

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İÇTEN YANMALI MOTORLARDA İNDİKATÖR
DİYAGRAMININ ÇIKARILMASI VE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. Hakkı Can KOMAN

Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Programı : OTOMOTİV

HAZİRAN 2008

**İÇTEN YANMALI MOTORLARDA İNDİKATÖR
DİYAGRAMININ ÇIKARILMASI VE ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Hakkı Can KOMAN
(503041727)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 9 Haziran 2008**

**Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr. Osman Akın KUTLAR
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Rafig MEHDİYEV
Prof.Dr. Orhan DENİZ (Y.T.Ü.)**

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Anadolu Motor’da yürütülen 106M056 numaralı “ANTOR Tipli Dizel Motorların İki Döngülü Yanma Odası Kullanımıyla Modernizasyonu” adlı Tübitak Projesi kapsamında yapılan motor deneylerinden derlenmiştir. İçten yanmalı motorların araştırma ve geliştirmesinde en sık kullanılan yöntem olan indikasyonu, ölçümlerde kullanılan teknik donanımdan indikatör diyagramlarıyla yapılan analizlere kadar ayrıntılı bir şekilde incelemektedir. Bu yönüyle çalışma, indikasyonun bir dizel motorunun geliştirme sürecinde oynadığı rolü ayrıntılı olarak açıklamaktadır.

Öncelikle gerek akademik, gerekse özel hayatımda bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren, bir eğitimcinin öğrencisine sunabileceği maddi ve manevi tüm imkanları sunarak bana her konuda destek olan tez danışmanım Sn. Yard. Doç. Dr. Osman Akın Kutlar’a; projedeki çalışmalarına olan katkılarından dolayı Sn. Prof. Dr. Rafig Mehdiyev ve Sn. Dr. Hikmet Arslan’a, başta Sn. Kenan Gündüz ve Sn. Rubi Gökbel olmak üzere Anadolu Motor’daki çalışmalarımda bana yardımcı olan herkese teşekkürü bir borç bilirim.

İTÜ Otomotiv Anabilim Dalı’nda bulunduğum 3 senede kendilerinden gerek taşıtlar gerekse içten yanmalı motorlar hakkında çok şey öğrendiğim hocalarıma, her zaman yanımda oldukları için araştırma görevlisi arkadaşlarıma ve yaklaşık 2 sene boyunca bir üyesi olduğum, eğitimimde olduğu kadar özel hayatımda da beni desteklemeyi hiçbir zaman bırakmamış olan; başta Sn. Yunus Canlı olmak üzere tüm OTAM ailesine sonsuz teşekkür ederim. Bu 3 senede kazandığım her başarıda sizin de bir payınız vardır.

Bu çalışma, tüm diğerleri gibi, hayatım boyunca yanımda olan ve bir kez olsun yalnız olduğum düşüncesine kapılmama izin vermeyen çok sevgili aileme ve arkadaşlarıma adanmıştır.

Hakkı Can Koman

Haziran 2008

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
2. İY MOTOR İNDİKASYONU	3
2.1 İndikasyonun Tanımı	3
2.2 İndikasyonun Kullanıldığı Alanlar	5
2.3 İndikasyon Tipleri	6
2.3.1 Yüksek Basınç İndikasyonu	6
2.3.2 Alçak Basınç İndikasyonu	8
2.4 İndikasyonla Elde Edilen Bilgiler	9
2.4.1 Ölçülen Büyüklükler	9
2.4.1.1 Maksimum silindir basıncı	9
2.4.1.2 Maksimum silindir basıncının yeri	10
2.4.1.3 Silindir basıncının değişimi ve maksimum basıncın gerçekleştiği yer	11
2.4.1.4 Maksimum püskürtme basıncı	11
2.4.2 Hesaplanan Büyüklükler	15
2.4.2.1 Ortalama indike basınç	15
2.4.2.2 Sürtünme efektif basıncı	16
2.4.2.3 Yanma başlangıcı ve yanma süresi	17
2.4.2.4 Tutuşma gecikmesi	18
2.4.2.5 Açığa çıkan toplam ısı miktarı	18
3. İNDİKASYONDA KULLANILAN DONANIM	20
3.1 Ölçüm Zinciri	20
3.2 Açısal Enkoderler	22

3.2.1 Mutlak açısal enkoderler	22
3.2.2 Arttırmalı açısal enkoderler	24
3.2.3 Açısal enkoderlerin seçim kriterleri	25
3.3 Basınç Sensörleri	27
3.3.1 Piezoelektrik basınç sensörleri	27
3.3.2 Piezoresistif basınç sensörleri	33
3.4 Yükselticiler	35
3.5 Veri Toplama Cihazları	36
4. ÖLÇÜM ESASLARI	38
4.1 Üst Ölü Noktanın Belirlenmesi	38
4.2 Basınç Referansının Belirlenmesi	41
4.3 Ölçülen Sinyallerin Filtrelenmesi	44
5. İNDİKASYON ANALİZLERİ VE SONUÇLAR	47
5.1 Deney Motorunun Özellikleri	47
5.2 Deney Bulguları	48
5.3 Sonuçlar	54
6. ÖNERİLER	56
KAYNAKLAR	58
EKLER	60
ÖZGEÇMİŞ	65

KISALTMALAR

AÖN	: Alt ölü nokta
ASR	: Ortalama yapı tepkisi (Average structure response)
dk	: Dakika
fmep	: Sürtünme efektif basıncı (Friction mean effective pressure)
FSO	: Ölçüm aralığı üstünden (Full scale output)
İY	: İçten yanmalı
imep	: Ortalama indike basınç (indicated mean pressure)
KMA	: Krank mili açısı
mbar	: Milibar
mep	: Ortalama efektif basınç (mean indicated pressure)
SOC	: Yanma başlangıcı (Start of Combustion)
SOI	: Püskürtme başlangıcı (Start of Injection)
TKA	: Termodinamik kayıp açısı (Thermodynamic Loss Angle)
ÜÖN	: Üst ölü nokta

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 : Yüksek Basınç İndikasyonu ile ölçülebilen ve hesaplanabilen büyüklükler	7
Tablo 2.2 : Farklı parametreler gözlenerek püskürtme başlangıcının belirlenmeye çalışılması	14
Tablo 2.3 : Kümülatif ısı çıkışlarının gerçekleştiği noktaların 100 çevrime göre standart sapmaları	18
Tablo 2.4 : Isı kayıpları	19
Tablo 3.1 : 3 bitlik bir mutlak açısal enkoderin pozisyon tablosu	23
Tablo 3.2 : Piezoresistif basınç sensörleri için alt değerler	35
Tablo 5.1 : Deney motorunun özellikleri	47
Tablo 5.2 : 3000 devir/dk ve tam yükte yapılan deney sonuçları	49
Tablo 5.3 : 3000 devirde diğer yüklerde yapılan deney sonuçları	55
Tablo A.1 : AVL QC34D piezoelektrik basınç sensörünün özellikleri (silindir basıncı için)	60
Tablo A.2 : AVL GU21D piezoelektrik basınç sensörünün özellikleri (silindir basıncı için)	61
Tablo A.3 : Kistler 4045 ve 4075 piezoresistif basınç sensörleri (emme ve egzoz basınçları için)	61
Tablo A.4 : Kistler 4065 piezoresistif basınç sensörü (yakıt basıncı için)	62
Tablo B.1 : AVL 3066 A02 yük yükselticisi	62
Tablo B.2 : Kistler 4665 gerilim yükselticisi	63
Tablo C.1 : Combi teknik özellikler	63

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Nikolaus August Otto'nun kaydettiği silindir içi basınç diyagramı.....	3
Şekil 2.2 : Buhar makinelerinde indikasyon için kullanılan bir Thompson indikatörü.....	4
Şekil 2.3 : Tüm yanma çevrimi boyunca kaydedilmiş silindir basıncı.....	7
Şekil 2.4 : Tüm yanma çevrimi boyunca kaydedilmiş alçak basınç eğrileri.....	8
Şekil 2.5 : Maksimum basıncın yükle değişimi.....	10
Şekil 2.6 : Maksimum basıncın gerçekleştiği açının püskürtme avansı ile değişimi.....	10
Şekil 2.7 : Silindir basıncının değişimi.....	11
Şekil 2.8 : Maksimum püskürtme basıncı.....	12
Şekil 2.9 : Püskürtme başlangıcının belirlenmesi.....	13
Şekil 2.10 : Püskürtme başlangıcının yakıt basıncından yararlanılarak bulunması.....	13
Şekil 2.11 : $p-\alpha$ diyagramında + ve – bölgelerin açıklanması.....	15
Şekil 2.12 : İndike iş ve indike basıncın hesaplanması.....	16
Şekil 2.13 : $\log p-V$ diyagramında yanma başlangıcı ve yanma sonunun belirlenmesi.....	17
Şekil 3.1 : Motor indikasyonu için temel ölçüm zinciri.....	20
Şekil 3.2 : Mutlak açısal enkoder.....	22
Şekil 3.3 : Enkoder diski üzerindeki şekiller.....	22
Şekil 3.4 : Mutlak açısal enkoderlerde kullanılan optik ölçüm metodu.....	24
Şekil 3.5 : Arttırmalı açısal enkoderin çalışma prensibi.....	24
Şekil 3.6 : Piezoelektrik etki.....	27
Şekil 3.7 : Piezoelektrik basınç sensörü.....	28
Şekil 3.8 : Basınç sensörünün yerleştirilmesi için üretilen buji adaptörü.....	29
Şekil 3.9 : Kısa süreli termal kaymaları gösteren bir sonlu elemanlar analizi.....	31
Şekil 3.10 : Farklı tip piezoresistif sensörler.....	33
Şekil 4.1 : Termodinamik kayıp açısının motor hızına göre değişimi.....	40
Şekil 4.2 : TDC hatalarının hesaplanan imep'e etkisi.....	42
Şekil 4.3 : Emme ve silindir basınçlarının benzerliği.....	43
Şekil 4.4 : Emme ve egzoz subaplarının kapanma gürültüleri.....	44
Şekil 4.5 : Subapların kapanma gürültüsünden etkilenen basınç gradyanı.....	45

Şekil 4.6	: Çeşitli filtrelerin basınç sinyalindeki geciktirici etkileri.....	46
Şekil 5.1	: Standart ve MR-1 yanma odaları.....	48
Şekil 5.2	: Standart motor ve MR-1 motorun 3000 devir/dk ve tam yükte silindir basınç eğrileri.....	49
Şekil 5.3	: Standart motor ve MR-1 motorun 3000 devir/dk ve tam yükte silindir basınç-hacim eğrileri.....	50
Şekil 5.4	: Standart motor ve MR-1 motorun 3000 devir/dk ve tam yükte silindir basıncı değişimi eğrileri.....	51
Şekil 5.5	: Standart motor ve MR-1 motorun 3000 devir/dk ve tam yükte açığa çıkan ısı oranı eğrileri.....	51
Şekil 5.6	: Standart ve MR-1 motorda buharlaşma sırasında ortamdan alınan ısı.....	52
Şekil 5.7	: Çeşitli motorlardan ortalama alınarak hesaplanan ASR eğrisi.....	53
Şekil 5.8	: Basınç gradyanı ve yanma gürültüsü.....	53
Şekil 5.9	: Yanma hızı ve yanma gürültüsü.....	54
Şekil D.1	: Deney motoru üzerinde yer alan, ölçüm ile ilgili elemanlar.....	64
Şekil D.2	: Deney düzeneği ve veri toplama ünitesinin genel görünümü.....	64

SEMBOL LİSTESİ

b_e	: Motorun spesifik yakıt tüketimi
c_v	: Sabit hacimde özgül ısı katsayısı
dp_c/da	: Silindir içi basıncın değişimi
k	: Duman koyuluğu
N_e	: Motorun efektif gücü
n	: Motorun dönme hızı
P_e	: Motorun efektif gücü
p_c	: Silindir basıncı
p_{cmax}	: Maksimum silindir basıncı
p_{imax}	: Maksimum püskürtme basıncı
p_f	: Sürtünme efektif basıncı
p_{me}	: Ortalama efektif basınç
p_{mi}	: Ortalama indike basınç
Q_t	: Yanma çevrimi boyunca açığa çıkan toplam ısı
$Q_{1\rightarrow 2}$	: Yanma çevriminde gerçekleşen iki nokta arasında açığa çıkan ısı
R	: İdeal gaz sabiti
V	: Yanma çevriminin herhangi bir noktasında silindir hacmi
V_h	: Motorun strok hacmi
W_i	: İndike iş
Z	: Motorun zaman sabiti
α	: Krank mili açısı
adp_c/da_{max}	: Maksimum basınç artışının gerçekleştiği krank mili açısı
α_i	: Tutuşma gecikmesi
αp_{cmax}	: Maksimum silindir basıncının gerçekleştiği krank mili açısı
η_m	: Motorun mekanik verimi
λ	: Motorun volümetrik verimi

İÇTEN YANMALI MOTORLARDA İNDİKATÖR DİYAGRAMININ ÇIKARILMASI VE ANALİZİ

ÖZET

İçten yanmalı motor indikasyonu, motorda krank milinin pozisyonuna bağlı olarak değişen basınç, sıcaklık ve çeşitli verilerin yüksek hızlı veri toplama cihazlarıyla ölçülüp kaydedilmesi anlamına gelmektedir. Motor üzerinde uygulanan hiçbir deney tekniği ile yanma olayı hakkında indikasyon sayesinde toplanan bilgi miktarından fazlası elde edilememektedir. İndikasyon, diğer deney metodlarıyla karşılaştırıldığında uygulaması daha basit bir deney metodu olup çok daha kesin ve güvenilir sonuçlar sağlamaktadır. Bununla beraber indikasyon çalışmalarını tüm yönleriyle sistematik bir şekilde anlatan Türkçe kaynak yok denecek kadar azdır. Bu çalışmanın amacı, içten yanmalı motorların araştırma ve geliştirme çalışmalarında en sık kullanılan yöntem olan motor indikasyonunu ve indikatör parametreleri ile yapılan analizleri, bir dizel motorunun geliştirme sürecinde yapılan indikasyon çalışmaları ışığında, incelemektir. Bu kapsamda motor indikasyonu tanıtılmış, indikatör diyagramından elde edilecek veriler incelenmiştir. Ayrıca indikasyon için kullanılan ölçüm zinciri tanımlanmış, zincirde kullanılan teknik donanımın sahip olması gereken özellikler, ölçüm şartları göz önüne alınarak, detaylı olarak anlatılmıştır. İndikatör diyagramının çıkarılmasında dikkat edilmesi gereken temel noktalar ve ölçüm esasları üzerinde durulmuş, bu noktalarda gerçekleşen belirsizliklerin ölçüm sonuçlarında yaratacağı hatalar saptanmıştır. Son olarak indikatör diyagramından elde edilen parametrelerle yapılan analizlere örnekler verilmiştir. Çalışmada anlatılan tüm teknik ve analizler, Anadolu Motorda halen sürmekte olan motor geliştirme çalışmalarında uygulanmıştır. Bu yönüyle çalışma, motor indikasyonunun ve indikatör diyagramı analizinin bir dizel motorunun geliştirme sürecinde oynadığı rolün güzel bir örneğini teşkil etmektedir.

INTERNAL COMBUSTION ENGINE INDICATING AND INDICATION ANALYSIS

SUMMARY

Internal combustion engine indicating can be defined as high speed acquisition of pressure, temperature and certain other values which consistently change with the position of the crank shaft. It is not possible to gather more information on combustion characteristics with any other experimental method other than indicating. Compared to other methods, indication is more simple in application and provides more accurate and repeatable results. Even still, the lack of Turkish reference on internal combustion engine indication can't be denied. The aim of this study is to analyze engine indicating in depth and give examples to indication based analysis, both under guidance of experiments conducted during the development phase of a diesel engine. To achieve this, engine indication is explained and indicating parameters are analyzed. Moreover, the indication measurement chain is described with emphasis on how each unit on the chain should be selected, according to the specific needs of the measurements. The experimental methods and influencing parameters are discussed to point out possible error sources that these parameters may create. Lastly, examples on analysis made by using indicating parameters are given. All methods and analysis explained in this study are experimented during Anadolu Motor's ongoing engine development work. For this, the study is a fine example of the role that engine indication plays on the development of a diesel engine.

1. GİRİŞ

İçten yanmalı motorların geliştirme sürecinde kuşkusuz ilk ve en önemli rolü oynayan deneysel çalışmalar, motorun silindir için basıncının ölçülmesidir. Krank mili açısı ile değişen diğer büyüklüklerin de (emme ve egzoz basınçları, yakıt hattı basıncı, enjektör iğnesinin hareketi, vb.) ölçülmesiyle motorun çalışma karakteri hakkında çok ayrıntılı bilgi edinmek mümkün hale gelmektedir. KMA ile değişen tüm bu büyüklüklerin ölçülmesi İY motor indikasyonu denilen deneysel sürecin ilk aşamasını oluşturmaktadır.

Bugün İY motor indikasyonu, motor üzerinde yapılan deneysel çalışmaların arasında en sık uygulananıdır. Ölçüm tekniğinin diğer deneysel çalışmalarla, özellikle optik ölçüm yöntemleriyle, kıyaslandığında nispeten daha basit olması ve bu teknikle ölçülen büyüklüklerden yararlanılarak elde edilen bilginin bolluğu; İY motor indikasyonunu motorun geliştirme sürecindeki en önemli çalışma durumuna getirmektedir. İndikasyon ile elde edilen parametrelerin analizi sayesinde motorun çalışma karakteri hakkında tüm önemli bilgilerin elde edilmesi mümkündür.

Bununla beraber indikasyonun ölçüm metodunun hızlı ve nispeten daha basit olması nedeniyle çoğu zaman sensörden alınan bilgi yeterli kabul edilerek ölçüm öncesinde dikkate alınması gereken ve ölçüm sonuçlarının doğruluğu açısından hayati önem taşıyan bazı noktalar ihmal edilmiştir. Bu şekilde yapılan çalışmalar ya yanlış ya da eksik sonuçlar doğurmuştur.

Bu çalışmanın amacı İY motorların geliştirilmesinde en çok kullanılan indikatör diyagramı metodunun ve diyagramdan yararlanılarak yapılan analizlerin ayrıntılı olarak incelenmesidir. Bu kapsamda öncelikle İY motor indikasyonu ile ilgili temel noktalar anlatılmış, indikasyon ile elde edilen bilgiler detaylı olarak sunulmuştur. Daha sonra indikatör diyagramının çıkarılmasında kullanılan donanım, alımına karar verilme nedenleri ile ayrıntılı olarak, açıklanmıştır.

Sonraki bölümlerde indikatör diyagramlarının çıkarılması için yapılan deneylerde dikkat edilmesi gereken temel noktalar tartışılmıştır. İndikasyonla ölçülen temel

büyükliklerde yapılacak ufak hataların, bu büyüklükler kullanılarak termodinamik yöntemlerle hesaplanan büyüklüklerde çok daha büyük hatalara sebep olacağından bu bölümde anlatılan bilgiler indikatör diyagramının çıkarılması için yapılan deneylerin hassasiyeti ve güvenilirliği açısından çok büyük önem taşımaktadır.

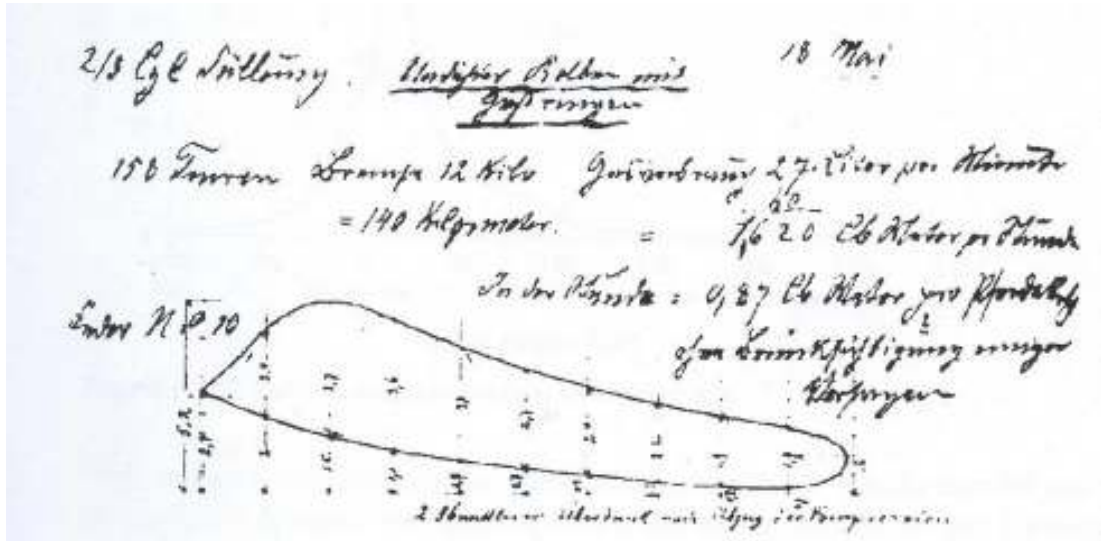
Çalışmada sunulan tüm bilgiler Anadolu Motor'un "ANTOR Tipli Dizel Motorların İki Döngülü Yanma Odası Kullanımıyla Modernizasyonu" adlı Tübitak projesi kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda uygulanmıştır. Sonuç olarak proje boyunca yapılan deneylerde toplanan indikatör diyagramları incelenmiş ve motorun geliştirme süreci boyunca yapılan değişiklikler ve bunların yanma sürecine etkileri gösterilmiştir.

Çalışmanın içeriği, indikatör diyagramı ile elde edilen bilgilerin bir dizel motorunun geliştirilmesi sürecinde oynadığı rolün güzel bir örneğini teşkil etmektedir.

2. İY MOTOR İNDİKASYONU

2.1 İNDİKASYONUN TANIMI

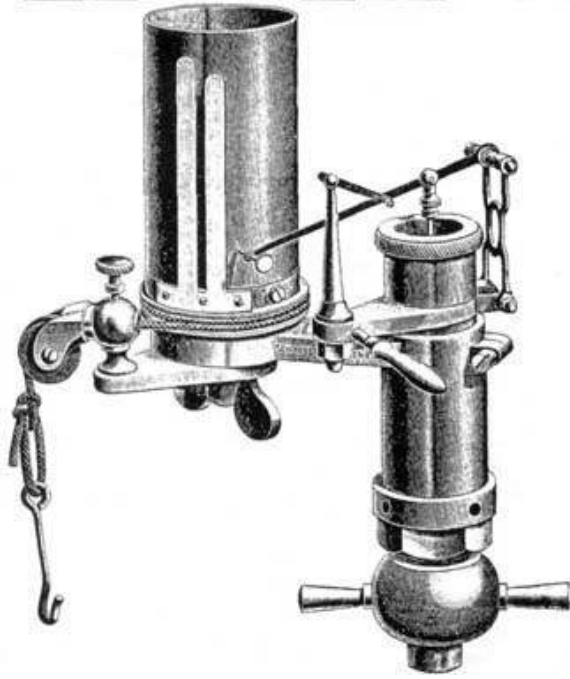
İY motorlarda indikatör diyagramının çıkarılması, veya yabancı literatürdeki adıyla İY motor indikasyonu (engine indication), İY motorların keşfi kadar eski bir süreçtir. Nikolaus August Otto kendi motorunu geliştirirken yanma çevrimi boyunca yapılan iş ve silindir içi basıncın değişimi gibi bazı termodinamik parametreleri kağıt üzerinde hesaplamış bulunuyordu. Daha sonra silindir basıncını ölçerek hesapladığı parametrelerin doğrulunu sına ma şansı buldu. Şekil 1.1 Otto'nun 18 Mayıs 1876 yılında kaydettiği silindir içi basınç diyagramını göstermektedir. Bu diyagram İY motorların tarihindeki bilinen en eski indikatör diyagramıdır (Pischinger, 2002).



Şekil 2.1 Nikolaus August Otto'nun kaydettiği silindir içi basınç diyagramı (Pischinger, 2002)

İlk indikatör diyagramları, silindir içi basıncın ölçülmesi ile kaydedilen diyagramlardan ibaret olup mekanik sistemler kullanılarak elde edilmişlerdir. Bu sistemler buhar türbinlerinin geliştirilmesi süresince elde edilen tecrübelerle dayanılarak oluşturulmuşlardı. Diyagramlar, pistonun yer değiştirmesine bağlı olarak

hareket eden silindirik bir membrana bağlanan kalemlerle çiziliyorlardı (**Zhao ve Ladammatos, 2001**).



Şekil 2.2 Buhar makinelerinde indikasyon için kullanılan bir Thompson indikatörü

İY motorlar üzerinde yapılan ilk çalışmalarda indikatör diyagramı sadece silindir içi basıncın kaydedilmesinden ibaretti. Günümüzde motor indikasyonu denildiğinde kastedilen deneysel çalışmalar, üç ayrı işlem sürecini kapsamaktadır. İlk süreç İY motorun krank milinin (dolayısıyla pistonun) pozisyonuna bağlı olarak değişen tüm parametrelerin ileri teknoloji ürünü sensörler kullanılarak ölçülmesidir. En sık ölçülen parametreler aşağıda sıralanmıştır.

- Silindir basıncı
- Emme ve egzoz basınçları
- Yakıt hattı basıncı
- Enjektör iğnesinin hareketi
- Motorun çeşitli noktalarında sıcaklıklar

Bu parametrelerin ölçülmesinde kullanılan sensörlerin tiplerine ve yapılarına indikasyon için kullanılan donanımların anlatıldığı bölümde ayrıntılı olarak değinilecektir.

KMA'ya bağılı parametrelerin ölçülmesi sonucunda elde edilen analog sinyaller yüksek hızlı veri toplama sistemleri ile dijital olarak kaydedilir. Bu sistemler analog veriyi önce dijital hale çevirir, sonra da kayıt ortamına (genellikle bir bilgisayarın belleğı) aktarır. Kullanılan sistemin analog-dijital çevirme kapasitesi ve örnekleme hızı da üzerinde deney yapılan motora veya analiz edilen olaya göre değişmektedir. Ön yanma odalı dizel motorlarda yapılan yanma analizlerinde veya kıvılcım ateşlemeli motorlarda gerçekleştirilen vurunu olayının analizinde daha yüksek hızlı veri toplama sistemlerinin kullanılması şarttır. (**Zhao ve Ladammatos, 2001**).

İndikasyon sürecinin son aşaması elde edilen büyüklüklerin analizini kapsamaktadır. Çalışmalar sonucunda elde edilen parametreler iki gruba ayrılır. Ölçülen parametreler (silindir içi basınç, emme veya egzoz basıncı, vb...) sensörlerden alınan sinyallerden direk olarak okunabilir. Hesaplanan parametreler ise (ortalama indike basınç, açığa çıkan ısı, vb.) ölçülen parametreler kullanılarak çeşitli termodinamik bağıntılar kullanılarak elde edilen büyüklüklerdir. Ölçülen büyüklüklerde yapılan ve çoğunlukla ölçümde dikkat edilecek hususlara uyulmamasından kaynaklanan hatalar, hesaplanan parametrelerde çok daha büyük hatalara sebebiyet vermektedir. Örnek olarak piston üst ölü noktasının belirlenmesinde yapılan 1 °KMA'lık hata, ortalama indike basıncın hesaplanmasında %8'e varan hatalara sebebiyet vermektedir (**Kuratle ve Märki, 1992**).

Geçtiğimiz yıllarda yüksek ve alçak basınç indikasyonu, yanma optimizasyonunun incelenmesi için kullanılan en geçerli analiz metodu haline gelmiştir. Hem kullanılan sensör hem de bilgisayar destekli veri toplama sistemlerinin ulaştıkları teknoloji sayesinde indikasyon, İY motorların geliştirilmesinde kullanılan en güvenilir metot olarak kullanılmaktadır. Günümüzde İY motorlar üzerinde yapılan deneylerde kullanılan hiçbir donanım veya metot yanma hakkında indikasyonun sağladığı kadar çok ve güvenilir bilgi sağlayamamaktadır (**Pischinger, 2002**).

2.2 İNDİKASYONUN KULLANILDIĞI ALANLAR

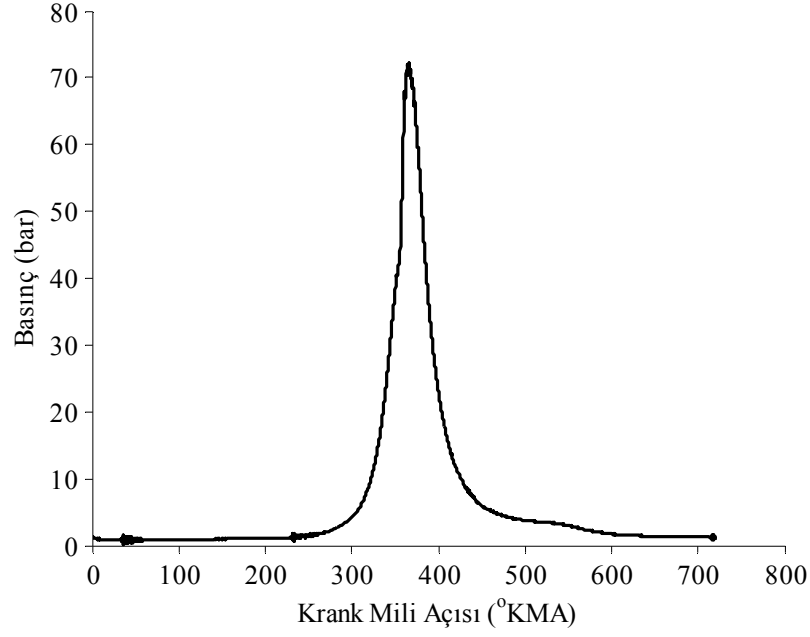
İndikasyonla elde edilen bilgiler doğrultusunda yapılan analizler, motor geliştirme sürecinin birçok alanında kullanılmaktadır. Aşağıda bu alanların bazıları sırayla listelenmiştir.

- **Verim Analizi:** Emme ve egzoz basınçlarının da ölçülmesiyle volümetrik verim hesabı, silindir içi basınçtan yola çıkılarak ortalama indike basıncın hesaplanması ve ortalama efektif basıncın bulunmasıyla motorun mekanik veriminin belirlenmesi indikasyon sayesinde yapılabilmektedir.
- **Yanma gürültüsünün analizi:** İndikasyonla silindir içi basıncın değişme hızından (basınç gradyanı) yola çıkılarak yanmadan kaynaklanan gürültü ile ilgili ayrıntılı bilgi edinilebilir.
- **Ateşleme hatalarının bulunması**
- **Vuruntu analizi:** Silindir içi basınç sinyalinin frekans spektrumu yardımıyla motor vuruntusu hakkında önemli bilgiler sağlanabilir.
- **Püskürtme analizi:** İndikasyon kapsamında ölçülen yakıt hattı basıncı ve enjektör iğnesinin hareketinin sonucunda elde edilen veriler, silindir içi basınç diyagramından yararlanılarak hesaplanan avans parametreleriyle birleştirilerek püskürtmenin analizi yapılabilmektedir.
- **Yanma analizi**
- **Gerilme analizi:** Silindir içi basıncın maksimum değeri ve basınç gradyanı piston, silindir kafası gibi parçaların tasarımı ve üretiminde önemli rol oynamaktadır.
- **Artık gaz analizi:** Alçak basınç indikasyonu kapsamında ölçülen emme ve egzoz basınçları silindir içi basınç bilgisiyle birleştirilerek artık gaz miktarı hesaplanabilir.

2.3 İNDİKASYON TİPLERİ

2.3.1 Yüksek Basınç İndikasyonu

Yüksek basınç indikasyonu temel olarak İY motorun yanma odası içindeki basıncın ölçülmesi ile yapılmaktadır. Ölçüm aralığı tüm yanma çevrimi (720 °KMA) olabileceği gibi çevrimin daha ayrıntılı incelenmek istenen belli bir bölümü de olabilir. Yüksek basınç indikasyonu genellikle silindir içine direk olarak veya bir adaptör yardımı ile yerleştirilen piezoelektrik basınç sensörleri ile yapılır.



Şekil 2.3 Tüm yanma çevrimi boyunca kaydedilmiş silindir basıncı

Tablo 2.1’de yüksek basınç indikasyonu ile ölçülebilen ve hesaplanabilen büyüklüklerin bir listesi görülmektedir.

Tablo 2.1 Yüksek Basınç İndikasyonu ile ölçülebilen ve hesaplanabilen büyüklükler
(Pischinger, 2002)

Ölçülen Büyüklükler	Hesaplanan Büyüklükler
- Maksimum silindir basıncı (p_{max})	- Ortalama indike basınç (p_{mi})
- Maksimum basıncın yeri (αp_{max})	- Sürtünme efektif basıncı (p_f)
- Basıncın değişimi ($dp/d\alpha$)	- Yanma başlangıcı
- Maksimum püskürtme basıncı (p_{imax})	- Yanma süresi
- Maksimum basınç artışının gerçekleştiği yer ($\alpha dp_e/d\alpha_{max}$)	- Tutuşma gecikmesi (α_i)
	- Açığa toplam çıkan ısı (Q_t)

Yüksek basınç indikatör diyagramından faydalanılarak yapılan en kapsamlı analizlerden biri basınç eğrisinin termodinamik analizidir. Bu analiz, açığa çıkan ısı

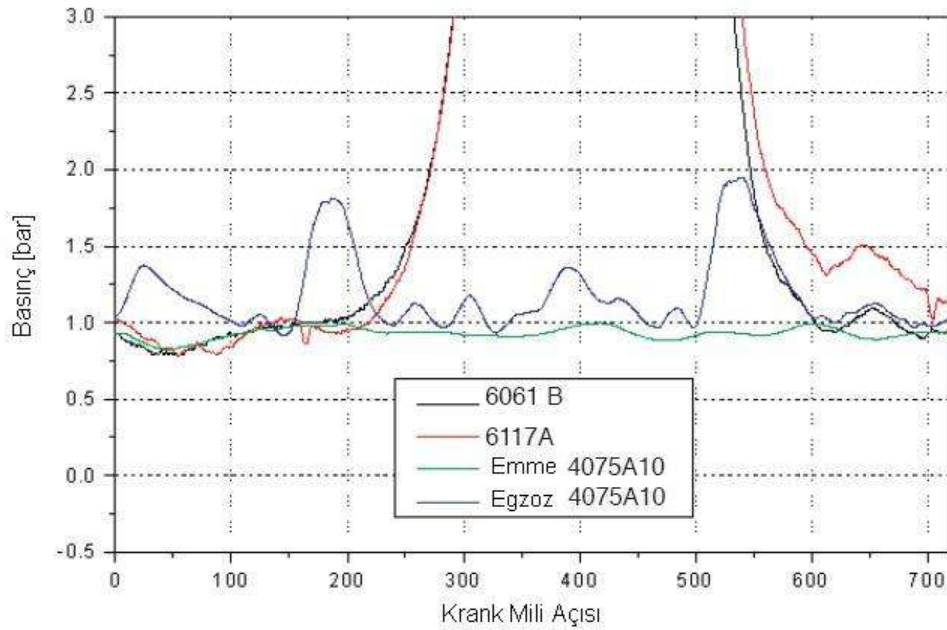
miktarı ve bunla orantılı olarak yanan yakıt miktarının hesaplanmasını sağlar. Böylece yanma süreci hakkında önemli bilgiler elde edilebilir. Termodinamik analiz metotlarına ve Tablo 2.1’de belirtilen büyüklüklere bölüm 2.4’te ayrıntılı olarak yer verilecektir.

2.3.2 Alçak Basınç İndikasyonu

Alçak basınç indikasyonu genellikle emme ve egzoz manifoldlarındaki basıncın krank mili açısına göre örneklenmesi olarak tanımlanır. Bazı durumlarda yanma çevriminin düşük basınç bölümünün özel adaptörler yardımıyla ölçülmesi de söz konusu olabilir. Emme ve egzoz basınçlarının ölçülmesi çoğu zaman mutlak basınç ölçümü yapabilen piezoresistif basınç sensörleriyle yapılır.

Alçak basınç indikasyonu ile yapılabilen en önemli analiz işlem gaz değişimi analizidir. Bu analizin temel parametreleri

- Emme ve egzoz basınçlarıyla silindir basıncı
- Supap açılma, kapanma eğrileri (dolayısıyla kam profili)
- Supapların debi katsayıları



Şekil 2.4 Tüm yanma çevrimi boyunca kaydedilmiş alçak basınç eğrileri (**Mladek ve diğerleri, 2003**)

Alçak basınç indikasyonunun silindir içi basınç ölçümü ile beraber yapılması; emme, egzoz ve yanma odası basıncının birbirleriyle eşzamanlı ölçümleri, açığa çıkan

ısının gaz değişimi ile beraber hesaplanabilmesi açısından son derece önem taşımaktadır. Bu nedenle kullanılan donanımın tüm sensörlerden eşzamanlı veri alabilecek özellikte olması gerekmektedir.

Gaz değişimi analizi ile motor üzerinde yapılabilecek tasarım uygulamaları aşağıda listelenmiştir.

- Emme ve egzoz manifoldu gibi gaz değişim araçlarının tasarımı
- Supap zamanlamasının (dolayısıyla kam profilinin) ayarlanması
- Gaz değişimi olayının incelenmesi ve volümetrik verim hesabı
- Supapların debi karakterlerinin bulunması ve supap tasarımı

2.4 İNDİKASYONLA ELDE EDİLEN BİLGİLER

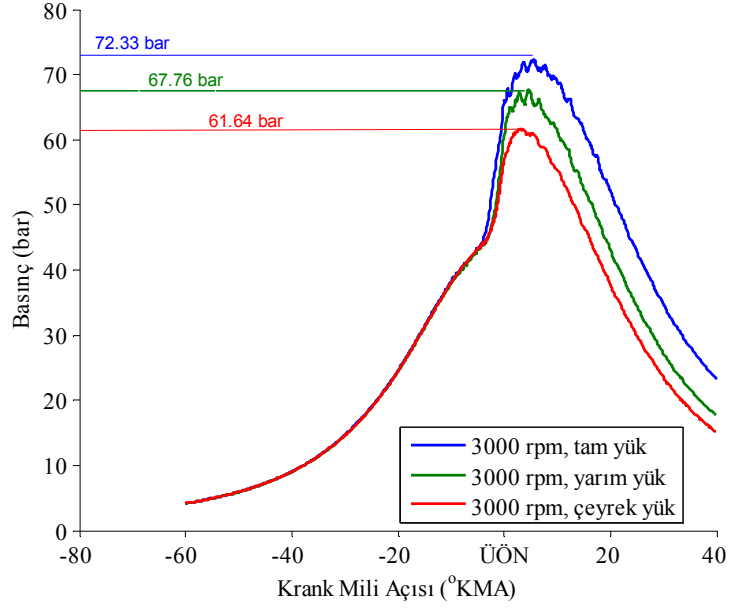
Daha önceki bölümlerde indikasyonla ölçülen ve ölçülen büyüklüklerden hesaplanabilen büyüklükler üzerinde durulmuştu. Bu bölümde bu büyüklüklere ayrıntılı olarak açıklanacaktır. Bununla beraber bölümün kapsamını Anadolu Motor ile yapılan deneylerde çıkarılan yüksek basınç indikasyonunun parametreleri oluşturmaktadır.

2.4.1 Ölçülen Büyüklükler

Ölçülen parametreler Tablo 2.1’de gösterildikleri sırayla anlatılacaktır.

2.4.1.1 Maksimum silindir basıncı

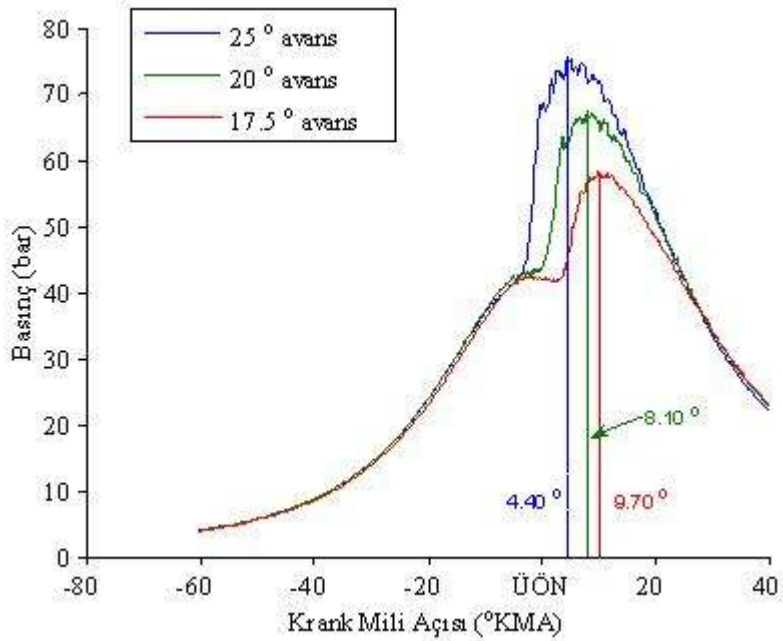
Maksimum silindir basıncı (p_{max}), yanma odasına yerleştirilen basınç sensörüyle tüm çevrim boyunca elde edilen basınç diyagramının tepe noktasıdır. Motorun üretebileceği maksimum güçle doğru orantılıdır. Şekil 2.5’te Anadolu Motorda 3000 devir/dk’da farklı yüklerde yapılan deneylerde kaydedilen silindir basıncı eğrisi gösterilmektedir. Maksimum basıncın yüke bağlı değişimi burada açıkça görülebilmektedir. Tüm diğer parametreler aynı kalmakla beraber maksimum silindir basıncı tam yükte 72.33 bar, yarım yükte 67.66 bar, çeyrek yükte ise 61.64 bardır.



Şekil 2.5 Maksimum basıncın yükle değişimi

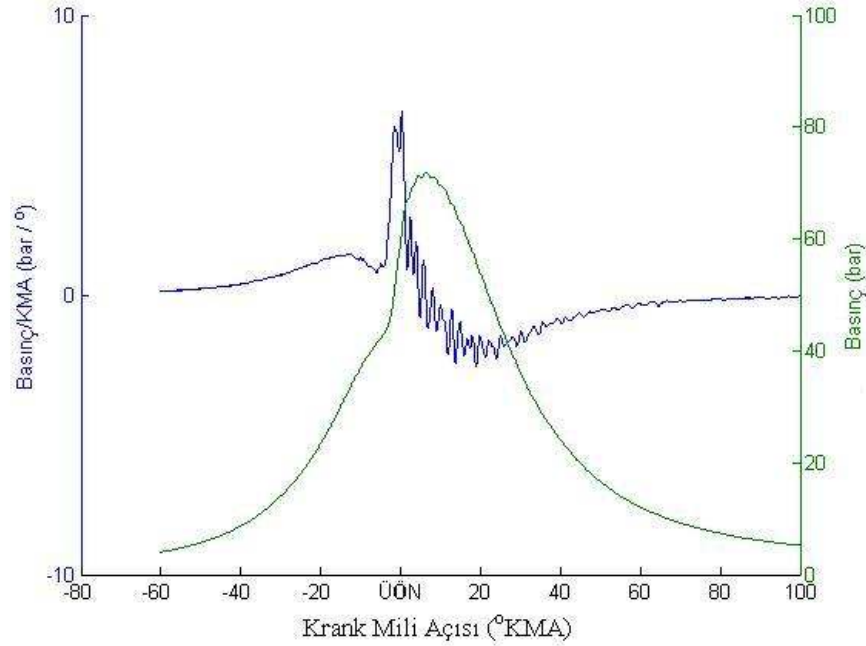
2.4.1.2 Maksimum silindir basıncının yeri

Maksimum silindir basıncının yeri, Silindir basıncının maksimum olduğu KMA'dır. Maksimum basıncın gerçekleştiği nokta şekil 2.5'te görüldüğü gibi yükle değişmekle beraber püskürtme avansına da yakından bağlıdır. Şekil 2.6 Anadolu Motor'da farklı aynı yük ve devir koşullarında farklı püskürtme avanslarında yapılan deneylerde kaydedilen indikatör diyagramlarını göstermektedir.



Şekil 2.6 Maksimum basıncın gerçekleştiği açının püskürtme avansı ile değişimi

2.4.1.3 Silindir basıncının değışimi ve maksimum basıncın gerekleştėđi yer



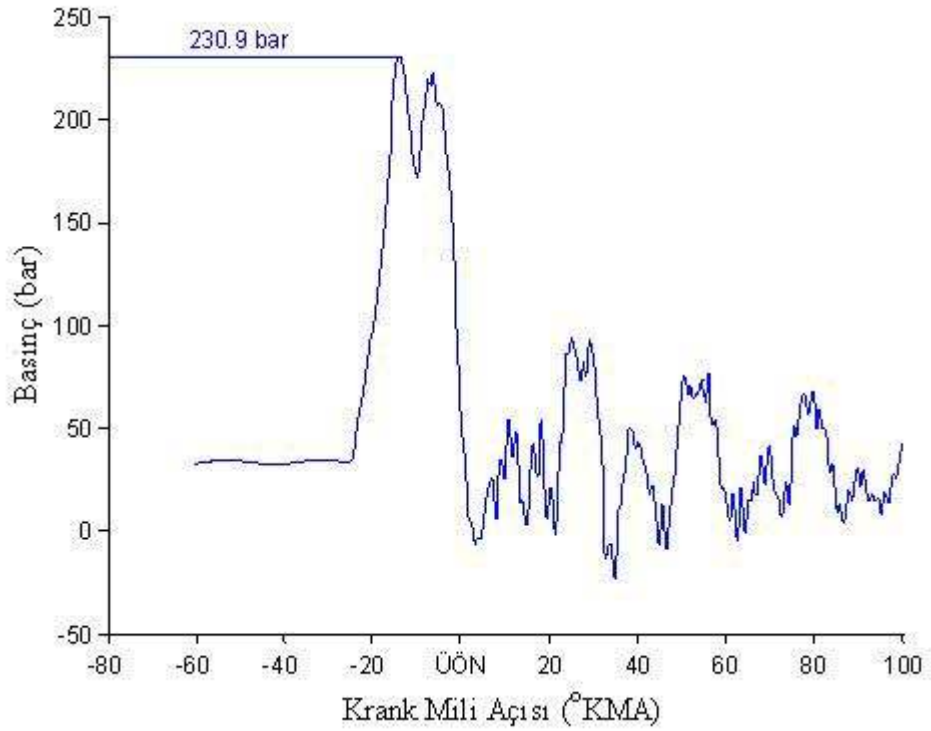
Şekil 2.7 Silindir basıncının değışimi

Silindir basıncının değışimi için piezoelektrik basınç sensörü ile toplanan basınç sinyalinin gradyanı hesaplanır. Şekil 2.6'da Anadolu motorda yapılan 3000 devir/dk'da tam yükte yapılan deneylerden toplanan bir indikatör diyagramı ve basınç gradyanı gösterilmektedir. Basınç gradyanının çizdirilmesi ve maksimum basınç artışının bulunduğu yerin belirlenmesi için basınç sinyalinin filtrelenmesi gerekebilir. Yukarıdaki grafikte basınç sinyali üzerinde 4. dereceden bir alçak geçirgen (kesme frekansı 10 kHz) Bessel filtresi uygulanmıştır. Filtreleme üzerinde ilerleyen bölümlerde daha ayrıntılı durulacaktır.

Dizel motorlarda gerçekleşen ani yanma, dolayısıyla ani basınç artışı hem motor parçalarının ömürlerini, hem de dizel vuruntusu adı verilen yanma gürültüsünü yakından etkilemektedir.

2.4.1.4 Maksimum püskürtme basıncı

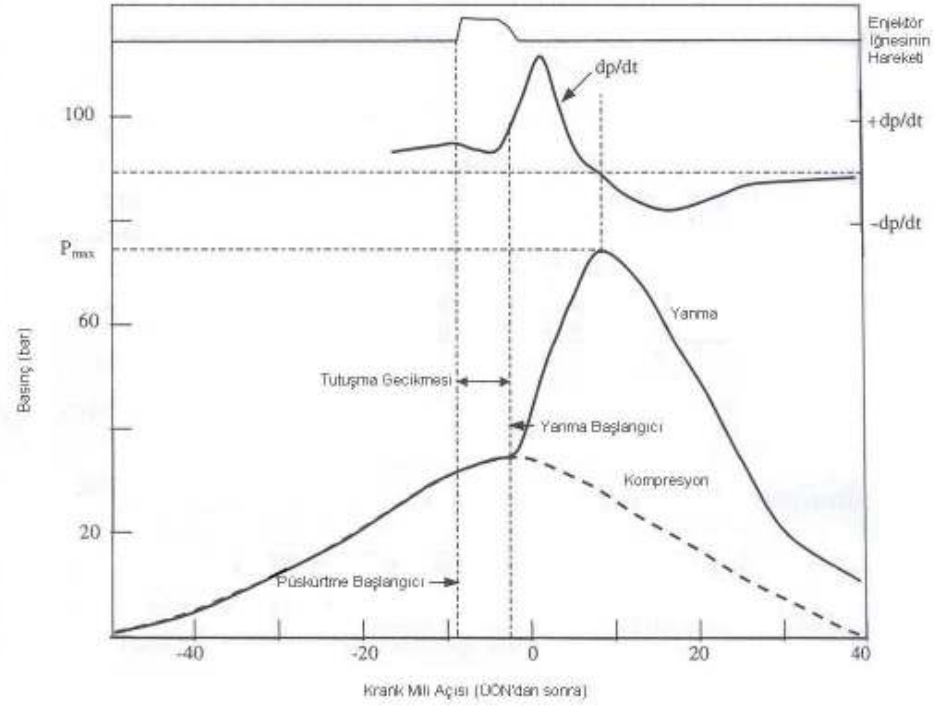
Maksimum püskürtme basıncı, yakıt hattında enjektöre yakın bir noktada yakıt basıncının ölçülmesiyle bulunmaktadır. Şekil 2.8 Anadolu Motorda 3000 devir/dk ve tam yükte yapılan deneylerde ölçülen yakıt basıncını göstermektedir. Enjektör mekanik olarak devreye girmekte olup iğnenin kapanmasıyla oluşan basınç dalgaları diyagramda açıkça gözükmemektedir.



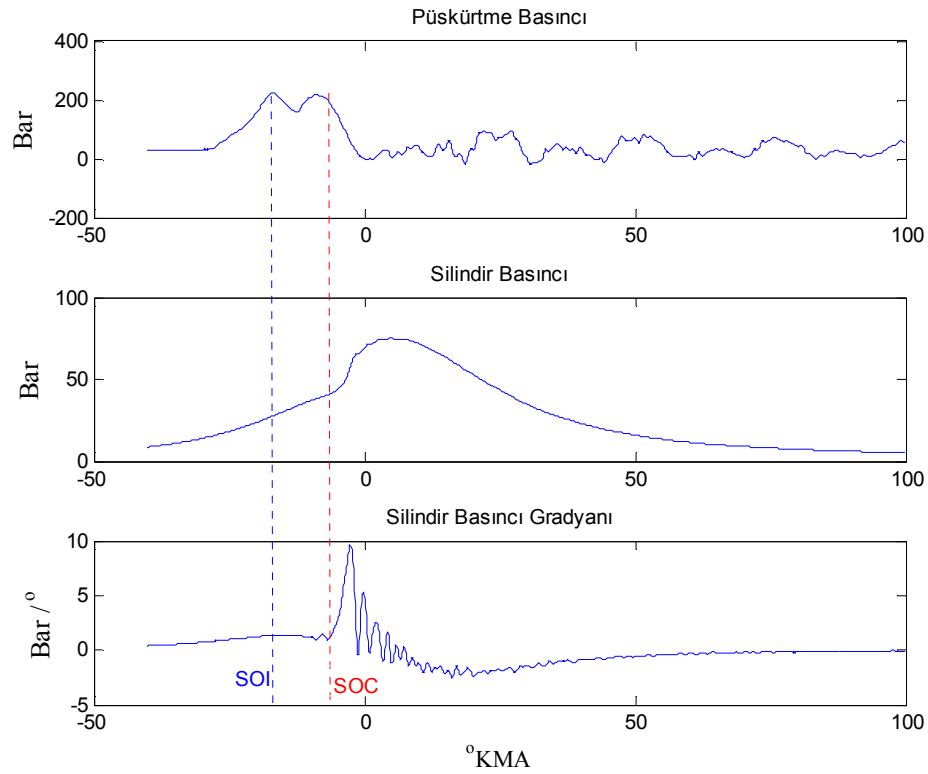
Şekil 2.8 Maksimum püskürtme basıncı

Püskürtmenin başladığı anın en doğru şekilde belirlenmesi enjektör iğnesinin hareketinin KMA'ya bağlı olarak kaydedilmesiyle yapılır. **Zhao ve Ladammatos (2001)** püskürtmenin başladığı anı bulmak için enjektör iğnesinin, silindir basıncının ve basınç gradyanının KMA'ya bağlı olarak alt alta çizdirilmesini tavsiye etmiştir. Silindir basınç gradyanının düşmeye başladığı nokta ve enjektör iğnesinin yukarı hareketinin başlaması püskürtmenin başladığına (SOI, Start of Injection) işaret etmektedir. Şekil 2.9'de dizel motorunda püskürtme başlangıcı açık olarak gösterilmektedir. Yazarlar, yanma basıncı eğrisinin motorun kompresyon basıncı eğrisinden ayrıldığı noktanın da yanma başlangıcı (SOC, Start of Combustion) olarak belirlendiğine ayrıca dikkat çekmektedir. Bu noktada basınç gradyanındaki artış Şekil 2.9'da açıkça görülebilir.

Bununla birlikte Anadolu Motor'da gerçekleştirilen deneylerde enjektör iğnesinin hareketini gözlemek için uygun donanım bulunmadığından yakıt hattı basıncı kullanılarak püskürtme başlangıcı belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun için indikatör diyagramından faydalanılmıştır. Şekil 2.10 indikatör diyagramından faydalanılarak püskürtme başlangıcının yaklaşık olarak nasıl bulunabileceğini göstermektedir.



Şekil 2.9 Püskürtme başlangıcının belirlenmesi (Zhao ve Ladammatos, 2001)



Şekil 2.10 Püskürtme başlangıcının tahmini yerinin yakıt basıncından yararlanılarak bulunması

Şekil 2.10’da gösterilen indikatör diyagramı Anadolu Motorda 3000 devir/dk’da ve tam yükte yapılan deneylerden alınmıştır. Statik püskürtme avansı 30 °KMA’dır. Maksimum püskürtme basıncının olduğu nokta basınç gradyanının yaklaşık sabit kaldığı bir bölgeye işaret etmektedir. Püskürtmenin bu bölgede 6 °KMA’lık bir pencerede gerçekleştiği düşünülebilir. Püskürtme basıncının ani düşüşü enjektör iğnesinin açılmasıyla basınca karşı oluşan direncin birden azalmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle püskürtme basıncındaki bu düşüşün, silindir içine yakıt girişini gösterdiği düşünülebilir. Bununla beraber yakıt hattına bağlanan basınç sensörü enjektörden birkaç santimetre geriye monte edilmiştir. Negatif basınç dalgasının sensöre ulaşması için belli bir zaman geçmesi gerektiğinden elde edilen püskürtme tepe noktası ile püskürtme başlangıcı arasında bir miktar faz farkı olması (püskürtme tepesinin daha geç gerçekleşmesi) mümkündür.

Anadolu Motorda yapılan deneylerde dinamik püskürtme avansının belirlenmesi için bir avans okuma tabancası da kullanılmıştır. Bu tabanca aslında bir strobokoskoptan ibaret olup yakıt hattındaki basınç dalgalarını algılayabilecek bir sensöre sahiptir. Bu şekilde püskürtme avansının tahmini yeri gözlenebilmektedir.

Püskürtme başlangıcının belirlenmesi için elimizde 3 adet parametre vardır. Bunlar

1. Püskürtme basıncının maksimum noktası
2. Basınç gradyanının düştüğü nokta
3. Avans belirleme tabancasından okunan değer

Tablo 2.2, 3000 devir/dk’da ve tam yükte farklı statik püskürtme avanslarıyla yapılan deneylerde bu üç parametrenin değerlerini göstermektedir.

Tablo 2.2 Farklı parametreler gözlenerek püskürtme başlangıcının belirlenmeye çalışılması

Parametre	30 °KMA avans	25 °KMA avans	17.5 °KMA avans
Basınç gradyanının düştüğü nokta	349,8°	348°	348.2°
Püskürtme basıncı tepe noktası	344°	347.10°	354°
Tabancadan okunan avans	335.4°	339.9°	345.9°

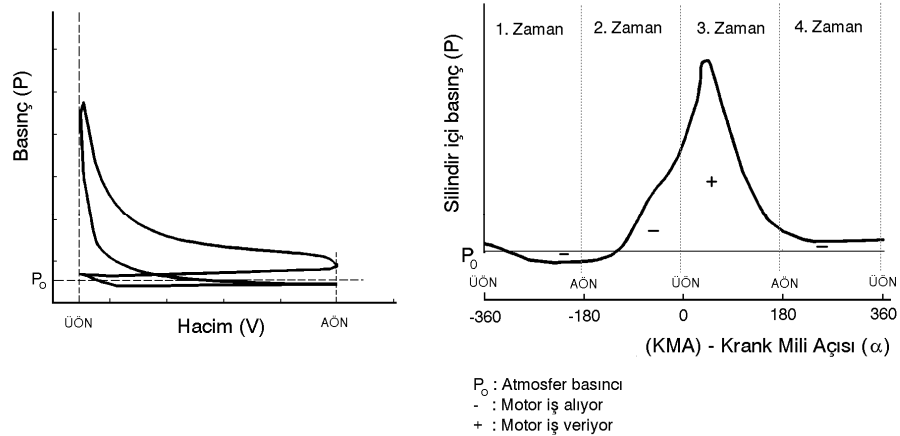
Tablo 2.2’de de görüldüğü gibi yüksek avans değerlerinde (25 °KMA’ya kadar) ilk olarak püskürtme basıncı tepe noktası gözlenmekte, sonra basınç gradyanı düşmeye başlamaktadır. 22.5 °KMA’dan daha düşük avanslarda ise bu durumun tam tersi gözlenmiş; yani ilk önce basınç gradyanı düşmeye başlamış, daha sonra püskürtme basıncı maksimum değerine ulaşmıştır. Diğer yük ve devirlerde de gözlenen bu durum sonucunda yazar, sadece yukarıda bahsedilen üç parametreyi kullanarak püskürtmenin başladığı noktanın kesin bir şekilde bulunamayacağına, yalnızca bir püskürtme aralığı belirlenebileceğine kanaat getirmiştir. Bununla beraber Anadolu Motor’da yapılan deneylerde farklı yanma odalarının performanslarını karşılaştırırken püskürtme başlangıcı olarak püskürtme basıncının tepe noktası alınmıştır. Bunun nedeni, aynı motor hızında kalmak koşuluyla, püskürtme başlangıcında yaşanan gecikmenin her iki yanma odası için aynı miktarda olacağıdır.

2.4.2 Hesaplanan Büyüklükler

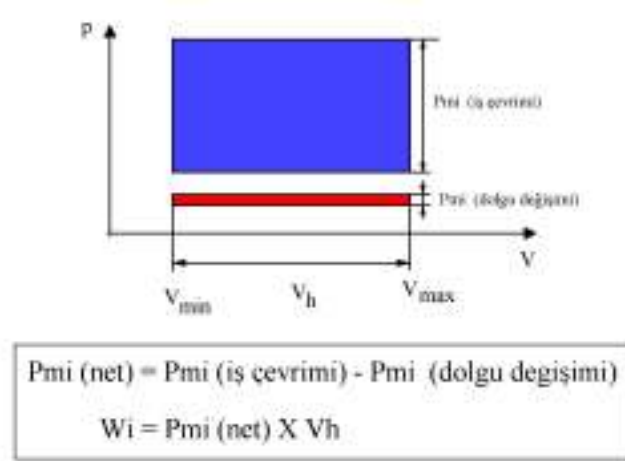
Bu büyüklükler, ölçülen parametrelerden yararlanılarak hesaplanır. Tablo 2.1’deki sırasıyla aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

2.4.2.1 Ortalama indike basınç

Ortalama indike basınç (imep), yanma çevrimi boyunca kaydedilen P-V diyagramı’ndan yararlanılarak hesaplanabilir. P-V diyagramının ortalama basıncı olarak da tanımlanabilen ortalama indike basıncın hesaplanması için önce yüksek basınç eğrisinin altında kalan alandan alçak basınç eğrisinin altında kalan alan çıkarılır. Sonuç motor tarafından yapılan net iş verir. Net işin motorun strok hacmine bölünmesi ile imep elde edilir.



Şekil 2.11 p-α diyagramında + ve – bölgelerin açıklanması



Şekil 2.12 İndike iş ve indike basıncın hesaplanması

2.4.2.2 Sürtünme efektif basıncı

İmep'in hesaplanmasıyla birlikte motorun mekanik kayıplarının bir göstergesi olan sürtünme efektif basıncı (fmep) da belirlenebilir. Böylece motorun mekanik verimi hakkında bilgi sahibi olmak mümkündür. Fmep'in bulunması için öncelikle ortalama efektif basınç (mep) hesaplanmalıdır. Mep, motorun efektif gücünü oluşturan basınç değeri olup motor freninden okunan gücün bilinmesi durumunda aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$p_{me}(\text{bar}) = \frac{N_e \cdot z \cdot 600}{V_h \cdot n} \quad (2.1)$$

Burada N_e (kW) motorun efektif gücü, z zaman sabiti (2 zamanlı motorlar için bir, 4 zamanlı motorlar için 2), V_h strok hacmi, n (devir/dk) de motorun dönme hızıdır. Mep hesaplandıktan sonra fmep, indikatör diyagramından çıkarılan imep kullanılarak, aşağıdaki şekilde tarif edilir.

$$p_f = p_{mi} - p_{me} \quad (2.2)$$

motorun mekanik verimi de

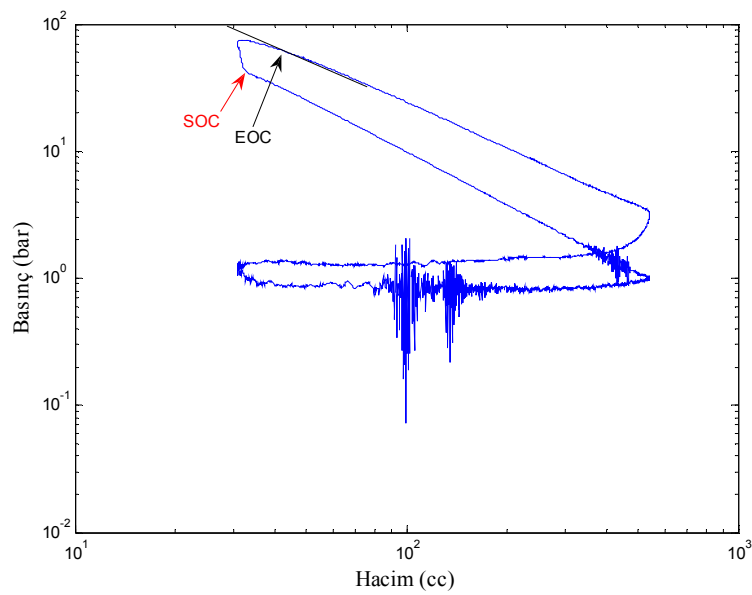
$$\eta_m = \frac{p_{me}}{p_{mi}} \quad (2.3)$$

şeklinde elde edilir.

2.4.2.3 Yanma başlangıcı ve yanma süresi

Püskürtme başlangıcının anlatıldığı bölümde yanma başlangıcının belirlenmesinde kullanılan en iyi yöntemin basınç gradyanının artmaya başladığı nokta ile yanma basıncı eğrisinin motorun kompresyon basıncı eğrisinden ayrılmaya başladığı noktayla karşılaştırmak olduğu belirtilmişti. Diğer bir yöntem açığa çıkan ısıyı KMA'ya bağlı olarak entegre etmek ve çıkan eğrinin x ekseninden ayrılarak artmaya başladığı noktayı tespit etmek olabilir (Zhao ve Ladammatos, 2001). Şekil 2.13 bu yöntemle belli büyüklüklerin nasıl okunabileceğini göstermektedir.

Yanma başlangıcının ve bitişinin tayininde kullanılan bir diğer yöntem silindir içi basıncından yararlanarak yanma çevriminin p-V diyagramını çıkarmaktır. p-V diyagramı logaritmik olarak çizdirildiğinde kompresyon ve genişleme zamanı sabit eğimli iki doğru şeklinde olmalıdır. Bunun nedeni bu zamanlarda basınç ve hacim arasında $pV^{n_p} = \text{sabit}$ ilişkisinin sağlanmasıdır. Burada n_p politropik üs olarak adlandırılır. Logaritmik p-V diyagramında, genişleme zamanına bakıldığında lineerliğin bozulmaya başladığı nokta yanma başlangıcına işaret etmektedir (Zhao ve Ladammatos, 2001). Aynı şekilde genişleme zamanında lineerliğin bozulmaya başladığı nokta yanmanın sonunu göstermektedir. Şekil 2.14 Anadolu Motorda 3000 devir/dk da ve tam yükte yapılan deneylerde kaydedilen indikatör diyagramlarından alınan bir p-V diyagramı, ve diyagramın üzerinde yanma başlangıcı ve bitişinin nasıl belirlendiği gösterilmiştir.



Şekil 2.13 logaritmik p-V diyagramında yanma başlangıcı ve yanma sonunun belirlenmesi

Anadolu motorda yapılan deneylerde elde edilen indikatör diyagramları analiz edilirken yanma başlangıcı, sinyaller daha net olduğundan, basınç gradyanı ve silindir basıncı eğrilerinden tayin edilmiştir. Yanmanın bitişi içinse normalize edilmiş ısı grafiğinden faydalanılmış ve % 90 ısı çıkışının gerçekleştiği nokta esas alınmıştır. Bunun nedeni, Tablo 2.3'te görülebileceği gibi % 90'ı geçen ısı çıkışı hesaplarında çevrimler arası standart sapmanın oldukça artmasıdır.

Tablo 2.3 Kümülatif ısı çıkışlarının gerçekleştiği noktaların 100 çevrime göre standart sapmaları

	%90 Isı Çıkışı	%92 Isı Çıkışı	%94 Isı Çıkışı	%96 Isı Çıkışı	%99 Isı Çıkışı
Standart Sapma (°KMA)	4.48	12.23	21.41	36.82	47.62

2.4.2.4 Tutuşma gecikmesi

Tutuşma gecikmesi, püskürtme başlangıcından yanmanın başlamasına kadar geçen süredir ve KMA cinsinden ifade edilir. Daha önceki bölümlerde püskürtme ve yanma başlangıcının nasıl belirlendiği açıkça izah edilmiştir. Tutuşma gecikmesi bu noktaların farkı alınarak hesaplanır.

2.4.2.5 Açığa çıkan toplam ısı miktarı

Yanma sonucunda açığa çıkan ısı miktarı, deney sonuçlarını analiz etmekte kullanılan yazılım tarafından, emme subabının kapandığı noktayla egzoz subabının açıldığı nokta arasında, Hohenberg'in açığa çıkan ısı modeliyle hesaplanmıştır. Bu modelde silindir duvarlarına olan ısı ve blow-by kayıpları ihmal edilmektedir. Model kısaca şu şekilde özetlenebilir.

Genişleme çevrimi üzerinde 1 noktasından 2 noktasına, önce 1'den 2'ye adyabatik sonra 2' 'den 2'ye sabit hacimde geçildiği düşünüldüğünde p_2' ile p_1 arasında

$$p_2' = p_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n_p} \quad (2.4)$$

bağıntısı geçerlidir. 2' 'den 2'ye sabit hacim geçişi için de

$$\Delta Q = m.c_v.(T_2 - T_2') \quad (2.5)$$

yazılabilir. 2 ve 2' noktalarında sıcaklıklar

$$T_2 = \frac{p_2 \cdot V_2}{m \cdot R} \quad T_2' = \frac{p_2' \cdot V_2}{m \cdot R} \quad (2.6)$$

olarak ifade edilirler. 2.5 ve 2.6 denklemlerini birleştirerek açığa çıkan ısı

$$\Delta Q = \frac{c_v}{R} \cdot V_2 \cdot (p_2 - p_2') \quad (2.7)$$

şeklinde yazılabilir 2.4 ve 2.7 denklemlerini birleştirirsek, 1 noktasından 2 noktasına geçişte açığa çıkan ısı için

$$\Delta Q_{1 \rightarrow 2} = \frac{c_v}{R} \cdot V_2 \cdot \left(p_2 - p_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma} \right) \quad (2.8)$$

denklemini elde edilir. Burada c_v sabit hacimde özgül ısı katsayısı, R ise ideal gaz sabiti ($0.287 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ K}$) olarak tanımlanır.

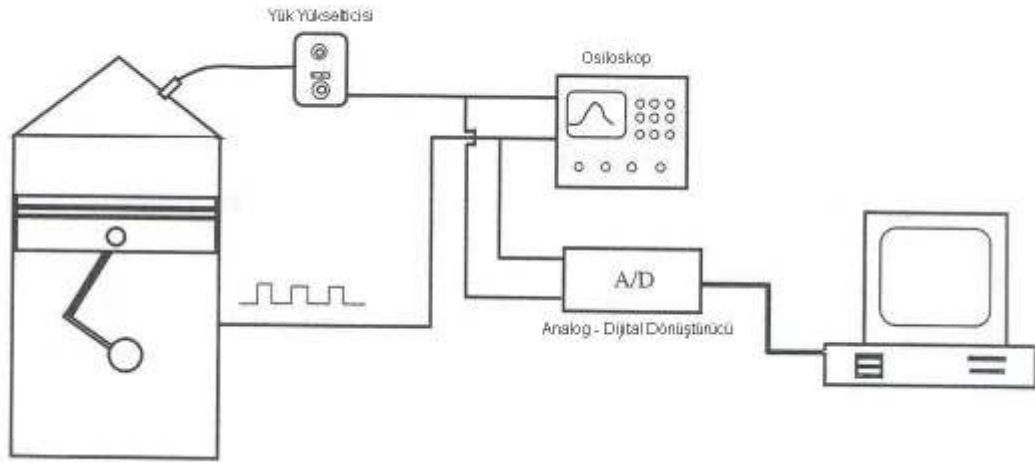
Bu yöntemle hesaplanan ısı, yukarıda bahsedilen kayıp değerlerini de içerdiğinden yanan yakıt miktarından hesaplanan ısı, bu yöntemle hesaplanan açığa çıkan ısıdan daha yüksek çıkmaktadır. Anadolu Motorda yapılan deneylerde, açığa çıkan ısı her iki yöntemle de hesaplanmış, yakıttan yanma sonucu elde edilen ısıнын % 30 - % 40 kaybedildiği görülmüştür. Tablo 2.4'te farklı yüklerde yapılan deneylerde bu değerlerin değişimi görülmektedir.

Tablo 2.4 Isı Kayıpları

	Yanan yakıt miktarından hesaplanan ısı çıkışı (J)	Hohenberg formülasyonu ile hesaplanan ısı çıkışı (J)	% Fark
Tam yük	1061	655	%38
%50 yük	552	346	%37
Yüksüz	255	171	%33

3. İNDİKASYONDA KULLANILAN DONANIM

3.1 ÖLÇÜM ZİNCİRİ



Şekil 3.1 Motor indikasyonu için temel ölçüm zinciri

Şekil 3.1’ de İY motorların indikasyonunda kullanılan ölçüm donanımı görülmektedir. Şekilde motordan silindir basıncı bilgisi toplandığı varsayılmakla beraber KMA’ya göre değişen herhangi bir bilginin toplanması için de kurulacak düzenek burada gösterilenden farklı olmayacaktır. Motor üzerinde basınç ölçümleri genellikle piezoelektrik veya piezoresistif sensörler kullanılarak yapılır. Bu sensörler ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanacaktır. Bununla beraber enjektör iğnesinin hareketini ölçen kapasitif veya indüktif sensörler ve farklı tip sıcaklık sensörleri de indikasyon ölçümlerinde yer bulmaktadır.

İstenilen sinyalleri toplayan sensör dışında bir de motordan kare dalga olarak çizilmiş bir sinyal çıkmaktadır. Bu kare dalga genellikle herhangi bir tip açısai enkoderin sembolizasyonu için kullanılmaktadır. Açısai enkoder ölçüm için örnekleme aralığını belirlemekle beraber ölçümü başlatmak ve bitirmek için gerekli tetik sinyallerini üretir. Ayrıca birden fazla veri toplama cihazının kullanıldığı ölçüm düzeneklerinde açısai enkoder, ürettiği tetik sinyalleriyle cihazlar arası senkronizasyonu sağlar.

Açısal enkoderin bir diğer önemli özelliği, ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak üzerinde durulacak olan, motorun üst ölü noktasını belirlemesidir.

Genellikle sensörden çıkan sinyalin genliği, veri toplama cihazının algılayabileceğinden çok daha düşüktür. Bu nedenle sinyal bir yükselticiye gönderilir. Yükseltici sinyalin genliğini veri toplama cihazının kolayca algılayabileceği bir seviyeye yükseltir. Ölçümlerde kullanılan yükselticiler ayrıca sinyal üzerinde bir takım filtreleme işlemleri de yaparlar. Böylece analog sinyalin kalitesi arttırılmış olur. Şekil 1.3'te gösterilen yükseltici piezoelektrik sensörler için kullanılmaya uygun olup yük yükselticisi olarak adlandırılır. Piezoresistif sensörler için gerilim yükselticisi kullanmak gerekmektedir.

Yükselticiden çıkan sinyal analog bir sinyal olup kaydedilmek üzere analog-dijital çeviriciye girer. Dijitize edilen sinyal hem uzun mesafelere taşınmaya uygun hale gelir, hem de bilgisayar kullanılarak kolaylıkla analiz edilebilir. Veri toplama cihazı olarak adlandırılan sistemler genellikle bünyelerinde birden fazla sensör bilgisini işleyebilecek kanallar ve her bir kanala bağlı analog-dijital çeviriciler barındırır. Veri toplama cihazları çoğunlukla bilgisayara bağlanır ve bilgisayar tarafından yönetilir. Toplanan bilginin son durağı, bilgisayarın sabit belleğidir. Sinyallerin analizi de çoğu zaman bilgisayarda bulunan yazılımlar tarafından yapılır. Şekil 3.1'de gösterilen osiloskop, bilgisayar sistemlerinin günümüzdeki kadar yaygın kullanılmadığı zamanlarda sinyallerin gerçek zamanlı görüntülenmesi için kullanılmıştır. Günümüzde yavaş yavaş yerini gerçek zamanlı gösterim yapabilen bilgisayar programlarına bırakmaktadır. Bununla birlikte yazar, ölçüm zincirinde gerçekleşen bir hatanın hızlı bir şekilde belirlenmesinde ve hazır sistemlerin elde yapılan sistemlerle entegrasyonunda osiloskobun büyük yararını görmüştür.

Bundan sonraki bölümlerde ölçüm zincirinde kullanılan elemanlar ayrıntılı olarak açıklanacaktır. Sensörler ve cihazlar çalışma prensipleriyle açıklanmakla beraber hangi donanımın kullanılacağını belirlemek için dikkat edilecek seçim kriterleri üzerinde de durulacaktır. Bu bölümdeki bilgiler Anadolu Motorda kurulan ölçüm zincirini oluşturan elemanların seçilmesi için yapılan araştırmalardan derlenmiştir.

3.2 AÇISAL ENKODERLER

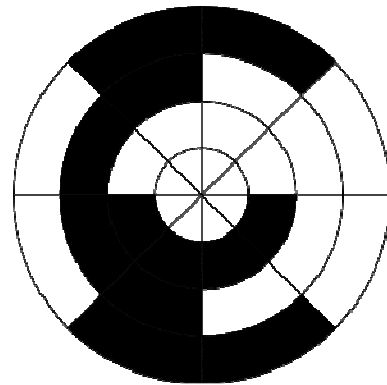
Bir önceki bölümde açıklandığı gibi açısal enkoderin temel görevi örnekleme frekansını belirlemektir. Motor indikasyonu kapsamında yapılan ölçümlerin amacı KMA'ya göre değişen parametrelerin incelenmesi olduğundan örnekleme de KMA'ya göre yapılmaktadır. Açısal enkoderin shaft krank miline uygun bir adaptörle bağlanır ve böylece motorun dönme hareketi aynen açısal enkoder üzerine taşınır. Açısal enkoderlerin de iki farklı tipi vardır. Bunlar mutlak açısal enkoder ve artırımlı açısal enkoderlerdir.

3.2.1 Mutlak açısal enkoderler

Mutlak açısal enkoderler doğrudan açısal pozisyon ölçebilirler. Eskiden mutlak enkoderler dönen metal bir diskin üzerinde yalıtkan bir malzeme ile belli aralıklarda şekiller oluşturarak üretilmişlerdir. Disk, döndükçe metal kontaklarla temas edecek şekilde yerleştirilmiştir. Diskin metal kısımları kontaklara değdiğinde bir devreyi tamamlar, yalıtkan kısımlar ise akım geçmesine izin vermez. Bu şekilde disk döndükçe değişen elektrik sinyalleri elde edilir. Sinyaller bir mikroişlemciye okutularak diskin hangi pozisyonda olduğu anlaşılabilir. Şekil 3.2 de Heidenhain firmasının ürettiği eski bir mutlak açısal enkoder, Şekil 3.3'te de basitleştirilmiş bir mutlak enkoderin dönen diski görülmektedir.



Şekil 3.2 Mutlak açısal enkoder



Şekil 3.3 Enkoder diski üzerindeki şekiller

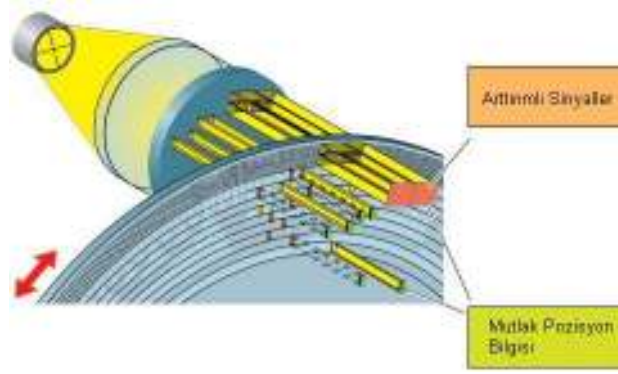
Disk yüzeyi önce üç farklı yarıçapta daireler oluşturacak şekilde çizilmiştir (şekilde dört farklı yarıçapta daire bulunmakla beraber en merkezdeki dairenin kullanılmadığı görülmektedir). Bu şekilde oluşturulan üç farklı disk üzerinde sekiz değişik kombinasyon elde edilebilir. Siyah şekillerin metal yüzeyleri temsil ettiği düşünülür

ve metal yüzeyler mantıksal 1, yalıtkan yüzeyler mantıksal 0 ile temsil edilirse Tablo 3.1 de görülen pozisyon çözümü elde edilir. Üç farklı disk ile 23 farklı açısal pozisyon algılanabilmektedir. Çözünürlüğü arttırmak için metal disk yüzeyinde daha fazla daire oluşturmak gerekmektedir.

Tablo 3.1 3 bitlik bir mutlak açısal enkoderin pozisyon tablosu

Sektör	Kontak 1	Kontak 2	Kontak 2	Açısal Pozisyon
1	0	0	0	0°-45°
2	0	0	1	45°-90°
3	1	0	1	90°-135°
4	1	1	1	135°-180°
5	0	1	1	180°-225°
6	0	1	0	225°-270°
7	1	1	0	270°-315°
8	1	0	0	315°-360°

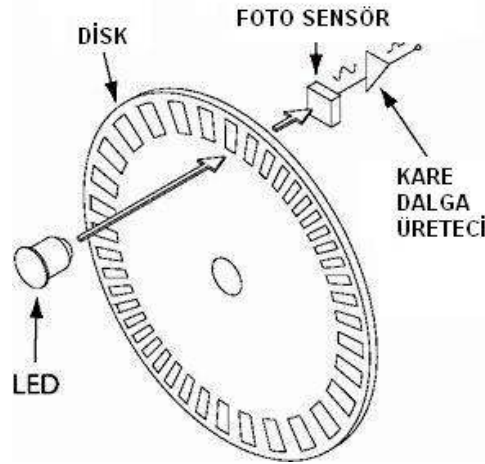
Günümüzde üretilen mutlak encoderler metal-metal kontak yerine optik veya indüktif yöntemlerle ölçüm yapmaktadır. Şekil 3.4’te Heidenhain firmasının ürettiği enkoderlerde kullanılan optik ölçüm tekniği gösterilmiştir. Bu enkoder hem mutlak açısal pozisyonu hem de açısal değişimleri ölçebilmektedir. Bir foto diottan çıkan ışık, dönen diskin yüzeyine yoğunlaştırılır. Diskin yüzeyinde farklı açısal pozisyonlara karşılık gelen boşluklu sektörler bulunmaktadır. Diskin karşısında bulunan foto sensörler boşluktan geçen ışığı algırlar. Işık geçiren bölgeler mantıksal 1, geçirmeyen bölgeler mantıksal 0 şeklinde temsil edildiğinde aynen metal-metal kontaklı mutlak enkoderin yaptığı işlem elde edilir. Optik ölçüm metodu sayesinde Heidenhain 35 bite varan çözünürlükte mutlak açısal enkoderler üretmektedir.



Şekil 3.4 Mutlak açısal enkoderlerde kullanılan optik ölçüm metodu

3.2.2 Arttırımlı açısal enkoderler

Arttırımlı açısal enkoderler (incremental angular encoders) mutlak pozisyon bilgisi göstermezler. Sadece dönen bir cismin bir önceki pozisyonundan açısal sapmasını bildirebilirler. Şekil 2.5'te optik bir enkoderin dönen diski görülmektedir. Çalışma prensibinin açıkça görülebilmesi için disk basitleştirilmiştir. Diskin her birim açı yer değiştirmesinde ışık huzmesi disk üzerindeki boşluktan geçerek foto sensöre düşmektedir. Böylece bir tam dönüşte disk üzerindeki boşluk sayısı kadar kare sinyal elde edilir. Bu kare dalgalara saat sinyali adı verilir. Ölçümde kullanılan örnekleme frekansı disk üzerindeki boşluk sayısına doğrudan bağlıdır.



Şekil 3.5 Arttırımlı açısal enkoderin çalışma prensibi

İY motorlar üzerinde yapılan deneylerde krank milinin pozisyonunu saptamak için genellikle arttırımlı açısal enkoderler kullanılır. Bu tip enkoderlerin hem kullanımı basit, hem de fiyatları nispeten ucuzdur. Bununla beraber krank milinin mutlak pozisyonunun belirlenmesi için bir referansa ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle birçok arttırımlı açısal enkoder ürettiği saat sinyalleri dışında her tam dönüşte tek bir

sinyal üretir. Bu sinyal motorun gaz değişim ÜÖN'sına getirilirse krank milinin açılmal pozisyonu için uygun referans sağlanmış olur.

Anadolu Motor'da yapılan indikasyon çalışmalarında kullanılan arttırmalı açılmal enkoder Heidenhain firması tarafından üretilmiştir. 0.1° aralıklarla bir tam dönüşte 3600 saat sinyali üretmektedir. Bununla birlikte saat sinyalleriyle 90 derece faz farkı olan bir set sinyal daha üretme kapasitesine sahiptir. Veri toplama cihazları bu iki set sinyalden yararlanarak milin dönme yönünü ayırt edebilir. Tüm bunlara ek olarak enkoder bir tam dönüşte tek bir sinyal üretmektedir. Bu sinyal hem gaz değişim ÜÖN ile karşılaştırılarak krank milinin referans pozisyonunu ayarlamaya yaramaktadır hem de ölçümün başlangıcını ve bitişini belirleyen tetikleme sinyali görevi görmektedir.

3.2.3 Açılmal enkoderlerin seçim kriterleri

Anadolu Motor'da yapılan deneylerde kullanılacak açılmal enkoderin seçiminde rol oynayan en önemli faktör açılmal çözünürlük olmuştur. Enkoderin çözünürlüğü aynı zamanda maksimum örnekleme frekansını belirlemektedir.

Kullanılacak enkoderin açılmal çözünürlüğü konusunda yabancı literatürde farklı değerlerden bahsedilmektedir. **Zhao ve Ladammatos (2001)** dizel motorlarda ön karışımın yanması veya benzin motorlarında alev çekirdeğinin oluşumunun sadece birkaç °KMA sürdüğünü, bu yüzden bu tip olayların incelenmesi gerektiğinde 0.5° çözünürlük gerektiğini öne sürmektedir. **Kuratle ve Märki (1992)** imep'in açılmal çözünürlükten fazla etkilenmediğini belirterek 0.5° - 1° arasındaki çözünürlüklerin mantıklı bir seçim olduğunu söylemekte; aşırı basınç gradyanlarının olmadığı motorlarda, örnek olarak benzin motorlarında, ise 1° çözünürlüğün yeterli olacağını açıklamaktadır. **Brunt ve Lucas (1991)** farklı açılmal çözünürlüklerde yaptıkları deneylerde dizel motorlarında açığa çıkan ısıнын hesaplanması için 0.5° - 1° çözünürlüğün yeterli olduğunu, benzin motorlarında bu değerin 2° 'ye kadar çıkarılabileceğini belirtmektedir. Sadece imep hesapları içinse 4° gibi düşük bir çözünürlüğün yeterli olacağını öne sürmektedirler. Bu koşullarda en büyük imep hatası -0.1% olarak hesaplanmıştır. **Brunt ve Emtage'in (1996)** çalışmalarında da imep'in krank açısı çözünürlüğünden çok az etkilendiği gösterilmekte ve sırf imep'in gözlenmesi için 1° çok daha altında çözünürlüklerin yeterli olacağı savunulmaktadır

Çözünürlüğün belirlenmesinde dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta da Shannon örnekleme teorisidir. Buna göre örnekleme frekansı, kaydedilen sinyalde incelenmek istenen en yüksek frekansın iki katından fazla olmalıdır. Örnek vermek gerekirse benzin motorunda 4000 devir/dk'da gerçekleşen vuruşta olayında ince 16 kHz'lik basınç dalgalanmalarının izlenebilmesi için örnekleme frekansı minimum 0.75° olmalıdır. **Brunt ve Lucas (1991)** benzin motorunda vuruşta olayının incelenmesi için 0.2° çözünürlüğün yeterli olması gerektiğini savunmuştur. Bu yüksek çözünürlükte basınç sinyali oldukça gürültülü çıkmaktadır. Basınç sinyalinin türevi alınarak hesaplanan basınç gradyanı ve açığa çıkan kümülatif ısının türevi alınarak hesaplanan ısının açığa çıkma oranı bu gürültüden oldukça kötü etkilenmektedir. Buna çözüm olarak basınç sinyalinin lineer faz farkı olan filtrelerle filtrelenmesi veya dinamik çözünürlük kullanılması önerilmektedir.

Yukarıda açıklanan noktalar göz önüne alınarak 0.1° hassasiyete sahip bir artırımı açısız enkoder seçilmiştir. Böylece benzin motorlarında vuruşta analizi yapmak da mümkün olabilecektir. Çözünürlüğün yüksek tutulmasındaki en büyük avantaj istenildiğinde örnekleme frekansını veri toplama cihazından düşürebilmektir. Yani gerek duyulduğunda örnekleme frekansını 0.1° KMA'ya kadar arttırmak mümkün olacaktır.

Çözünürlük dışında açısız enkoderin seçiminde etkili olan diğer önemli faktörler enkoderin hız aralığı, hassasiyeti, titreşim direnci ve termal çalışma aralığıdır. Anadolu Motorda yapılan deneylerde kullanılan enkoderin (Heidenhein ROD 420 serisi) temel bilgileri aşağıda gösterilmiştir. Daha ayrıntılı bilgi için ekler bölümünde enkoderin teknik tanıtım dokümanına bakılabilir.

- Çalışma hızı: 16000 devir/dk
- Hassasiyet: Ölçüm aralığının 1/20 si kadar
- Maksimum çalışma sıcaklığı: 100°C
- Minimum çalışma sıcaklığı: Sıkı bağlantıda -40°C , esnek kaplinle bağlantıda -10°C .

Enkoderin motora bağlantısı, esnek kaplinle (Heidenhein K17 diaframli kaplin) yapılmıştır. Motorun volan bulunmayan tarafındaki kapak çıkarılarak yerine bir flanş

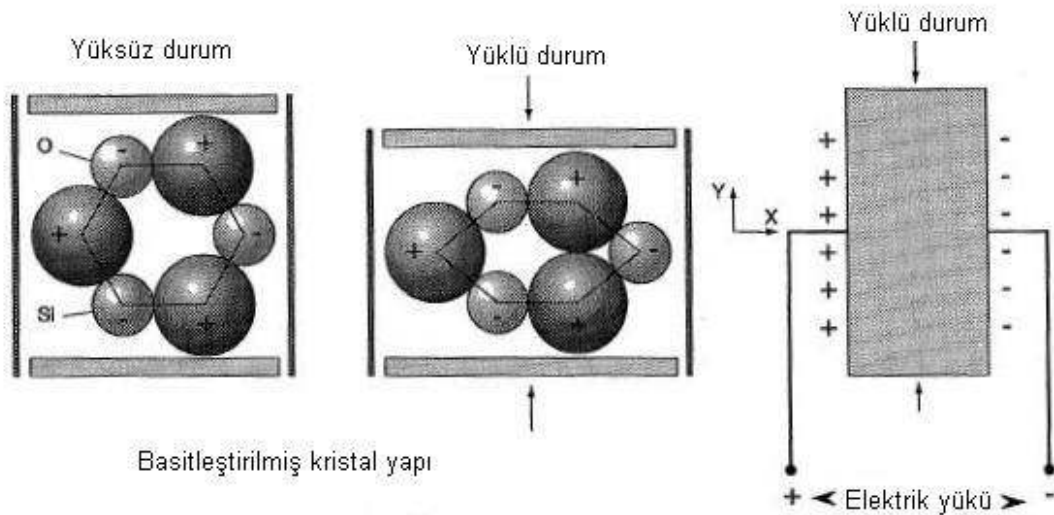
monte edilmiştir. Flanşın ucuna sabitlenen enkoder, esnek kaplinle krank miline bağlanmıştır. Bağlantı resimleri için ekler bölümüne bakılabilir.

3.3 BASINÇ SENSÖRLERİ

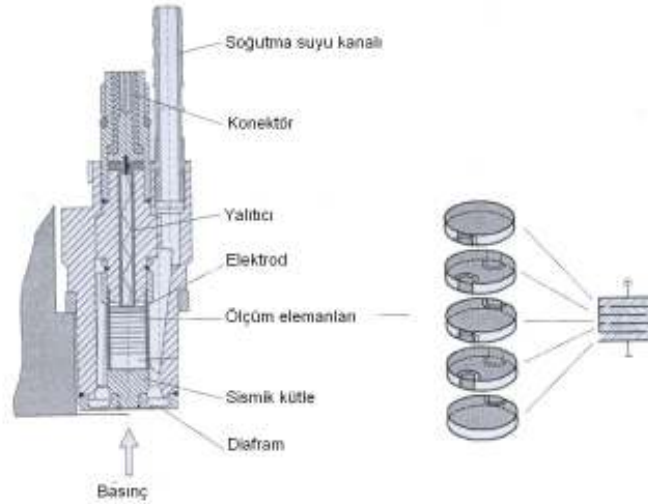
Anadolu Motor'da yapılan deneylerde silindir basıncını ölçmek için bir adet piezoelektrik basınç sensörü, yakıt basıncını ölçmek içinse bir adet piezoresistif basınç sensörü kullanılmıştır. Bu sensörlerle ilgili ayrıntılı bilgi ve sensörlerin seçiminde rol oynayan kriterler bu bölümde detaylı olarak anlatılacaktır.

3.3.1 Piezoelektrik basınç sensörleri

Quartz (SiO_2) ve Galyum Ortostat (GaPo₄) gibi bazı kristallerin üzerlerine basınç uygulandığında yüzeyleri arasında gerilim farkı meydana gelir. Bu olaya piezoelektrik etki adı verilir. Piezoelektrik etki sonucunda oluşan gerilim farkı çok çabuk bir şekilde nötrlendiğinden, algılanabilmesi için yüksek empedanslı yük yükselticilerine ihtiyaç duyulur. Piezoelektrik etki prensibiyle çalışan basınç sensörleri, cevap süreleri oldukça yüksek olduğundan, yanma odasında sürekli değişen basınç durumlarında ölçüm yapmaya oldukça uygundurlar. Yüksek sıcaklık ve basınç koşullarına dayanıklı olmaları da avantajları arasındadır. Bununla beraber sadece basınç değişikliklerine duyarlı olup statik basıncın ölçülmesinde kullanılamazlar.



Şekil 3.6 Piezoelektrik etki



Şekil 3.7 Piezoelektrik basınç sensörü (Pischinger, 2002)

Şekil 3.7 AVL firması tarafından üretilen su soğutmalı bir piezoelektrik basınç sensörünün kesit resmidir. Ölçülecek basınç esnek bir diafram ve küçük bir sismik kütle aracılığıyla kuartz ölçüm elemanlarına iletilir. Bu kütlenin görevi basıncı ölçüm elemanının yüzeyüne mümkün olduğu kadar eşit miktarda dağıtmaktır. Ölçüm elemanı ve diafram bir su ceketinde çevrelenmiştir. Ölçüm sırasında kanallardan geçen soğutma suyu sayesinde ölçüm elemanının sıcaklığı soğutma suyunun sıcaklığının 10 °C, tam yükte ve yüksek güç altında çalışıldığında ise 20 °C kadar üstünde seyreder. Ölçüm elemanının toplam yük miktarını arttırabilmek için birden fazla kristal disk birbirine paralel bağlanmıştır. Bu disklerden oluşan elemanın pozitif kutbu sensörün dış metal yüzeyine bağlanmıştır. Negatif kutup ise, dış yüzeyden çok iyi yalıtılmış olan ($>10^{13} \Omega$) konektöre bağlıdır. Konektörün ucu, yüksek empedanslı bir kablo yardımıyla, yük yükselticisine gitmektedir.

Gerek Anadolu Motor'da, gerek İTÜ Otomotiv Laboratuvarlarında yapılan deneylerde kullanılacak piezoelektrik basınç sensörlerinin seçiminde rol oynayan en önemli kriterler aşağıda gösterilmektedir.

- Boyutlar
- Adaptör seçimi
- Soğutma şekli
- Ölçülecek maksimum basınç
- Hassasiyet

Sensörlerin boyutları, seçimdeki en önemli kriterlerden biri haline gelmiştir. Piezoelektrik basınç sensörleri genellikle ağızları M5 ve M14 vida boyutlarında piyasada sunulmaktadır. Bununla birlikte su soğutmalı sensörlerin boyutları M10'dan başlamaktadır. Özellikle 4 supaplı, küçük hacimli motorlarda test yaparken su soğutmalı sensörlerin silindir kafasına direk bağlanması, su ceketlerinden dolayı mümkün olmayabilir. Anadolu Motorda yeni geliştirilen 4 supaplı silindir kafasında bu problem yaşanmış, AVL QC34D model su soğutmalı sensörle ölçüm yapmak mümkün olmamıştır. Bu nedenle seçilecek sensörlerin, yerleştirileceği alan düşünülerek, boyutlarına dikkat edilmesi gerekmektedir.

Sensör üreticileri, günümüzde motorların gittikçe küçüldüklerini hesaba katarak sensörlerin yerleştirilmesi için bir takım pratik çözümler bulma yoluna gitmişlerdir. Basınç sensörlerinin buji veya ısıtma bujisi içine konulabilir hale getirilmesi bu çözümlerden biridir. Bunu gerçekleştirmek için bazı üreticiler piyasaya, özel buji ve ısıtma bujisi adaptörleri sunmuşlardır. Şekil 3.8'de AVL firmasının ürettiği ZF42 kodlu buji adaptörü, içine yerleştirilmiş basınç sensörüyle birlikte gösterilmektedir.



Şekil 3.8 Basınç sensörünün yerleştirilmesi için üretilen buji adaptörü

Buji adaptörlerinin seçiminde rol oynayan en önemli faktör sensörün yanma odasına olan uzaklığıdır. Eskiden buji adaptörlerinde basınç sensörünün yerleştirildiği kanal, sensörü elektrot civarında oluşan yüksek sıcaklıklardan korumak amacıyla, uzun tutulur; sensör yanma odasına uzak kalırdı. Bu boşlukta oluşan gaz titreşimleri nedeniyle basınç sinyalinde dalgalanmalar oluşur, ölçüm hassasiyeti oldukça düşerdi. **Kuratle (1993)** çalışmasında “Pipe Oscillations” adı verilen bu olayla ilgili ayrıntılı bilgi vermiş, boşluk uzunluğunun artmasıyla gerçekleşen dalgalanmaların

frekanslarını ve bu dalgalanmaları önleme yolları üzerinde durmuştur. Günümüzde sensörlerin yapımında uygulanan metotların gelişmesiyle artık sensörler yanma odasına oldukça yakın monte edilebilmektedir. Yukarıda gösterilen buji adaptöründe sensör yanma yüzeyden sadece 1-2 mm içeride kalmaktadır.

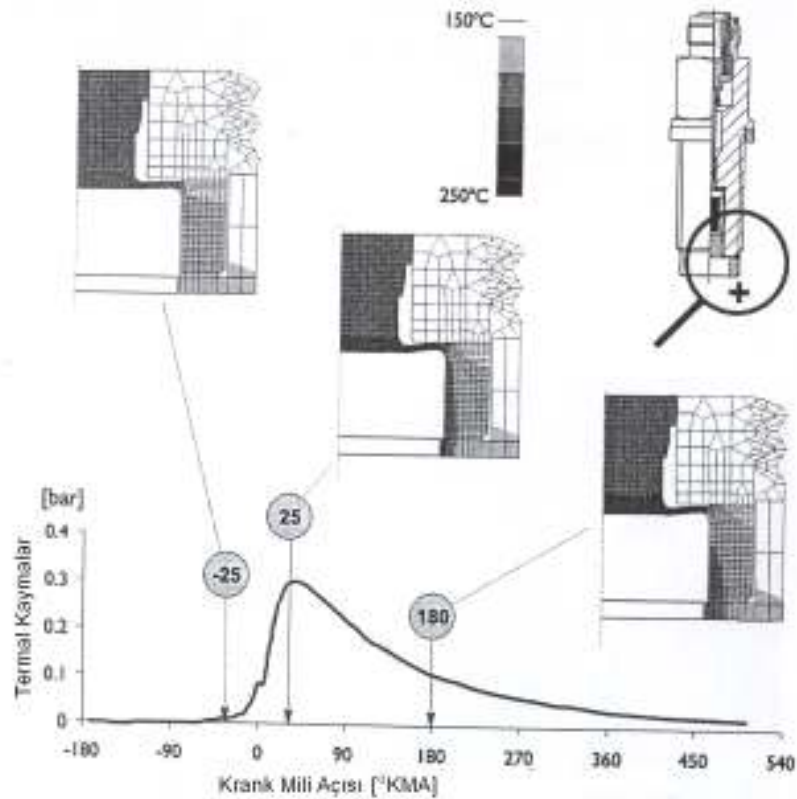
Buji adaptörünün seçimindeki bir diğer önemli kriter bujinin ısı faktörüdür. Isı faktörü bujinin yanma odasında oluşan ısıyı ne kadar hızlı bir şekilde silindir kafasına aktardığının bir ölçüsü olup farklı tip motorlarda farklı ısı faktörlerinde bujilerin kullanılması gerekmektedir. Yüksek yükte çalışan motorlarda, örneğin yarış motorlarında, ısıyı silindir kafasına çabuk ileten soğuk bujiler kullanılır. Böylece bujinin ısınarak vuruntu riskinin artması önlenmiş olur. Binek taşıt motorlarında elektrot yüzeyinde biriken kurumun yanabilmesi için ısıyı daha uzun süre üzerinde tutan sıcak bujiler kullanılır. Bujinin ısı faktörü genellikle adına eklenen sayısal kodlarla belirtilip bu kodlar genellikle üreticiden üreticiye farklılık göstermektedir. **Walter ve Diğerlerine (2004)** göre indikasyon ölçümlerinde kullanılacak bujinin bir miktar soğuk tarafta olması sensör için avantajlı gibi sayılabilir. Bununla birlikte uzun süre düşük yüklerde çalışması sonucunda elektrotta kurum birikmesi ve ateşleme hataları gözükülebilir. Ayrıca bujinin vuruntu karakterine etkisi de değişmiş olmaktadır. **Kuratle'ye (1993)** göreyse Bujinin sıcak olması ise sensörün zarar görmesine sebep olabilir. Bu nedenle indikasyon İTÜ Otomotiv Laboratuvarlarında gerçekleştirilecek indikasyon çalışmalarında kullanılmak üzere 5 numara ısı faktörüne sahip bir buji adaptörü tercih edilmiştir. Bu adaptör ılıkla bir miktar soğuk tarafa kaçan bir ısı faktörüne sahiptir.

Soğutma şekli sensörün ölçüm hassasiyetinde önemli rol oynamaktadır. **Kuratle ve Märki (1992)** sensörün olduğu bölgede ortalama sıcaklıkların 150-300 °C arasında seyrettiğini belirtmektedirler. **Pischinger (2002)** ise, yanma esnasında soğutmasız sensörlerde yanma odasında kalan yüzeyin 500 °C, ölçüm elemanının 400 °C, konektörün ise 200 °C sıcaklığa ulaşabildiğinden bahsetmektedir. Su soğutmalı sensörlerin kullanılmasıyla ölçüm elemanı, soğutma suyundan 10-20 °C kadar sıcak kalmakta, konektördeki sıcaklık ise 200 °C'ye kadar düşürülebilmektedir.

Su soğutmalı sensörlerin kullanılmasında dikkat edilmesi gereken bir unsur, soğutma suyunun debisinin mümkün olduğunca sabit kalmasıdır. Su basıncının değişmesi veya dalgalanması basınç sinyalinde düşmeye sebep olacaktır **Pischinger (2002)**.

Anadolu Motor'da yapılan deneylerde kullanılan AVL QC34D kodlu su soğutmalı sensör için tavsiye edilen su debisi 20 litre/saat'tir.

Su soğutmalı sensörlerin en büyük avantajlarında biri de kısa zamanlı termal şokların basınç sinyali üzerindeki etkisini oldukça azaltmalarıdır. Yanma esnasında yakıt hava karışımının sıcaklığı anlık olarak 2000 °C'ye kadar çıkabilir. Basınç sensörün yanan gazlara maruz kalan bölgelerde sıcaklıklar (diafram ve ölçüm yüzeyi gibi) milisaniye kadar kısa bir sürede yükselip tekrar azalabilir. Bu olay termoşok olarak adlandırılmaktadır. Termoşok sonucunda sensörün ucundaki diafram ani şekil değişmelerine uğrayacak, bu da ölçülen basınçta kaymalara neden olacaktır. Bu olaya kısa süreli termal kayma (short term thermal drift) adı verilir. Şekil 3.9'da **Pischinger'in (2002)** çalışmasından alınan; yanma çevriminin üç farklı noktasında diaframda oluşan gerilmeleri ve bu gerilmelerin ölçülen basınca etkilerini gösteren bir sonlu elemanlar analizi gösterilmiştir. Burada kısa süreli termal kaymalardan oluşan hataların 0.3 bara kadar çıktığı görülmektedir.



Şekil 3.9 Kısa süreli termal kaymaları gösteren bir sonlu elemanlar analizi

Kuratle ve Märki (1992), kısa süreli termal kaymaların sebep olduğu basınç hatalarının yüksek hassasiyetli bir sensörde 1 bardan az olduğunu öne sürmektedirler. Bu durumda hesaplanan imep hatası ise -%1 ile +%0.2 arasında değişmektedir.

Bununla beraber değişik sensör tipleriyle yaptıkları testlerde imep hatasının -%9'a kadar vardığını belirtmişlerdir.

Su soğutmalı sensörlerle kısa süreli termal kaymalar azaltılabilir. Anadolu Motor'da yapılan deneylerde kullanılan AVL firmasının ürettiği QC34D kodlu su soğutmalı sensörde kısa süreli termal kaymaların sebep olduğu basınç hataları ± 0.3 bar'dan küçüktür. Aynı firmanın daha küçük ama su soğutmasız GU21D modelinin termal kayması ± 0.4 bar, GU12P'de ise ± 0.6 bardır.

Buji adaptörlerinde ise, sınırlı yer yüzünden, soğutmasız sensörler kullanılmaktadır. Bu durumda kısa süreli termal kaymaların azaltılabilmesi için bazı üreticiler sensörle ölçüm yüzeyi arasına yerleştiren silikon temelli termal koruma üniteleri sunmaktadır.

Kullanılacak sensör, deneylerde maruz kalınabilecek maksimum basınç dikkate alınarak seçilmelidir. Genellikle sensörlerin zarar görme sınırı ölçebileceği maksimum basınçtan daha fazladır. Anadolu Motor'da yapılan deneylerde kullanılan AVL QC34D kodlu su soğutmalı sensörün maksimum ölçüm basıncı 250 bar, zarar görmeye başladığı basınç ise 300 bardır.

Son olarak piezoelektrik basınç sensörünün seçiminde hassasiyet önemli rol oynamaktadır. Ölçüm hassasiyeti teknik dokümanlarda pC/bar cinsinden ifade edilir. AVL QC34D sensörünün hassasiyeti 19 pC/bar olup daha yüksek değerli sensörler tercih sebebi olabilir.

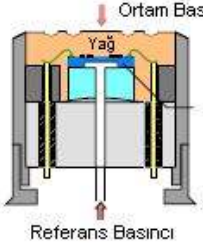
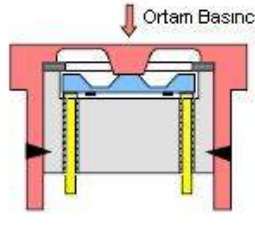
Burada anlatılanların dışında sensörün çalışma ömrü, çalışma aralığındaki doğrusallığı ve imep stabilitesi de teknik dokümanlarda araştırmacıların karşısına çıkabilir. Bu çalışmada yukarıda bahsedilen değerler hakkında, çalışmanın indikasyonla sınırlı tutulması için, daha fazla bilgi verilmeyecektir. Bu konularda daha ayrıntılı bilgi için **Wenger'in (1986)** basınç sensörlerinin stabilitesi hakkındaki çalışmasına ve Kistler'in "Piezoelectric Transducers Measure Pressures" adlı raporuna başvurmaları önerilir.

Anadolu Motorda kullanılan piezoelektrik basınç sensörlerinin teknik özellikleri EK A'da gösterilmektedir.

3.3.2 Piezoresistif basınç sensörleri

Piezoresistif basınç sensörleri, basınç altında şekil değiştiren kristallerin dirençlerinde gerçekleşen değişimden faydalanarak ölçüm yaparlar. En büyük avantajları statik basıncı algılayabilmeleridir. Bununla birlikte piezoelektrik sensörler gibi ağır şartlarda kullanılamazlar. Bu nedenle emme basıncının ve özel adaptörler kullanılarak egzoz ve yakıt basıncının ölçülmesinde genellikle bu tip sensörlerden yararlanılmaktadır.

Şekil 3.10 gerek İTÜ Otomotiv Laboratuvarlarında, gerekse Anadolu Motorda yapılacak deneylerde gaz değişimi analizinde kullanılacak piezoresistif sensörleri göstermektedir. 4045 tip sensörler emme basıncını ölçmek için alınmıştır. Bu tip sensörlerde ölçüm yüzeyinde bulunan metal diyafram ve silikon ölçüm elemanı arasında bir yağ deposu bulunmaktadır. Basınç yağ aracılığıyla ölçüm elemanına iletilir. Şekilde de görüldüğü gibi ölçüm elemanının bir tarafı yağ basıncına maruz kalırken diğer tarafı referans basıncına, yani hava basıncına, açıktır. Bu şekilde mutlak basıncın ölçülmesi mümkün olmaktadır. 4045 tip sensörler yüksek sıcaklıkta çalışma kapasitesine sahip olup soğutma adaptörüne ihtiyaç duymaksızın emme basıncının ölçülmesinde kullanılabilirler.

Mevcut Modeller	Yeni Tasarımlar	
Yağ hazneli sensörler (Kistler 4045) (maksimum sıcaklık 120 °C)	Emme basıncı için Kistler 4005	Egzoz basıncı için Kistler 4047
		
 Yüksek hassasiyet Sert koşullarda ölçüm	 Yüksek hassasiyet Küçük boyutlar	 Soğutmalı Sert koşullarda ölçüm

Şekil 3.10 Farklı tip piezoresistif sensörler

Burkhardt ve diğ. (2003), gaz değişimi analizlerinde kullanılacak sensörlerin seçiminde aşağıda listelenen kriterlerin birinci derecede önem taşıdığını belirtmektedirler.

- Boyutlar
- Termoşok direnci
- Sıfır noktası stabilitesi

Sensörün mümkün olduğu kadar supaplara yakın yerleştirilmesi tercih edilmelidir. Silindir kafasına doğrudan yerleştirilen sensörlerle alınan sonuçlar çok daha verimli olmaktadır. Bununla beraber 4 supaplı, küçük hacimli motorlarda bu her zaman mümkün olmayabilir. Kistler firması, supaba yakın ölçüm yapabilmek için M5 boyutlarında 4005 tip soğutmasız piezoresistif sensörler sunmaktadır. Bunların dezavantajı yalnızca emme basıncını ölçmek için kullanılabilir olmalarıdır.

Burkhardt ve diğ. (2003), kullanılan sensörün termal yüklere dirençli olmasını, termoşok sonucu basınç hatalarının minimum olması gerektiğini belirtmektedir. Gaz değişimi eğrilerinden elde edilen grafiıklere göre hesaplanan gaz miktarı, ölçülen basınçta gerçekteşen termal sapmalar 10 milibar'ın geçmediği sürece yeterli doğrulukta çıkmaktadır. Maksimum ölme basıncı 2 bar olduğunda bu değer 0.5 % FSO, 5 bar olduğunda ise 0.2 % FSO olmaktadır.

Normal koşullar ve motor deneylerindeki sıfır noktası arasındaki farkın azaltılması için ölçüme başlamadan sensörün ortam basıncına tabi tutulması uygun olacaktır. Özellikle egzoz basıncını ölçen sensör, yüksek sıcaklıklara maruz kaldığından, bir anahtarlama adaptörü kullanılarak (switching adapter) ölçümden önce ve sonra hava basıncına maruz bırakılırsa hassasiyet daha çok artacaktır (**Burkhardt ve diğ., 2003**).

Burkhardt ve diğ. (2003), çalışmalarında, gaz analizinde kullanılacak piezoresistif sensörlerin sahip olması gereken özellikleri bir tablo haline getirmişlerdir. Tablo 3.2 bu özellikleri özetlemektedir.

Tablo 3.2 Piezoresistif basınç sensörleri için alt değerler

Teknik özellik	Değer	Birim
Sıfır noktası stabilitesi	$<\pm 0.5$	%FSO
Termal sıfır noktası kaymaları	$<\pm 0.5$	%FSO
Doğrusallık (linearity)	$<\pm 1$	%
Doğal Frekans	>20	kHz
İvme direnci	<0.3	mbar/g

Gerek İTÜ Otomotiv Laboratuvarlarında, gerekse Anadolu Motorda yapılacak deneylerde egzoz ölçümünde kullanılacak Kistler 4075 tipi piezoresistif sensörler için ayrıca soğutma ve anahtarlama adaptörleri temin edilmiştir. Soğutma adaptörleri sensörün su ile soğutulmasını sağlayarak ölçümde termal kaymaların minimuma indirilmesini sağlar. Anahtarlama adaptörlerinde ise basınçlı hava ile çalışan metal ventiller sayesinde basınç sensörü sadece ölçüm süresince sıcak gazlara maruz kalır. Ölçüm yapılmadığı zamanlarda metal ventiller kapanarak sensörün normal hava basıncına tabi tutulmasını sağlar.

Emme, egzoz ve yakıt basıncı sensörlerinin teknik özellikleri ekler bölümünde gösterilmektedir.

3.4 YÜKSELTİCİLER

Yükselticiler, piezoelektrik basınç sensörlerinin ürettiği yükleri veya piezoresistif sensörlerin ürettiği gerilim sinyallerini, veri toplama cihazlarının algılayabileceği gerilim sinyallerine çevirir veya sadece genliklerini artırır.

Yükselticilerin seçiminde yazar aşağıda gösterilen üç şeye dikkat etmiştir.

- Elektronik kayma düzeltme devresi
- Akıllı sensör uygulaması
- Filtreleme özellikleri

Piezoelektrik yük yükselticilerinin çıkışlarında, girişte sabit bir basınç sinyali olsa bile, bazı kaymalar gerçekleşmektedir. Bunun sebebi yükselticinin çalışma prensibinden kaynaklanmaktadır. Piyasadaki bazı yük yükselticilerinde bu kaymaları

önleyen özel sistemler bulunmaktadır. Anadolu Motor'da yapılan deneylerde kullanılan AVL 3066A02 yük yükselticisinde bu özellik bulunmaktadır (**Pischinger, 2002**).

Kistler'den alınan 4665 tip gerilim yükselticisinde akıllı sensör teknolojisi mevcuttur. Bu teknolojiyle yükseltici giriş kanalına takılan bir sensörün özelliklerini otomatik olarak algılamakta ve belleğine yüklemektedir. Kullanıcıya sadece kazanç değerini girmek kalır. Bu özellik kullanıcıya büyük kolaylık sunmaktadır.

Deneylerde kullanılan AVL 3066A02 yük yükselticisinde 180 kHz alçak geçirgen filtre bulunmaktadır. Bu değer sinyalde faz gecikmelerinden yaşanan hataların minimumda tutulması için ideal gözükmetedir (**Kuratle ve Märki 1992**).

Bu bölümde yükselticilerin çalışma prensiplerine ve ayrıntılı seçim kriterlerine değinilmeyecektir. Bunun en önemli nedeni yazarın basınç sensörleri ve yükselticileri aynı firmadan temin etmiş olmasıdır. Sensörler seçildiğinde aynı firmanın ürettiği ve bu sensörlerle kullanılabilecek yükseltici tipleri fazla değildir; olanlar da çoğunlukla birbirine benzemektedir. Bununla beraber yükselticilerin çalışma prensiplerini açıklayabilmek için devre temellerini anlatmak da şarttır. Bu çalışmanın konusu ise İY motorlarda indikasyon çalışmaları ile sınırlı tutulmuştur. Bu bağlamda araştırmacılar, yukarıda belirtilen pratik bilgiler sayesinde yükseltici seçiminde çok zorluk çekmeyeceklerdir. Yükselticilerle ilgili ayrıntılı bilgi için **Pischinger (2002), Kuratle ve Märki'nin (1992)** çalışmalarına ve Kistler firmasının yayınladığı "Piezoelectric Theory" adlı teknik dokümana başvurabilirler.

3.5 VERİ TOPLAMA CİHAZLARI

Veri toplama cihazlarının en önemli görevleri, belli bir örnekleme frekansı ile sensörden gelen analog sinyalleri toplamak, bu sinyalleri dijitale çevirmek ve sonra da depolama ortamına aktarmaktır. Bu bağlamda veri toplama cihazlarının seçiminde rol oynayan kriterler aşağıda listelenmiştir.

- Toplam analog giriş kanalı sayısı ve kanal kapasitesi
- Analog-dijital çevirme çözünürlüğü
- Örnekleme hızı

Veri toplama cihazını seçerken tek bir ölçümde cihaza kaç basınç sensörünün bağlanacağı göz önünde bulundurulmalı, istenilen analog kanal sayısına sahip bir veri toplama cihazı seçilmelidir. Kanal kapasitesi, toplanmak istenen çevrim sayısına göre belirlenir. **Brunt ve Emtage (1996)**, birçok araştırmacının 100 çevrimle yetindiğini ancak istatistik parametrelerin hassasiyeti ve güvenilirliği açısından en az 300 çevrimin toplanması gerektiğini savunmaktadır. Bu fikir göz önüne alınarak Anadolu Motor’da yapılan deneylerde kullanılan veri toplama cihazında bulunan kanalların bellekleri, 0.1 °KMA çözünürlükle yaklaşık 550 yanma çevrimi toplayacak şekilde, 1 Mb’tan 8 Mb’a arttırılmıştır.

Analog-dijital çevirme çözünürlüğü konusunda birçok kaynakta 12 bitlik çeviricilerin kullanıldığı görülmektedir. **Brunt ve Emtage (1996)** 12 bit çözünürlüğün yaklaşık 50 mbar’a karşılık geldiğini, bu koşullarda imep ve pmep hatalarının 15 mabar’da kaldığını belirtmektedirler. Diğer hata kaynaklarının yanında 15 mbar’ın oldukça az olduğunu da eklemişlerdir. Bununla birlikte **Brunt ve Lucas (1991)** 14 bit çözünürlükte çalışarak istenmeyen gürültülerin oldukça azaltılabileceğinden bahsetmektedirler (Yukarıda anlatılan çalışmada belirtilen yazarların aynı kişi oldukları dikkat çekicidir).

Veri toplama cihazının örnekleme hızının seçimi, yapılacak basit bir hesaplama anlaşılabilir. Örnek olarak araştırmacının benzin motorunda, nispeten yüksek bir motor devri olan 4000 devir/dakika’ da vuruntu analizi yapmak istediği ve bu nedenle, uygun frekansları gözlemleyebilmek için 0.2 °KMA çözünürlükle veri topladığı düşünülürse, basınç sensörünün bağlı olduğu kanalın örnekleme hızı aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\frac{360 \left[\frac{^\circ}{devir} \right]}{0.2 \left[\frac{^\circ}{örnek} \right]} \times \frac{4000 \left[\frac{devir}{dk} \right]}{60 \left[\frac{sn}{dk} \right]} = 120000 \left[\frac{örnek}{sn} \right] \quad (3.1)$$

Eğer veri toplama cihazı multiplexing prensibiyle çalışıyorsa, toplam örnekleme hızını kanalları arasında paylaşmak zorundadır. Yukarıdaki veri toplama cihazının 8 kanallı olduğu düşünülürse toplam örnekleme hızı, multiplexing işlemi için gereken zaman da hesaba katılırsa, 1 MHz’e çıkmaktadır.

Anadolu Motor’da kullanılan veri toplama cihazı SMETEC tarafından üretilmiş olup 8 analog kanalının her biriyle 1 MHz örnekleme hızıyla veri toplamak mümkündür. Cihazın diğer teknik özellikleri ekler bölümünde gösterilmiştir.

4. ÖLÇÜM ESASLARI

Daha önce de belirtildiği gibi indikasyon, içten yanmalı motorlar üzerinde uygulanan deney tekniklerine kıyasla uygulaması daha basit ve hızlı bir metottur. Bu nedenle çoğu zaman dikkat edilmesi gereken temel noktalara özen gösterilmeden ölçüm yapılmakta, basınç sensörünün verdiği değer doğru kabul edilerek indikatör diyagramları analiz edilmektedir. Bu şekilde yapılan çalışmalardan doğan sonuçlar ya yanlış ya da eksik bilgi içerecektir. Bu bölüm indikasyon çalışmaları kapsamında yapılan ölçümlerde dikkat edilmesi gereken temel noktaları anlatmaktadır. Ayrıca bu noktalar bir hata kaynağı olup, her birinin motorda incelenmek istenen çeşitli parametrelerde sebep olduğu hata oranları da, Anadolu Motor'da yapılan indikasyon çalışmalarından verilen örneklerle açıklanmıştır.

4.1 ÜST ÖLÜ NOKTANIN BELİRLENMESİ

Çoğu zaman indikasyon deneylerinde arttırmalı açısız enkoderler kullanılmaktadır. Bu enkoderlerin en büyük dezavantajı daha önce belirtildiği gibi, sadece krank milinin açısız değişimlerini göstermesi, gerçek pozisyon bilgisi vermemesidir. Bu nedenle ölçüme başlamadan önce krank milinin pozisyonu için bir referans noktası belirlemek lazımdır. Bu işlem enkoderin, her tam turda gönderdiği tek sinyalin motorun üst ölü noktasıyla karşılaştırılması yardımıyla gerçekleştirilebilir. Bunun haricinde motorun kompresyon eğrisinden faydalanarak ÜÖN'yı geometrik olarak bulmak veya p-V diyagramından termodinamik yöntemlerle hesaplamak gibi metotlarla da literatürde karşılaşılmaktadır. Bu çalışmada sadece deneysel yöntemlerle sınırlı kalınacaktır.

Motorun ÜÖN'sını belirlemek için sık olarak kullanılan üç deneysel metot bulunmaktadır. Bunlar:

- 1- Statik olarak üst ölü noktanın bulunması
- 2- Dinamik olarak üst ölü noktanın bulunması
- 3- Motorun kompresyon eğrisinden faydalanarak üst ölü noktanın bulunmasıdır.

Kutlar (1999), çalışmasında geliştirdikleri tek silindirli deney motorunda açısal enkoder sinyali ile motorun ÜÖN'sını çakıştırmakta kullandıkları yöntemi anlatmıştır. Buna göre motor kafasını sökerek piston üzerine konan bir komparatör ve volan tarafındaki silindir üzerine yapıştırılan bir gösterge çizelgesi yardımıyla pistonun açısal konumunu 0.2 °KMA hassasiyetle bulmanın mümkün olduğunu belirtmektedir. ÜÖN'ya her iki yönden yaklaşarak komparatörün minimum değeri gösterdiği noktalar işaretlenmiş, bu noktaların ortası ÜÖN olarak kabul edilmiştir. Son olarak enkoderin montajı, tetik sinyali ÜÖN ile çakışacak şekilde, yapılmıştır.

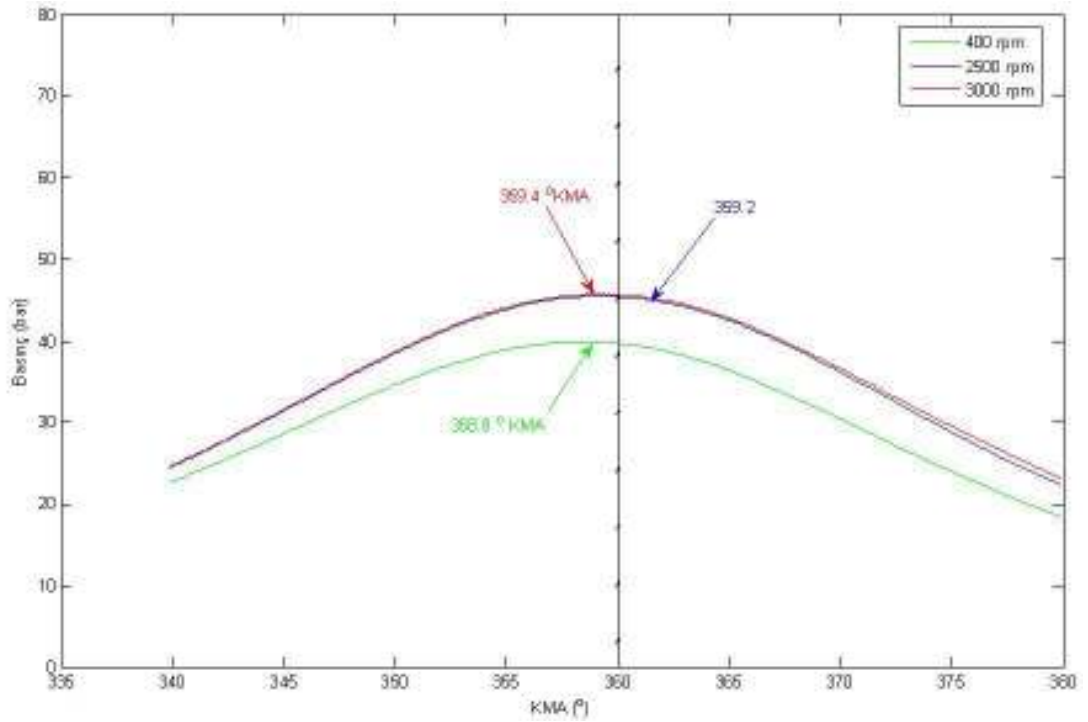
Statik yöntemler ucuz olmakla beraber, zaman gerektiren bir yöntemdir. Bununla birlikte statik yöntemin hassasiyeti tartışma konusudur. **Oliveira ve diğ. (1996)** ÜÖN civarında pistonun 4 °KMA boyunca neredeyse hareketsiz kaldığından bahsetmektedirler. **Kutlar'ın (1999)** çalışmasına benzer bir metotla ölçüm yapmakla beraber **Oliveira ve diğ. (1996)** pistonun hareketsiz kaldığı plato'yu farklı ölçümler olarak kaydetmişler, polinomlarla uydurulan eğrilerin türevlerinin sıfır olduğu noktayı ÜÖN kabul etmişlerdir. Bu şekilde hesaplanan ÜÖN ile platonun orta noktası arasında 0.1 °KMA fark olduğunu belirtmektedirler.

Pischinger (2002)'ye göre ÜÖN'yı kapasitif bir sensörle dinamik olarak çok daha hassas bir şekilde belirlemek mümkündür. Bu metotta kapasitif sensör, kullanılan motorun tipine bağlı olarak, buji, enjektör veya varsa basınç sensörü deliğine yerleştirilir. Motor kompresyonda çalışırken yapılan ölçümlerle ÜÖN'nın 0.1 °KMA'dan daha yüksek bir hassasiyetle okunmasının mümkün olduğu savunulmaktadır.

Kapasitif sensörlerle yapılan ÜÖN tayini şüphesiz daha az zaman alacaktır. Bununla beraber yazar bu sensörlerin piyasa fiyatlarının çok yüksek olduğunu belirtmeyi de faydalı görmektedir.

İndikasyon çalışmalarında ÜÖN'nın belirlenmesi için en sık kullanılan yöntem motorun kompresyon eğrisinin tepe noktasını bulmaktır. Motorun ateşleme ve püskürtme sistemleri iptal edilerek kompresyonda çalışması sağlanır ve silindir içi basınç kaydedilerek basıncın eğrisinin tepe noktası incelenir. Bu metottaki en önemli problem basıncın maksimum olduğu noktanın, ısı kayıplarından dolayı, ÜÖN'nın bir miktar gerisinde çıkacağıdır. Bu fark literatürde termodinamik kayıp açısı (thermodynamic loss angle) olarak adlandırılmıştır. Yazar, TKA için literatürde

farklı değerlerle karşılaşmıştır. **Zhao ve Ladammatos (2001)**, TKA'nın motor devri arttıkça düştüğünü ve benzin motorları için 0.7-0.9 °KMA, ön yanma odalı dizel motorları için 1.1-1.3 °KMA, direk püskürtmeli dizel motorları içinse 0.8-1 °KMA olduğunu belirtmektedir. **Pischinger (2002)**, benzin motorları için TKA'nın 0.5 derece civarında seyrettiğini söylemiştir. Literatürde bulunan diğer çalışmalarda da farklı değerlerden bahsedilmektedir. Bunların tek ortak noktası, üzerinde çalışılan direk püskürtmeli dizel motoru için, TKA'nın 1 °KMA'yı geçmeyeceğidir. Literatürde TKA ile ilgili bu belirsizliğe pratik bir çözüm bulabilmek için yazar konuyu, veri toplama cihazının temin edildiği SMETEC firmasında çalışan Dr. Frank Wytrykus'a danışmıştır. Dr. Wytrykus, farklı motorlarda yaptıkları çalışmalarda 2500-3000 devir/dk'da alınan kompresyon eğrilerinde TKA'nın 0.7 °KMA kullanılmasını önermiştir (**Wytrykus, 2008**). Yazar, literatürdeki birçok araştırmadan farklı olarak kompresyon basıncı eğrisinin hangi çalışma koşullarında alınacağını da belirttiği için, Dr. Wytrykus'un önerisini kullanmayı uygun görmüştür.



Şekil 4.1 Termodinamik kayıp açısının motor hızına göre değişimi

Şekil 4.1 farklı devirlerde ölçülen kompresyon basınç sinyallerini göstermektedir. Deneyler üç farklı şekilde yapılmıştır. Öncelikle motorun yakıt pompası iptal edilerek marş motoru ile 400 devir/dk'da 10 çevrim kaydedilmiştir. Daha sonra motor hızı 2500 devir/dk'ya çıkarılmış, bu hızda yakıt kesilerek motorun devrinin

düşmeye başladığı anda yine 10 çevrim kaydedilmiştir. Aynı yöntem izlenerek 3000 devir/dk'da ayrı bir ölçüm yapılmıştır. Her üç deneyde de kullanılan TKA sabit ve 0.7 °KMA'dır. Buna rağmen basınç maksimumlarının farklı olduğu ve motor devri yükseldikçe basınç maksimumunun ÜÖN'ya doğru kaydığı gözlenmiştir.

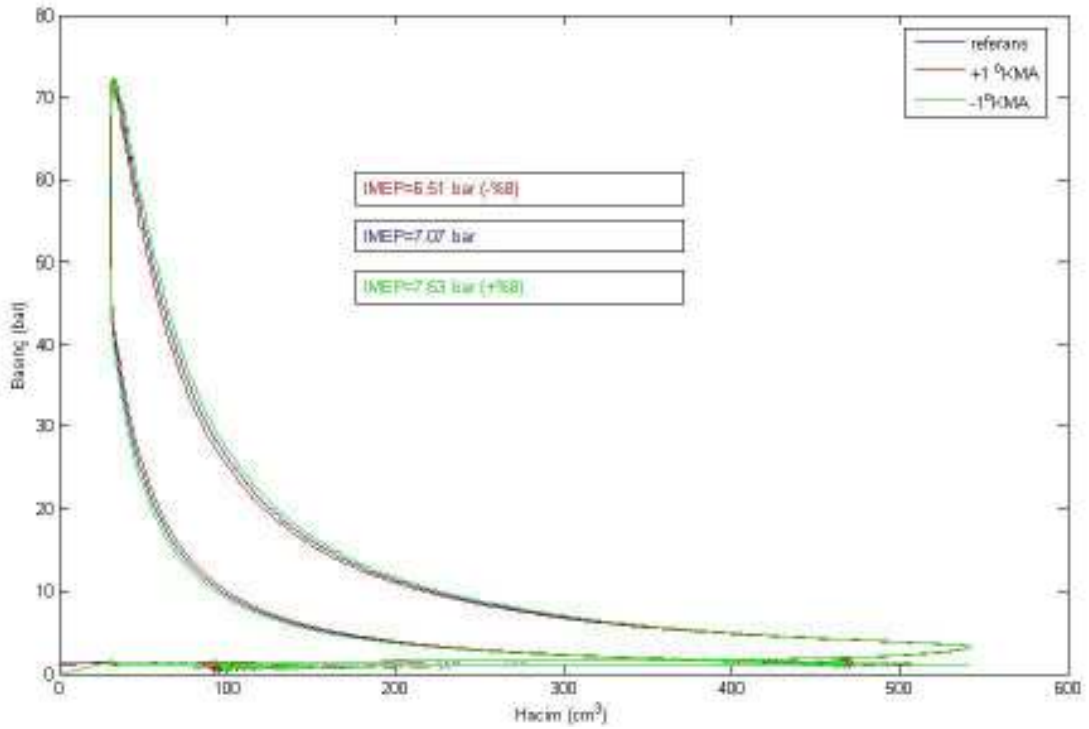
Anadolu Motor'da yapılan deneylerde uygulanan ÜÖN tayini, 2500 devirden yakıt kesilerek yapılmış ve TKA her seferinde 0.7 °KMA olarak kullanılmıştır. Bununla beraber motoru sabit olarak istenilen devirde döndürecek bir fren sistemi sayesinde, yakıtı tümünden keserek, daha hassas ölçümler yapmak mümkün olacaktır.

ÜÖN'nın tayini indikasyon çalışmaları için hayati derecede önem taşımaktadır. Dr. Wytrykus, **Kuratle ve Märki (1992)**, ÜÖN'nın en az 0.1 °KMA hassasiyetle belirlenmesi gerektiğini savunmaktadır. Yazar, belirlenen ÜÖN'yı ± 1 °KMA kaydırarak yaptığı hata simülasyonunda hesaplanan imep'te %8'e varan hatalarla karşılaşmıştır. Bu simülasyonun sonuçlarını Şekil 4.2'de görmek mümkündür.

4.2 BASINÇ REFERANSININ BELİRLENMESİ

Piezoelektrik sensörleri yapıları gereği sadece basınç değişimini ölçebilirler. Mutlak basınç ölçme kabiliyetleri yoktur. Bu nedenle, tıpkı ÜÖN referansının belirlenmesi gerektiği gibi, ölçülen silindir içi basıncı için de bir referans değeri belirlenmelidir. İndikasyon çalışmalarında en çok kullanılan referans basınç yöntemleri aşağıda sıralanmaktadır.

- 1- Hava basıncının referans alınması
- 2- Emme basıncının referans alınması
- 3- Silindir içi basıncın piezoresistif sensörlerle ölçülmesi
- 4- Termodinamik metotlarla referans alma.

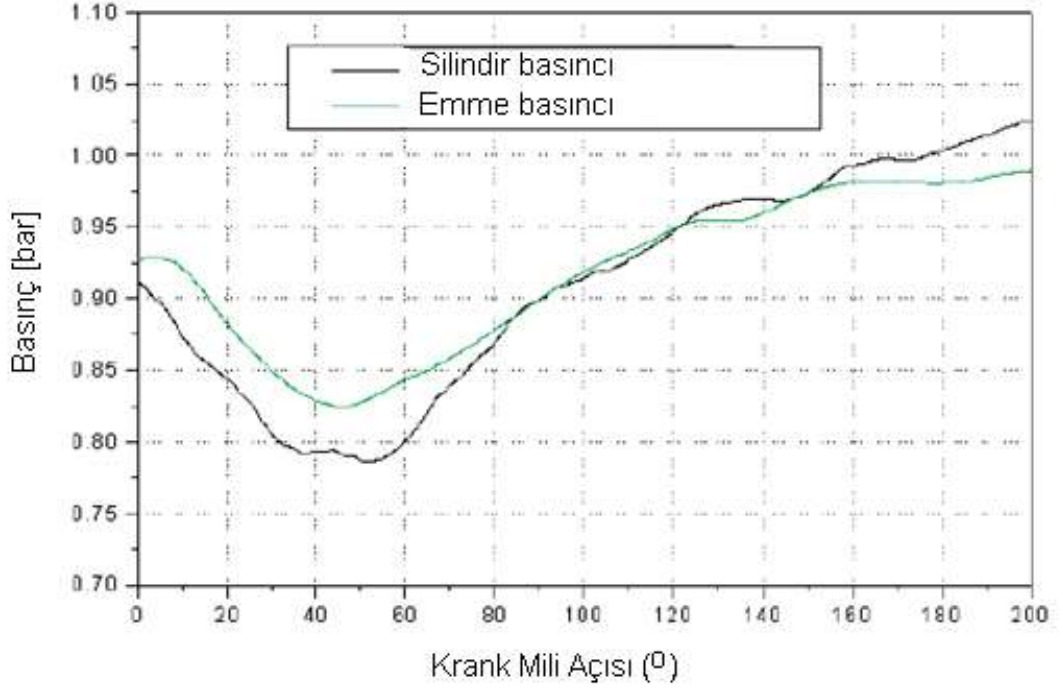


Şekil 4.2 TDC hatalarının hesaplanan imep'e etkisi

En sık kullanılan referans metotlarından biri gaz değişimi ÜÖN'sında silindir basıncının dış hava basıncına eşitlenmesidir. Bu yöntem sadece emme kanalıdaki akışın herhangi bir şekilde kesit daralmasına uğramadığı (örnek dizel motorlar) doğal emişli motorlarda yeterli hassasiyet sağlayabilir. Bunun dışında kullanılması pek önerilmemektedir (**Pischinger, 2002**).

Basıncı referansının daha hassas bir şekilde belirlenmesi için bir diğer yöntem emme kanalındaki basıncın ölçülmesidir. Bu yöntem, termodinamik metotlardan sonra en çok kullanılan yöntemdir. **Mradek ve diğ. (1999)**, gaz değişimi ÜÖN'sı ile emme AÖN'sının 20 °KMA sonrasındaki bölgede (220 °KMA'lık bir bölgede) emme basıncı ve silindir basıncı arasındaki farkın 20 mbar'dan az olduğunu belirtmektedirler. Şekil 4.4'te bu bölgede ölçülen silindir ve emme basıncı görülmektedir.

Silindir gövdesine, AÖN'ya yakın bir yere yerleştirilecek piezoresistif sensörle, AÖN civarında mutlak silindir basıncını ölçmek mümkün olabilir. Sensörün AÖN'da karışımın nispeten daha soğuk olduğu bir bölgede gazlara maruz kalması, ölçülen basıncın hassasiyetini arttırabilir. Piezoresistif sensörlerin, piezoelektrik sensörlere kıyasla, termoşoktan daha fazla etkilenmesi bu yöntemin en büyük dezavantajıdır. Diğer yöntemlere kıyasla uygulaması da daha zordur.



Şekil 4.3 Emme ve silindir basınçlarının benzerliği

İndikasyon çalışmalarında en sık kullanılan yöntem sabit politropik üs kabulüdür. Bu yöntemde sıkıştırma zamanının sabit bir politropik üs boyunca ilerlediği kabul edilir. Bu şekilde belli bir KMA bölgesinde sabit politropik üs kullanarak basıncı hesaplamak mümkün olmaktadır. Literatürde en sık rastlanan değerler, AVL'nin önerdiği aralık ve politropik üstür. Buna göre, ÜÖN'yı sıfır kabul ederek, -100°KMA ve -65°KMA arasındaki bölgede benzin motorları için $n_p=1.32$, dizel motorlar için $n_p=1.37$ kullanmaktır. Bu yöntemle referanslanan basınç sinyalinin hassasiyeti ± 100 mbar kadardır. (**Brunt ve Pond, 1997**).

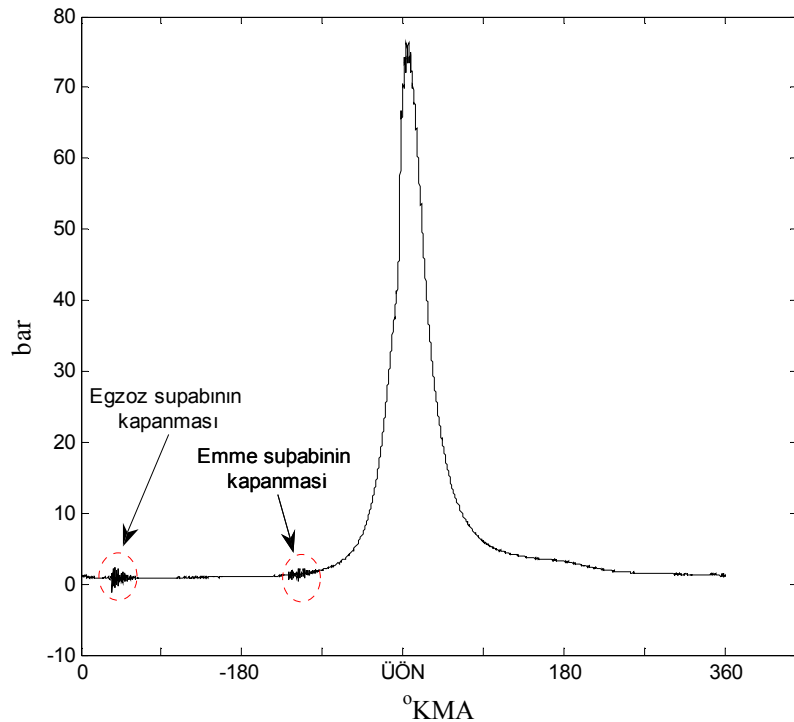
Anadolu Motor'da yapılan deneylerde emme basıncını ölçmek mümkün olmadığından referans basıncın belirlenmesi için 1 ve 4 numaralı metotlar test edilmiştir. 3000 devir/dk ve farklı yüklerde yapılan basınç ölçümünde, iki farklı referans kullanılmıştır. Buna göre tam yükte iki basınç sinyali arasında 9.7 mbar fark vardır ve politropik referans yöntemiyle hesaplanan basınç, referans olarak dış hava basıncının kullanıldığı durumdan daha azdır. Bu fark yarım yükte 7.5 mbar, yüksüz durumda ise 5 mbar'a düşmektedir.

Politropik üs yönteminin en belirsiz yanı kullanılması tavsiye edilen politropik üsün belli bir aralıkta verilmiş olmasıdır. Bu aralık için **Pischinger (2002)** 1.37-1.39 önermektedir. Yazar bu üç farklı politropik üs kullanılarak referanslanmış basınç sinyallerini karşılaştırdığında basıncın politropik üs arttıkça azaldığını görmüştür.

$n_p=1.37$ kullanılarak referanslanmış basınç ile $n_p=1.39$ kullanılarak referanslanan arasındaki fark ise ortalama 33.5 mbar kadardır. Bu fark oldukça küçük olduğundan deneylerde politropik üsle referans alma yönteminin $n_p=1.38$ kullanılarak uygulanmasının yeterli hassasiyeti sağlayacağına karar verilmiştir.

4.3 ÖLÇÜLEN SINYALLERİN FİLTRELENMESİ

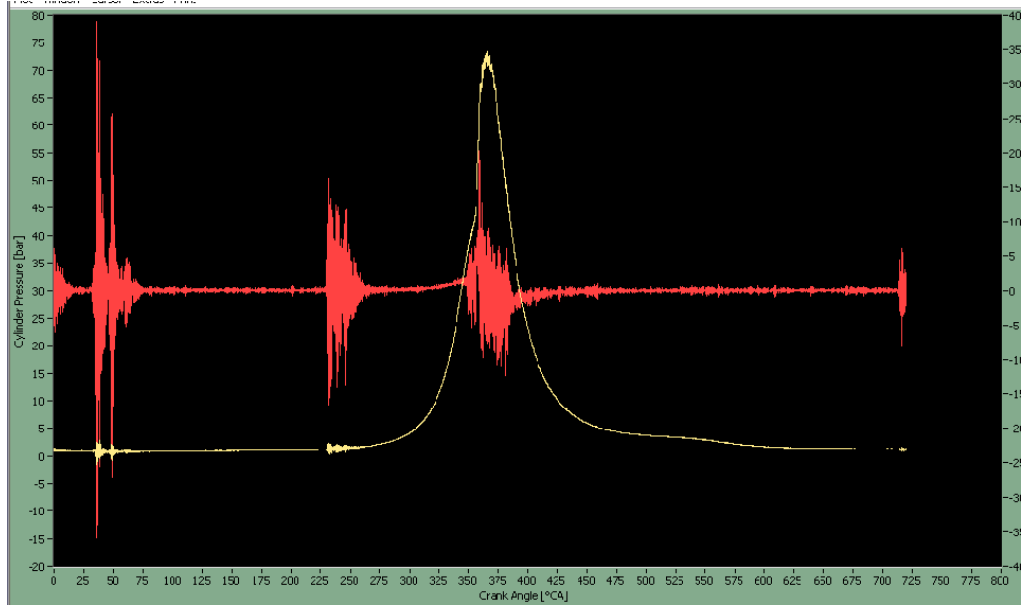
İndikasyon çalışmalarıyla elde edilen sinyallerde çoğunlukla direk hesaplanabilecek büyüklüklerin belirlenmesini zorlaştıracak kadar fazla gürültü bulunmamaktadır. Bununla beraber kullanılan yük yükselticisinde bulunan 180 kHz kesme frekanslı alçak geçirgen filtre ne yazık ki bazı gürültülerin basınç sinyalini bozmasını engelleyememektedir. Emme ve egzoz subabının kapanırken çıkardığı yapısal gürültü bunlardan biridir. Şekil 4.4'te 3000 devirde ve tam yükte yapılan deneylerde kaydedilen basınç eğrilerinden biri gözükmektedir. Deney yapılan motorda emme subabı AÖN'dan 52 °KMA sonra kapanmaktadır. Kapanma sırasında yarattığı basınç dalgalanmaları silindir basıncı sinyalinde açıkça görülmektedir.



Şekil 4.4 Emme ve egzoz subaplarının kapanma gürültüleri

Bu gürültülerin analizlerde yarattığı en büyük problem basınç gradyanının hesaplanmasında ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.5'te basınç sinyali üzerine çizdirilen

basınç gradyanı eğrisi görülmektedir. Subapların kapanma gürültüleri yüzünden basınç gradyanının maksimumu, egzoz supabının kapanma noktasına denk gelmektedir.

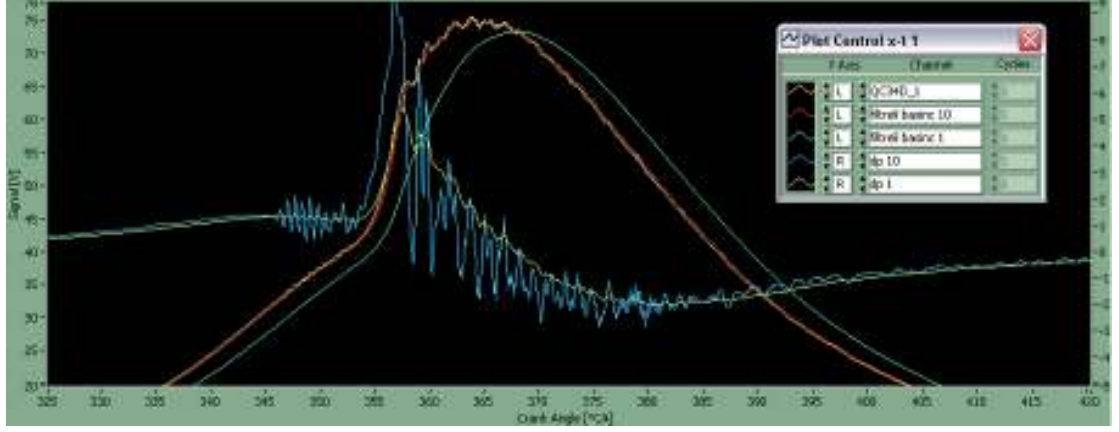


Şekil 4.5 Supapların kapanma gürültüsünden etkilenen basınç gradyanı

Basınç gradyanı ile ilgili işlemlerin yapılabilmesi için basınç sinyalinin filtrelenmeye ihtiyacı olduğu muhakkaktır. Burada dikkat edilmesi gereken konu filtrenin kesme frekansıdır. Şekil 4.6, basınç sinyaline 1 KHz ve 10 KHz kesme frekanslı alçak geçirgen filtre uygulanması sonucu basınç gradyanının ve orjinal basınç sinyalinin şeklini göstermektedir. Sarı renkli filtrelenmemiş basınç sinyali ile turkuaz renkli 1 KHz'le filtrelenen basınç sinyali arasındaki gecikme açıkça görülmektedir. Basınç sinyaline 1 kHz kesme frekanslı alçak geçirgen Bessel filtresi uyguladığında imep'in hesaplanmasında gerçekleşen hata %14.5 olmuştur (orijinal sinyalden hesaplanan imep: 7.07 bar, filtreli sinyalden hesaplanan imep: 8.01 bar). **Kuratle ve Marki (1992)** de çalışmalarında uygulanması gereken en düşük frekanslı filtrenin 10 kHz olduğunu, bu durumda imep'te %2'lik bir hatanın gerçekleştiğini açıklamışlardır. Yazarlar, 1 kHz filtre kullanıldığında ise hatanın % 12'lere varabileceğini belirtmektedirler.

Yazar, bu çalışmada lineer faz cevabı nedeniyle, 10 kHz kesme frekanslı alçak geçirgen Bessel filtresi kullanmayı uygun bulmuştur. Filtre, kullanılan veri toplama cihazının üreticisi olan SMETEC firmasından temin edilen COMBI indikatör

yazılımı yardımıyla sinyallere uygulanmıştır. Bu durumda gerçekleşen ortalama hata % 2.2 olmakla beraber maksimum basınç artışı ve artışın yeri düzgün bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Şekil 4.6’da görülebileceği gibi kırmızı renkli filtrelenmiş sinyal ile sarı renkli filtrelenmemiş sinyal arasındaki gecikme de oldukça azdır.



Şekil 4.6 Çeşitli filtrelerin basınç sinyalindeki geciktirici etkileri

5. İNDİKASYON ANALİZLERİ VE SONUÇLAR

Bu bölümde Anadolu Motor’da yürütülen 106M056 numaralı “ANTOR Tipli Dizel Motorların İki Döngülü Yanma Odası Kullanımıyla Modernizasyonu” adlı Tübitak Projesi kapsamında yapılan motor deneylerinden derlenen sonuçlar sunulacaktır. Proje kapsamında motor üzerinde çeşitli modifikasyonlar yapılmış ve her bir durum için indikasyon diyagramları toplanmıştır. Deneylerde silindir ve yakıt basıncının yanı sıra hava debisi, yakıt tüketimi, is ve püskürtme avansı gibi karakteristik özellikler de ölçülmüştür. İndikatör diyagramından elde edilen bilgilerle birleştirildiğinde analiz edilmesi gereken bilginin büyüklüğü gerçekten kayda değerdir.

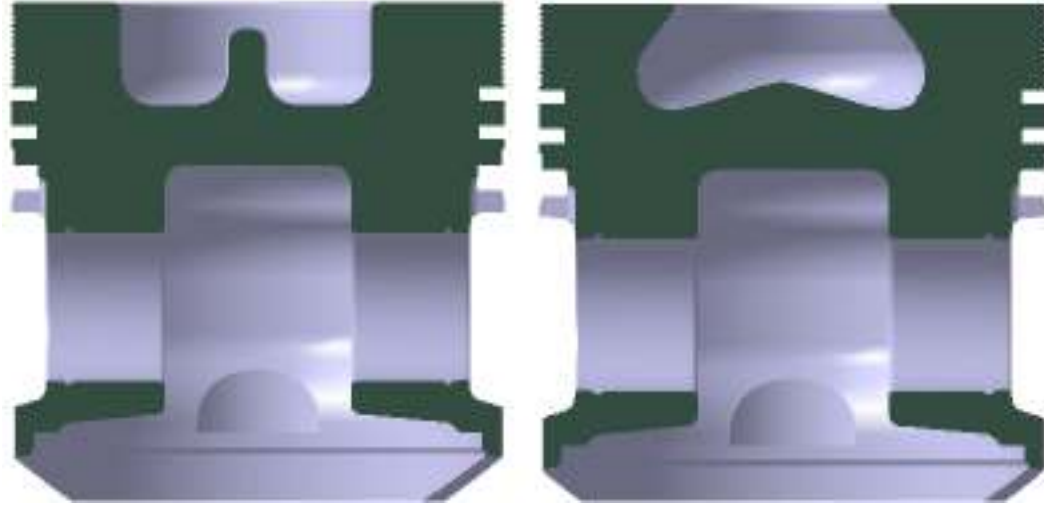
5.1 DENEY MOTORUNUN ÖZELLİKLERİ

Tablo 5.1 deneylerin gerçekleştirildiği ANTOR 3LD 510 tipi motorun özelliklerini göstermektedir.

Tablo 5.1 Deney motorunun özellikleri

ANTOR 3LD 510	
Tip	4 zamanlı dizel motor
Silindir sayısı	1
Strok hacmi	510 cm ³
Çap×Strok	85 mm × 90 mm
Şıkıştırma oranı	17.5 / 1
Emme supabının kapanması	AÖN’den 52 °KMA sonra
Egzoz supabının açılması	AÖN’den 46 °KMA önce
Biyel kolu uzunluğu	145 mm

Proje kapsamında bu motor üzerinde iki farklı yanma odası tipi denenecektir. Ayrıca 2 supaplı orijinal silindir kafası değiştirilerek 4 supaplı ve biri tek döngülü, diğeri çift döngülü iki farklı silindir kafası test edilecektir. Projenin bugün geldiği aşamada birinci yanma odasının standart 2 supaplı silindir kafasıyla testleri tamamlanmış olup, 4 supaplı tek döngülü silindir kafası motora bağlanmıştır ve deneyleri sürmektedir. İkinci yanma odası ise yapım aşamasındadır. Şekil 5.1 motorun orijinal yanma odasını ve modifiye edilmiş yanma odasını (bundan sonra MR1 olarak adlandırılacak) göstermektedir.



Şekil 5.1 Standart ve MR-1 yanma odaları

5.2 DENEY BULGULARI

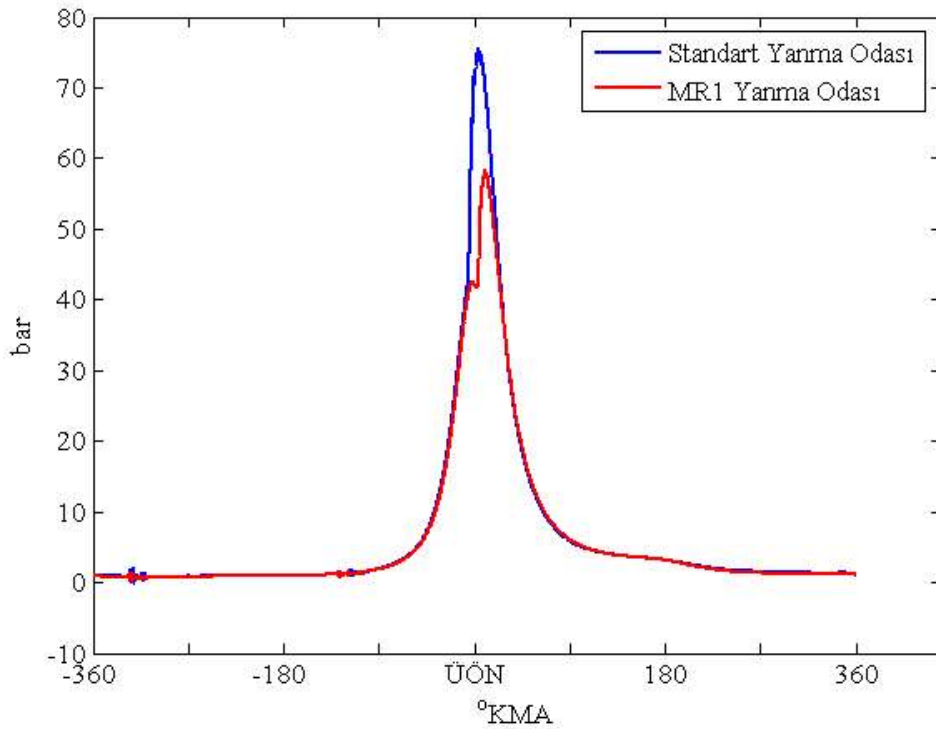
Standart ve MR-1 yanma odasında farklı statik püskürtme avanslarıyla gerçekleştirilen testler sonucunda en iyi performans ve en düşük is; standart yanma odası için 30 °KMA püskürtme avansında, MR-1 içinse 17.5 °KMA püskürtme avansında ortaya çıkmıştır. Tablo 5.2’de deney sonuçları ayrıntılı olarak görülmektedir.

Standart ve MR-1 yanma odasının araştırılması için çıkarılan indikatör diyagramından elde edilen sonuçlar analiz edildiğinde en çarpıcı fark MR-1 motorda maksimum basıncın çok daha düşük olmasıdır. Şekil 5.2’de 3000 devir/dk ve tam yükte her iki motorun silindir içi basınç eğrileri gösterilmektedir. Standart yanma odasında maksimum basınç 75.57 bar’a çıkarken, MR-1 yanma odasında basınç 58.45 bar’da kalmıştır. Bununla beraber motorun gücünde herhangi bir düşme

yaşanmamış olması da (hatta 0.2 bg'lik bir güç artışı Tablo 5.2'de görülebilir) dikkat çekicidir.

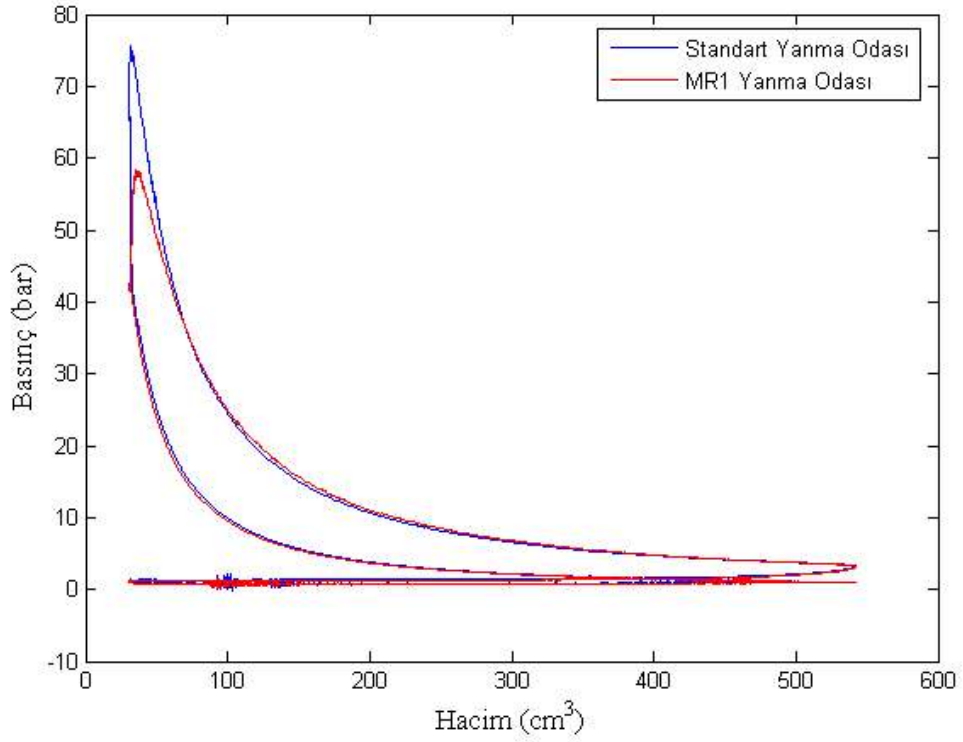
Tablo 5.2 3000 devir/dk ve tam yükte yapılan deney sonuçları

St. Avans °KMA	P _e , BG	b _e , g/kWsaat	k, m ⁻¹	λ	η _m
Standard Yanma Odası					
30	11.1	278	2.60	1.47	0.88
25	11.0	282	2.75	1.46	0.86
20	10.7	286	3.58	1.47	0.87
17.5	10.7	290	3.90	1.47	0.89
MR-1 Yanma Odası					
30	10.9	284	2.53	1.45	0.86
25	10.9	284	2.53	1.44	0.85
20	11.1	279	2.94	1.45	0.86
17.5	11.3	272	2.85	1.47	0.88



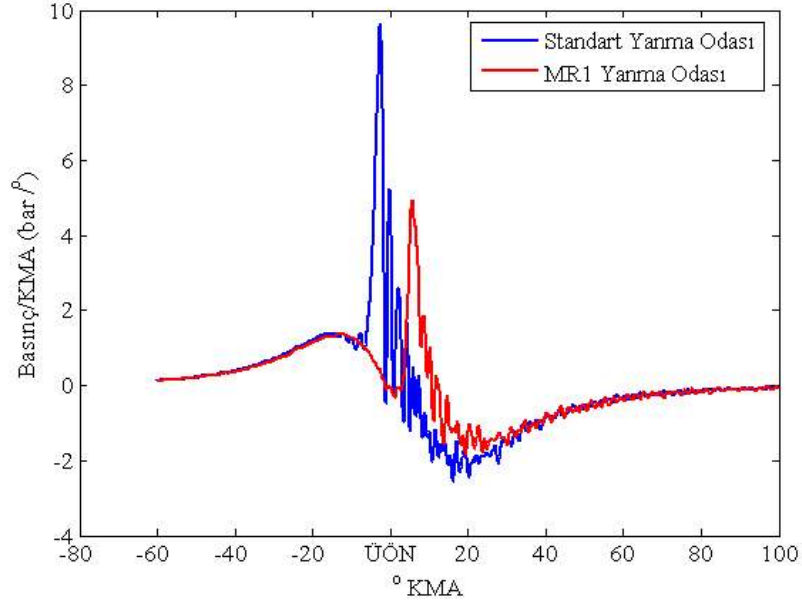
Şekil 5.2 Standart motor ve MR-1 motorun 3000 devir/dk ve tam yükte silindir basınç eğrileri

İki yanma odasında bu çalışma şartlarında efektif gücün değişmemesinin en önemli nedeni ortalama indike basınçların eşit kalmış olmasıdır. Maksimum basıncın yeri bu noktada önemli rol oynamaktadır. Standart motorda basıncın tepe noktası 364 °KMA'dayken, MR-1 yanma odası kullanıldığında bu nokta 369.7 °KMA'dır. Şekil 5.3'te de görülebileceği gibi standart yanma odasında her ne kadar maksimum basınç daha yüksek ise de MR1 yanma odasındaki, iş yapılan eğri altında kalan alan daha büyük olmaktadır. Bu da MR1 yanma odasında imep'in standart yanma odasına kıyasla aynı mertebede kalmasına sebep olmaktadır. Gerçekten de 3000 devir/dk'da ve tam yükte standart motor için imep 6.91, MR-1 motor içinse 6.94 olarak hesaplanmıştır.



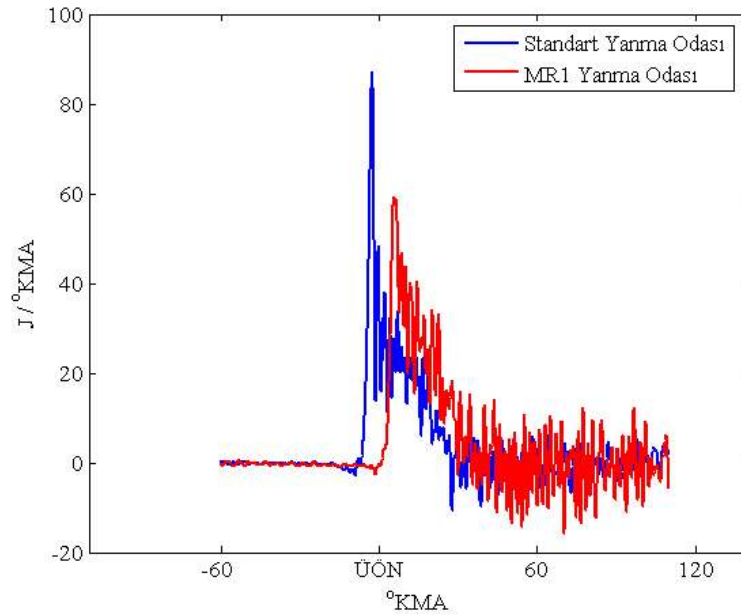
Şekil 5.3 Standart motor ve MR-1 motorun 3000 devir/dk ve tam yükte silindir basınç-hacim eğrileri

MR-1 motorun maksimum basıncının daha az olmasının nedeni iki motordaki basınç artış eğrilerinin karşılaştırılması sonucu daha iyi anlaşılmıştır. Şekil 5.4'de görüldüğü gibi maksimum basınç artışı standart motorda 9.13 bar/ °KMA iken MR-1 motorda sadece 4.58 bar/ °KMA'dır. Bu sonuçla beraber yanma hızının da analiz edilmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır. Şekil 5.5'te her iki motor için ısı açığa çıkış oranı görülmektedir.



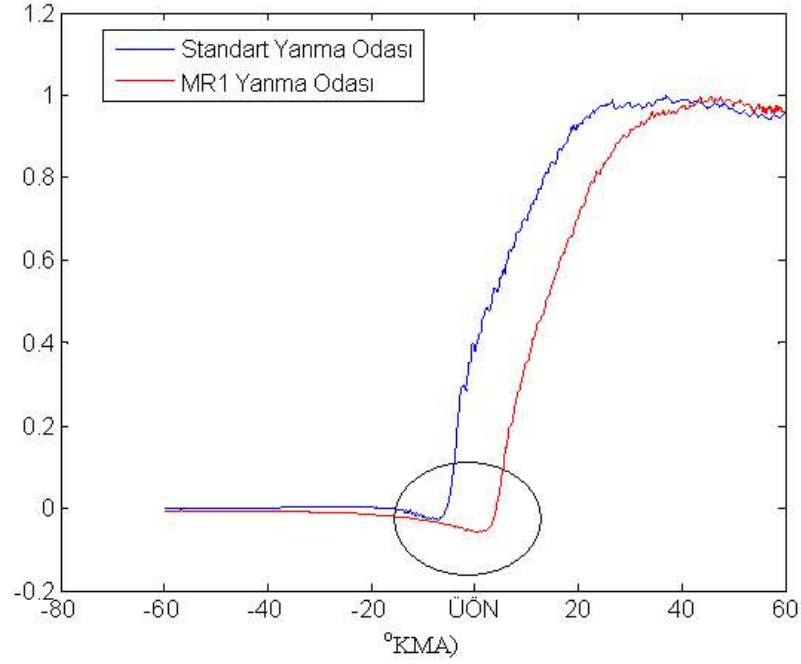
Şekil 5.4 Standart motor ve MR-1 motorun 3000 devir/dk ve tam yükte silindir basıncı değişimi eğrileri

Bu şekilden de görülebileceği gibi standarta yanma odasında ısı çok daha hızlı bir şekilde açığa çıkmaktadır (tepe noktası 87.07 J/°KMA). MR-1 motorda maksimum açığa çıkan ısı gradyanı 59.31 J/°KMA'da kalmıştır. Bu sonuçlara dayanarak MR-1 motorda yanmanın standart motora kıyasla daha yavaş gerçekleştiği söylenebilir.



Şekil 5.5 Standart motor ve MR-1 motorun 3000 devir/dk ve tam yükte açığa çıkan ısı oranı eğrileri

Yanmanın yavaşlamasındaki en önemli neden MR-1 yanma odasında yakıtın yanma odası duvarlarına sıvanacak şekilde püskürtülmesidir. Yakıt ile yanma odası duvarının temasında ısı iletim katsayısı daha yüksek olduğundan buharlaşma daha hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Bunun sonucunda daha homojen bir karışım elde edilmekte, standart motordaki ani patlamanın önüne geçilmektedir (**Mehdiyev ve diğ., 2008**).

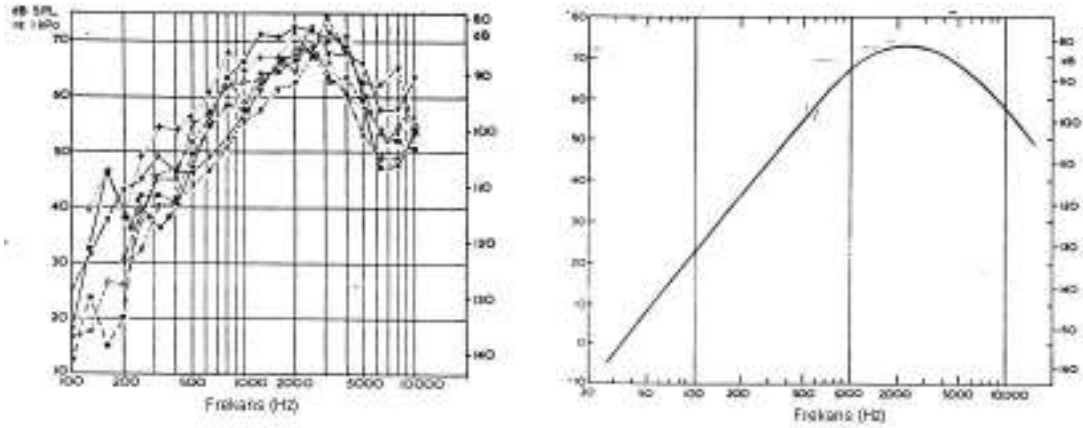


Şekil 5.6 Standart ve MR-1 motorda buharlaşma sırasında ortamdan alınan ısı

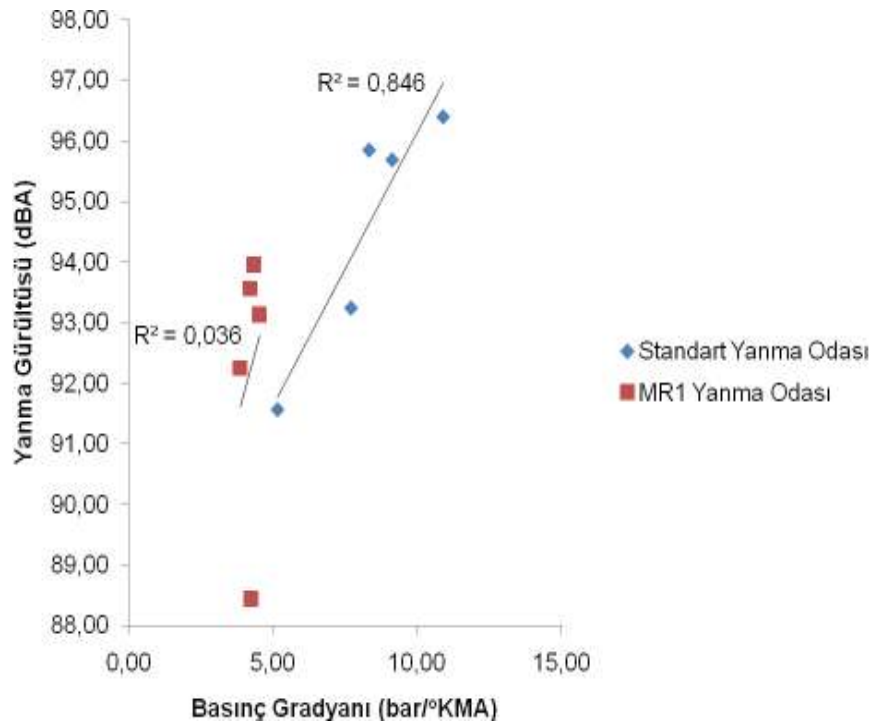
Şekil 5.6'da her iki motor için 3000 devir ve tam yükte açığa çıkan ısı eğrileri görülmektedir (normalize edilmiş halde). Yuvarlak çizilmiş bölgede yakıtın buharlaşması sırasında ortamdan çektiği ısı görülmektedir. MR-1 motorda buharlaşmanın daha hızlı gerçekleştiği bu grafikten de anlaşılabilir.

Bu sonuçlara dayanarak yanma gürültüsü hakkında da yorum yapmak mümkündür. MR-1 yanma odasında basınç artışı ve açığa çıkan ısının, standart yanma odasına kıyasla daha yavaş gerçekleşmesi, bu yanma odası kullanıldığında motorda yanmadan kaynaklanan gürültünün daha az olacağına işaret edebilir. Bu noktayı test etmek için yazar, COMBI yazılımından yararlanarak her iki yanma odasının 3000 devir/dk'da ve tam yükte yanma gürültülerini kıyaslamıştır. Bu değerler hesaplanırken ASR eğrileri (Average Structure Response – Ortalama Yapı Tepkisi) kullanılmıştır. ASR eğrileri, Şekil 5.7'de görüldüğü gibi, çeşitli motorlar için 1 metre

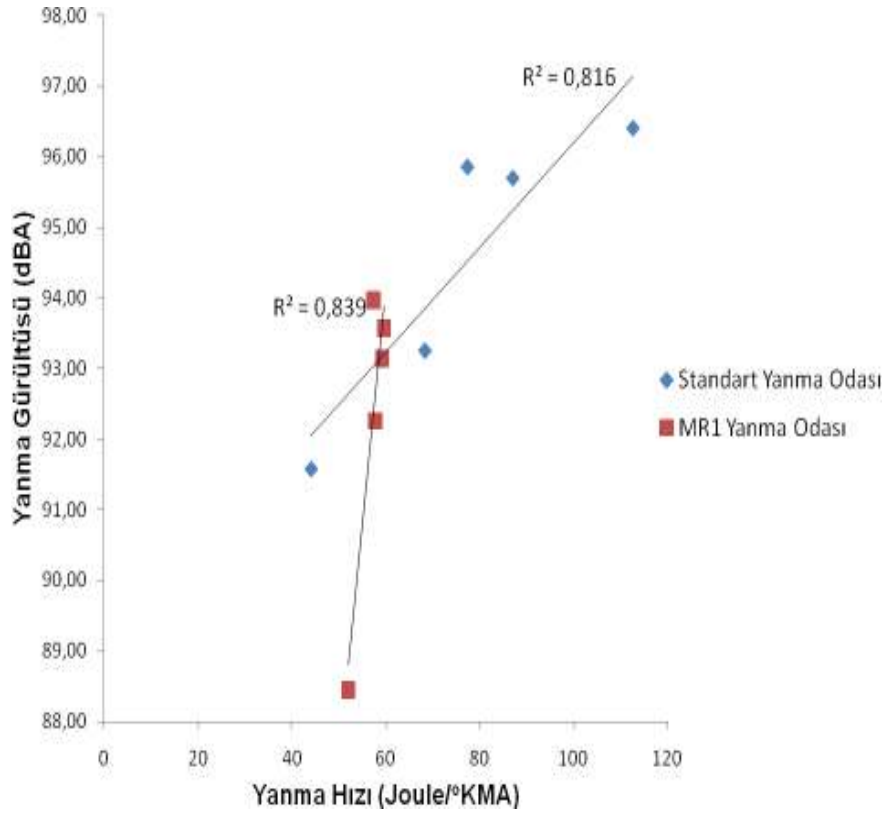
uzaklıkta ölçülen ses basınçlarının yanma odası basınçlarına oranları hesaplanarak ve tüm motorlar için elde edilen eğrilerin ortalamaları alınarak üretilmiştir (**Herbert ve Russel, 1982**). COMBI yazılımı elde edilen yanma odası basınç sinyalinden, ASR eğrisi yardımıyla, yanma gürültüsünü hesaplar ve bunu A ağırlıklı filtreden geçirerek sonuçları dB(A) olarak kullanıcıya gösterir. Bu yöntemle hesaplanan gürültü değerleri, kesin gürültü değerleri olarak algılanmamalıdır. Yazar bu yöntemi yalnızca iki yanma odasında yanma gürültüsünde gözlenebilecek farklılıklara işaret etmek amacıyla kullanmıştır.



Şekil 5.7 Çeşitli motorlardan ortalama alınarak hesaplanan ASR eğrisi



Şekil 5.8 Basınç gradyanı ve yanma gürültüsü



Şekil 5.9 Yanma hızı ve yanma gürültüsü

Şekil 5.7 ve 5.8’de her iki yanma odası için 3000 devir/dk’da, tam yükte basınç artışı ve yanma hızının yanma gürültüsüne olan etkisi görülmektedir. Basınç gradyanı ve yanma gürültüsü arasında lineer bir ilişki olduğunu söylemek zor olsa da ($R^2=0,036$), yanma hızı ile yanma gürültüsü arasında daha lineer bir ilişkiden bahsetmek mümkündür. Bu iki şekilden de görülebileceği gibi bu çalışma noktasında MR-1 yanma odası kullanıldığında yanma gürültüsünde 2 dB(A)’ya varan azalmalar gözlenebilir. Bununla birlikte yazar, bu sonuçların mikrofön ölçümleriyle doğrulanması gerektiğinin altını çizmektedir.

3000 devir/dk’da diğer yüklerde kaydedilen indikatör diyagramından alınan sonuçlar Tablo 5.3’te görülmektedir. Değerler incelendiğinde genel olarak bu bölümde belirtilen noktaların diğer yüklerde de geçerliliğini koruduğu görülebilir.

5.3 SONUÇLAR

Bu bölümde Anadolu Motor’da testleri yapılan farklı bir yanma odasının, standart yanma odasına kıyasla yanma olayına sunduğu avantajlar indikatör diyagramları yardımıyla gösterilmiştir. Kullanılan yanma odasında yakıtın pistonun duvarlarına

sıvanacak şekilde püskürtülmesi sonucunda buharlaşma hızı artmış, yanma daha yavaş ama daha kontrollü bir şekilde gerçekleşmiştir. İndikatör diyagramlarından elde edilen basınç gradyanı ve açığa çıkan ısı oranı eğrileri bu teoriyi desteklemektedir. Maksimum silindir basıncı düşmüş olmakla beraber basınç tepesinin ÜÖN'dan yaklaşık 10 °KMA kadar sonraya kaydığı görülmektedir (standart yanma odasında bu değer 1-4 °KMA arasında). Bu da maksimum momentin oluşması için daha uygun bir nokta olup efektif güçte bir miktar artışa sebep olmuştur (Mehdiyev ve diğ., 2008). Yanma hızının düşmesiyle birlikte yanma gürültüsünün de azalacağı beklenmektedir.

Tablo 5.3 3000 devirde diğer yüklerde yapılan deney sonuçları

Standart Motor									
Devir (rpm)	Yük %	Güç (HP)	IMEP (bar)	Maks basınç (bar)	Maks basınç yer (°KMA)	Maks dp/dKMA (bar / °KMA)	Maks dp/dKMA yer (°KMA)	Maks HR (J)	Maks HR oranı (J / °KMA)
3000	100	11,3	6,91	75,57	364	9,13	357,6	684,43	87,07
	75	8,42	5,34	74,38	361,7	10,9	357,9	472,3	112,7
	50	5,64	3,92	69,1	362,1	8,33	358	346,03	77,41
	25	2,86	2,63	64,57	362,6	7,7	358,1	254,68	68,34
	0	0,95	1,49	58,98	361	5,15	358,2	186,01	44,1
MR-1 Motor									
Devir (rpm)	Yük %	Güç (HP)	IMEP (bar)	Maks basınç (bar)	Maks basınç yer (°KMA)	Maks dp/dKMA (bar / °KMA)	Maks dp/dKMA yer (°KMA)	Maks HR (J)	Maks HR rate (J / °KMA)
3000	100	11,5	6,94	58,45	369,7	4,58	365,9	721,58J	59,31
	75	8,63	5,42	57,35	369,7	4,35	366,5	519,29	57,38
	50	5,74	4,02	54,05	370,9	4,22	367,3	381,65	59,62
	25	3,02	2,64	52,05	368,1	3,86	367,9	259,85	57,81
	0	0,9	1,52	53,42	365,7	4,24	365,3	168,65	52,04

6. ÖNERİLER

Bu çalışma bir dizel motorunda uygulanan indikasyon ölçümlerinden derlenerek hazırlanmış olup indikasyon çalışmalarını tüm temel yanlarıyla yansıtmak amacındadır. Bu nedenle yazar, çalışmalarında tecrübe ettiği önemli noktaları ve bu konulardaki görüşlerini, indikasyon ölçümlerinde bulunacak diğer araştırmacılara yardımcı olacağını veya en azından farklı bir bakış açısı getireceğini düşünerek, bu bölümde sunmayı uygun görmüştür.

İndikatör çalışmalarına başlamadan önce ÜÖN belirleme işlemine son derece önem gösterilmelidir. Anadolu Motor'da yapılan deneylerde kullanılan motor freni, motoru kendi tahrik edemediği için, ilk aşamada deneylerde marş motorundan yararlanmak zorunda kalınmıştır. Bu yöntemin en büyük dezavantajı motorun düşük hızda döndürülmesi (yaklaşık 400 devir/dk) ve bunun sonucunda TKA'nın yüksek çıkarak ölçüm belirsizliğini arttırmasıdır. Sonradan yapılan ÜÖN tayinlerinde motor 3000 devir/dk'ya hızlandırılmış, aniden yakıt kesilerek hız düşmeye başladığı anda ölçüm alınmıştır. Yüksek hızda yapılan bu ÜÖN tayini daha etkili olmakla beraber devrin tam olarak sabit kalmaması ölçümlerin hassasiyetini etkilemiştir. ÜÖN tayininin en hassas şekilde yapılması test edilecek İY motorun, bir elektrik motoruyla (motor frenine dahil veya harici olabilir) 2500 devir/dk sabit hızda döndürülmesi ve çok miktarda kompresyon çevriminin kaydedilmesidir (en az 100 çevrim). Birden fazla silindirli bir motorla deney yapılıyorsa test edilecek silindirin yakıt ve/veya ateşleme sistemini iptal etmek de uygun olacaktır.

Basınç gradyanı ile ilgili analizler yapılmak isteniyorsa silindir basıncı sinyalinin filtrelenmesi gerektiği kesin gibidir. Bunu yaparken orijinal sinyalle aradaki faz kaymasını önlemek için çift filtre uygulaması iyi bir çözümdür. Bu yöntemde, filtrelenen sinyal ters çevrilerek aynı filtreden tekrar geçirilir. Böylece başta sinyalde ortaya çıkan gecikme, ikinci filtrenin sebep olduğu ters faz kayması ile giderilmeye çalışılır. Bu yöntem için MATLAB'de filtfilt fonksiyonu kullanılabilir.

Püskürtmenin başladığı noktanın en hassas belirlenme metodu, enjektör iğnesinin hareketinin takip edilmesiyle olacaktır. Yakıt hattı basıncında oluşan dalgalanmalar ve sensörün enjektöre olan uzaklığı püskürtme başlangıcının yakıt basıncında hassas bir şekilde okunmasını engellemektedir.

Bu noktalarda önerilenlerin yapılmasıyla hem indikasyon deneyleri daha basitleşecek, hem de ölçümlerden alınan sonuçların hassasiyeti artacaktır.

KAYNAKLAR

- Brunt, M. F.J. ve Emtage, A. L.**, 1996. Evaluation of imep routines and analysis errors, *International Congress and Exposition*, Detroit, Michigan, 26-29 Şubat, SAE Paper 960609
- Brunt, M. F.J. ve Lucas, G. G.**, 1991. The Effect of Crank Angle Resolution on Cylinder Pressure Analysis, *International Congress and Exposition*, Detroit, Michigan, 25 Şubat-1 Mart, SAE Paper 910041
- Brunt, M. F.J. ve Pond, R.**, 1997. Evaluation of techniques for absolute cylinder pressure correction, *International Congress and Exposition*, Detroit, Michigan, 24-27 Şubat, SAE Paper 970039
- Burkhardt, C., Gnielka, M., Gossweiler, C., Karst, D., Schnepf, M., Berg, v. J. ve Wolfer P.**, 2003. Optimization of gas exchange by a suitable combination of pressure indicating, analysis and simulation, *9th Symposium The Working Process of the Internal Combustion Engine*, September 2003.
- Herbert, A.J. ve Russel M.F.**, 1982. Measurement of Combustion Noise in Diesel Engines, *Mechanical Engineering Technology*, April 1982, 33-39.
- Kuratle, R. H.**, 1993. Measuring spark plugs with integrated cylinder pressure sensor, ImechE Publication, C465/019
- Kuratle, R. H. ve Märki, B.**, 1992. Influencing parameters and error sources during indication on internal combustion engines, SAE Paper 920233.
- Kutlar, O. A.**, 1999. Dört zamanlı Otto (Rochas) çevrimli motorlarda kısmi yükte yakıt tüketimini azaltmak için yeni bir yöntem (periyot atlatmalı motor), *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Mehdiyev, R., Kutlar, O.A, Arslan, H.**, 2008. ANTOR 3 LD 510 Dizel motorunun MR-1 ve MR-2 yeni yanma odalı pistonları, 2 ve 4 Supap (2 emme ve 2 egzoz) uygulaması ile geliştirilmesi 2. Aşama Raporu, Antor-OTAM Projesi No: 07-0030, İstanbul.
- Mladek, M., Brechbühl, S. ve Mandel B.**, 1999. New possibilities in low pressure indication for charge cycle optimization in direct injection multivalve engines, Kistler Publications, USA
- Pischinger, R.**, 2002. Engine Indicating User Handbook, AVL List GmbH, Graz, Austria.
- Oliveira, A.B.S., Vianna, J.N.S., Neves, F.J.R. ve Sousa, M.T.**, 1996. Metrological study on the setting of the top dead center in internal combustion

engines, *V International Mobility Technology Conference & Exhibit*, Sao Paulo, Brazil, 7-9 Şubat.

Walter, T., Brechbühl, S., Gossweiler C., Schnepf, M. Ve Wolfer, P., 2004.

Pressure indicating with measuring spark plugs on a DI-Gasoline engine –state of technology-, *Kistler Special Prints*, 920-333e-09.04

Wenger, A., 1986. Stability of pressure transducers, *Technisches Messen* 53 (1986)

Vol 12., p. 447-454, R. Oldenbourg GmbH Publishers, München

Wytrykus, F., 2008. Kişisel görüşme.

Zhao, H. ve Ladammatos, N., 2001. Engine Combustion Instrumentation and Diagnostics, SAE Publications, USA.

EKLER

EK A. Basınç Sensörleri

Tablo A.1 AVL QC34D piezoelektrik basınç sensörünün özellikleri (silindir basıncı için)

Standard Specifications

Measuring Range	0...250 bar (3625 psi), 25 MPa
Lifetime	> 10 ⁸ load changes
Overload	300 bar (4350 psi), 30 MPa
Sensitivity (nominal)	19 pC/bar (1.31 pC/psi), 190 pC/MPa
Linearity	< ±0.2 % FSO
Natural Frequency	69 kHz
Acceleration	< 0.013 bar/g with cooling water
Sensitivity	< 0.003 bar/g without cooling water
Temperature coefficient of sensitivity	0.003 %/°C at 20...80°C (68...176°F)
Insulation Resistance at 20°C (68°F)	> 10 ¹³ Ω
Capacitance	10 pF
Cooling water	rate of flow min. 20l/h pressure max. 2.0 bar (29 psi)
Mass (without cable)	15 grammes
Mounting Torque	10 Nm (for adaptors refer to drawings)

Thermodynamic Specifications

Cyclic Temperature Drift	< ±0.3 bar
Load Change Drift	
Max. Zero-line Gradient dp/dt	4.5 mbar/ms
Permanent Zero-line Deviation	5 bar
IMEP-Stability	< 2 %

Tablo A.2 AVL GU21D piezoelektrik basınç sensörünün özellikleri (silindir basıncı için)

Standard Specifications

Measuring Range	0...250 bar (3625 psi), 25 MPa
Lifetime	> 10 ⁸ load changes
Overload	300 bar (4350 psi), 30 MPa
Sensitivity (nominal)	35 pC/bar (2.41 pC/psi), 350 pC/MPa
Linearity	< ±0.3 (0.1)* % FSO
Natural Frequency	85 kHz
Acceleration Sensitivity	< 0.002 bar/g
Shock Resistance	> 2000 g
Operating Temperature Range	up to 400°C (750°F)
Thermal Sensitivity Shift	20...400°C <±2% 200...300°C <±0.5%
Insulation Resistance at 20°C (68°F)	> 10 ¹³ Ω
Capacitance	8 pF
Mass (without cable)	6 grammes
Mounting Torque	3 Nm (for adaptors refer to drawings)

Thermodynamic Specifications

Cyclic Temperature Drift	< ±0.4 (0.2)* bar
Load Change Drift	
Max. Zero-line Gradient dp/dt	1,5 mbar/ms
Permanent Zero-line Deviation	8 bar
IMEP-Stability	< 2.5 %

*) Selected transducers GU21D (Art. No. GG0682) with specifications in () can be supplied upon request.

Tablo A.3 KISTLER 4045 ve 4075 piezoresistif basınç sensörleri (emme ve egzoz basınçları için)

Technische Daten

Typ 4043A... / 4045A...

Données techniques

Type 4043A... / 4045A...

Technical Data

Types 4043A... / 4045A...

		A1	A2	A5	A10	A20	A50	A100	A200	A500
Bereich/Gamme/Range	bar abs	0 ... 1	0 ... 2	0 ... 5	0 ... 10	0 ... 20	0 ... 50	0 ... 100	0 ... 200	0 ... 500
Überlast/Surcharge/Overload	bar abs	2,5	5	12,5	25	50	125	250	500	750
Linearität/Linéarité/Linearity	% FSO	≤±0,3	≤±0,3	≤±0,3	≤±0,3	≤±0,3	≤±0,3	≤±0,3	≤±0,3	≤±0,3
Empfindlichkeit/Sensibilité/Sensitivity	mV/bar	500	250	100	50	25	10	5	2,5	1
Eigenfrequenz/Fréquence propre/Natural Frequency	kHz	>14	>20	>30	>45	>70	>110	>150	>180	>200
Anzugsdrehmoment/Couple de serrage/Tightening torque	Nm	12 ... 20								
Gewicht/Poids/Weight	g	33								
Anschlussstecker/Fiche de connexion/Connector		Fischer Type SE 102A054								

Technische Daten

Typ 4073A... / 4075A...

Données techniques

Type 4073A... / 4075A...

Technical Data

Types 4073A... / 4075A...

		A10	A20	A50	A100	A200	A500
Bereich/Gamme/Range	bar abs	0 ... 10	0 ... 20	0 ... 50	0 ... 100	0 ... 200	0 ... 500
Überlast/Surcharge/Overload	bar abs	25	50	125	250	500	750
Linearität/Linéarité/Linearity	% FSO	≤±0,3	≤±0,3	≤±0,3	≤±0,3	≤±0,3	≤±0,3
Empfindlichkeit/Sensibilité/Sensitivity	mV/bar	50	25	10	5	2,5	1
Eigenfrequenz/Fréquence propre/Natural Frequency	kHz	>45	>70	>110	>150	>180	>200
Anzugsdrehmoment/Couple de serrage/Tightening torque	Nm	12 ... 20					
Gewicht/Poids/Weight	g	28					
Anschlussstecker/Fiche de connexion/Connector		Fischer Type SE 102A053					

Tablo A.4 KISTLER 4067 piezoresistif basınç sensörü (yakıt basıncı için)**Technical Data****Type 4067**

Range	bar	0 ... 1 000	0 ... 2 000	0 ... 3 000	0 ... 5 000
Overload	bar	1 500	2 500	3 500	6 000
Sensitivity (±0,5 % at 25 °C)	mV/bar	10	5	3,3	2
Natural frequency	kHz	>100	>100	>200	>200
Output signal:	Depends on measuring chain ^{o)}				
Output Impedance	Ω	10			
Supply (amplifier)	V DC	18 ... 30			
Zero (at 25 °C, 1 bar abs)	mV	<±100**			
Endpoint Linearity	% FSO	<±0,5			
Thermal error:					
Zero Shift	% FSO	<±2			
sensitivity shift	%	<±1			
Operating temperature range					
Sensor	°C	20 ... 120			
Amplifier Type 4618Ax	°C	0 ... 70			
Storage temperature	°C	-40 ... 140			
Operating temperature	°C	0 ... 120			
Tightening Torque	Nm	15	15	20	
Degree of protection	IP65				
Acceleration error	mbar/g	<10			
Service Life	Typical	>10 ⁷	>10 ⁷	>10 ⁷	>10 ⁶

^o Refer to table measuring chain

**) Tightenend to specified torque

EK B. Yükselticiler**Tablo B.1 AVL 3066 A02 yük yükselticisi**

Number of channels	2
Measurement range	100 to 16000 pC (for 10V output voltage)
Measurement range settings	1, 2, 5, 10, 20, 50 bar/V
Transducer sensitivity	1.00 ... 99.9 pC/bar
Linearity	< ± 0.01 % FSO
Upper cut off frequency (lowpass)	200 kHz (other values available: 2, 9, 20, 40, 90 kHz)
Output voltage range	- 10 V ... +10 V

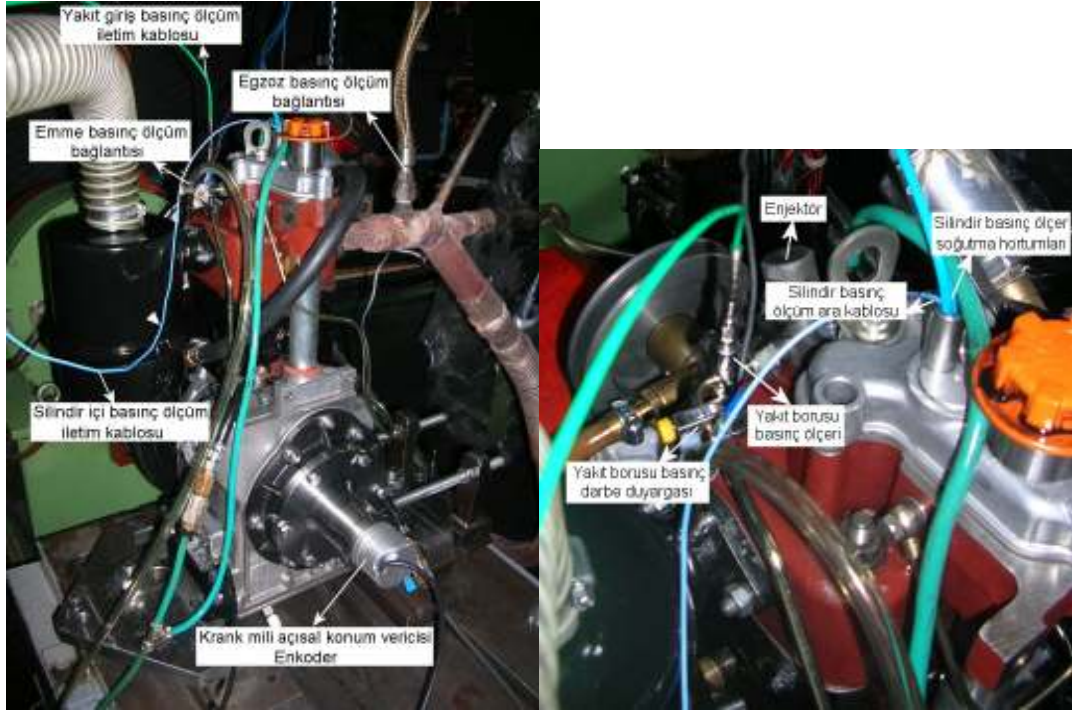
Tablo B.2 KISTLER 4665 gerilim yükselticisi**Technical Data**

Number of channels	–	2
Gain	–	10 ... 270
Additional gain	–	1 ... 10 (in 0,1)
Error (0 ... 60 °C)	%	<±0,3
typical	%	<±0,1
Output voltage	V	0 ... ±10
Output current	mA	0 ... ±2
Output impedance	Ω	10
Zero point adjustment range		
referred to input	mV	–100 ... 500
Output interference signal		
(0,1 Hz ... 1 MHz) Amplif. ≤100 Filter off	mV _{rms}	<20
(0,1 Hz ... 1 MHz) Amplif. ≤100 Filter 30kHz	mV _{rms}	<10
(0,1 Hz ... 1 MHz) Amplif. ≤270 Filter off	mV _{rms}	<40
(0,1 Hz ... 1 MHz) Amplif. ≤270 Filter 30kHz	mV _{rms}	<20
Frequency range (20V _{rms}), up to Amplif. 10 ... 270	kHz	0 ... >90
Low-pass filter	kHz	3, 10, 30
Linearity adjustment, second power	%	–3 ... 3 (in 0,1)
Overload threshold	V	~±10,5
Additional zero point shift	V	–8 or –10
or taring range	V	0 ... –10
Power supply (module)	–	via SCP
Weight	kg	0,32
Sensor		
Sensor supply (I ref)	mA	1 or 4
Maximum load (I ref: 4 mA)	kΩ	5
Minimum load (I ref: 1 mA)	kΩ	20
Interface, Sensor Detection		
Connection according to IEEE 1451.4	–	–
Max. length for extension cable	m	10
Temperature range for PiezoSmart-coupling	°C	–20 ... 85
Connections		
Signal inputs	Type 103 (Fischer 5 pin)	
Signal outputs	Type	BNC neg.
Actuation, outputs, supply	Type	64 pin DIN41612

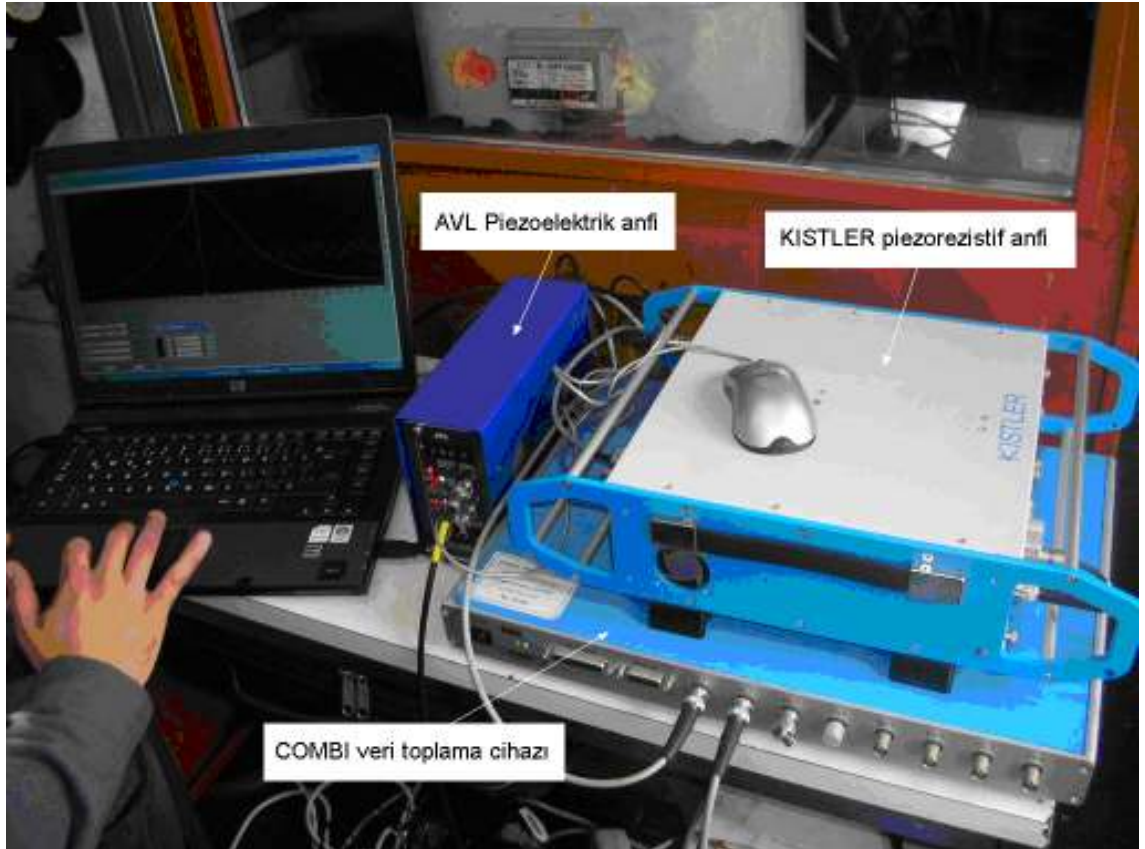
EK C. SMETEC Combi Veri Toplama Cihazı**Tablo C.1 Combi Teknik Özellikler**

Number of Analog Channels (basic version)	4
Maximum Number of Analog Channels	8
Upgrade Steps	4
Sampling Rate each Channel ¹	1 MHz
Accuracy/ Dynamic	14 Bit
Memory each Channel (basic version) ²	1 Mbyte
Upgrade Memory each Channel	1 Mbyte
PC-Slots	IEEE1394
WINDOWS System	WINDOWS 2000/XP
Variable Input Ranges	to +/- 10 V
Integrated Encoder Device	Ok
galvanically separated inputs	Ok
Data Acquisition	Crank Angle or Time
Power Supply	12 V DC
Field of Application	Test Bench and Vehicle Application

EK D. Deney Sisteminin Fotoğrafları



Şekil D.1 Deney motoru üzerinde yer alan ölçüm ile ilgili elemanlar



Şekil D.2 Deney düzeneği ve veri toplama ünitesinin genel görünümü

ÖZGEÇMİŞ

Hakkı Can KOMAN 1981 yılında Ankara’da doğdu. İlköğreniminin 2 senesini Ankara’da Ayşe Abla İlkokulu’nda; kalanını ise İstanbul’da Şişli Terakki İlkokulu’nda tamamladı. Orta öğrenimi ve Liseyi Özel Koç Lisesi’nde okuduktan sonra 1999 yılında İTÜ Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Mühendisliği Bölümüne başladı. 2004 yılında bu bölümden Fizik Mühendisi unvanıyla mezun oldu. Aynı yıl İTÜ Makina Mühendisliği Otomotiv Programında yüksek lisansına başladı. Yüksek lisans eğitimini devam ettirirken 2004-2006 yıllarında Otomotiv Teknoloji Araştırma Geliştirme Merkezinde yardımcı teknik personel olarak çalıştı. 2006-2007 döneminde Sabancı Üniversitesi’nin yürüttüğü DRIVE SAFE-Güvenli Sürüş projesinde yer aldı ve proje kapsamında yapılan deneylerini koordine etti. 2007’de “ANTOR Tipli Dizel Motorların İki Döngülü Yanma Odası Kullanımıyla Modernizasyonu” projesinde görev alarak motor indikasyonu çalışmalarıyla uğraştı. Aynı yıl yurt dışında yapılan Formula SAE yarışmalarına katılmak üzere üretilecek bir yarış arabasının tasarım grubunda yer aldı. Bugün İTÜ Formula SAE ekip başkanı olarak Formula SAE projesini sürdürmektedir.