifade edilmiştir. Bu denklem ile bulunan ve deneylerden elde edilen tutuşma gecikmesi değerlerinin korelasyon katsayısı 0,9525 bulunmuştur. Tutuşma gecikmesi sıkıştırma oranı ve emme havası sıcaklığının artmasıyla azalmış, püskürtme avansı ve hava fazlalık katsayısının artmasıyla ise artmıştır.

Anahtar Kelimeler: Tutuşma gecikmesi, Sıkıştırma oranı, Püskürtme avansı, Hava sıcaklığı, Ampirik denklem.

* Sorumlu Yazar: mgumus@marmara.edu.tr

Abstract

Important points of combustion processes have to be known in order to provide fuel economics and decreasing air pollution that aggravates environment and engine noise emission. Combustion of diesel engine, which starts with injection, takes place in effect of numerous parameters as a whole and even continues partially in exhaust pipe, is complicated event. Combustion is investigated as three phases; ignition delay, rapid combustion and controlled combustion. Ignition delay is period of time from start of fuel injection to increasing exponentially of pressure or temperature, which represent, spontaneous combustion. There are effects of ignition delay on combustion and diesel knock so ignition delay effects engine performance, exhaust emissions and engine noise. If ignition delay is equal or longer than period of fuel evaporation, very high rapid increasing pressure originating from instantaneous combustion occurs and that is called diesel knock. One of the most important results of diesel knock is vibration of engine equipment and engine noise originates from engine equipment vibration. In this study, effects of important factors (compression ratio, fuel injection timing, intake air temperature, equivalence ratio) on the ignition delay have been investigated experimentally so that ignition delay can be changed under control. Furthermore, effect of main factors that affect ignition delay has been expressed with one stage half empiric equation. The correlation coefficient of the ignition delay values found with this equation and obtained from experiments was 0.9525. Ignition delay has been decreased with increasing compression ratio and intake air temperature, and increased with increasing fuel injection timing and excess air coefficient.

Keywords: Ignition delay, Compression ratio, Fuel injection timing, Air temperature, Empiric equation.

GİRİŞ

İçten yanmalı motorlarda verimliliğin sağlanması, hava kirliliğinin ve motor gürültüsünün azaltılması için yanma olayının safhalarının bilinmesi gerekmektedir. Dizel motorlarında yanma olayı püskürtme ile başlayıp, pek çok sayıda parametrenin topluca etkisi altında cereyan eden ve gerçekte egzoz içinde bile kısmen devam eden karmaşık bir olaydır (Warnatz, 2001). Yanma olayı üç ayrı safha halinde incelenmektedir. Bunlar tutuşma gecikmesi, ani yanma ve kumandalı (kontrollü) yanma safhalarıdır (Lucian, 2021).

Yanma olayının başlaması çeşitli şekillerde olmaktadır. Dizel motorlarında yanma olayının başlangıcı kendi kendine tutuşma ile sağlanmaktadır. Reaktif bir karışım belirli bir basınç ve sıcaklığa ulaşır bu şartlarda bekletilince bir süre sonra kendi kendine tutuşabilmektedir. Bu şartlar tutuşmanın başladığı şartlar olsa bile karışım bir süre bu şartlarda tutuşmadan kalabilmekte ve daha sonra explozyon görülmektedir. Tutuşmanın olmadığı bu süreye tutuşma gecikmesi (TG) denir (Borat, 1995). Dizel motorlarında ise tutuşma gecikmesi (Ignition Delay) püskürtme başlangıcından basınç veya sıcaklık değişiminin eksponansiyel artış göstermeye başladığı ana kadar geçen süredir (Borman, 1998). Bu sürenin başında sisteme sıvı fazda sokulan



yakıt, önce dinamik ve termik etkilerle parçalanmakta ve ısınarak buharlaşmaya başlamaktadır. Bu andan itibaren yakıt buharı hem türbülans ve difüzyon etkisi ile yayılarak hava ile karışmakta, hem de kimyasal dönüşümlere uğrayarak tutuşmaya hazırlanmaktadır. Kimyasal reaksiyonlar sırasında meydana gelen pek çok sayıda ara ürün ve ürünler yayılarak yeni yakıt buharı ve hava ile karışıp kimyasal reaksiyonları sürdürmektedirler. Görüldüğü gibi ilk safhadaki olaylar tamamen fiziksel iken, ikinci safhada fiziksel ve kimyasal olaylar birlikte cereyan etmektedir. Bu nedenle tutuşma gecikmesi, fiziksel tutuşma gecikmesi (FTG) ve kimyasal tutuşma gecikmesi (KTG) olarak kendi içinde iki bölüme ayrılarak incelenir (Laat, 2017).

Tutuşma gecikmesi sonundaki etkili büyüklüklere bakıldığında bu bölgede düşük sıcaklıklardan dolayı kimyasal reaksiyonların hızları çok düşüktür. Ayrıca ekspanansiyel karakteristiklerinin başlangıç kısımlarında bulduklarından aktif öge ve ara ürünlerin mutlak değerleri çok küçük mertebededir. Bu nedenle tutuşma sonrası bölgesinin aksine, olay kimyasal reaksiyonlar tarafından kontrol edilmektedir ve olaya kimyasal ve termik açıdan bakmak gerekir (Yetkin, 1975).

Tutuşma gecikmesinin dizel motorlarında önemli bir husus teşkil ettiğini ve araştırılması gerektiğini, bu konuda önemli çalışmalarıyla bilinen Prof. Dr. Necmettin Erbakan'ın "Diesel Motorlarında Tutuşma gecikmesi Hakkında Yeni Araştırmalar" başlıklı doçentlik tezindeki "Diesel motorlarında tutuşma gecikmesi ve yanma gidişi, motorun ana konstruktif hatlarının tespitinde, inşa olunmuş bir motora uygun yakıt seçiminde ve verilen bir yakıt – motor hali için en uygun işletme şartlarının tespitinde göz önünde bulundurulması ve araştırılması icap eden ana motor problemlerinden birisidir." ifadelerinden anlaşılmaktadır. Erbakan, "Diesel Motorlarında Tutuşma Evresine Kadarki Süreçlerin Teorisi" başlıklı doktora tezinde dizel motorlarında yakıtın püskürtülmesinden tutuşmasına kadar cereyan eden olayları incelenmiş, sınır tabaka ve reaksiyon kinetiği teorileri yardımıyla damlaların etrafındaki yakıt buharı–hava karışımı tabakası içerisinde tutuşma hazırlıklarının gelişimini tetkik etmiştir. Doçentlik tezinde ise, tutuşma gecikmesini yanma olayı ile beraber ele almış, problemin analitik çözümünün ancak belirli koşullarda mümkün olması ve çok zaman alıcı olmasından dolayı, pratik ihtiyaçlar doğrultusunda deneysel olarak incelemiştir.

Tutuşma gecikmesi süresince meydana gelen olayların, yanmanın ve dizel vuruntusunun dolayısıyla motorun performansı ve gürültüsü üzerindeki direkt etkilerinin yanı sıra, is teşekkülü gibi çok daha sonraki sonuçları bile etkilediği bilinmektedir (Gardiner, 1999). Dizel motorlarında yakıt sıvı damlacıklar halinde püskürtüldüğünden karışım homojen olmamakta, tam buharlaşma için epey zaman geçmektedir. Bu zaman tutuşma gecikmesinden daha uzun olduğunda, yanma başladıktan sonra basınç yükselme hızı yüksek olmaz ve yanma olayı normal seyrinde gelişir. Ancak tutuşma gecikmesi buharlaşma süresine kıyasla eşit veya daha uzun olursa o zaman bütün karışım bir anda yanmaya hazır olacağından yanma hızı dolayısıyla basınç yükselme hızı çok yüksek olur. Buna dizel vuruntusu (diesel knock) denir (Borman, 1998).

Dizel vuruntusunun en önemli sakıncası yüksek hızlı basınç artışı ve buna bağlı olarak oluşan mekanik ve termal gerilmelerdir. Aynı yüksek basınç değerlerine daha düşük basınç artış hızıyla ulaşılması halinde bu gerilmeler daha az olur. Bu yüksek basınç artışının diğer bir sonucu, sebep olduğu titreşimler ve buna bağlı oluşan gürültüdür. Bu nedenle dizel motorlarının tasarımında bu iki faktör önemle dikkate alınmalıdır (Borat, 1992).

Tutuşma gecikmesi olayını etkileyen büyüklüklerin çeşitli ve değişken olması, karışım teşkili ve yakıtın tutuşmaya hazırlanması olayının motorda incelenmesini güçleştirmektedir. Bu sebeple muhtelif araştırmacılar özel olarak geliştirilmiş bomba, tüp, vs. gibi aparatlarda olaya etkileyen faktörleri incelemişler ve bu deneylerin sonuçlarına dayanan bazı ampirik ifadeler vermişlerdir (Chigier, 1991; Beerer, 2009;). Kendi kendine tutuşma gecikmesinin deneysel sonuçlara dayanan ampirik ifadeleri daha çok saf yakıtların homojen reaktif karışımları için verilmektedir (Burcat, 1985; Qin, 2001). Bu aparatlarla yapılan deney sonuçlarının gerçek motora uydurulması için irdelemeler yapılmış, ayrıca bu sonuçlar motor deneylerine ait tutuşma gecikmesi ölçmeleri ile kıyaslanmıştır. Bu arada çeşitli işletme büyüklükleri ile motor parametrelerinin olaya etkileri incelenmiştir (Chigier, 1991).

Reaktif karışımların tutuşma gecikmesi süresince uğradığı değişimler ve tutuşma olayı, klasik içten yanmalı motorlarda (Bolt, 1970), yakıtların özelliklerini incelemek üzere hazırlanmış CFR (Combustion Fuels Research Corporation) motorlarında (Sahetchian, 1990; Leppard, 1991), tutuşma ve yanma olaylarının fotoğraf veya kamera tekniğiyle incelenmesine olanak

sağlayan özel motorlarda (Barituad, 1994) incelenmediği gibi akış reaktörleri (Davis, 1999; Cavaliere, 1993; Beerer, 2009), çabuk sıkıştırma makineleri (Brett, 2001; Minetti, 1995), şok tüpleri (Fieweger, 1997; Abu-Elyazeed, 2015; Hoang, 2015) ve sabit hacimli yanma odaları (Taylor, 1985; Lapuerta, 2017) gibi farklı şekillerde hazırlanmış deney sistemleriyle incelenmektedir. Bu sistemlerin herbiri farklı amaç ve deney şartlarında kullanılmıştır. Örneğin çabuk sıkıştırma makineleri düşük sıcaklıklarda ve tutuşma gecikmesinin uzun olduğu durumlarda kullanılırken şok tüpleri yüksek sıcaklıklarda ve tutuşma gecikmesinin düşük olduğu durumlarda kullanılmıştır (Ciezki, 1993). Tutuşma gecikmesi yakıtın setan sayısının bir özelliği olarak, aynı şartlarda farklı yakıtlardaki süresi farklı karışımlar olarak çok farklı ölçüm sistemlerinde araştırılmıştır (Hoskin, 1992; Dimitriu, 1990).

Tutuşma gecikmesini açıklamak için zincir reaksiyonu teorisine dayanan kalitatif modellere literatürde karşılaşmak mümkündür. Homojen ortamlarda ki tutuşma olayıyla ilgili detaylı kimyasal kinetik mekanizmalar Wilk, 1989; Müller, 1992; Keunsoo, 2023) ve indirgenmiş kinetik mekanizmalar (Varatharajan, 2001; Soyhan, 2000) oluşturulmaktadır. Heterojen reaktif karışımların kendi kendine tutuşma gecikmesini teorik olarak belirlemek için fiziksel ve kimyasal olayları içeren modeller geliştirilmiştir (Gutheil, 1993; Pinchon, 1989). Dizel motorlarında tutuşma gecikmesi fenomenolojik modellerle belirlenmeye çalışıldığı gibi tutuşma gecikmesini kimyasal kinetik açıdan inceleyen global tek basamaklı reaksiyon mekanizmaları veya detaylı kimyasal kinetik mekanizmalarının kullanıldığı tek boyutlu sayısal modellerle de belirlenmeye çalışılmaktadır. Üç boyutlu sayısal modeller kullanıldığında çözümün kolaylaşması için indirgenmiş kimyasal kinetik modeller tercih edilmektedir (Rente, 2001; Sahin, 2001; Kang, 2001; Hamosfakidis, 2003; Shrestha, 2022).

Tutuşma gecikmesinin farklı alternatif yakıt türleri ve bunların fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre davranışı bir çok araştırmanın konusunu oluşturmuştur. Dizel alkol karışımları (Jamrozik, 2017) veya farklı alkollerin dizel ile karışımları (Lapuerta, 2017) dizel motorun farklı çalışma şartlarında incelenmiştir. Ayrıca farklı kaynaklardan üretilen biodizel yakıtların dizel yakıtı ile oluşturulan karışımları hem deneysel hem de teorik olarak incelenmiştir (Aldhaidhawi, 2018; Allen, 2011; El-Kasaby, 2013).

Yukarıdaki açıklamalardan dizel motorlarında vuruntuyu tayin eden en önemli faktörün tutuşma gecikmesi olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla tutuşma gecikmesini olumlu veya olumsuz yönde etkileyen bütün faktörler dizel vuruntusunda da etkili demektir. Tutuşma gecikmesi süresini kontrol ederek dizel motorlarındaki vuruntu oluşumunu engellemek ve motor gürültüsünü azaltmak için, tutuşma gecikmesi süresince oluşan fiziksel ve kimyasal olayları incelemek, tutuşma gecikmesini etkileyen faktörleri belirlemek ve bunların etkilerini araştırarak tutuşma gecikmesini kontrol etmek gerekir.

Bu çalışmada; sürekli yakıt ilavesi olan homojen olmayan yakıt / hava sistemlerinin bir örneği olan, dizel motorunun değişik işletme şartlarının (püskürtme avansı, emme havası sıcaklığı vb.) ve yapısal (sıkıştırma oranı) büyüklüklerinin tutuşma gecikmesi üzerindeki etkileri deneysel olarak belirlenmiş ve tutuşma gecikmesi bu deneysel çalışma sonuçlarına dayanan yarı ampirik tek safhalı denklemle ifade edilmiştir.

MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada tek silindirli dizel motorunda, tutuşma gecikmesinin sıkıştırma oranı, püskürtme avansı ve emme havası sıcaklığına göre değişimi belirlenmiştir. Bu safhada bu parametrelerin değişiminin ve tutuşma gecikmesi ölçümünün nasıl yapıldığı açıklanmıştır. Deneyler Marmara Üniversitesi Otomotiv Anabilim Dalı Ölçme Laboratuvarında yapılmıştır. Tutuşma gecikmesi süresinin muhtelif işletme parametrelerinin etkisi altında deneysel olarak tespiti tek silindirli dizel motorunda yapılmıştır. Deney motorunun teknik özellikleri Tablo1’de verilmiştir.

Tablo 1. Deney Motorunun Teknik Özellikleri

Motorun markası ve modeli	Lombardini 6 LD 400
Silindir Sayısı	1
Silindir Çapı	86 mm
Strok	68 mm
Sıkıştırma Oranı	18/1
Supap Düzenlemesi	Alttan kamlı, iticili, 2 supaplı
Soğutma Sistemi	Hava soğutmalı
Maksimum Motor Devri	4000 d/d
Maksimum Motor Gücü	21 N.m
Maksimum Motor Momenti	8 kW

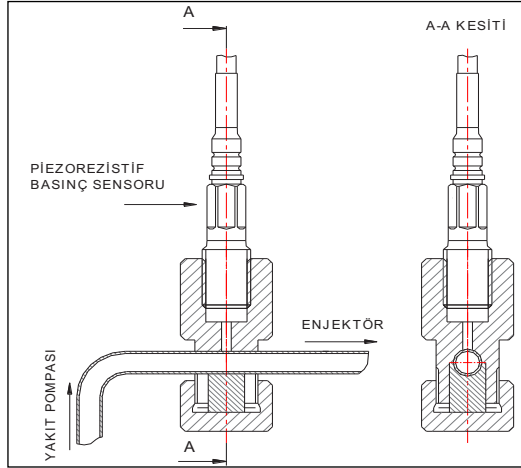
Yakıt püskürtme sistemi statik avanslı tek elemanlı bir pompa ve dört delikli bir enjektörden oluşmaktadır. Deneylede avans değişimi pompanın statik avansı değiştirilerek yapılmıştır. Pompanın statik avansı pompayla motor bloğu arasındaki metal conta kalınlıklarının değiştirilmesiyle ayarlanmıştır. Pompanın statik avansının conta kalınlığına göre değişiminin belirlenmesinde SUN marka MEA 1500 SL model motor analizörü kullanılmıştır. İstenilen püskürtme avansının ayarlanmasında ölçüm verilerinin kullanılmasıyla yapılan regresyon analiziyle elde edilen üçüncü dereceden bir polinom kullanılmıştır. Enjektör memesi dört delikten oluşmakta, delik çapları 0.21 mm ve delik açısı 1550'dir. Enjektör yayının altına konulan basınç ayar pullarıyla yay gerilimi değiştirilerek püskürtme basıncı değiştirilebilmektedir. Enjektörün yakıt püskürtme basıncı 195 Bar olarak ayarlanmıştır. Emme havası ölçüm sisteminin giriş kısmına bir elektrikli ısıtıcı yerleştirilmiştir. Emme havasının sıcaklığı bir termostatla sürekli kontrol edilerek elektrikli ısıtıcının besleme devresi kontrol edilmektedir. Bu sistemle, emme havası sıcaklığı 25,55 ve 85 °C değerlerinde ayarlanmıştır. Motorun sıkıştırma oranının tutuşma gecikmesi üzerindeki etkilerinin belirlenmesi için 14-22 arasında değiştirilmiştir. Bu değişiklik silindir ve silindir kapağı arasındaki conta kalınlığının değiştirilmesiyle sağlanmıştır. Deneyleler CUSONS marka tek silindirli motor dinamometresinde yapılmıştır. Dinamometre motora ilk hareketi vermede, motoru yanma olmaksızın tahrik etmede ve motorun yüklenmesinde kullanılabilir. Deneylelerde Tablo 2'de özellikleri verilen motorin yakıtı kullanılmıştır.

Tablo 2. Deneylelerde Kullanılan Motorin Yakıtı Özellikleri

Fiziksel görünüm	Ortam sıcaklığında sıvı halde
Renk (ASTM D1500)	Açık sarı/yeşil karışımı
İlk kaynama noktası	1700 C
Son kaynama noktası	3850 C
Yoğunluk (EN ISO 3675)	830 kg/m ³ (150 C)
Kinematik viskozite (EN ISO 3104)	2,4 mm ² /s (400 C)
Parlama noktası (EN ISO 2719)	Minimum 510 C
Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı	>2500 C
Özgül ısı (DIN 51900)	43150 kJ/kg
Setan sayısı	50

Tutuşma gecikmesi süresinin muhtelif işletme parametrelerinin etkisi altında deneysel olarak tespiti, yüksek basınçlı yakıt borusunun basınç değişimi ve yanma odası basıncının değişimi incelenerek yapılmıştır. Ayrıca

yakıt püskürtme anının ve yanma odası basıncının üst ölü noktaya göre değişiminin belirlenmesi için elektromanyetik üst ölü nokta sensörü ve krank konum sensörü kullanılmıştır. Tutuşma gecikmesinin belirlenmesi için bir basınç ölçme sistemi kurulmuştur. Bu sistemde enjektör püskürtme anının tespit edilmesinde piezoresistif basınç sensörü ve yanma odası basıncı ölçümünde ise hava soğutmalı quartz basınç sensörü kullanılmıştır. Bu sensörlerden alınan sinyallerin filtre edilmesi ve yükseltgenmesi için amlifikatörler kullanılmıştır. Amlifikatörlerden alınan verilerin derlenmesinde ve sayısallaştırılıp bilgisayara aktarılmasında dijital osiloskop kullanılmıştır. Yüksek basınçlı yakıt borusuna monte edilen piezoresistif basınç sensörü mümkün olduğu kadar enjektöre yakın monte edilmiştir. Montaj resmi ve montaj görüntüsü Şekil 1 ve 3'te verilmiştir.



Şekil 1. Piezoresistif Basınç Sensorunun Montaj Resmi

Piezoresistif basınç sensörü ve sensör amlifikatörünün özellikleri Tablo 3 ve 4'te verilmiştir.

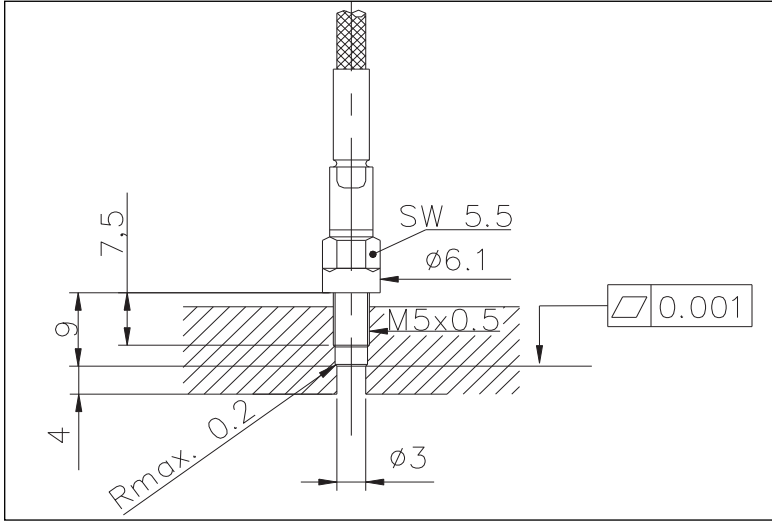
Tablo 3. *Piezoresistive Basınç Sensörü (Kistler marka 4067 A2000 model)*

Ölçüm aralığı	bar	0...2000
Aşırı yükleme	bar	2500
Ölçüm Eşiği	mbar	200
Hassasiyet	mV/bar	5
Doğal frekans	kHz	>100
Sinyal yükselme süresi	µs	<10
Çıkış sinyali (basınç)	V	0...10
Çıkış sinyali (sıcaklık)	mV/K	10
Besleme (amplifikatörün)	VDC	18...30
Doğrusallık ve histerizlik	%FSO	<±1
Ölçüm sıcaklık aralığı	°C	10...120
Min/Max sıcaklık aralığı	°C	-40/140
Sıkma momenti	Nm	15
Titreşim direnci	g	1000

Tablo 4. *Piezoresistive Basınç Sensörü Amplifikatörü (Kistler marka 4618 model)*

Sensor besleme akımı	mA	1,5 ± 3%
Sensor besleme gerilimi	VDC	18...30
Giriş gerilimi aralığı	mV	50...1000
Hassasiyet	%FS	<±0,2
Materyal	Alüminyum	
Ağırlık	g	250

Quartz kristal basınç sensörü motorun silindir kafasına monte edilmiştir. Sensorun yanma odasında oluşan yüksek sıcaklıklardan etkilenmemesi için silindir kafasındaki konumu piston oyuğuna gelmeyecek şekilde ayarlanmış ve ayrıca sensor silindir kafasının yüzeyinden 4 mm içeriye monte edilmiştir. Sensorun soğutulması motorun hava soğutma sisteminden yararlanarak yapılmaktadır. Sensorun montaj resmi ve montaj görüntüsü Şekil 2 ve 3'te verilmiştir.



Şekil 2. Quartz Kristal Basınç Sensörü Motorun Silindirik Kafasına Montajı

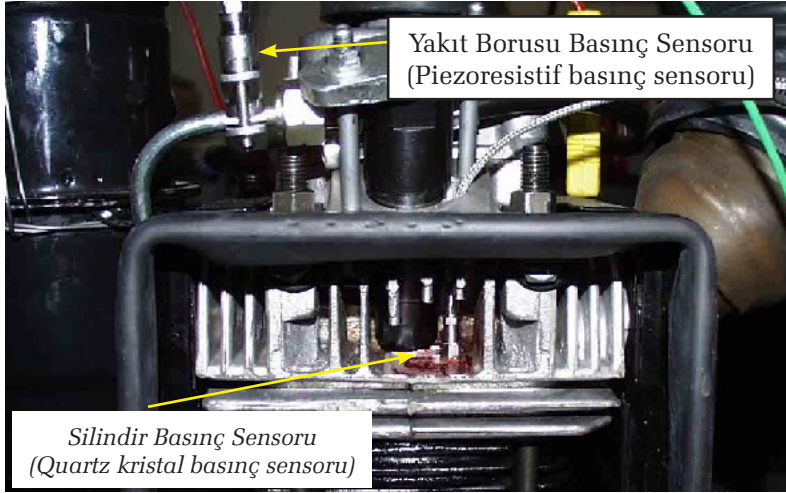
Quartz kristal basınç sensöründen alınan dataların filtre edilmesi ve yükseltilmesi için içten yanmalı motorların basınç ölçümlerinde kullanılan çok kanallı bir amlifikatör kullanılmıştır. Sensörün ve sensör amlifikatörünün özellikleri Tablo 5 ve 6'da verilmiştir.

Tablo 5. Quartz Kristal Basınç Sensörü (Kistler marka 6052B model)

Ölçme aralığı	bar	0...250
Aşırı yükleme	bar	300
Hassasiyet	pC/bar	≈-20
Doğal frekans	kHz	≈130
Doğrusallık	%FSO	<±0,4
Ölçüm sıcaklık aralığı	oC	-50...400
Sıkma momenti	Nm	1,5

Tablo 6. Çok Kanallı Amplifikatör (Kistler marka 5644A model)

Besleme gerilimi	V DC	± 15
Akım sarfiyatı	mA	< 80
Kanal sayısı		2
Hassasiyet	%	$< \pm 1$
Sensör hassasiyeti	pC/M.U	1...99.9
Ölçü skalası	M.U./V	1...500
Ölçüm sıcaklık aralığı	°C	0...60
Min./Max.sıcaklıklar	°C	-10...60
Titreşim direnci	gp	10

**Şekil 3. Basınç Sensorlarının Montaj Resmi**

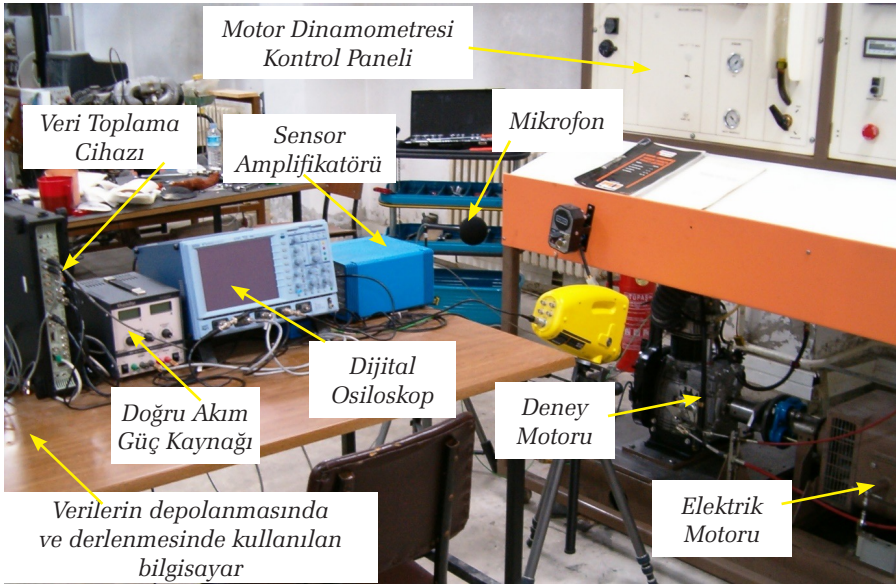
Pistonun üst ölü nokta ve krank konumunu belirlemek için iki ayrı elektromanyetik sensör kullanılmıştır. Krank konumunu belirleyebilmek için motorun orijinal volanı değiştirilerek üzerine dişli çark monte edilen yeni bir volan kullanılmıştır. Ayrıca üst ölü nokta bilgisini alabilmek için aynı volanın alın kısmına bir delik açılmıştır. Elektromanyetik sensörün biri piston üst ölü noktada iken bu delik karşısına monte edilmiştir. Elektromanyetik sensörün diğeri ise dişli çarkın karşısına yerleştirilmiştir. Sensörlardan alınan verilerin değerlendirilmesi ve sayısallaştırılarak bilgisayar ortamına

aktarılması LeCroy marka LT374 model renkli ekran bir dijital osiloskopa gerçekleştirilmiştir. Osiloskobun özellikleri Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. Dijital Osiloskop (LeCroy marka LT374 model)

Kanal sayısı	4
Band genişliği	500MHz
Hassasiyet (50 Ω veya 1M Ω)	2mV~10V/div
Timebase	aynı anda asıl ve dört bağımsız zoom izi
Kademeler	500ps/div - 1000s/div
Saat Doğruluğu	≤ 10 ppm
Örnekleme Hızı	
1 Kanal Max.	4GS/s
2 Kanal Max.	4GS/s
3-4 Kanal Max.	2GS/s
Maksimum Kayıt Nokta/Kanal	
1 Kanal Max.	500k / 2M / 8M
2 Kanal Max.	500k / 2M / 8M
3-4 Kanal Max.	250k / 1M / 4M

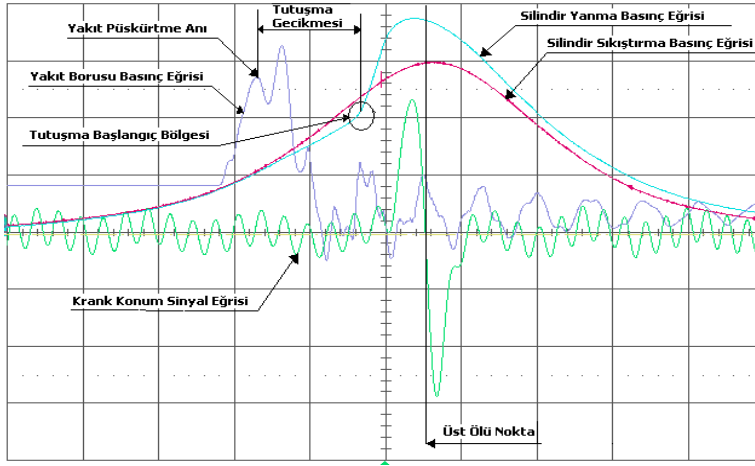
Bu çalışmanın deneysel bölümünde kullanılan deney seti ekipmanlarının topluca genel görünümü Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 4. Deneysel çalışmanın genel görünümü

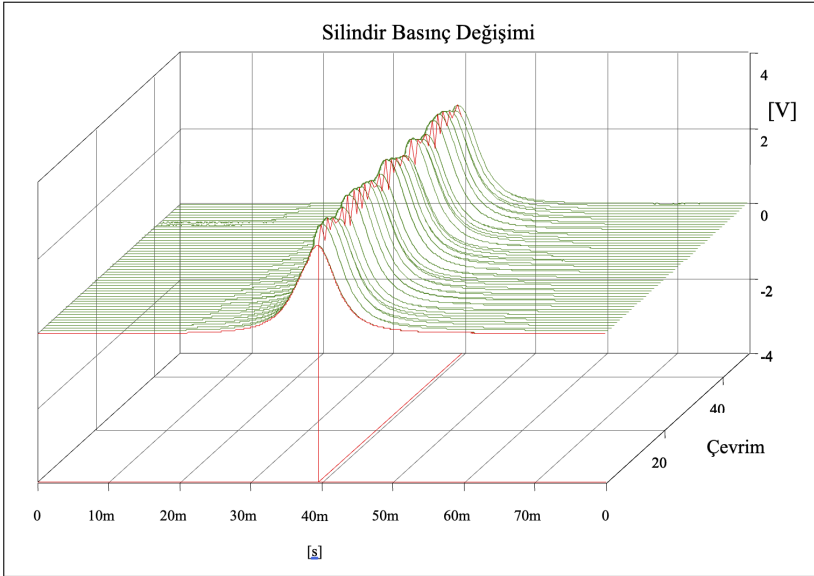
DENEYSSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Tutuşma gecikmesi süresinin muhtelif işletme parametrelerinin etkisi altında deneysel olarak tespiti, yüksek basınçlı yakıt borusunun basınç değişimi ve yanma odası basıncının değişimi incelenerek yapılmıştır. Tutuşma gecikmesinin belirlenebilmesi için yakıtın yanma odasına püskürtüldüğü anın ve yanmanın başladığı anın belirlenmesi gerekmektedir. Yakıtın yanma odasına püskürtüldüğü an; yüksek basınçlı yakıt borusunda basıncın artışı sonrasında basıncın düşmeye başladığı an yani basınç değişim eğrisinin eğiminin negatif değer aldığı ilk an olarak belirlenmiştir. Yanmanın başladığı an; yanma odasındaki ani basınç artışının meydana geldiği an, diğer bir ifadeyle basınç değişim eğrisi eğiminin (dp/dQ) maksimum olduğu an olarak belirlenmiştir. Ayrıca yakıt püskürtme anının ve yanma odası basıncının üst ölü noktaya göre değişiminin belirlenmesi için elektromanyetik üst ölü nokta sensörü ve krank konum sensörü kullanılmıştır. Yakıt borusu basınç değişim eğrisi, silindirdeki yanma sonucundaki ve sıkıştırma sonucundaki basınç değişim eğrisi ve krankın konumunu belirleyen elektromanyetik sensörün sinyal değişim eğrisinin osiloskop ekranındaki görünümü Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5. Sensorlardan alınan sinyallerin osiloskop ekranındaki görünümü

Tutuşma gecikmesi 5 farklı sıkıştırma oranı, 3 farklı püskürtme avansı ve 3 farklı taze dolgu sıcaklığı kombinasyonundan oluşan toplam 45 farklı motor çalışma şartlarında incelenmiştir. Özellikle yakıt püskürtme karakteristiğinin değişiminden kaynaklanan aynı motor çalışma şartlarında çevrimden çevrime silindir basınç değişimleri meydana gelmektedir. Meydana gelen bu değişimlerin tutuşma gecikmesi ölçümündeki etkisini azaltmak için tutuşma gecikmesi 50 çevrimin ortalaması alınarak belirlenmiştir.



Şekil 6. Çevrimden çevrime meydana gelen silindir basınç değişimleri

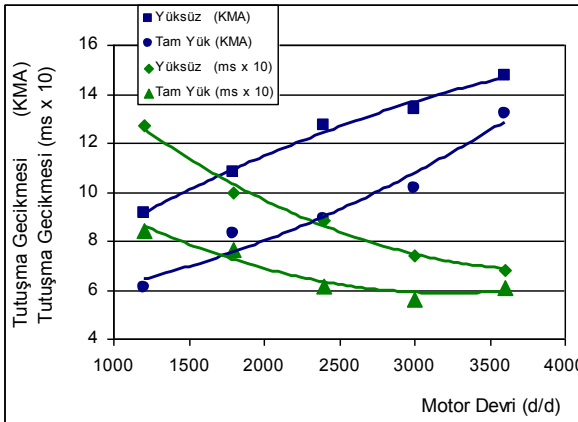
Çevrimden çevrime meydana gelen silindir basınç değişimleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi Maksimum silindir basınç seviyelerinde değişimler olmaktadır ve bu değişim sensordan alınan sinyal değeri olarak 2,07-2,98 volt arasındadır.

Tutuşma gecikmesinin yanma gürültüsü üzerindeki etkisinin ve dolayısıyla yanma gürültüsünün motor gürültüsü üzerindeki etkisinin yüksek olduğu motor işletme şartlarının belirlenmesi için öncelikle silindir basınç seviyesi ve motor gürültü seviyesi spektrumları motor devrine ve motor yüküne göre incelenmiştir. Silindir basınç seviyelerinin yüksek olduğu düşük devir ve kısmi yük (1200 d/d, ¼ yük) motor işletme şartlarında sıkıştırma

oranının, püskürtme avansının ve taze dolgu sıcaklığının tutuşma gecikmesi üzerindeki etkileri incelenmiş ve tutuşma gecikmesinde meydana gelen değişimlerin yanma gürültüsüne olan etkisi incelenmiştir. Ölçümler duyma eşiği olan 20 mPa ses basıncı referans alınarak silindir ses basıncı seviyesi dB olarak ve A-ağırlıklı filtre kullanılarak dB(A) olarak belirlenmiştir. Silindir basınç seviyeleri logaritmik frekans ekseninde 50 çevrimin silindir basınç seviyelerinin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Silindir basınç seviyeleri ve motor gürültü seviyeleri 1/3 oktav bandında 50 çevrimin gerçekleştiği süre boyunca ölçüm alınarak belirlenmiştir. Ayrıca silindir basınç seviyeleri ve motor gürültülerinin sürekli eşdeğerleri ölçülmüştür.

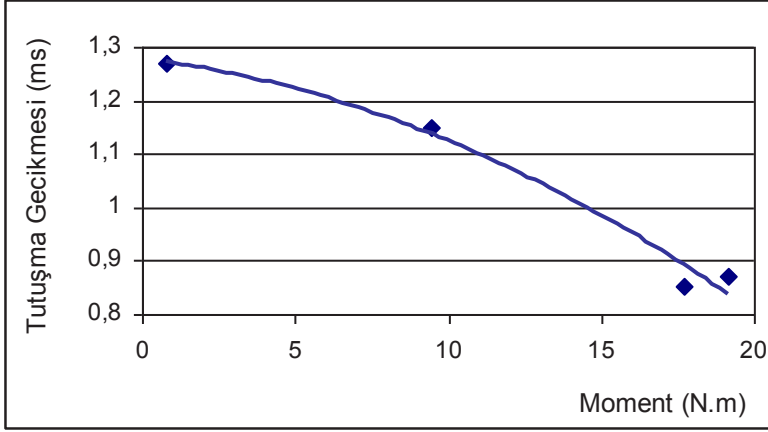
Tutuşma Gecikmesinin Etkili Olduğu Şartların Belirlenmesi

Tutuşma gecikmesi süresi (ms) motor devrinin artmasıyla azalırken tutuşma gecikmesi krank mili açısı (KMA) ise motor devrinin artmasıyla artmaktadır. Motor devrinin artmasıyla tutuşma gecikmesi süresinde(ms) meydana gelen kısalma hava yakıt karışımının daha hızlı bir şekilde sıkıştırılması sonucunda gerek hava hareketlerinin artırılıp fiziksel tutuşma gecikmesinin azaltılması ve gerekse karışım sıcaklık ve basınçlarının daha hızlı bir şekilde artırılmasıyla kimyasal tutuşma gecikmesinin kısaltılmasıyla sağlanmaktadır. Ancak tutuşma gecikmesi süresindeki bu azalmaya rağmen krank mili açısına göre tutuşma gecikmesi artmaktadır. Bu değişim Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Tutuşma gecikmesinin motor devrine göre değişimi

Tutuşma gecikmesi süresi motor yükünün artmasıyla azalmaktadır. Motor yükünün artmasıyla tutuşma gecikmesinde meydana gelen bu azalma özellikle karışımın zenginleşmesinden ve motor çalışma sıcaklığının artmasından dolayı olmaktadır. Tutuşma gecikmesinin motor yüküne göre değişimi Şekil 8’de gösterilmiştir.

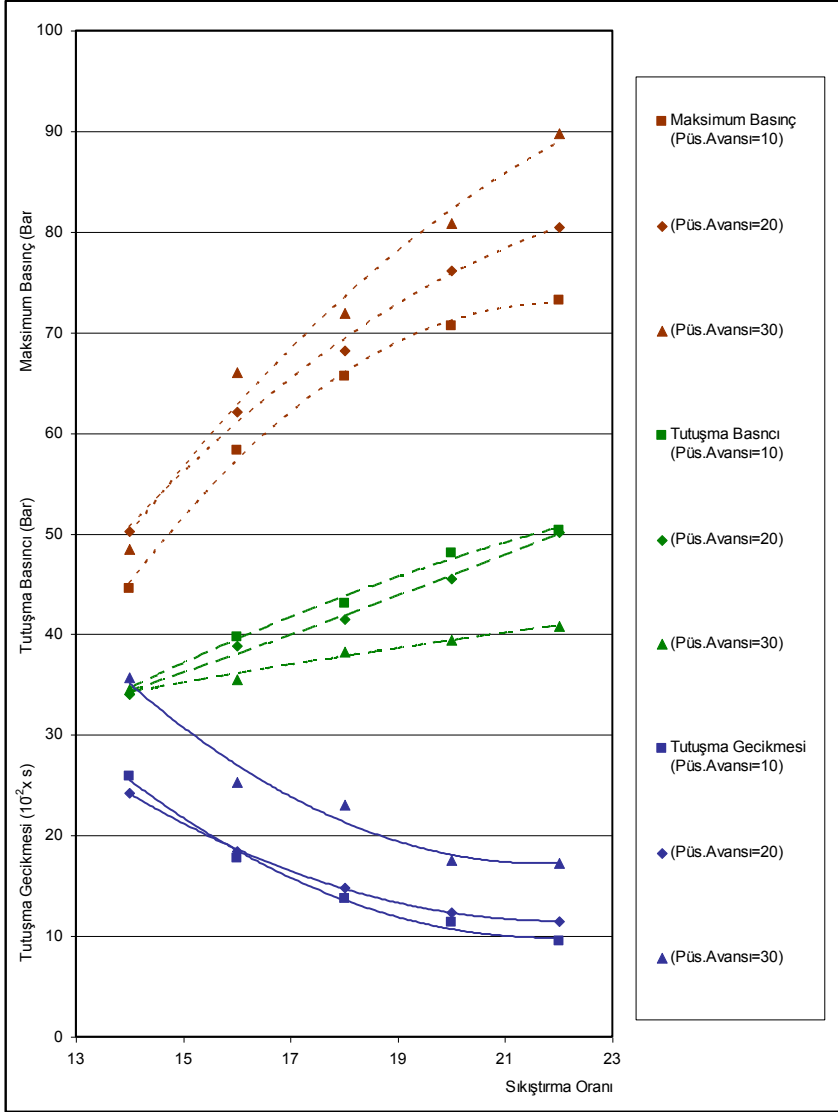


Şekil 8. Tutuşma gecikmesinin motor yüküne göre değişimi

Tutuşma gecikmesi üzerinde etkili olan sıkıştırma oranı, püskürtme avansı, emme havası sıcaklığı parametrelerinin tutuşma gecikmesi üzerindeki etkileri, tutuşma gecikmesinin uzun ve silindir içinde karışım oluşma ve yanma üzerindeki etkisinin yüksek olduğu düşük motor devri (1200 d/d) ve kısmi yük ($\frac{1}{4}$ motor kısmi yükü) çalışma şartlarında incelenmiştir.

Sıkıştırma oranı arttıkça diğer parametreler sabit kalmak şartıyla, yakıt püskürtme anındaki silindir basınç ve sıcaklıkları daha yüksek değerlere ulaşır. Basınç ve sıcaklığın artması gerek fiziksel ve gerekse kimyasal tutuşma gecikmesini etkileyerek tutuşma gecikmesini azalttığından dolayı Şekil 9 ve 10’da görüldüğü gibi sıkıştırma oranının artmasıyla tutuşma gecikmesi azalmaktadır.

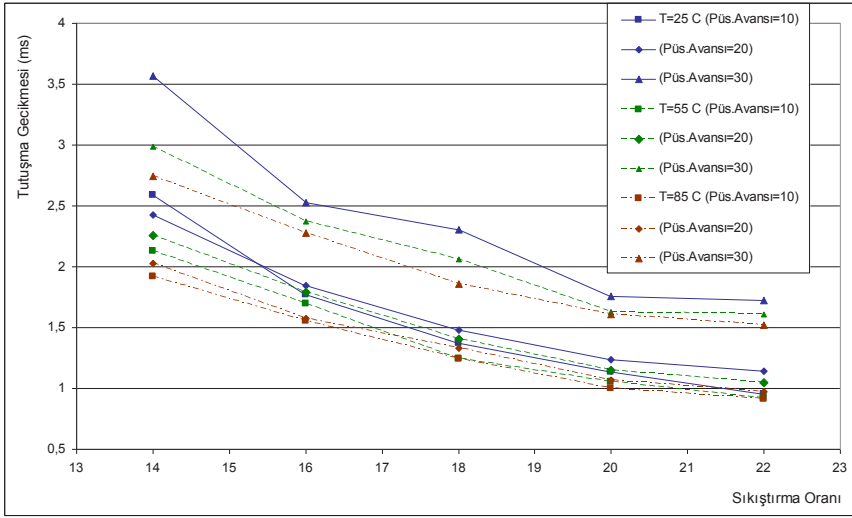
Püskürtme avansının değişimi sindir içerisine püskürtülen yakıt ortamının sıcaklık ve basıncının değişimini sağlar. Püskürtme avansının azaltılması sıcaklık ve basıncı artırdığından dolayı tutuşma gecikmesi Şekil 9 ve 10’da görüldüğü gibi azalmaktadır. Ancak püskürtme avansının daha fazla azalmasıyla tutuşma gecikmesinde yükselme meydana gelmeye başlamaktadır. Tutuşma gecikmesi optimum bir püskürtme avans değerinde minimum olmaktadır.



Şekil 9. Tutuşma gecikmesinin, yakıt tutuşma basıncının ve silindir maksimum basıncının sıkıştırma oranına ve püskürtme avansına göre değişimi.

Artan emme havası sıcaklığı tutuşma gecikmesinde azalmaya sebep olmaktadır. Bunun sebebi yakıtın daha sıcak bir ortama püskürtüldüğünden buharlaşma ve kinetik reaksiyon hızları artmakta ve bunun sonucunda fi-

ziksel ve kimyasal tutuşma gecikmesi kısalarak toplam tutuşma gecikmesi kısalmaktadır. Şekil 9'da tutuşma gecikmesinin, emme havasının 25, 55 ve 85 °C sıcaklıklarındaki değerlerinin sıkıştırma oranına ve püskürtme avansına göre değişimleri gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi sıcaklığın artmasıyla tutuşma gecikmesi azalmaktadır.



Şekil 10. Tutuşma gecikmesinin sıkıştırma oranına, püskürtme avansına ve emme havası sıcaklığına göre değişimi.

TUTUŞMA GECİKMESİNİN YARI AMPİRİK DENKLEMLERİNİN HESAPLANMASI

Tutuşma gecikmesiyle ilgili sabit hacimli yanma odası, daimi akış reaktörü, şok tüpleri, hızlı sıkıştırma makineleri ve motorlarda yapılan deneysel çalışmalara dayanan korelasyonlar önerilmiştir. Bu korelasyonların çoğunda Wolfer tarafından önerilen ve Arrhenius ifadesine benzeyen tek safhalı denklemler kullanılmaktadır. Tutuşma gecikmesinin modifiye edilmiş Arrhenius korelasyon ifadesi reaksiyon kinetiğinden çıkarılabilmektedir. Kimyasal kinetiğe göre yakıt ve hava arasındaki reaksiyon, ürünlere dönüşen yakıt ve hava tarafından temsil edilebilmektedir ve global reaksiyonun reaksiyon hızı

$$RR = K_f [O_2]^j [Y]^m P^n \quad (1)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Bu denklemde K_f reaksiyon hız sabiti, O_2 ve Y molar konsantrasyonlardır, P basınç ve $n = m + j$ olup reaksiyon mertebesini belirtirler. Reaksiyon hız sabiti sıcaklıkla kuvvetle ilişkilidir ve aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$K_f = B \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (2)$$

Tutuşma gecikmesi reaksiyon hızıyla ters orantılı olduğundan, tutuşma gecikmesi yukarıdaki denklemlerin bileşiminden

$$\tau \propto \frac{1}{B} \exp\left(\frac{E}{RT}\right) [O_2]^{-j} [Y]^{-m} P^{-n} \quad (3)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu ifadeden de anlaşılacağı gibi tutuşma gecikmesi reaksiyonun aktivasyon enerjisine kuvvetle bağlıdır. Aktivasyon enerjisi aşılması gereken bir bariyer olup kimyasal kinetik mekanizma içerisinde ilk ayrışma reaksiyonlarıdır. Ayrıca sıcaklık, basınç, yakıt ve oksijen konsantrasyonu (veya hava fazlalık katsayısı) tutuşma gecikmesi üzerinde etkileri vardır (Chen, 2003). Bu çalışmada, oksijen ve yakıt terimlerinin hava fazlalık katsayısıyla ifade edilmesi ve sıcaklık terimlerinin yalnızca exponansiyel terim içinde ifade edilmesiyle

$$\tau = A \lambda^k P^{-n} \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (4)$$

şeklinde yarı ampirik tutuşma gecikmesi ifadesi kullanılacaktır. Bu ifade tutuşma gecikmesinin hem fiziksel hem de kimyasal etkilerini kapsayacaktır. Tutuşma gecikmesi yarı ampirik denklemi sıcaklığa, basınca ve hava fazlalık katsayısına bağlı olarak belirlenecektir.

Emme Sonu Sıcaklığının Belirlenmesi

Tutuşma gecikmesi ampirik denklemlerindeki basınç ve sıcaklık değerleri olarak, deneylerin dizel motorunda yapılmasından dolayı, yakıtın yanma odasına püskürtüldüğü andaki yanma odası sıcaklığı ve basıncı alınacaktır. Bu nedenle püskürtme anı dolgu sıcaklığı ve basıncının belirlenmesi için emme sonu sıcaklığının belirlenmesi gerekmektedir. Emme sonu sıcaklığı,

$$T_{A\ddot{O}N} = T_d (1 - \gamma) \frac{P_y}{P_d} \frac{\varepsilon}{(\varepsilon - 1) \eta_v} \quad (5)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada γ art gazların tüm dolguya olan oranı, η_v volumetrik verimi, P_y tüm dolgu (taze ve art gaz karışımı) basıncını ve P_d ise taze dolgu kısmi basıncını ifade etmektedir. Bu çalışmada; $\gamma = 0,04$ $\eta_v = 0,90$ ve $P_y/P_d = 1$ alınarak emme sonu sıcaklığı:

$$T_{A\ddot{O}N} = 1,067 \cdot T_d \frac{\varepsilon}{(\varepsilon - 1)} \quad (6)$$

olarak yalnızca taze dolgu sıcaklığına ve sıkıştırma oranına bağlı olarak belirlenmiştir.

Yakıt Püskürtme Anı Dolgu Sıcaklığı ve Basıncının Belirlenmesi

Yakıt püskürtme anı dolgu sıcaklığı ve basıncının belirlenmesi, sıkıştırma periyodu, politropik hal değişimi kabul edilerek yapılmıştır. Bu nedenle öncelikle yakıt püskürtme anı silindir hacminin ve pistonun alt ölü noktadayken silindir hacminin belirlenmesi gerekmektedir. Buna göre, ϕ püskürtme açısı olmak üzere püskürtme anı sıcaklığı ve basıncı

$$T(\phi) = T_{A\ddot{O}N} \left(\frac{V_{A\ddot{O}N}}{V(\phi)} \right)^{m-1} \quad (7)$$

$$P(\phi) = P_{A\ddot{O}N} \left(\frac{V_{A\ddot{O}N}}{V(\phi)} \right)^m \quad (8)$$

şeklinde belirlenir. Bu ifadelerdeki m politropik üsttür. Ancak silindirdeki karışımın sıkıştırılmasıyla meydana gelen kompresyon kaçaklarının etkisini dikkate almak için politropik üst sıkıştırma oranına ve püskürtme

avansına bağlı olarak azaltmak gerekir. Bu nedenle m politropik üst sabiti, ε sıkıştırma oranı, s sıkıştırma oranı katsayısı, ϕ püskürtme avansı, a püskürtme avansı katsayısı olmak üzere politropik üst $m - s\varepsilon + a\phi$ şeklinde ifade edilmiştir.

Politropik Üst İfadesinin Belirlenmesi

Politropik üstün $m - s\varepsilon + a\phi$ şeklindeki ifadede m, s ve a katsayıları deneysel olarak belirlenmiş püskürtme anındaki silindir basınçların kullanımıyla en küçük kareler yöntemiyle deney motoruna ait olmak üzere belirlenmişlerdir. Bu çalışmadaki korelasyon hesaplamaları [104]'dncü kaynaktaki esaslara göre yapılmıştır.

$$P(\phi) = P_{A\dot{O}N} \left(\frac{V_{A\dot{O}N}}{V(\phi)} \right)^{m-s\varepsilon+a\phi} \quad (9)$$

Bu ifadedeki sabitlerin en küçük kareler yöntemiyle belirlenebilmesi için exponansiyel formda olan denklem lineer forma dönüştürülecektir. İfadesinin logaritması alınırsa

$$\ln(P(\phi)) = (m - s\varepsilon + a\phi) \ln \left(P_{A\dot{O}N} \left(\frac{V_{A\dot{O}N}}{V(\phi)} \right) \right) \quad (10)$$

Bu ifadede $\ln(P(\phi)) = P'(\phi)$ ve $\ln \left(P_{A\dot{O}N} \left(\frac{V_{A\dot{O}N}}{V(\phi)} \right) \right) = V'(\phi)$ olarak alınırsa ifade

$$P'(\phi) = (m - s\varepsilon + a\phi)V'(\phi) \quad (11)$$

şeklinde çok değişkenli lineer bir denklem haline gelir. Ölçülen silindir basıncının logaritmasıyla, $P'(\phi)_g$ ($\ln P(\phi)_g$) bu bağıntıdaki tutuşma gecikmesi, $P'(\phi)$ arasındaki farkın, e kareleri

$$\sum e_i^2 = \sum (P'(\phi)_{g_i} - P'(\phi)_i)^2 = \sum (P'(\phi)_{g_i} - (m - s\varepsilon_i + a\phi_i)V'(\phi)_i)^2 \quad (12)$$

şeklinde ifade edilir. Denklem sabitlerinin belirlenmesi için bu ifadenin minimum olması istenir. Bu nedenle bu ifadenin denklem sabitlerine göre türevleri alınırsa

$$\frac{\partial \sum e_i^2}{\partial m} = 0 \Rightarrow 2 \sum (P'(\phi)_{g_i} - (m - s\varepsilon_i + a\phi_i)V'(\phi)_i) (-V'(\phi)_i) = 0$$

$$\sum P'(\phi)_{g_i} V'(\phi)_i = m \sum V'^2(\phi)_i - s \sum V'^2(\phi)_i \varepsilon_i + a \sum V'^2(\phi)_i \phi_i \quad (13)$$

$$\frac{\partial \sum e_i^2}{\partial s} = 0 \Rightarrow 2 \sum (P'(\phi)_{g_i} - (m - s\varepsilon_i + a\phi_i)V'(\phi)_i) (\varepsilon_i V'(\phi)_i) = 0$$

$$\sum P'(\phi)_{g_i} V'(\phi)_i \varepsilon_i = m \sum V'^2(\phi)_i \varepsilon_i - s \sum V'^2(\phi)_i \varepsilon_i^2 + a \sum V'^2(\phi)_i \phi_i \varepsilon_i \quad (14)$$

$$\frac{\partial \sum e_i^2}{\partial a} = 0 \Rightarrow 2 \sum (P'(\phi)_{g_i} - (m - s\varepsilon_i + a\phi_i)V'(\phi)_i) (-\phi_i V'(\phi)_i) = 0$$

$$\sum P'(\phi)_{g_i} V'(\phi)_i \phi_i = m \sum V'^2(\phi)_i \phi_i - s \sum V'^2(\phi)_i \varepsilon_i \phi_i + a \sum V'^2(\phi)_i \phi_i^2 \quad (15)$$

şeklinde üç bilinmeyenli üç adet lineer denklem elde edilir. Aşağıda matris formunda verilen bu lineer denklem takımının çözülmesiyle katsayılar belirlenir.

$$\begin{bmatrix} \sum P'(\phi)_{g_i} V'(\phi)_i \\ \sum P'(\phi)_{g_i} V'(\phi)_i \varepsilon_i \\ \sum P'(\phi)_{g_i} V'(\phi)_i \phi_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum V'^2(\phi)_i & \sum V'^2(\phi)_i \varepsilon_i & \sum V'^2(\phi)_i \phi_i \\ \sum V'^2(\phi)_i \varepsilon_i & \sum V'^2(\phi)_i \varepsilon_i^2 & \sum V'^2(\phi)_i \varepsilon_i \phi_i \\ \sum V'^2(\phi)_i \phi_i & \sum V'^2(\phi)_i \varepsilon_i \phi_i & \sum V'^2(\phi)_i \phi_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m \\ s \\ a \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{matrix} \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ T & = & D & & X \end{matrix}$$

Burada T silindirik basınç vektörü, D veri matrisi ve X katsayılar vektörüdür. Bulunan m, s, a , katsayılarından m politropik üstü için $m - s\varepsilon + a\phi$ ve $m - 1$ için $m - 1 - s\varepsilon + a\phi$ ifadesi kullanılmıştır.

Tek Sayfalı Tutuşma Gecikmesi Ampirik Denkleminin Belirlenmesi

Dizel motorunda farklı yapısal ve işletme şartlarda tutuşma gecikmesi belirlenmiş ve elde edilen deneysel sonuçlardan tek silindirik dört zamanlı hava soğutmalı dizel motorlarında tutuşma gecikmesinin belirlenebilmesi için yarı ampirik bir denklem elde edilmiştir. Bunun için önceki bölümde açıklanan modife edilmiş ve aşağıda verilen Arrhenius denklemi kullanılmıştır.

$$\tau = A\lambda^k P^{-n} \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (17)$$

Bu ifadedeki sabitlerin en küçük kareler yöntemiyle belirlenebilmesi için exponansiyel formda olan denklem lineer forma dönüştürülecektir. İfadesinin logaritması alınırsa

$$\ln \tau = \ln A + k \ln \lambda - n \ln P + \frac{E}{RT} \quad (18)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifade de

$$\ln \tau = \tau', \ln A = A', \ln \lambda = \lambda', \ln P = P', 1/T = T' \text{ ve } E/\bar{R} = m \text{ olarak alınırsa ifade} \quad (19)$$

$$\tau' = A' + k\lambda' - nP' + mT'$$

şeklinde çok değişkenli lineer bir denklem haline gelir. Ölçülen tutuşma gecikmesinin logaritmasıyla, τ'_g ($\ln \tau_g$) bu bağıntıdaki tutuşma gecikmesi, τ' arasındaki farkın, e kareleri

$$\sum e_i^2 = \sum (\tau'_{gi} - \tau'_i)^2 = \sum (\tau'_{gi} - A' - k\lambda'_i + nP'_i - mT'_i)^2 \quad (20)$$

şeklinde ifade edilir. Denklemin sabitlerinin belirlenmesi için bu ifadenin minimum olması istenir. Bu nedenle bu ifadenin denklem sabitlerine göre türevleri alınırsa

$$\frac{\partial \sum e_i^2}{\partial A'} = 0 \Rightarrow 2 \sum (\tau'_{gi} - A' - k\lambda'_i + nP'_i - mT'_i)(-1) = 0$$

$$z = \text{Veri sayısı} \quad \sum \tau'_{gi} = zA' + k \sum \lambda'_i - n \sum P'_i + m \sum T'_i \quad (21)$$

$$\frac{\partial \sum e_i^2}{\partial k} = 0 \Rightarrow 2 \sum (\tau'_{gi} - A' - k\lambda'_i + nP'_i - mT'_i)(-\lambda'_i) = 0$$

$$\sum \tau'_{gi} \lambda'_i = A' \sum \lambda'_i + k \sum (\lambda'_i)^2 - n \sum P'_i \lambda'_i + m \sum T'_i \lambda'_i \quad (22)$$

$$\frac{\partial \sum e_i^2}{\partial n} = 0 \Rightarrow 2 \sum (\tau'_{gi} - A' - k\lambda'_i + nP'_i - mT'_i)(P'_i) = 0$$

$$\sum \tau'_{gi} P'_i = A' \sum P'_i + k \sum \lambda'_i P'_i - n \sum (P'_i)^2 + m \sum T'_i P'_i \quad (23)$$

$$\frac{\partial \sum e_i^2}{\partial m} = 0 \Rightarrow 2 \sum (\tau'_{gi} - A' - k\lambda'_i + nP'_i - mT'_i)(-T'_i) = 0$$

$$\sum \tau'_{gi} T'_i = A' \sum T'_i + k \sum \lambda'_i T'_i - n \sum P'_i T'_i + m \sum (T'_i)^2 \quad (24)$$

şeklinde dört bilinmeyenli dört adet lineer denklem elde edilir. Aşağıda matris formunda verilen bu lineer denklem takımının çözülmesiyle katsayılar belirlenir.

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \sum \tau'_{gi} \\ \sum \tau'_{gi} \lambda'_i \\ \sum \tau'_{gi} P'_i \\ \sum \tau'_{gi} T'_i \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} z & \sum \lambda'_i & -\sum P'_i & \sum T'_i \\ \sum \lambda'_i & \sum (\lambda'_i)^2 & -\sum P'_i \lambda'_i & \sum T'_i \lambda'_i \\ \sum P'_i & \sum \lambda'_i P'_i & -\sum (P'_i)^2 & \sum T'_i P'_i \\ \sum T'_i & \sum \lambda'_i T'_i & -\sum P'_i T'_i & \sum (T'_i)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A' \\ k \\ n \\ m \end{bmatrix} & \quad (25) \\
 \downarrow & \qquad \qquad \qquad \downarrow & \qquad \qquad \qquad \downarrow \\
 T & = D \cdot X
 \end{aligned}$$

Burada T tutuşma gecikmesi vektörü, D veri matrisi ve X katsayılar vektörüdür. Bulunan A', k, n, m katsayılarından modife edilmiş Arrhenius denklemindeki sabitler belirlenmiştir.

Ampirik Denklemlerin Deneysel Sonuçlarla Uyum

En küçük kareler yöntemiyle elde edilen ampirik denklemlerin deneysel bulgularla ne kadar iyi uyum sağladığı ortalama sapma ve korelasyon katsayısı ile incelenmiştir.

Yüzde olarak sapma için:

$$\sigma_i = \frac{y_{gi} - y_i}{y_{oi}} \cdot 100 \quad (26)$$

ifadesi, yüzde olarak ortalama sapma için:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{z} \sum_{i=1}^z |\sigma_i| \quad (27)$$

ifadesi ve korelasyon katsayısı içinde:

$$R = \left(1 - \frac{(z-1) \sum_{i=1}^z (y_{gi} - y_i)^2}{(z-F) \sum_{i=1}^z (y_{gi} - \bar{y}_i)^2} \right)^{1/2} \quad (28)$$

ifadesi kullanılmıştır. Bu ifadelerde;



z = deney sayısı,

y = belirlenmek istenilen bağımlı değişken,

y_{gi} = y değişkeninin gerçek (deneysel) değeri,

y_i = y değişkeninin ampirik denklemden elde edilmiş değeri,

$\bar{y}_i = \frac{1}{z} \sum_{i=1}^z y_{gi}$ olmak üzere y değişkeninin gerçek değerlerinin ortalaması,

$F = y$ bağımlı değişkeninin bağımlı olduğu bağımsız değişken sayısıdır (bu çalışmada politropik üstün belirlenmesinde 2, tutuşma gecikmesinin belirlenmesinde 3' tür).

Bu bölümdeki hesaplamalar, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve verilerin grafikler şeklinde sunulması EXCEL programıyla yapılmıştır. Elde edilen Lineer denklem sistemlerinin çözümü ise MATLAB'da hazırlanan programla gerçekleştirilmiştir.

Tutuşma Gecikmesi Hata Analizi

Tutuşma gecikmesi Denklem 17'ye göre $\tau = \tau(\lambda, P, T)$ olmak üzere belirlilik analizi yöntemine göre tutuşma gecikmesi hata oranı:

$$w_{\tau} = \left[\left(\frac{1}{z} \sum_{i=1}^z \left(\frac{\partial \tau}{\partial \lambda} \right)_i w_{\lambda i} \right)^2 + \left(\frac{1}{z} \sum_{i=1}^z \left(\frac{\partial \tau}{\partial P} \right)_i w_{pi} \right)^2 + \left(\frac{1}{z} \sum_{i=1}^z \left(\frac{\partial \tau}{\partial T} \right)_i w_{Ti} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (29)$$

olarak belirlenmiştir. Bu denklemde;

w_{λ} = Hava fazlalık katsayısı ölçüm hata oranı,

w_p = Basınç belirleme hata oranı,

w_T = Sıcaklık belirleme hata oranıdır.

Ve yine denklem 17'ye göre;

$$\frac{\partial \tau}{\partial \lambda} = kA\lambda^{k-1}P^{-n} \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (30)$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial P} = -nA\lambda^k P^{-n-1} \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (31)$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial T} = -\frac{E}{RT^2} \ln(A\lambda^k P^{-n}) A\lambda^k P^{-n} \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (32)$$

olarak belirlenmektedir.

YARI AMPİRİK DENKLEMLERİNİN HESAPLAMA SONUÇLARI

Tutuşma gecikmesinin belirlenmesinde ,

$$\tau = A\lambda^k P^{-n} \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (29)$$

kullanılan yarı ampirik denklemdeki, yakıtın yanma odasına püskürtüldüğü andaki silindir basınç değeri deneysel sonuçların en küçük kareler yönteminin kullanılmasıyla elde edilen politropik üst ifadesinin kullanımıyla

$$P(\phi) = P_{AÖN} \left(\frac{V_{AÖN}}{V(\phi)} \right)^{1,265-0,003\varepsilon+0,011\phi} \quad (30)$$

şeklinde hesaplanmıştır. Bu bağıntıyla bulunan ve deneylerden elde edilen basınç değerlerinin serpilme diyagramı, yüzde ortalama sapma değeri $\bar{\sigma}$ ve korelasyon katsayısı (R) Şekil 11'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi basıncın hesap ve ölçüm değerleri yeterli uyum içerisindedir. Yüzde ortalama sapma 1,94 ve korelasyon katsayısı 0,9966 bulunmuştur.

Belirlenen bu politropik üst sabitinden yakıtın püskürtüldüğü sıcaklık değerleri

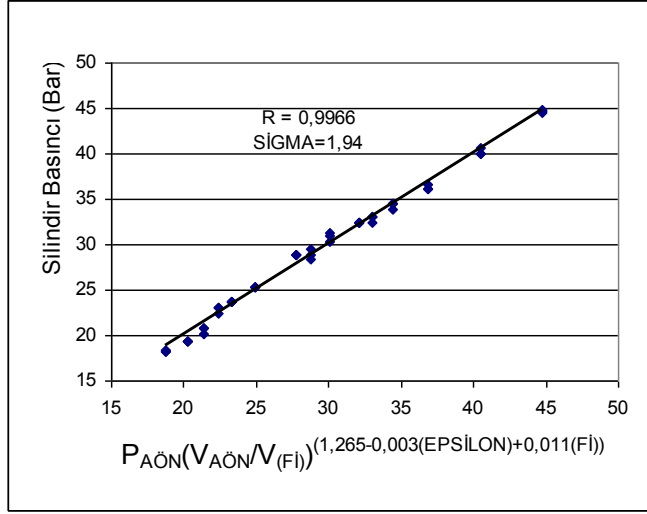
$$T(\phi) = T_{AÖN} \left(\frac{V_{AÖN}}{V(\phi)} \right)^{0,265-0,003\varepsilon+0,011\phi} \quad (31)$$

bağıntısıyla hesaplanmıştır.

Denklem 29'da verilen tutuşma gecikmesi ifadesindeki sabitlerin en küçük kareler yönteminin kullanımıyla elde edilen tutuşma gecikmesi ifadesi

$$\tau = 32.\lambda^{0,1}.P^{-1,6}.\exp\left(\frac{2100}{T}\right) \quad (32)$$

şeklindedir.



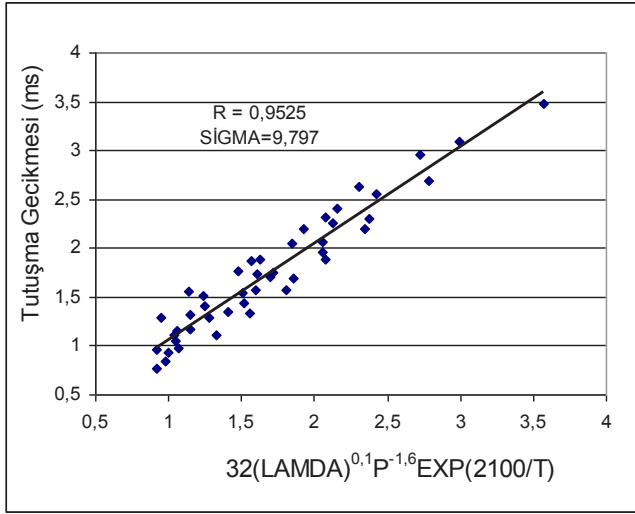
Şekil 11. Ampirik denklemle belirlenen ve deneylerden elde edilen basınç değerlerinin serpilme diyagramı, ortalama sapma değeri ve korelasyon katsayısı.

Denklem 32'deki basınç ve sıcaklık ifadelerinde Denklem 30 ve 31'in kullanılmasıyla,

$$\tau = 32 \cdot \mathcal{A}^{0,1} \cdot P_{A\ddot{O}N}^{-1,6} \left(\frac{V_{A\ddot{O}N}}{V(\phi)} \right)^{-2,024+0,0048\varepsilon-0,0176\phi} \cdot \exp \left(2100 \cdot T_{A\ddot{O}N}^{-1} \left(\frac{V_{A\ddot{O}N}}{V(\phi)} \right)^{-0,265+0,003\varepsilon-0,011\phi} \right) \quad (33)$$

ifadesi elde edilir. Bu bağıntıda $V(\phi)$, $V_{A\ddot{O}N}$ ve $T_{A\ddot{O}N}$ deney motor özelliklerine göre hesaplanmaktadır. Bu çalışmada $P_{A\ddot{O}N} = 1$ Bar kabul edilmiştir. Diğer değişkenler motorun yapısal ve işletme şartlarına göre belirlenmektedir. Denklemdeki sabitler deney motoruna ait karakteristik sabitlerdir.

Bu bağıntıyla bulunan ve deneylerden elde edilen tutuşma gecikmesi değerlerinin serpilme diyagramı, ortalama sapma değeri ve korelasyon katsayısı Şekil 12'de gösterilmiştir. Ortalama sapma değeri 9,797 ve korelasyon katsayısı 0,9525 dir. Yarı ampirik denklemin ortalama sapma değeri ve korelasyon katsayısı, üç ayrı parametrenin geniş sınırlar içerisindeki etkilerini kapsadığı için tek parametrenin daha dar sınırlardaki etkisini içeren denklemlerin ortalama sapma değerinden ve korelasyon katsayılarından daha düşük bulunmuştur.



Şekil 12. Ampirik denklemle belirlenen ve deneylerden elde edilen tutuşma gecikmesi değerlerinin serpilme diyagramı, ortalama sapma değeri ve korelasyon katsayısı

Tutuşma gecikmesi hata oranı Denklem 29'a göre belirlenmiştir. Hava fazlalık katsayısı ölçüm hata oranı, deneysel çalışmada kullanılan ölçüm sistemleri için önerilen, %1 değeri alınmıştır. Basınç belirleme hata oranı olarak, tutuşma gecikmesi yarı ampirik denklemde kullanılan ve ampirik olarak belirlenen yakıt püskürtme basıncının deneysel olarak elde edilen değerlerden yüzde ortalama sapmasını veren %1,94 değeri kullanılmıştır. Yakıt püskürtme basıncının deneysel olarak elde edilen değerlerindeki ölçüm sistemi hata oranı bu değere dahil kabul edilmiştir. Sıcaklık belirleme hata oranı, basınç belirleme hata oranından, basınç ve sıcaklığın politropik ilişkisinden yararlanılarak %0,82 değeri alınmıştır. Buna göre Denklem 29'den tutuşma gecikmesi hata oranı

$$w_{\tau} = \left[(0,0018)^2 + (-0,0543)^2 + (0,0609)^2 \right]^{1/2} = 0,0816 \quad (34)$$

olarak belirlenmiştir. Tutuşma gecikmesi ortalama değeri 1,75 ms alınarak tutuşma gecikmesi hata oranı %4,67 bulunur. Tutuşma gecikmesi hata oranında hava fazlalık katsayısı ölçüm hata oranı %0,1 ile ihmal edilebilecek kadar küçük bulunmuştur. Basınç belirleme hata oranı %3,1 ile oldukça etkilidir. Sıcaklık belirleme hata oranıdır %3,48 ile tutuşma gecikmesi hata oranında en etkili parametredir.

SONUÇ

Dizel motorlarında yanma olayı püskürtme ile başlayıp, pek çok sayıda parametrenin topluca etkisi altında cereyan eden ve gerçekte egzoz içinde bile kısmen devam eden karmaşık bir olaydır. Yanma olayı üç ayrı safha halinde incelenmektedir. Bunlar tutuşma gecikmesi, ani yanma ve kumandalı (kontrollü) yanma safhalarıdır. Tutuşma gecikmesi süreci; yanmayı, dizel vuruntusunu ve buna bağlı olarak motorun performansını ve gürültüsünü, bununla birlikte is teşekkülü gibi yanmanın daha sonraki safhalarını da etkilemektedir.

Bu çalışmada; sürekli yakıt ilavesi olan homojen olmayan yakıt / hava sistemlerinin bir örneği olan, dizel motorunun değişik işletme şartlarının (püskürtme avansı, emme havası sıcaklığı vb.) ve yapısal (sıkıştırma oranı) büyüklüklerinin tutuşma gecikmesi üzerindeki etkileri deneysel olarak belirlenmiş, tutuşma gecikmesi bu deneysel çalışma sonuçlarına dayanan yarı ampirik tek safhalı denklemle ifade edilmiş ve özetle aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Tutuşma gecikmesini etkileyen önemli faktörlerin (sıkıştırma oranı, püskürtme avansı, emme havası sıcaklığı, hava fazlalık katsayısı) tutuşma gecikmesi üzerindeki etkileri deneysel olarak belirlenerek tutuşma gecikmesinin kontrollü değiştirilmesi sağlanılmıştır. Tutuşma gecikmesi sıkıştırma oranı ve emme havası sıcaklığının artmasıyla azalmakta, püskürtme avansı ve hava fazlalık katsayısının artmasıyla ise artmaktadır.
- Deney sonuçlarından yararlanılarak tutuşma gecikmesini etkileyen ana faktörlerin etkileri tek safhalı yarı ampirik denklemle ifade edilmiştir. Ampirik denklem deney motorunun karakteristik özelliklerine göre;

$$\tau = 32 \cdot \lambda^{0,1} \cdot P_{AON}^{-1,6} \left(\frac{V_{AON}}{V(\phi)} \right)^{-2,024+0,0048\varepsilon-0,0176\phi} \cdot \exp \left(2100 \cdot T_{AON}^{-1} \left(\frac{V_{AON}}{V(\phi)} \right)^{-0,265+0,003\varepsilon-0,011\phi} \right)$$

şeklinde belirlenmiştir.

- Tutuşma gecikmesi bağıntıyla bulunan ve deneylerden elde edilen tutuşma gecikmesi değerlerinin korelasyon katsayısı 0,9525 dir.

- Yarı ampirik denklemin belirlilik katsayısı, üç ayrı parametrenin geniş sınırlar içerisindeki etkilerini kapsamasından dolayı belirlilik katsayısı düşük bulunmuştur. Tutuşma gecikmesi tek parametrenin sınırlı değiştirilmesiyle daha iyi tahmin edilerek silindir basınç seviyesine etkisi incelenmelidir.
- Fiziksel değişimlerin tutuşma gecikmesi üzerindeki etkisi iki safhalı yarı ampirik denklemle dikkate alınarak tutuşma gecikmesi daha hassas olarak belirlenmeye çalışılmalıdır.

Kaynaklar

- Abu-Elyazeed O.S.M. (2015). "On the ignition delay of two types of Castor oil bio-diesel using shock tube experiments". *Fuel*, 144, 157–163.
- Aldhaidhawi M. & Miron, L. & Chiriac R. Badescu V. (2018). "Autoignition process in compression ignition engine fueled by diesel fuel and biodiesel with 20% rapeseed biofuel in diesel fuel". *J. of Energ. Eng.*
- Allen C.M. & Toulson E. & Hung L.S.D. & Schock H. & Miller D. & Lee T. (2011). "Ignition characteristics of diesel and canola biodiesel sprays in the low-temperature combustion regime". *Energy Fuels*, 25 (7), 2896–2908.
- Barituad, T.A. & Heinze, T.A. & Le Coz, J.F. (1994). "Spray and self-Ignition Visualization in a DI Diesel Engine". SAE Technical Paper No: 940681.
- Beerer D. & McDonell V. & Samuelsen S. & Angello L. (2009). "Interpretation of flow reactor based ignition delay measurements". *Proc. ASME Turbo Expo 2*, 1011–1026.
- Bolt, J.A. & Henein, N.A. (1970). "The effect of Some Engine Variables on Ignition Delay and Other Combustion Phenomena in a Diesel Engine". The Institution of Mechanical Engineers.
- Borat, O. (1953). "Diesel Motorlarında Tutuşma Evresine Kadarki Süreçlerin Teorisi". Doktora tezi, Ren-Vestfalya Teknik Yüksek Okulu Aachen.
- Borat, O. (1953). "Diesel Motorlarında Tutuşma Gecikmesi Hakkında Yeni Araştırmalar". Doçentlik tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Borat, O. & Balcı, M. & Sürmen, A. (1992). "Yanma Bilgisi". Gazi Üni. Teknik Eğitim Fak. Yayınları, Ankara.
- Borat, O. & Balcı, M. & Sürmen, A. (1995). "İçten Yanmalı Motorlar", Gazi, Üni. Teknik Eğitim Fak. Yayınları, Ankara.
- Borman, G.L. & Ragland, K.W. (1998). "Combustion Engineering". Mc Graw Hill Book Company, San Francisco USA.
- Brett, L. & Macnamara, J. & Musch, P. & Simmie, J.M. (2001). "Simulation of Methane Autoignition in a Rapid Compression Machine with Creviced Pistons". *Combustion and Flame*, 124.
- Burcat, A. & Radhakrishnan, K. (1985) "High Temperature Oxidation of Propane". *Combustion and Flame*, 60.
- Cavaliere, A. & Ciajolo, A. & D'anna, A. & Mercogliano, R. (1993). "Autoignition of n-Heptane and n-Tetradecane in Engine-Like Conditions". *Combustion and Flame*, 93.
- Chen, C. (2003). "Correlation of Ignition Delay with Fuel Composition and State For Application to Gas Turbine Combustion", MSc Thesis, Clemson University Research Foundation South Carolina Institute for Energy Sciences, University of California.

- Chigier, N. (1991). "Combustion Measurements". Hemisphere Publishing Corporation, Washington, USA.
- Ciezki, H.K. & Adomeit, G. (1993). "Shock-Tube Investigation of Self-ignition of n-Heptane-Air Mixtures Under Engine Relevant Conditions". *Combustion and Flame*, 93.
- Davis S.G. & Law, C.K. & Wang, H. (1999). "Propane Pyrolysis and Oxidation Kinetics in a Flow Reactor and Laminar Flames". *Combustion and Flame*, 119.
- Dimitriu, D.G. & Goettler, H.J. & Ziejewski, M. (1990). "Apparatus for the Measurement of Ignition Delay Times for Diesel Engine Fuels". SAE Paper No: 901617.
- El-Kasaby M. & Nemit-Allah M.A. (2013). "Experimental investigations of ignition delay period and performance of a diesel engine operated with Jatropha oil biodiesel". *Alex. Eng. J.* 52 (2), 141–149
- Erbakan N. (1953) "Diesel Motorlarında Tutuşma Evresine Kadarki Süreçlerin Teorisi" Doktora tezi, Ren-Vestfalya Teknik Yüksek Okulu, Aachen.
- Erbakan N. (1953) "Diesel Motorlarında Tutuşma gecikmesi Hakkında Yeni Araştırmalar" Doçentlik tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Fieweger, K. & Blumenthal, R. & Adomeit, G. (1997). "Self-Ignition of S.I. Engine Model Fuels: A Shock Tube Investigation at High Pressure". *Combustion and Flame*, 109.
- Gardiner, W.C. (1984). "Combustion Chemistry". Springer-Verlog, Berlin.
- Gutheil, E. (1993). "Numerical Investigation of the Ignition of Dilute Fuel Sprays Including Detailed Chemistry". *Combustion and Flame*, 93.
- Hamosfakidis, V. & Reitz, R.D. (2003). "Optimization of a Hydrocarbon Fuel Ignition Model for Two Single Component Surrogates of Diesel Fuel". *Combustion and Flame*, 132.
- Hoang V.N. & Thi L.D. (2015). "Experimental study of the ignition delay of diesel/biodiesel blends using a shock tube". *Biosyst. Eng.* 134, 1–7.
- Hoskin, D.H. & Edwards, C.F. & Siebers, D.L. (1992). "Ignition Delay Performance versus Composition of Model Fuels". SAE Paper No: 920109.
- Jaat N. & Khalid, A. & Andsaler A.R. & Sapit A. & Razali A. & Basharie M. (2017). "Effects of ambient temperature and injection pressure on biodiesel ignition delay". *J. Mech. Eng. Sci.*, 11 (2), 2723–2733.
- Jamrozik A. (2017). "The effect of the alcohol content in the fuel mixture on the performance and emissions of a direct injection diesel engine fueled with diesel-methanol and diesel-ethanol blends". *Energy Convers. Manage.* 148, 461–476.
- Kang, S.H. & Baek, S.W. & Choi, J.H. (2001). "Autoignition of Sprays in a Cylindrical Combustor". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44.
- Keunsoo K. & Wooyoung L. & Paxton W. & Eric M. & Jacob T. & Chol-Bum M. & Tonghun L. (2023). "Effects of the cetane number on chemical ignition delay". *Energy*, 264, 126263.



- Lapuerta M. & Hernandez J.J. & Fernandez-Rodriguez D. & Cova-Bonillo A. (2017). "Autoignition of blends of n-butanol and ethanol with diesel or biodiesel fuels in a constant-volume combustion chamber". *Energy*, 118, 613–621.
- Leppard, W.R. (1991). "The Autoignition Chemistries of Octane-Enhancing Ethers and Cyclic Ethers: A Motored Engine Study". SAE Technical Paper No:912313.
- Lucian M. & Radu C. & Marek B. & Viorel B. (2021). "Ignition delay and its influence on the performance of a Diesel engine operating with different Diesel–biodiesel fuels". *Energy Reports*, 7, Pages 5483-5494.
- Minetti, R. & Carlier, M. & Rbaucour, E. & Therssen, E. & Sochet, L.R. (1995). "A Rapid Compression Machine Investigation of Oxidation and Auto-Ignition of n-Heptane: Measurement and Modeling". *Combustion and Flame*. 102.
- Müller, U.C. & Peters, N. (1992). "Global Kinetics for n-Heptane Ignition at High Pressures", 24. Symposium (international) on Combustion, Sydney, Australia.
- Pinchon, P. (1989). "Three Dimensional Modeling of Combustion in a Prechamber Diesel Engine". SAE Technical Paper No: 890666.
- Qin, Z.; Yang, H. & William, C. & Gardiner, J.R. (2001). "Measurement and Modeling of Shock-Tube Ignition Delay for Propane". *Combustion and Flame*, 124.
- Rente, T. & Golovitchev, V.I. & Denbratt, I. (2001). "Effect of Injection Parameters on Auto-Ignition and Soot Formation in Diesel Sprays". SAE Technical Paper No: 2001-01-3687.
- Sahetchian, K.A. & Blin, N. & Rigny, A. & Seydi, A. (1990). "The Oxidation of n- Butane and n-Heptane in a CFR Engine. Isomerization Reactions and Delay of Autoignition". *Combustion and Flame*, 79.
- Sahin, S.S. & Feng, G. & Heikal, M.R. & Goldfarb, I & Gol'dshtem, V. & Kuzmenko, G. (2001). "Thermal Ignition Analysis of a Monodisperse Sprays with Radiation". *Combustion And Flame*, 125.
- Shrestha K.P. & Eckart S. & Drost S. & Fritsche C. & Schießl R. & Seidel L. & Maas U. & Krause H. & Mauss F. (2022). "A comprehensive kinetic modeling of oxymethylene ethers (OMEn, n=1–3) oxidation - laminar flame speed and ignition delay time measurements". *Combustion and Flame*, 246, 112426.
- Soyhan, H.S. (2000). "Chemical Kinetic Modeling of Autoignition Under Conditions Relevant to Knock in Spark Ignition Engines". Ph.D. Thesis, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Taylor, C.F. (1985). "Detonation and Preignition, The Internal Combustion Engine in Theory and Practice". The M.I.T. Press, London, England.
- Varatharajan, B. & Williams, F.A. (2001). "Chemical-Kinetic Description of High-Temperature Ignition and Detonation of Acetylene- Oxygen-Diluent Systems". *Combustion and Flame*, 125.

- Warnatz, J. & Maas, U. & Dibble, R.W., (2001). “Combustion”. Springer, Berlin.
- Wilk, R.D. & Cernansky, N.P. (1989). “Propene Oxidation at Low and Intermediate Temperatures: A Detailed Chemical Kinetic Study”. *Combustion and Flame*, 77.
- Yetkin, A. (1975). “Homojen Olmayan Ortamlarda Tutuşmaya Hazırlık Döneminde Reaksiyon Ürünlerinin Konsantrasyonlarının Kinetik Açısından İncelenmesi”. Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.

Çıkar Çatışması

Yazar tarafından çıkar çatışmasının olmadığı rapor edilmiştir.

Fonlama

Bu çalışma Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından BSE-075/131102 proje numarası ile desteklenmiştir.

Not

Bu çalışma “Dizel Motorlarında Tutuşma Gecikmesinin Silindir Basınç Seviyesine Etkisi” isimli doktora tezinden üretilmiştir.