

T. C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MODERN TAŞIT TEKNOLOJİSİNDE EMİSYON AZALTMA YÖNTEMLERİ

MURAT AYHANER

95253

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA - 2000

T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

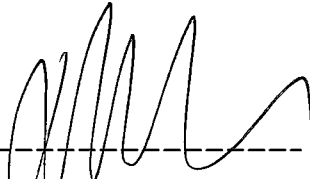
MODERN TAŞIT TEKNOLOJİSİNDE EMİSYON AZALTMA
YÖNTEMLERİ

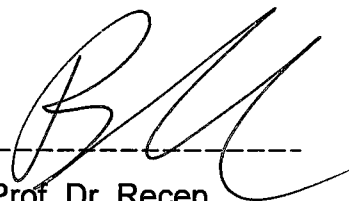
MURAT AYHANER

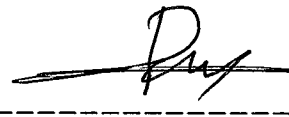
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA, 2000

Bu tez 06/12/2000 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


Doç. Dr. Habib UMUR
(Danışman)


Prof. Dr. Recep
YAMANKARADENİZ
(Üye)


Doç. Dr. Recep EREN
(Üye)

ÖZET

Bu çalışmada, tek noktadan yakıt enjeksiyonlu, 4 zamanlı, 4 silindirli benzinli bir motorun Faz 3 emisyon seviyesine ulaştırılması amaçlanmıştır. Bunu yapmak için, Faz 1 seviyesinde araç gövdesi altına yerleştirilen katalitik konvertöre ilave olarak eksoz manifoldu çıkışına ikinci bir 3-yollu katalitik konvertör yerleştirildi. İkinci katalitik konvertör motor geri basınç değerlerini değiştirdiğinden motor kalibrasyon parametreleri yeniden kalibre edildi. Motor performans ve emisyon değerlerinin optimizasyonu yapıldı. Aracın motor bölmesinde, Faz 3 katalitik konvertörünün sıcaklık olarak çevresindeki diğer parça ve aksamlara olan etkisi araştırıldı ve motor bölmesi sıcaklık haritaları çıkarıldı. Faz 1'den Faz 3'e geçerken motorun performans değerlerinde %4'lük bir kötüleşme olduğu gözlemlendi. Faz 1 ve Faz 3 araç emisyon deneyleri emisyon laboratuvarında Avrupa emisyon çevrimi kullanılarak gerçekleştirildi. Faz 1 çözümüne göre CO emisyonlarında %42, HC emisyonlarında %43 ve NO_x emisyonlarında %90 iyileşme sağlandı. Tek noktadan enjeksiyonlu bir motorla Avrupa Faz 3 emisyon seviyesine ulaşılabileceği görüldü.

Bu çalışmayı başka araçlara da uygulayabilmek için motor parametreleri kalibrasyonu ve sıcaklık testleri o araçlar içinde tekrarlanmalıdır. Burada karşılaşılan %4'lük performans kaybını telafi etmek için farklı geometrilerde katalitik konvertörler denenebilir. Ayrıca ekonomi amacıyla, iki katalitik konvertör yerine farklı miktarlarda aktif metal yüklemesinin emisyonlara olan etkisi araştırılarak tek bir katalitik konvertörle aynı sonuçların alınıp alınamayacağı araştırılabilir.

ABSTRACT

The aim of this study is to achieve Phase-3 exhaust emission level with a single point injection, 4 stroke, 4 cylinder, petrol engine so that 3-way catalytic converter has been located next to the exhaust manifold. Engine back-pressure was changed by a second catalytic converter and then engine parameters have been re-calibrated to optimize engine performance and exhaust emissions. The temperature mapping of the engine compartment of the car for Phase 3 solution has been obtained to investigate the critical points around the catalytic converter. Engine performance reduced around 4% in Phase 1 comparing to Phase 3 solutions. Emission measurements of Phase 1 and Phase 3 solutions have been carried out in the emission laboratory of Tofaş utilizing European test cycle. A considerable amount of emission reduction has been achieved by Phase 3 solution (with respect to Phase 1 solution; 43% in HC emissions, 42% in CO emissions, 90% in NO_x emissions). It was also found that a single point injection petrol engine gave rise to the requirements of Phase 3 emission level.

The solution mentioned in this study can also be applied to other type of cars provided that the engine control unit mapping and temperature check around the catalytic converter must be repeated. Various active materials and catalytic converter geometry can also be investigated to reduce the cost and to recover the performance loss, respectively.

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|-----|
| ÖZET | i |
| ABSTRACT | ii |
| İÇİNDEKİLER | iii |
| ŞEKİLLERİN DİZİNİ | v |
| ÇİZELGELERİN DİZİNİ | vi |
| 1 GİRİŞ | 1 |
| 2 YAYIN TARAMASI | 4 |
| 2.1 Giriş | 4 |
| 2.2 İçten Yanmalı Motorlar Üzerinde Yapılan Çalışmalar | 4 |
| 2.2.1 Benzinli Motorların Çalışma Prensibi | 5 |
| 2.2.2 Motor Tasarım ve Çalışma Parametreleri | 10 |
| 2.2.3 İçten Yanmalı Motorlarda Yanma | 16 |
| 2.2.4 Motor Tasarımı ve Emisyon | 25 |
| 2.2.5 Yanma Sonrası Alınan Önlemler ve Katalitik Konvertörler | 28 |
| 2.2.6 Faz 3 İçin Uygulanması Düşünülen Araç Teknolojileri | 33 |
| 2.3 Emisyon Parametreleri ve Çevresel Etkileri | 35 |
| 2.3.1 Avrupa Birliği Emisyon Standartları | 37 |
| 2.3.2 Türkiyede Emisyona İlişkin uygulamalar | 39 |
| 3 MATERYAL VE YÖNTEM | 41 |
| 3.1 Giriş | 41 |
| 3.2 Teorik Çalışma | 41 |
| 3.3 Deney Düzenineğinin Tanıtılması | 48 |
| 3.4 Akış ve Ölçme Prensipleri | 54 |
| 4 ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA | 59 |
| 4.1 Giriş | 59 |
| 4.2 Deney Sonuçlarının İncelenmesi | 59 |
| 4.2.1 Motor Performans Değerlerinin Karşılaştırılması | 59 |
| 4.2.2 Araç Motor Bölmesi Sıcaklık Dağılımı | 63 |

| | |
|-------------------------------------|----|
| 4.2.3 Eksoz Emisyon Deneyleri | 66 |
| 4.3 Hata Analizi | 71 |
| 4.4 Sonuç | 72 |
| 5 SONUÇ VE TAVSİYELER | 74 |
| 6 KAYNAKÇA | 76 |
| 7 TEŞEKKÜR | 78 |
| 8 ÖZGEÇMİŞ | 79 |



ŞEKİLLERİN DİZİNİ

| | |
|--|----|
| Şekil 2.1. Benzinli motor karbüratör sistemi | 5 |
| Şekil 2.2. Tek noktadan yakıt püskürtme sistemi (SPI) | 6 |
| Şekil 2.3. Çok noktadan yakıt püskürtme sistemi (MPI) | 7 |
| Şekil 2.4. Tek noktadan enjeksiyonlu elektronik kontrollü sistemi oluşturan parçalar | 8 |
| Şekil 2.5. Sübap zamanlama diagramları | 10 |
| Şekil 2.6. Silindir, piston, biyel kolu ve krank mili geometrisi | 11 |
| Şekil 2.7. Dört zamanlı motorlarda gerçek p-V diagramı | 14 |
| Şekil 2.8. Yanma sırasında silindir içindeki alevin şematik gösterimi | 17 |
| Şekil 2.9. Stokiyometrik $\left(\frac{A}{F}\right)_s$ 'nin yakıt H/C mol oranına göre değişimi | 22 |
| Şekil 2.10. Buji pozisyonunun yakıt sarfiyatı ve HC emisyonuna etkisi | 26 |
| Şekil 2.11. Silindir başına 4 sübapın yakıt sarfiyatı ve HC emisyonuna etkisi | 27 |
| Şekil 2.12. Katalitik konvertör sistemleri | 29 |
| Şekil 2.13. Üç-Yollu katalitik konvertörlerde dönüşüm verimliliği | 31 |
| Şekil 2.14. Üç-yollu katalitik konvertör sisteminin iç yapısı | 32 |
| Şekil 3.1. Katalitik konvertör sıcaklığının fonksiyonu olarak CO ve HC'ların katalitik konvertörde dönüşüm verimi | 43 |
| Şekil 3.2. Faz 3 eksoz sistemi ve katalitik konvertörlerin yerleşimi | 45 |
| Şekil 3.3. Motor kontrol ünitesi çalışma diagramı | 47 |
| Şekil 3.4. Faz 3 katalitik konvertörün motora bağlantısı | 49 |
| Şekil 3.5. CAR motor kontrol ünitesi kalibrasyon düzeneği | 52 |
| Şekil 3.6. Emisyon şasi dinamometresi | 53 |
| Şekil 3.7. Sabit hacim örnekleme sistemi | 57 |
| Şekil 4.1. Faz 3 ve Faz 1 motor tork değerleri karşılaştırması | 61 |
| Şekil 4.2. Faz 3 ve Faz 1 motor güç değerleri karşılaştırması | 61 |
| Şekil 4.3. Faz 3 ve Faz 1 yakıt sarfiyat değerleri karşılaştırması | 62 |
| Şekil 4.4. Faz1 ve Faz 3 eksoz basınç karşılaştırması | 62 |
| Şekil 4.5. Faz 3 katalitik konvertör sıcaklık değerleri (yolda) | 65 |
| Şekil 4.6. Faz 3 katalitik konvertör sıcaklık değerleri (laboratuvarda) | 65 |
| Şekil 4.7. Avrupa eksoz emisyon test çevrimi | 67 |
| Şekil 4.8. Karbonmonoksit CO karşılaştırması | 69 |
| Şekil 4.9. Hidrokarbon HC karşılaştırması | 70 |
| Şekil 4.10. Azotoksit NO _x karşılaştırması | 70 |

ÇİZELGELERİN DİZİNİ

| | |
|--|----|
| Çizelge 2.1. Kuru havanın ana bileşenleri | 18 |
| Çizelge 2.2. Faz 3 benzini teknik özellikleri | 20 |
| Çizelge 2.3. Faz 1, Faz 2 ve Faz 3 limit değerleri | 33 |
| Çizelge 2.4. Faz 4 Emisyon limitleri | 38 |
| Çizelge 3.1. Avrupa Faz 3 (EEC 98/69) eksoz emisyon limitleri | 44 |
| Çizelge 4.1. Faz 3 motor test bankosu verileri | 60 |
| Çizelge 4.2. Motor bölmesi sıcaklık dağılımı | 64 |
| Çizelge 4.3. Faz 1 aracının yeni emisyon çevrimi (NEDC) test sonuçları | 67 |
| Çizelge 4.4. Faz 3 aracının yeni emisyon çevrimi (NEDC) test sonuçları | 68 |



1 GİRİŞ

Hızlı nüfus artışı ve kişi başına tüketilen enerji miktarının her geçen gün artması, Dünya'da çevre ve insan sağlığını koruma çalışmalarını son on onbeş yılın en önemli uğraşlarından biri haline getirmiştir. Otomobil özellikle gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde insan hayatının vazgeçilmez bir parçasıdır. Son 50 yılda dünya'da otomobil ve hafif ticari araçlara olan talep beş kat artarak 10 milyon adet/yıl'dan 50 milyon adet/yıl'a ulaşmıştır. Araçlarda (adı üstünde motorlu taşıtlarda) halen %100'e yakın güç kaynağı olarak yaklaşık 100 yıl önce bulunan içten yanmalı motorlar, yakıt olarak da petrol ve petrol ürünleri kullanılmaktadır. Motor veriminin ve yanma hızının artırılması için motor tasarımında günümüze kadar bir çok yenilikler yapılmıştır. Özellikle malzeme ve elektronik alanındaki teknolojik gelişmeler motor ve araç teknolojisine uygulanmıştır. Motor veriminin artırılması için bir yandan farklı malzemelerden daha hafif parçalar (piston, biyel kolu, krank mili, silindir blok vs.) tasarlanırken öte yandan yanma verimini artırmak için değişik geometrilere yanma odaları ve emme sistemleri (silindir başına dört ve beş tane sübap uygulamaları, sürekli değişken kam profilleri vs.) tasarlanmıştır. Yanma veriminin artırılması için ayrıca ateşleme sistemleri geliştirilerek elektronik ateşlemeye, yakıt besleme sistemlerinde de karbüratörden enjeksiyonlu sistemlere geçilmiştir. Günümüzde artık yakıt ekonomisi ve emisyonları azaltma konusu otomotiv teknolojisinin gelişimine yön veren iki baskın unsur durumundadır. Otomobil sayısının hızlı bir şekilde artması otomobillerin çevreye olan etkiside artırdığından çevreyi daha az kirleten otomobil üretimi artık bir zorunluluk haline gelmiştir. Dünya'da motorlu araçlardan kaynaklanan emisyonlarla ilgili ilk sınırlama ABD'nin Kaliforniya eyaletinde 1966 yılında uygulamaya konulmuştur. Bu uygulamayı daha sonra ABD geneli, Japonya ve Avrupa ülkeri izlemiştir. Avrupa Birliği'nde ise EEC 70/220 direktifiyle 1970 yılında ilk kez motorlu taşıtların motorlarından çıkan CO (karbonmonoksit) ve yanmamış HC (hidrokarbon)'ların limitleri belirlenmiştir. Daha sonra bir çok değişime uğrayan bu normlar en son EEC 98/69 direktifiyle OBD (*On Board Diagnostic*) sistemlerinin kullanılmasını zorunlu kılar hale gelmiştir. Motorlu taşıtlardan,

özellikle otomobillerden kaynaklanan emisyonların azaltılması için Avrupa ülkelerinde ciddi anlamda ilk uygulama Faz 1 veya EEC 91/441 direktifinin 1993 yılında uygulamaya konulmasıyla yapılmıştır. Üç-yollu katalitik konvertörün kullanımını zorunlu kılan bu uygulamayla, eksoz gazındaki karbonmonoksit, hidrokarbon ve azotoksitler %90 oranında azaltılmıştır. Yine Faz 1 uygulamasıyla araçtan buharlaşarak ortama yayılan benzin buharı yani hidrokarbonlar kontrol altına alınmıştır. Bunu yapmak için yakıt sistemini oluşturan parçaların malzemelerinde ve bağlantılarında iyileştirmeler yapılmıştır. Aynı zamanda araç kullanılmazken benzin deposunda buharlaşan hidrokarbonları atmosfere atmadan muhafaza edebilmek için aktif karbon filresi uygulaması başlatılmıştır. Faz 2 veya EEC 94/12 direktifi Avrupa'da 1996 yılında uygulamaya konulmuştur. Faz 2'nin gereklerini sağlayan bir araç donanım olarak Faz 1'le aynı (üç-yollu katalitik konvertör ve aktif karbon filresi) olmasına rağmen motor kontrol ünitesinde yapılan elektronik değişikliklerle üç-yollu katalitik konvertörün daha kısa sürede devreye girmesi sağlanarak eksoz emisyonlarında iyileşmeler sağlanmıştır. Faz 2 ile birlikte yeni bir binek araçtan yayılan kirleticilerin miktarı 1970'li yıllardaki standartlarla karşılaştırıldığında %90 azaldığı görülmektedir.

Tek bir taşıttan kaynaklanan emisyon miktarı önceki yıllara göre önemli oranda düşürülmesine rağmen artan trafik yoğunluğundan dolayı Avrupa'da hedeflenen hava kalitesini yakalayabilmek için ilave önlemler alınması gereği görülmüştür. Böylelikle emisyonla mücadelede yeni standartları belirlemek için Avrupa *Auto-Oil* programı ortaya çıkmıştır. *Auto-Oil* programıyla, hedeflenen hava kalitesini yakalayabilmek için değişik çözümlerin emisyon azaltma potansiyeli ve maliyeti incelenmektedir. Bu program içinde ileri araç teknolojisi ve yakıt kalitesinin yanı sıra düzenli satış sonrası kontrol, düzenli bakım, trafik düzeni, yol ücretlerinin ödenmesi, şehir içi toplu taşımanın yaygınlaştırılması gibi konular da bir bir ele alınmaktadır. Bu çalışmalar sonunda Avrupa'da araç teknolojisine ilişkin olarak Faz 3 veya 98/69/EC direktifi oluşturulmuştur. Bu direktifle eksoz emisyon limitleri Faz 2'ye göre % 50 civarında azalırken aynı zamanda araçlarda EOBD (*European On Board Diagnostic*) sistemini zorunlu kılınmaktadır. Avrupada 2001 yılından itibaren üretilen tüm araçlar Faz 3'e

uygun olacaktır. Türkiye ise Gümrük Birliği anlaşmaları kapsamında 2001 yılından itibaren Avrupa'daki güncel normlara (AB direktiflerine) uymak durumundadır. Bu nedenle 2001 yılı başından itibaren Türkiye'de üretilen ve satılan araçların Faz 3 Avrupa direktifine uyumları zorunlu hale gelecektir. Yalnız, Türkiye'de EOBD sistemi için uygun kalitede yakıt temin edilemediği için EOBD'ye ilişkin hükümler uygun benzin sağlanıncaya kadar askıya alınmıştır. Bu yüzden Türkiye için geliştirilen Faz 3'e uygun araç teknolojisi Avrupa için geliştirilen Faz 3'e uygun araç teknolojisinden farklılıklar gösterebilmektedir.

Faz 1 uygulamasıyla birlikte benzinli araçların eksozuna takılan üç-yollu katalitik konvertör motordan çıkan zehirli atıkların (HC, CO ve NOx) yaklaşık %90'nını bertaraf etmektedir. Yalnız pratikte bir çok aracın katalitik konvertörünün çeşitli nedenlerle (özellikle uygunsuz kullanımdan dolayı) devre dışı kaldığı sadece Türkiye'de değil Almanya, Fransa, İtalya gibi Avrupa ülkelerinde de saptanmıştır. Avrupa'da Faz 3 EOBD uygulamasıyla araçta emisyonu etkileyebilecek herhangi bir arıza hemen teşhis edilerek kullanıcı uyarılacak ve arızalı aracın uzun süre trafikte dolaşması önlenecektir. Bunun için Avrupa çözümlerinde üç-yollu katalitik konvertör çok noktadan enjeksiyonlu motorlara genellikle eksoz manifolduna yakın bir şekilde yerleştirilmiştir. Diagnos için katalitik konvertör öncesi ve sonrası olmak üzere iki tane lambda (veya oksijen) sensörü kullanılmıştır. Bu çalışmada ise Türkiye pazarına yönelik olarak daha ekonomik (hem yatırım hem de birim parça fiyatı olarak) tek noktadan enjeksiyonlu bir motor Faz 3 normuna uygun hale getirilmiştir. EOBD sistemi olmadığı için tek noktadan enjeksiyonlu motor kullanılması hedeflenmiştir. Faz 1 çözümünde kullanılan üç-yollu katalitik konvertör dayanabileceği maksimum sıcaklık nedeniyle motordan yaklaşık 1500 mm uzağa konulmaktadır. Katalitik konvertör 250°C'de devreye girip 400°C civarında tam olarak etkili olabilmektedir. Faz 1'de katalitik konvertör devreye girinceye kadar eksoz gazlarının %50'si hiç işlem görmeden dışarı atılmaktadır. Burada Faz 3'e uyabilmek için yüksek sıcaklığa dayanıklı küçük bir katalitik konvertör eksoz manifoldu çıkışına konularak çok çabuk devreye girmesi planlanmıştır. Sistemde bir tane de oksijen sensörü kullanılmıştır.

2 YAYIN TARAMASI

2.1 Giriş

İçten yanmalı motorların amacı yakıtın ihtiva ettiği kimyasal enerjiyi mekanik güç haline dönüştürmektir. İçten yanmalı motorları dıştan yanmalı motorlardan ayıran özelliği, yakıtın yanması veya okside olması sonucunda ortaya çıkan enerjinin motorun içinde gerçekleşmesidir. Motorun çalışmasını sağlayan gerçek akışkanlar, yanma öncesi hava-yakıt karışımı ve yanma sonrası ise yanmış ürünlerdir. İstenilen gücün ortaya çıkmasını sağlayan iş transferi, bu akışkanlar ve motorun mekanik parçaları arasında oluşur. İçten yanmalı motorlar, çalışma prensiplerine göre buji ateşlemeli veya benzinli, sıkıştırma ateşlemeli veya dizel diye ikiye ayrılırlar. Bu motorların geçmişleri 1876'da ilk Nicolaus A. Otto'nun benzinli motoru, 1892'de ise Rudolf Diesel'in dizel motoru bulmasıyla başlar. Otto'nun bu dört zamanlı motorunda sonra 1880'li yıllarda İngiltere ve Almanya'da birçok mühendis (Karl Benz - Almanya) emme ve eksoz işlemlerinin iş zamanı sonunda ve sıkıştırma zamanının başında yapıldığı iki zamanlı motorları geliştirmişlerdir (Heywood 1988).

Taşımacılıkta çok yaygın olarak kullanılan içten yanmalı motorların icat edilmelerinin üzerinden bir yüzyıl geçerken motor teknolojisinde verimliliği artırmak, çevreye olan zararlı etkileri azaltmak için sayısız geliştirmeler yapılmıştır. Bu motorların gelişmelerini tamamladığı, geliştirilecek çok az bir potansiyel kaldığı kanısı yaygın olsa da özellikle malzeme ve elektrik elektronik alanında yapılan teknolojik gelişmelerin motor teknolojisine uygulanması içten yanmalı motorların verimliliğini her geçen gün biraz daha artırmaktadır. Halen bu motorlar diğer rakiplerine göre cazibelerini korumaktadırlar.

2.2 İçten Yanmalı Motorlar Üzerinde Yapılan Çalışmalar

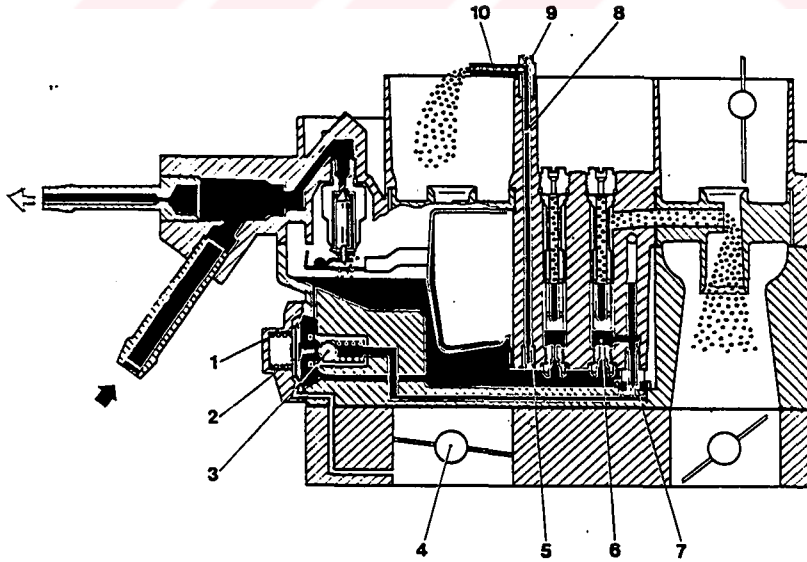
İçten yanmalı motorlar; motor tasarımına göre (pistonlu veya döner pistonlu Wankel motorlar), çalışma çevrimine göre (4 zamanlı veya 2 zamanlı motorlar),

yakıt türüne göre (benzinli, dizel, doğal gazlı, sıvılaştırılmış petrol gazlı, alkollü ve hidrojenle çalışan motorlar), yakıt hazırlama metoduna göre (karbüratörlü, emme manifolduna yakıt püskürtmeli veya silindirin içine direkt yakıt püskürtmeli motorlar), ateşleme metoduna göre (buji ateşlemeli veya sıkıştırma ateşlemeli motorlar), soğutma prensibine göre (su soğutmalı, hava soğutmalı veya soğutmasız motorlar) sınıflandırılabilirler.

Bu çalışmada sadece dört zamanlı benzinli motorlar çalışma konusu kapsamında ele alınmıştır. Diğer sınıflardaki motorlardan yeri geldiğinde sadece karşılaştırma amacıyla bahsedilecektir.

2.2.1 Benzinli Motorların Çalışma Prensibi

Benzinli motorlarda genellikle hava ve yakıt, karbüratör (şekil 2.1) veya yakıt enjeksiyon sistemleri (şekil 2.2 ve 2.3) kullanılarak silindir öncesi emme sisteminde karıştırılırlar. Gerçekleşebilir bir yanma sağlayabilmek için silindire giren hava miktarının silindire giren yakıt (benzin) miktarına olan oranı 14.7:1 civarındadır.

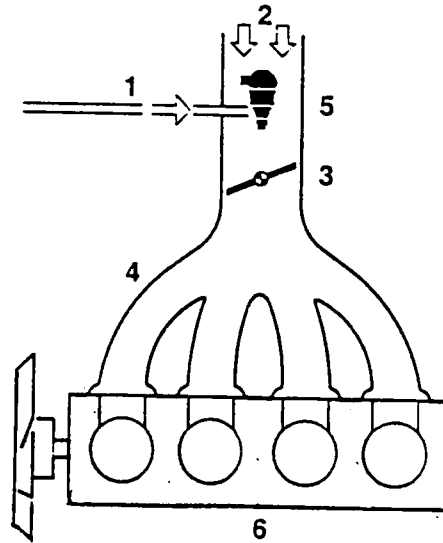


Şekil 2.1. Benzinli motor karbüratör sistemi

1-yag, 2-tam güç valf diaframı, 3-bilya, 4-2.boğaz kelebeği, 5-benzin memesi, 6-1.boğaz memesi, 7-tam güç memesi, 8-kanal, 9-hava memesi, 10-2.boğaz besleme borusu

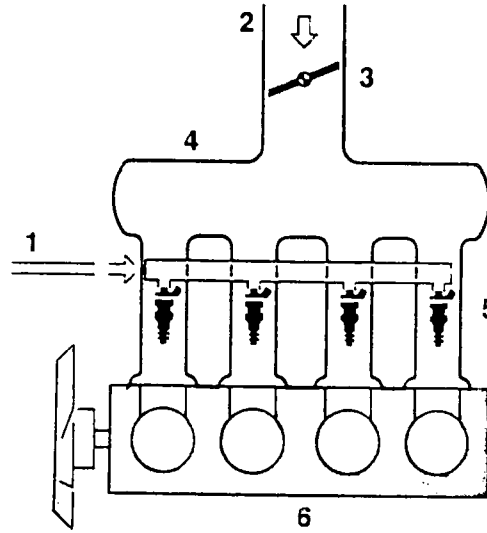
Son bir kaç yıl içinde pazara sunulan direkt silindir içine benzin püskürtmeli (GDI *Gasoline Direct Injection*) sistemlerde bu hava/yakıt oranı yükün düşük olduğu bölgelerde 30'dan 40:1, orta yük bölgelerinde 20'den 24:1, yüksek yük bölgelerinde ise stokiyometrik yani 14.7:1 olarak gerçekleşmektedir (Anonim 1998). Görüldüğü üzere fakir karışimli yanma sağlayan bu yeni teknoloji benzinin daha iyi yakılması sonucunda özellikle düşük ve orta yüklü çalışma durumunda GDI olmayan benzinli motorlara göre %15–20 arasında yakıt ekonomisi sağlamaktadır.

Yeni otomobil teknolojisinde artık karbüratörlü motor uygulaması pek fazla yapılmamaktadır. Özellikle emisyon azaltıcı sistemlerin uygulanabilmesi için elektronik enjeksiyon sistemlerini kullanmak zorunlu hale gelmiştir. Yaygın olarak yakıtı emme manifolduna (*Single Point Injection* SPI, tek noktadan püskürtme şekil 2.2) veya emme sübabı üzerine (*Multi Point Injection* MPI, çok noktadan püskürtme şekil 2.3) püskürten sistemler kullanılmaktadır. Bu sistemler oldukça gelişmiş elektronik donanım tarafından desteklenmektedir. Türkiye'de de artık 2000 yılı başından itibaren yasa gereği karbüratörlü yeni araç satışı yapılmamaktadır.



Şekil 2.2. Tek noktadan yakıt püskürtme sistemi (SPI)

1-yakıt , 2-hava , 3-kelebek , 4-emme manifoldu , 5-enjektör , 6-motor

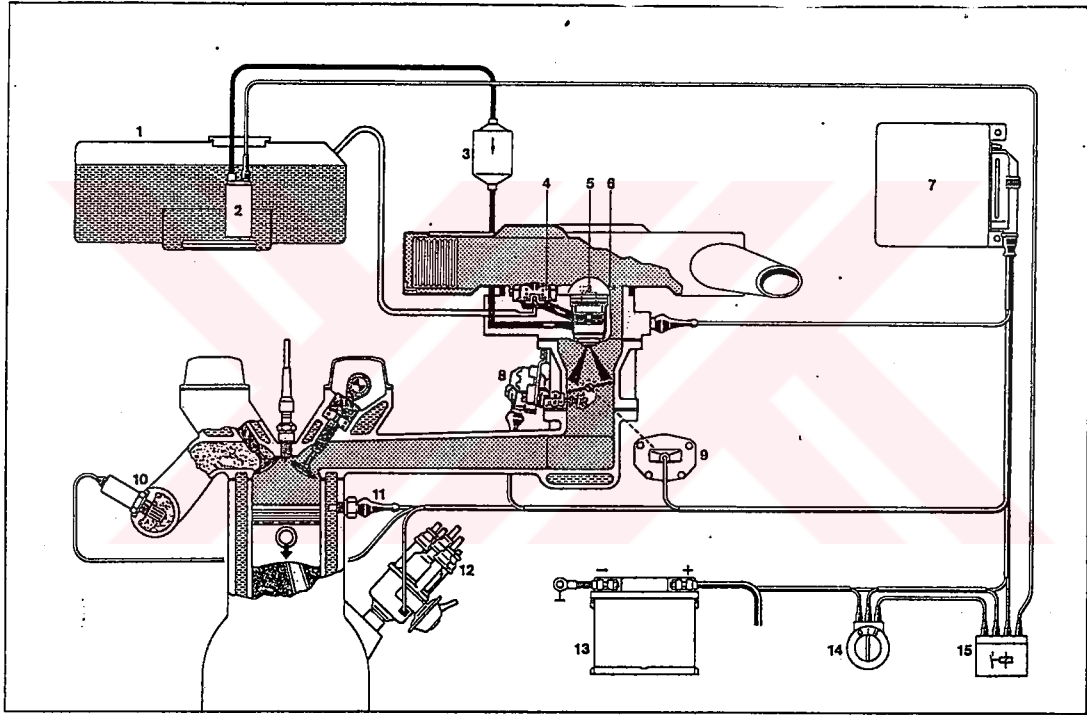


Şekil 2.3. Çok noktadan yakıt püskürtme sistemi (MPI)

1-yakıt , 2-hava , 3-kelebek , 4-emme manifoldu , 5-enjektör , 6-motor

Yakıt enjeksiyon sistemlerinin bir çok değişik modeli olmasına rağmen (mekanik, pnömatik destekli) yaygın olarak kullanılan ve günümüz otomobil teknolojisinin ihtiyacına cevap veren sistem, elektronik kontrollü enjeksiyon sistemidir. Şekil 2.4'de tek noktadan püskürtmeli bir elektronik kontrollü yakıt enjeksiyon sisteminin detayları gösterilmektedir. Burada da görüldüğü üzere motorun bütün silindirlere hizmet eden bir tane yakıt enjektörü (solenoid valf) kelebek gövdesi üzerine yerleştirilmiştir. MPI sistemlerden bu sistemin farkı daha düşük basınçlarda (0.7 – 1.0 bar) çalışabilmeleridir. Benzin basıncı genellikle SPI sistemlerde 1 bar, MPI sistemlerde ise 3 bar civarındadır. Bu sistemde hava akışı direkt olarak ölçülmektedir ve gerekli olan yakıt miktarı elektronik kontrol ünitesi (EKÜ) tarafından motor üzerindeki değişik sensörlerden (motor devri, hava akış miktarı, emme manifoldu mutlak basıncı, motor su sıcaklığı, giriş hava sıcaklığı, kelebek pozisyonu) gelen bilgiler doğrultusunda motorun içinde bulunduğu çalışma durumuda dikkate alınarak hesaplanır ve bu miktar motora zerkedilince kadar enjektör solenoid valfi açık kalır. Sensörlerden toplanan bilgiler EKÜ tarafından işlenerek motorun o anki ihtiyacı olan avans değeri de hesaplanarak uygulanır. Motor eksoz

sıcaklığının elverdiği ölçüde (katalitik konvertörün maksimum dayanma sıcaklığı) kapalı devre kontrolü yapılır. Yani $\lambda=1$ olacak şekilde eksozdaki oksijen sensörünün bilgileri kullanılarak yeni çevrimde benzin miktarı ona göre belirlenir. Tabii ki katalitik konvertörü korumak için sıcaklığın yüksek olduğu motor çalışma noktalarında daha zengin karışımı olan açık devre kontrolü yapılmaktadır.



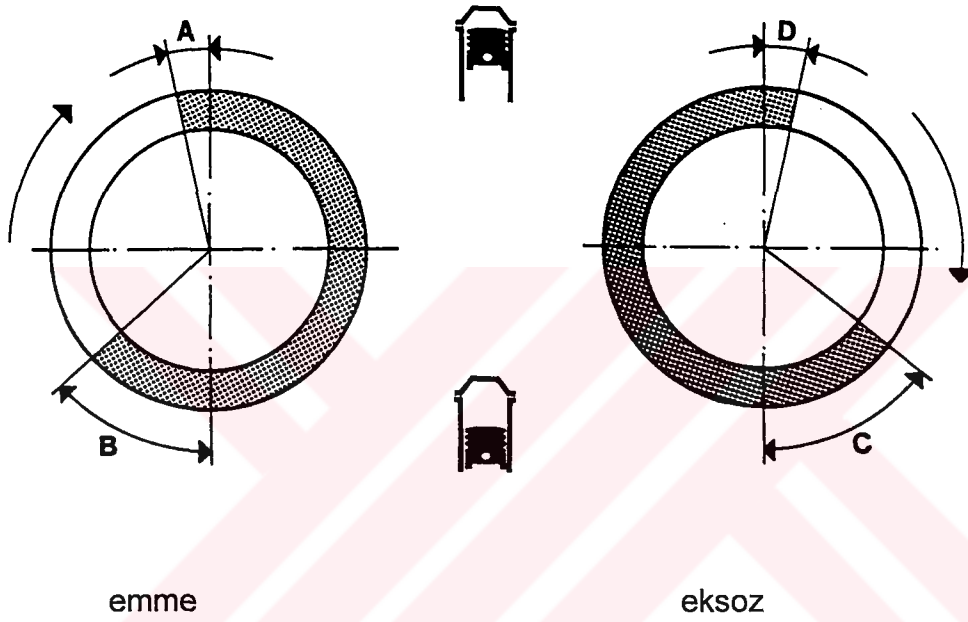
Şekil 2.4. Tek noktadan enjeksiyonlu elektronik kontrollü sistemi oluşturan parçalar (Adler 1990)

1-yakıt deposu, 2-elektrikli yakıt pompası, 3-yakıt filtresi, 4-basınç regülatörü (1 bar), 5-enjektör, 6-hava sıcaklık sensörü, 7- elektronik kontrol ünitesi (EKÜ), 8-kelebek kontrol motoru, 9-kelebek potansiyometresi, 10-lambda sensörü, 11-motor su sıcaklık sensörü, 12-ateşleme distribütörü, 13-akümülatör, 14-kontak anahtarı, 15-röle .

Yüksek motor devirlerinde silindir içine daha fazla karışım doldurabilmek için emme sübabı üst ölü noktadan biraz önce açılır ve alt ölü noktadan sonra kapanır. Emme sırasında taze karışım silindir içinde bir önceki çevrimden kalmış artık gazlarla karışır. Emme sübabı kapandıktan sonra silindir içindeki dolgu malzemesi sıkıştırılır. Bu esnada silindir içindeki basınç ve sıcaklık atmosfer şartlarının çok üzerine çıkar. Sıkıştırma esnasında piston, silindir kapağına ve silindir yüzeylerine bir miktar ısı transfer edilmesine rağmen bunun yanmamış gazlara olan olumsuz etkisi çok azdır.

ÜÖN'dan 10° ile 40° öncesinde buji tarafından yaratılan elektrik arki yanmayı başlatır. Ateşleme sistemi bir distribütör sayesinde kıvılcımı ilgili silindire gönderirken son zamanlarda yaygın olarak kullanılan distribütörsüz elektronik ateşleme sistemleri istenildiği şekilde ateşleme yapma olanağı sağlamaktadır. Bujinin çakmasıyla başlayan alev, hava-yakıt ve artık gaz karışımı boyunca hızla ilerler ve silindir duvarına geldiğinde söner. Yanma sürecinin süresi, motor tasarımı ve çalışma şartlarına göre değişmesine rağmen genellikle 40° ila 60° krank mili açısı civarında gerçekleşir. Verilen yakıt ve hava karışımı için optimum bir ateşleme zamanı mevcuttur. Optimum ateşleme zamanından farklı (daha fazla veya daha az) avans verilmesi durumunda motordan elde edilen tork değerinde düşme olur. Optimum ateşleme zamanına maksimum fren torku zamanı da denir ve yanmanın sıkıştırma çevrimi esnasında erken başlaması ile iş çevrimi sırasında geç sönmesi arasında bir denge durumudur. Genleşme veya iş zamanının sonuna doğru eksoz sübabı açılır, silindir basıncı eksoz manifold basıncından yüksek olduğu için yanmış gazın eksoz sübabı yuvasını takiben eksoz manifoldu ve eksoz boruları vasıtasıyla dışarı atım süreci başlar. Eksoz sübabı eksoz zamanı sonuna kadar (ÜÖN) açık kalır, emme sübabı ise ÜÖN'dan biraz önce açılır. Sübablar, yüksek sesi ve kam mili aşınmasını önlemek için çok yavaş açılır ve kapatılırlar. Pistonun maksimum süratinde sübabların tamamen açık olmalarını garanti etmek için genellikle eksoz ve emme sübabı açıklıkları şekil 2.5'te gösterildiği gibi üst üste çakışır. Buna sübab bindirmesi de denilir.

Eğer emme akışının basıncı eksoz manifold basıncı altında kalacak şekilde gaz kelebeği kapatılırsa bir miktar yanmış gaz emme manifolduna doğru hareket ederler. Bu durum bazen geri tepmeye (*backfire*) neden olabilmektedir.



Şekil 2.5. Sübap zamanlama diagramları

A : ÜÖN'dan önce açılma

B : AÖN'dan sonra kapanma

C : AÖN'dan önce açılma

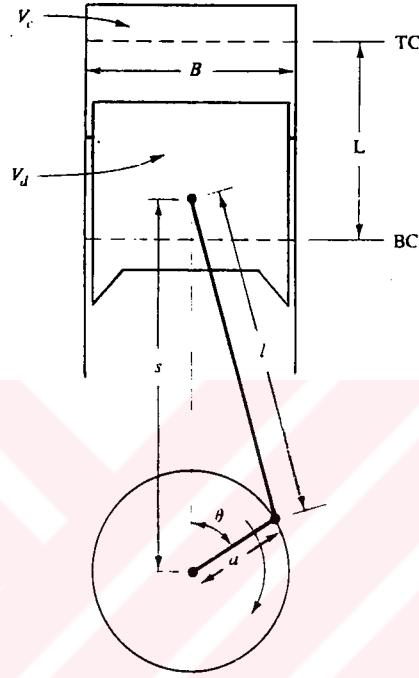
D : ÜÖN'dan sonra kapanma

2.2.2 Motor Tasarımı ve Çalışma Parametreleri

Şekil 2.6'da gösterildiği üzere aşağıdaki parametreler pistonlu motorların geometrik özelliklerini tanımlar. Sıkıştırma oranı r_c , motorda önemli bir parametre olup maksimum silindir hacminin minimum silindir hacmine olan oranını gösterir.

$$r_c = \frac{\text{maksimum silindir hacmi}}{\text{en küçük silindir hacmi}} = \frac{V_d + V_c}{V_c} \quad (2.1)$$

Burada V_d toplam süpürme hacmi, V_c ise arada kalan yanma odası hacmidir.



Şekil 2.6. Silindir, piston, biyel kolu ve krank mili geometrisi

B =silindir çapı, L =kursu boyu, l =biyel kol uzunluğu, a =krank yarıçapı, θ = krank açısı

Silindir çapının B , piston kursuna L olan oranı

$$R_{bs} = \frac{B}{L} \quad (2.2)$$

ve biyel kolunun l , krank yarıçapı a 'ya olan oranı ise

$$R = \frac{l}{a} \quad (2.3)$$

şeklinde ifade edilir. Bu arada krank yarıçapı ile piston kursu arasında $L = 2a$ gibi bir bağıntı vardır. Tipik olarak bu parametrelerin değerleri şu şekildedir: Sıkıştırma oranı r_c benzinli motorlar için 8'den 12'ye kadar, dizel motorlar için ise 12'den 24'e kadar değişmektedir. Küçük ve orta büyüklükteki motorlar için $R_{bs} = 0.8$ 'den 1.2'ye kadar değişirken, büyük daha yavaş dizel motorlar için ise $R_{bs} = 0.5$ 'tir. R orta ve küçük boy motorlar için 3 ile 4 arasında değişirken, büyük dizel motorlar için 5'den 9'a kadar değişebilmektedir. Şekil 2.6'da gösterilen θ açısına krank açısı denir. Krank mili herhangi bir θ pozisyonundayken silindir hacmi V şu şekilde ifade edilir (Heywood 1988).

$$V = V_c + \frac{\pi B^2}{4}(\ell + a - s) \quad (2.4)$$

burada s krank mili eksenini ile piston pimi eksenini arasındaki mesafe olup herhangi bir θ açısındaki değeri aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir.

$$s = a \cos \theta + (\ell^2 - a^2 \sin^2 \theta)^{1/2} \quad (2.5)$$

Motor tasarımının önemli bir özelliği ise ortalama piston hızıdır ve şu bağlantı ile ifade edilir.

$$\overline{S_p} = 2LN \quad (2.6)$$

Burada N krank mili dönme hızını gösterirken anlık piston hızı ise $S_p = \frac{ds}{dt}$ şeklinde verilebilir. Motorun silindirine dolan gaz direnci veya hareketli parçaların ataletinin yarattığı gerilim nedeniyle ortalama piston hızı 8 ile 15 m/sn arasında değişir. Otomobil motorlarının ortalama piston hızı üst sınırlara yaklaşırken ağır dizel motorlarının piston hızı alt limitte yer alır.

Motordan elde edilen tork genellikle bir dinamometre ile ölçülür ve

$$T = Fb \quad (2.7)$$

şeklinde ifade edilir. Burada F dinamometrenin yük hücreğine uyguladığı kuvvet, b ise dinamometre tork kolu uzunluğudur. Motorun verdiği güç ise tork ile motor açısal hızının çarpımına eşittir.

$$P = 2\pi NT \quad (2.8)$$

$$P(kW) = 2\pi N(\text{dev/sn})T(N.m) \times 10^{-3} \quad (2.9)$$

Buradan elde edilen güce motorun frenleme gücü denir. Dikkat edilmesi gereken diğer bir konu ise tork değeri motorun iş yapabilme kapasitesinin ölçütü olurken, güç değeri motorun birim zamanda iş yapma oranının ölçütüdür.

Şekil 2.7'de 4 zamanlı bir motorun p-V diagramı (indikatör diagramı) görülmektedir. Çevrim başına motorun yapmış olduğu iş p-V digramındaki taralı alanın integralinin alınmasıyla hesaplanır. Buna çevrim başına indike iş denir ve şu şekilde ifade edilir.

$$W_{c,i} = \oint p dv \quad (2.10)$$

Silindir başına düşen indike güç ise birim zamanda silindir içindeki gazın pistonu iletmış olduğu iş oranıdır ve

$$P = \frac{W_{c,i} N}{n_R} \quad (2.11)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, n_R her silindirin iş zamanına karşılık gelen krank mili dönüş sayısını (4 zamanlı motorlar için $n_R=2$ ve 2 zamanlı motorlar için $n_R=1$ 'dir), N ise motorun açısal hızını (devir/dk) göstermektedir.

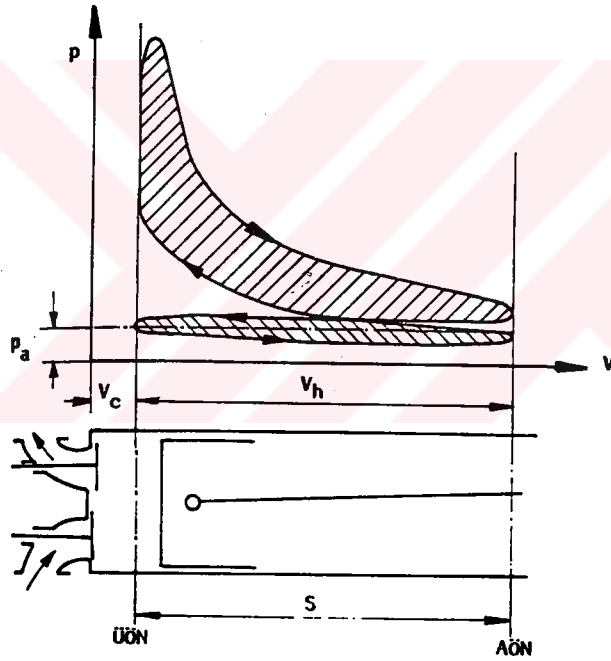
Silindir içindeki gazın oluşturduğu işin tamamı kullanılabilir güç haline dönüştürülemez. Gücün bir kısmı motorun hareketli parçaları arasındaki

sürtünmeyi bertaraf etmek için kullanılır. Sarfedilen bu güce sürtünme gücü P_f denir. *Indike güç* frenleme gücü ve sürtünme gücünün toplamına eşittir.

$$P_i = P_b + P_f \quad (2.12)$$

Sürtünme gücünü hassas bir şekilde ölçmek için motor çalıştırılmadan bir dinamometre tarafından döndürülür ve emilen güç ölçülür. Frenleme gücünün indike güce olan oranına *mekanik verim* denilir ve η_m ile gösterilir.

$$\eta_m = \frac{P_b}{P_i} = 1 - \frac{P_f}{P_i} \quad (2.13)$$



Şekil 2.7. Dört zamanlı motorlarda gerçek p-V diagramı

Sürtünme gücünün içinde emme ve eksoz esnasındaki pompalama gücünde olduğundan mekanik verim kelebek pozisyonuna, motor tasarımına ve motor devrine çok bağlıdır. Modern otomobil motorlarında kelebek tam açık pozisyondayken 1800 – 2400 dev/dk civarında mekanik verim %90 iken, maksimum motor devrinde yaklaşık 5500 – 6250 dev/dk civarında %75'e

düşmektedir. Kelebek açıklığı azaldıkça η_m 'de azalır ve rölanti devrinde sıfıra ulaşır (Heywood 1988).

Motor torku iş yapabilme kapasitesi olarak bir motor göstergesi olurken, motorların karşılaştırılmasında kullanılan bir başka parametre ise birim alana düşen kuvvet miktarıdır. Buna *ortalama efektif basınç (mep)* denir .

$$mep = \frac{W}{V_d} \quad (2.14)$$

şeklinde ifade edilir. Burada $W = \frac{Pn_R}{N}$ olup çevirim başına yapılan işi, V_d ise toplam silindir hacmini göstermektedir. 2.14 bağıntısı yeniden düzenlenirse

$$mep = \frac{Wn_R}{V_d N} \quad (2.15)$$

$$mep(kPa) = \frac{P(kW)n_R \times 10^{-3}}{V_d(dm^3)N(dev/sn)} \quad (2.16)$$

şeklinde olur. Doğal emişli benzinli motorlar için bu değer maksimum torkun elde edildiği devirlerde 850 ile 1050 kPa arasında değişmektedir. Turbo şarjlı motorlarda ise *mep* 1250 ile 1700 kPa arasında değişmektedir (Heywood 1988).

Emme sistemini oluşturan hava filtresi, karbüratör, kelebek gövdesi, emme manifoldu, emme sübabı ve sübap yuvası silindire girebilecek maksimum hava miktarını sınırlar. Motor emme sürecinin etkinliğini ölçmek için kullanılan parametreye *hacimsel verim* denir ve içeri giren hava miktarının toplam silindir hacmine olan oranı diye tanımlanır. Hacimsel verim η_v ,

$$\eta_v = \frac{m_a}{\rho_{a,i} V_d} \quad (2.17)$$

şeklinde ifade edilir. Burada m_a :bir çevrimde içeri giren hava kütlesini, $\rho_{a,i}$ ise emme havası yoğunluğunu göstermektedir. Doğal emişli benzinli motorlar için hacimsel verim değeri %80 ile %90 arasında oluşmaktadır.

2.2.3 İçten Yanmalı Motorlarda Yanma

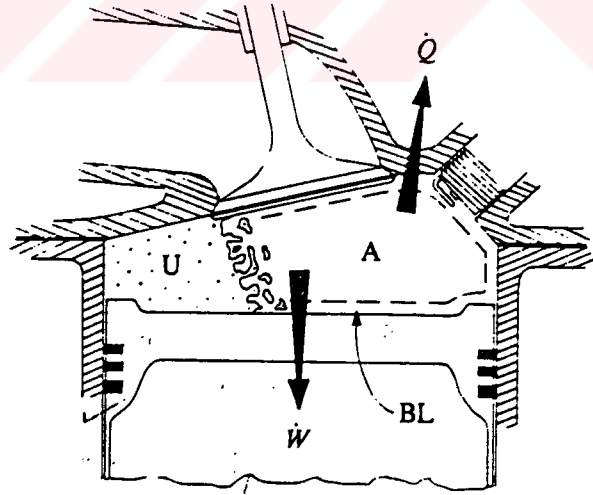
Yanma basit bir şekilde hidrokarbonlu yakıtların hızlı oksidasyonu olarak tarif edilebilir (Bejan 1988). Fakat yanma, başlangıcı, gelişmesi ve tamamlanması kimyasal reaksiyon hızına ve özelliğine, yanma bölgesindeki ısı ve kütle transfer durumuna ve çevreye olan ısı transfer durumuna bağlı olan çok karmaşık fiziksel ve kimyasal bir süreçtir (Anonim 1976). Oksidasyon ve yanma hızı ilk içeriğin (oksijen ve yakıt) harcanma hızına ve ortaya çıkan ısı miktarına bağlıdır. Yanma gaz formunda oluşur. Oksidasyon reaksiyonu amacıyla yeteri kadar yüksek hıza ulaşmak için sıvı yakıtın buharlaşması gerekir. Buharlaşan yakıt hava ile karışır. Yanma süreci homojen bir karışımda (yakıt molekülleri oksijen molekülü etrafında eşit bir şekilde dağılması durumunda) maksimum hıza ulaşır. Yakıt gaz formunda olsada heterojen karışımlarda yanma hızı tamamen yakıt ve hava moleküllerinin difüzyonuna bağlıdır, kimyasal reaksiyon hızı burada ikinci derecede etkindir.

Hava-yakıt karışımının motor silindiri içinde yanması motor gücünü, emisyonunu ve verimini kontrol eden süreçlerden bir tanesidir. Yanma mekanizması benzinli ve dizel motorlarda farklılık gösterir. Benzinli motorlarda yakıtla hava genellikle emme sisteminde karışır (GDI benzinli motorlarda karışım silindir içinde olur). Silindir içinde karışım sıkıştırıldıktan sonra elektrik arki tarafından yanma süreci başlatılır, alev silindir duvarlarına doğru ilerler ve silindir duvarlarına çarparak ya soğur ya da söner. Benzinli motorlarda yanma sabit hacim ortamında gerçekleşir. İstenmeyen yanma durumu olarak vuruntu (*knock*; önemli miktarda yakıt-hava karışımının buji kıvılcımıyla başlatılan alevin o bölgeye ulaşmasından önce kendiliğinden yanması) benzinli motorlarda kesinlikle önlenmesi gereken bir durumdur. Vuruntu ani basınç yükselmesine neden olduğu için motora zarar verebilmektedir. Bu yüzden benzinli motorlarda karışım sıcaklığı sıkıştırma zamanı sonunda düşük tutulacak şekilde (yani <

1000°K) tasarlanır. Alev sıcaklığı ise ($\approx 1500^\circ\text{K}$ olup yanma sonunda oluşan sıcaklığa eşittir) yüksek sıcaklıktaki kimyasal reaksiyon hızına bağlıdır (Anonim 1976).

Alev sınıflandırması tepkime bölgesine giren elementlerin yapısına göre (hava ve yakıt homojen bir şekilde karışmış ise *ön karışımli alev*, tepkimeye girenler ön karışımli değil ve tepkime alanında karışmak zorunda iseler *difüzyonlu alev*) ve tepkime bölgesindeki gaz akışına göre (Reynolds sayısı düşük olan düzgün akışlı veya laminer alev ve Reynolds sayısı yüksek çalkantılı alev) yapılmaktadır.

Şekil 2.8'de yanma devam ederken yanma odası ve alevin ilerlemesi şematik olarak gösterilmektedir. Burada biryandan silindir gazları ile piston arasında iş \dot{W} transferi olurken (ÜÖN öncesi silindir gazlarına, ÜÖN sonrası ise pistonu) öte yandan öncelikle yanmış gazlardan silindir duvarına ısı \dot{Q} transferi yapılır.



Şekil 2.8. Yanma sırasında silindir içindeki alevin şematik gösterimi (Heywood 1988).

\dot{Q} = silindir duvarlarına yapılan ısı transferi, \dot{W} = pistonu yapılan iş, U = yanmamış karışım, A = yanmış gazlar, BL = sınır tabaka

Normal olarak motorlar içinde yakıtlar hava ile yanar. Kuru havanın hacimsel olarak %20.95'ini oksijen, %78.09'unu nitrojen, %0.93'ünü argon ve geriye kalanını ise karbondioksit, neon, helyum, metan ve diğer gazlar oluşturur. Çizelge 2.1'de kuru havayı oluşturan bileşenlerin relatif oranları gösterilmektedir (Kaye 1973). Yanmada havanın tepkimeye giren bileşeni oksijendir. Hesaplamalarda havanın %21'i oksijen ve %79'u nitrojen olarak alınması mümkündür. İçten yanmalı motorlarda çalışma akışkanını oluşturan gazlar (O₂, N₂, yakıt buharı, CO₂, su buharı v.s.) ideal gaz olarak düşünülebilirler. Bu durumda ideal gaz formülü

$$pV = mRT = n\bar{R}T \quad (2.18)$$

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (2.19)$$

çalışma akışkanının değişik özelliklerini hesaplamak için kullanılabilir. Burada p: basınç N/m², V: hacim m³, m:gazın kütlesi kg, R: ilgili gaz sabiti J/kgK, T:sıcaklık K, M: molekül ağırlığı kg/mol, \bar{R} :evrensel gaz sabitini J/kmolK göstermektedir.

Çizelge 2.1. Kuru havanın ana bileşenleri

| Gaz | ppm (hacimsel) | mol ağırlığı kg | mol kesiri | mol oranı |
|-----------------|-------------------|--------------------|------------|-----------|
| O ₂ | 209500 | 31.998 | 0.2095 | 1 |
| N ₂ | 780900 | 28.012 | 0.7905 | 3.773 |
| A | 9300 | 38.948 | | |
| CO ₂ | 300 | 40.009 | | |
| Hava | 1000000 | 28.962 | 1.0000 | 4.773 |

Hava için $M=28.962\text{kg/kmol}$, $R=8314.3\text{ J/kmolK}$ olduğundan standart şartlarda ($p=101.33\text{ kPa}$, $T=25^\circ\text{C}$) ideal gaz formülü kullanılarak havanın yoğunluğu $\rho = 1.184\text{kg/m}^3$ olarak bulunur. Gerçek hava içinde su buharı bulunmaktadır. Genellikle su buharı kütleli olarak %1 civarındadır. Bu oran sıcaklık ve doymuluk oranına göre değişmektedir. En uç noktalarda nem oranı %4'e kadar çıkabilmektedir.

İçten yanmalı motorlarda kullanılan yakıtlar (benzin, motorin v.s.) ham petrolün rafine edilmesiyle elde edilen birçok hidrokarbonun karışımından oluşur. Bu yakıtlar genellikle karbon ve hidrojen bileşenlerinden (yaklaşık ağırlık olarak %86 karbon, %14 hidrojen) oluşmaktadırlar. Dizel yakıtı ise yaklaşık %1 civarında kükürt ihtiva eder. Diğer motor yakıtlarından alkol, bünyesinde oksijen ihtiva edip genellikle Güney Amerika ülkelerinde kullanılmaktadır. Gaz yakıtlar (doğal gaz ve sıvılaştırılmış petrol gazı) son yıllarda alternatif yakıt olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Bu çalışmanın esas konusu olan benzinli motor yakıtı benzin tek bir kimyasal formülle açıklanabilecek bir yakıt değildir. Benzin olarak tanımladığımız bu sıvı yakıt doymuş ve az miktarda doymamış hidrokarbon bileşkesi, aromatik hidrokarbon vb. bileşkelere oluşmaktadır. Bir benzinin içeriği diğerlerinden çok farklı olabilmektedir. Hipotetik bir şekilde bir yakıtın aşağıdaki elementlerden oluştuğu kabul edilirse:

| | | |
|--------|---------------------------|------|
| Propan | C_3H_8 | % 25 |
| Bütan | C_4H_{14} | % 25 |
| Pentan | C_5H_{12} | % 25 |
| Benzen | C_6H_6 | % 25 |

bu yakıtın ortalama kompozisyonu yani karbon hidrojen arasındaki aritmetiksel ilişki yukarıdaki yakıtların karbon ve hidrojen miktarları toplanarak elde edilir. Bu durumda yakıt formülü $\text{C}_{18}\text{H}_{36}$ olur, sadeleştirme yapıldığında ise CH_2 durumuna dönüşür. Örnekte ele alınan yakıt hipotetik CH_2 hidrokarbona dönüşüyor aynı durum deneysel olarak benzin için uygulandığında benzin için $\text{CH}_{1.85}$ formülüne ulaşılır. Yani benzin söz konusu olduğunda her bir karbon atomu için iki hidrojen (1.85) atomu vardır (Mellona 1995).

Çizelge 2.2'de ise Faz 3 normuna uygun benzin özellikleri verilmektedir. Ancak bu özelliklerdeki benzinle Faz 3 normunun istediği emisyon değerlerini yakalamak mümkün olmaktadır (Greening 1998).

Yanma Stokiyometrisi ve Yanma Türleri

Yanma olayında oksidasyonu gerçekleştiren madde olarak havanın önemi çok büyüktür. Havanın kimyasal kompozisyonu ve bileşenleri ise yanma karakteristiğini belirleyecek iki önemli unsurdan biridir. Diğer önemli unsur ise yakıtın kimyasal kompozisyonu ve bileşenleridir.

Çizelge 2.2. Faz 3 benzini teknik özellikleri

| Parametre | Birim | Minimum limit | Maksimum limit |
|--------------------------|-------|---------------|----------------|
| Araştırma oktan numarası | RON | 95 | -- |
| Motor oktan numarası | MON | 85 | -- |
| Reid buhar basıncı | KPa | -- | 60,0 |
| Aromatikler | % v/v | -- | 42,0 |
| Benzen | % v/v | -- | 1 |
| Olefinler | % v/v | -- | 18 |
| Oksijen miktarı | % m/m | -- | 2,7 |
| Kükürt | mg/kg | -- | 150 |
| Kurşun | g/l | -- | 0,005 |

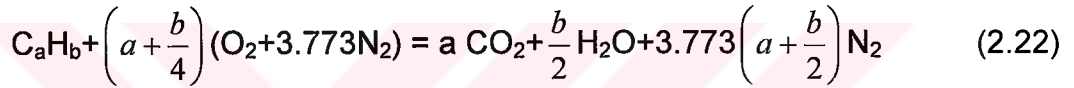
Yanma, oksitlenebilen bileşenlerin yanması durumunda *tamamlanmış yanma* aksi durumda ise *tamamlanmamış yanma* olarak adlandırılır. Eğer yeteri miktarda oksijen sağlanırsa hidrokarbon yakıtının tamamen oksidasyonu gerçekleşebilir. Yakıtın içindeki karbon tamamen karbondioksit CO₂'ye, hidrojen ise su H₂O'ya dönüşür. Buna *teorik tam yanma* da (TTY) denilir. Örnek olarak propan C₃H₈'in tam yanması düşünülürse;



şeklindeki yanma denkleminde iki tarafta karbon dengelemesi yapılırsa $b=3$, hidrojen dengelemesi yapılırsa $c=4$, oksijen dengelemesi yapıldığında da $2b+c = 10 = 2a$ buradan $a = 5$ bulunur. Bu durumda tepkime denklemi



şekline gelir. Hava hidrojen içermesine rağmen ürünlerin sıcaklığı düşük olursa nitrojen tepkimede etkilenmeden ürünler tarafına geçer. Ortalama yapısı C_aH_b olan genel bir hidrokarbon yakıtının tamamlanmış yanması düşünüldüğünde yanma denklemi



şeklinde olur. Burada her bileşenin önündeki katsayılar mol bazında göreceli oranlar dikkate alınarak hesaplanmıştır. Buradaki yakıt CH_y şeklinde de $(y = b/a)$ yazılabilir. Yukarıdaki denklem stokiyometrik olup ancak yakıtın tamamının yanması için yeterli kadar oksijenin var olduğu hesaba katılmaktadır. Stokiyometrik hava/yakıt oranı yakıt kompozisyonuna bağlıdır. Yukarıdaki genel denklemden

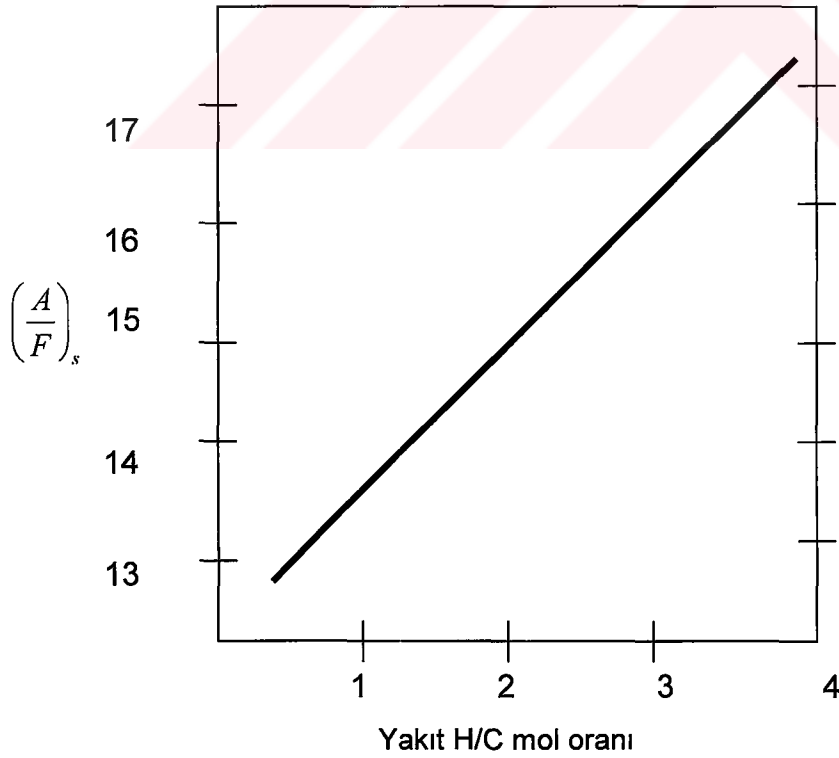
$$\left(\frac{A}{F}\right)_s = \frac{\left(1 + \frac{y}{4}\right)(32 + 3.773 \times 28.16)}{12.011 + 1.008y} \quad (2.23)$$

$$\left(\frac{A}{F}\right)_s = \frac{34.56(4 + y)}{12.011 + 1.008y} \quad (2.24)$$

bulunabilir (sırasıyla oksijen, nitrojen, karbon ve hidrojen mol ağırlıklarının 32, 28.16, 12.011 ve 1.008 olarak alınmıştır). Buradan hava yakıt oranı $\left(\frac{A}{F}\right)_s$

sadece y 'ye bağılı olarak değişmektedir. Şekil 2.9'da $\left(\frac{A}{F}\right)_s$ 'nin y 'ye bağılı olarak değişimi gösterilmektedir. y ise 1'den (benzen için) 4'e (metan için) kadar değişmektedir.

Yakıt hava karışımı stokiyometrik hava ihtiyacından daha az veya daha çok hava miktarıyla yanabilir. Havanın fazla olması durumunda yanma ürünleri arasında fazladan hava bulunur. Buna *tam yanma* da (TY) denir. Havanın stokiyometrik miktardan az olması durumunda C ve H'i tamamen CO₂ ve H₂O olarak okside etmek için yeterli oksijen olmayacağından yanma ürünleri arasında CO₂ ve H₂O ile birlikte CO, H₂ ve N₂ bulunur. Buna *eksik yanma* (EY) denir. Stokiyometrik hava/yakıt oranı yakıt kompozisyonuna bağılı olduğundan karışımın bileşenlerini tanımlamak için *hava fazlalık katsayısı lambda* λ gerçek hava/yakıt oranının stokiyometrik hava/yakıt oranına bölünmesiyle bulunur.



Şekil 2.9. Stokiyometrik $\left(\frac{A}{F}\right)_s$ 'nin yakıt H/C mol oranına göre değişimi

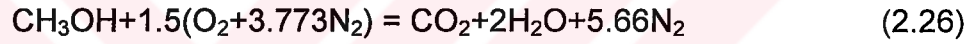
$$\lambda = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{gerçek}}}{\left(\frac{A}{F}\right)_s} \quad (2.25)$$

Yakıt fakiri karışımlar için $\lambda > 1$

Stokiyometrik karışımlar için $\lambda = 1$

Yakıt zengini karışımlar için $\lambda < 1$

şeklinde hava fazlalık katsayısı tanımlanır. Eğer yakıt içinde oksijen mevcut ise yanma denklemi yine aynı şekilde kurulur ve yakıt içindeki oksijen, oksijen dengelemesinde dikkate alınır. Örneğin metil alkol için yanma denklemi



şeklinde olurken $\left(\frac{A}{F}\right)_s = 6.47$ dir. Eğer yakıt içinde kükürt varsa yanma ürünleri tarafında SO_2 oluşur.

Yakıtın Isıl Değeri

Yakıtın gerçek kompozisyonunun bilinmediği durumlarda tepkimeye giren bileşenlerin entalpisi o bileşenlerin oluşum entalpisi kullanılarak belirlenemez. Bu durumda yakıtın ısı değeri direkt olarak ölçülür. Bir yakıtın ısı değeri Q_{HV} , onun standart sıcaklıkta sabit basınç veya sabit hacimde tepkimeye girerek tamamen yanması sonunda birim kütle başına ortaya çıkan ısı değeridir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$Q_{\text{HVp}} = -(\Delta H)_{\text{p, T}_0}$$

$$Q_{\text{HVv}} = -(\Delta H)_{\text{v, T}_0}$$

Komple yanma, bütün karbonların CO_2 'ye, bütün hidrojenlerin H_2O 'ya ve eğer yakıt içinde varsa bütün kükürtün SO_2 'ye dönmesi anlamına gelmektedir. Isıl değeri joule/kg veya joule/kmol olarak verilir. Hidrojen ihtiva eden yakıtlarda H_2O 'nun ürün kısmında sıvı veya buhar olması tepkime ısısının değerini

değiştireceğinden H₂O sıvı formunda olursa ortaya çıkan ısıya yakıtın büyük veya *üst ısı değeri* Q_{HHV}, eğer H₂O ürün kısmında su buharı halinde olursa çıkan ısıya yakıtın *net ısı değeri veya alt ısı değeri* Q_{LHV} adı verilir.

Adiabatik Yanma Süreci ve Adiabatik Alev Sıcaklığı

Termodinamiğin birinci kanunu; enerjinin korunumunu ($Q - W = E$; Q:sisteme verilen ısı, W: sistem tarafından yapılan iş, E: sistemin iç enerji değişimini göstermektedir) bir yanma işlemine uygulandığında

$$Q_{R-P} - W_{R-P} = U_P - U_R \quad (2.27)$$

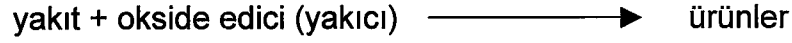
bağıntısı elde edilir. Burada Q_{R-P}: tepkime esnasında alınan ısı, W_{R-P}: tepkime esnasında yapılan iş, U_R: tepkimeye girenlerin iç enerjisi, U_P: ürünlerin iç enerjisini göstermektedir. Adiabatik sabit hacimde gerçekleşen bir yanma için yukarıdaki enerji denklemi

$$U_P - U_R = 0 \quad (2.28)$$

durumuna gelir. Adiabatik alev sıcaklığı (ASS), yanma reaksiyonu sırasında her türlü iş ve enerji alışverişi ile ortama ısı kaybı olmadığı varsayımında, yanma ürünlerinin ulaşacağı sıcaklık olarak tanımlanır (Çengel ve Boles 1989). ASS bir yanma sırasında ortaya çıkabilecek en yüksek sıcaklığı sınırladığından motorda yanma odalarının tasarımı için önemli bir parametredir. ASS ideal şartlara ait bir veri olduğundan gerçek yanmada ulaşılması mümkün olmayan bir sıcaklıktır.

Gerçek Yanma

Motorun araç üzerindeki çalışma şartlarından dolayı ideal yanma olması mümkün değildir. Motorda eksoz gazı kompozisyonu motora beslenen yakıt ve havanın göreceli oranına, yakıt kompozisyonuna ve yanmanın şekline bağlıdır. Genel bir formül olarak yakıt C_nH_mO_r olarak belirlenebilir. Genel olarak yanma denklemi de aşağıdaki şekilde yazılabilir.



Gerçek bir yanma için yakıt olarak: $C_nH_mO_r$, yakıcı olarak: $O_2 + 3.773N_2$ ve ürünler : CO_2 , H_2O , CO , H_2 , O_2 , NO_x , N_2 , yanmamış hidrokarbonlar ve katı karbon parçalarıdır. Katı karbon parçacıkları genelde çok az miktarda bulunurlar ve analizlerde ihmal edilebilirler. Bu durumda genel yanma denklemi kapalı olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$C_nH_mO_r + n_{O_2} \times \lambda (O_2 + 3.773N_2) \\ = n_p (x_{C_aH_b} C_aH_b + x_{CO} CO + x_{CO_2} CO_2 + x_{O_2} O_2 + x_{N_2} N_2 + x_{NO} NO + x_{NO_2} NO_2 + x_{H_2O} H_2O + x_{H_2} H_2)$$

burada λ hava fazlalık katsayısını, n_{O_2} O_2 molekül sayısını, n_p eksoz ürünleri toplam mol sayısını, x_i ise i 'ninci elementin mol kesrini belirtmektedir (Heywood 1988).

Gerçek bir yanmada eksoz gazlarının kompozisyonu: $N_2 = \%71$; $H_2O = \%9.2$; $CO_2 = \%18.1$; $O_2 = \%0.7$; kirleticiler = $\%1$ şeklindedir. Kirleticilerin dağılımı ise $CO = \%0.85$; $HC = \%0.05$; $NO_x = \%0.08$; katı maddeler = $\%0.005$ gibi olmaktadır (Arisio 1996).

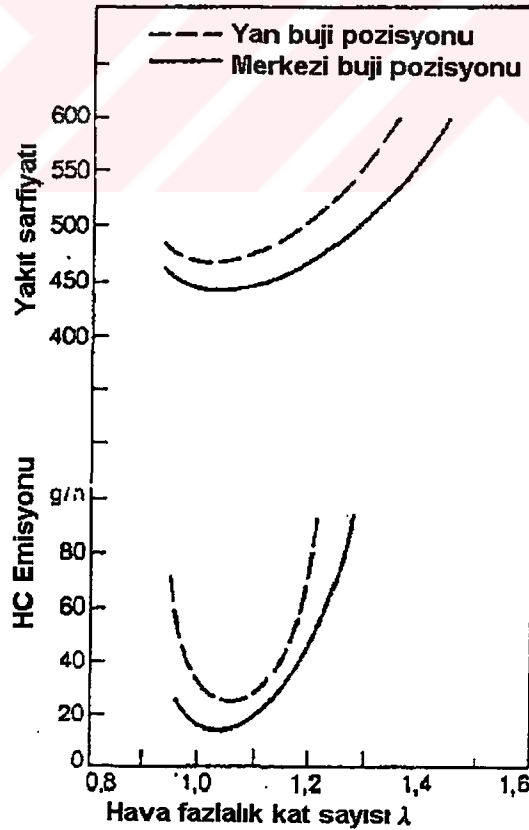
2.2.4 Motor Tasarımı ve Emisyon

Birçok tasarım parametresi kirletici emisyonlarını etkilemektedir. Tasarım yapılırken motorun emisyon özelliğinin yanı sıra yakıt sarfiyatı, performans, tork, vuruş ve gürültü seviyesi gibi başka özelliklerde dikkate alınır. Bu yüzden her motor birbiriyle çelişen bir çok isteğin dengelenmesini temsil eder.

Sıkıştırma oranı motorun termik verimi için bir alettir. Fakat yüksek sıkıştırma oranı termik verimi artırırken motorun vuruş meyilini yükseltip yüksek emisyonla neden olmaktadır. Artan sıkıştırma oranı sonunda yüksek yanma odası sıcaklığı NO_x oluşumunu artırmaktadır. Bu yüzden emisyon kontrolünün daha sıkı olduğu ABD ve Japonya'da düşük oktanlı kurşunsuz

benzinle beraber üreticiler sıkıştırma oranını da Avrupa tasarımlarına göre daha düşük tutmaktadırlar.

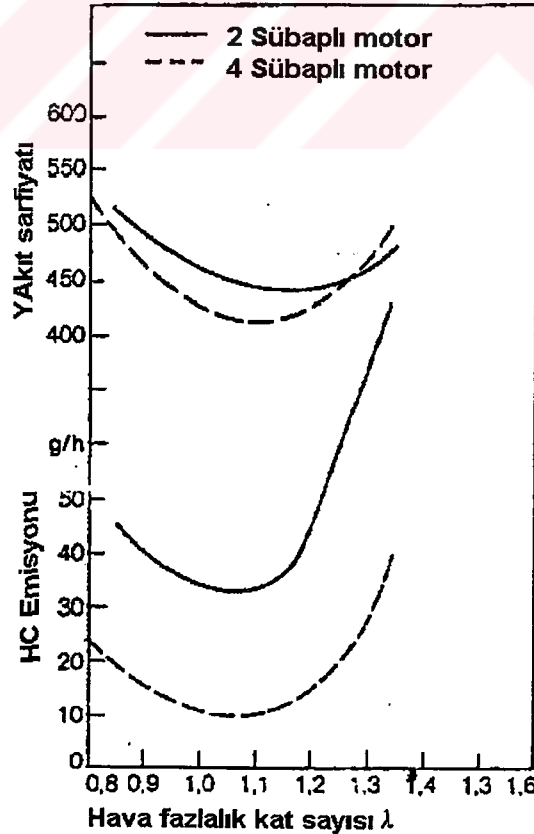
Yanma odası şekli özellikle yanmamış hidrokarbon emisyonları üzerinde önemli derecede etkili olmaktadır. Geniş yanma odası yüzeyi HC emisyonlarını artırmaktadır. Kompakt ve küçük yüzeyli yanma odaları burgulu dolgu ile birlikte ideal şekli oluşturmaktadır. Ayrıca bu şekilde yüksek sıkıştırma oranına olanak tanınırken yakıt fakiri karışımların yanması konseptide gerçekleştirilebilmektedir. Yanma odasında bujilerin yeride önemlidir. Şekil 2.10'da buji pozisyonunun HC emisyonuna ve yakıt sarfiyatına olan etkisi gösterilmektedir. Merkeze konulan bir buji daha kısa sürede yakıtı yakabileceğinden yanmamış HC'ların miktarını önemli ölçüde azaltırken, yan tarafa konulmuş bujiye göre %5 civarında yakıt ekonomisi sağlamaktadır. Yakıt ekonomisinde doğrudan emisyonları iyi yönde etkilemektedir.



Şekil 2.10. Buji pozisyonunun yakıt sarfiyatı ve HC emisyonuna etkisi

Yanma odasına konulan iki buji ise bunu daha da iyileştirmektedir. Bu bakımdan silindir başına 4 sübaplı motorlar burada bahsettiğimiz yararları pekiştirmek için önemli rol oynamaktadır. Şekil 2.11'de silindir başına 2 sübap ve 4 sübap uygulamasının emisyon ve yakıt sarfiyatına olan etkisi gösterilmektedir. 4 sübaplı stokiyometrik motorlarda HC emisyonu 2 sübaplı motorlara göre %75 civarında azalmaktadır (Adler 1990).

Sübap zamanlaması ve kam profili, silindir içine giren hava miktarı etkilediğinden motor performansını ve emisyonları yakından ilgilendirir. Motorun içinde kalan artık gazlar yanmayı doğrudan ilgilendirmektedir. Tek kam milli motorlarda yüksek devirlerde genellikle motor performansını artırmak için aynı anda eksoz ve emme sübaplarının açık kalma (*overlap*) süresi uzun tutulur. Bu da düşük devirlerde ya eksoza yanmadan giden benzin kaçağına yada emme manifolduna kaçan eksoz gazına neden olur her iki durumda da HC emisyonu artar. Sübap zamanlaması sadece bir motor devri için optimize edilebilir.



Şekil 2.11. Silindir başına 4 sübapın yakıt sarfiyatı ve HC emisyonuna etkisi

İdeal olan motor devrine ve yüke bağlı sübap zamanlamasıdır. Bunun için ya değişken kam miliprofilini ya da en az iki kam mili kullanılmaktadır. Eksoz ve emme sübap açıklığının üst üste binmesi esnasında emme ile eksoz arasında iyi bir basınç dengelemesi sayesinde emisyon, performans ve yakıt sarfiyatı konusunda olumlu sonuçlar elde edilmektedir. Ayrıca emme sisteminde başlayan burgu (*swirl*) işlemi yanma odasında da devam edeceğinden bunun sonucunda iyi ve homojen bir karışım sağlanması mümkündür. Bu da emisyon, performans ve yakıt sarfiyatı konusunda önemli derecede iyileştirme olanağı sağlamaktadır. Bunlar ancak iyi şekilde tasarlanmış emme sistemiyle sağlanabilir.

Motorların çoğu homojen bir hava yakıt karışımı oluşturmak için tasarlanmıştır. Kademeli dolgu sayesinde bujinin bulunduğu bölgeye zengin karışım sağlanırken ana odayada fakir karışım sağlanmaktadır. Böylece yanma zengin bölgede başlatılarak fakir bölgedeki karışımında yanması garanti altına alınmış olur ve yanma zengin ve fakir bölgelerde olduğundan NO_x emisyonu azalır fakat artan yanma odası yüzeyinin etkisiyle HC emisyonları normal odalara göre daha fazladır.

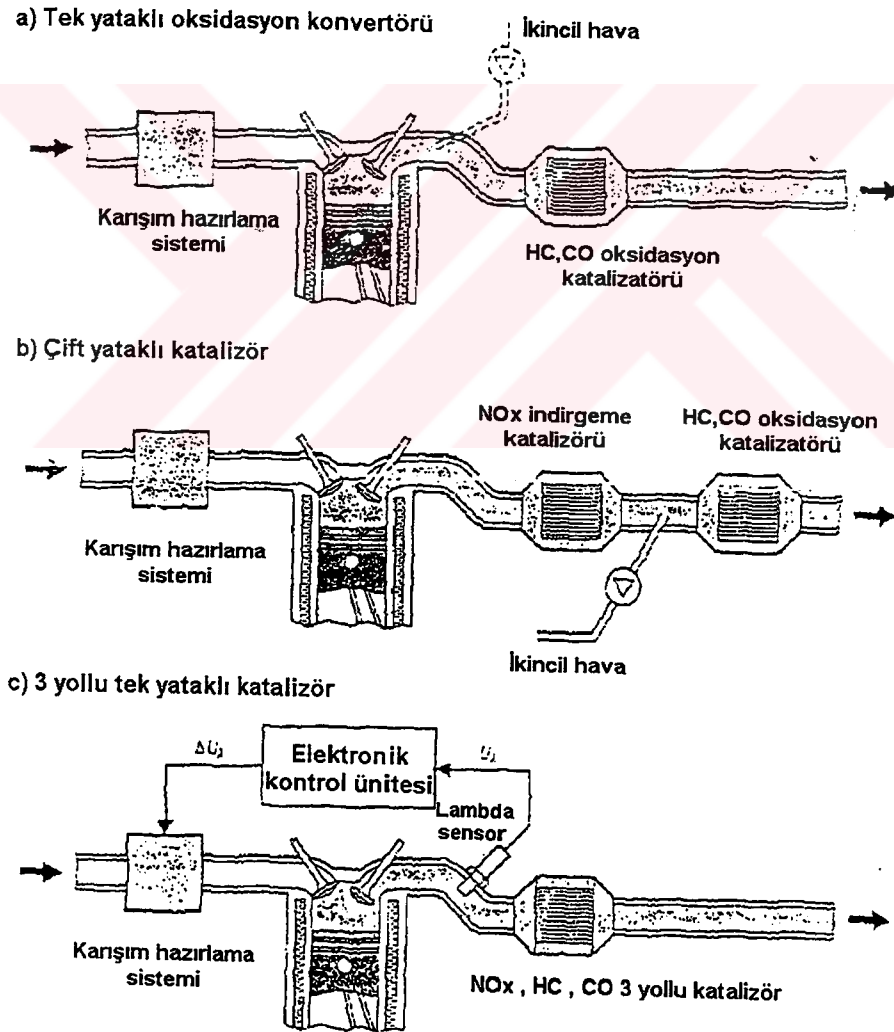
EGR (*Exhaust Gas Recirculation*), eksoz gazının bir miktarını yanma odasına geri beslenmesi NO_x emisyonlarını düşürmek için başvurulan bir başka yöntemdir. Eksoz gazı inert bir gaz olup taze karışımın içine belirli oranlarda karıştırılması yanma sıcaklığını düşüreğinden dolayı NO_x oluşmasını da engellemektedir. Alevsiz yanma olarakta bilinen bu yöntem sayesinde yüksek sıcaklıklarda oluşan NO_x miktarı 60 ppm'den 6 ppm'e kadar düşürülebilmektedir (Özdemir 2000).

Motorun güç gereksinimini azaltan çevresel faktörlerde yakıt sarfiyatını ve dolaylı olarak emisyonu azaltmaktadır. Örneğin piston ve sübap kumanda sisteminin sürtünme azaltımı ve motor üzerindeki yardımcı ekipmanların güç gereksiminin azaltılması da buna dahildir.

2.2.5 Yanma Sonrası Alınan Önlemler ve Katalitik Konvertörler

Her ne kadar motor tasarımı esnasında emisyonu azaltıcı bir çok yeni yöntem uygulanmaya konulsa da artan hava kirliliğiyle beraber her geçen gün

biraz daha ağırlaşan emisyon standartları yanma sonrası da çeşitli önlemlerin alınmasını zorunlu kılmıştır. Benzinli motorların eksoz gazında bulunan üç tane kirletici gaz için şu an uluslararası emisyon standartlarında sınırlamalar getirilmektedir. Bu gazlar toplam hidrokarbonlar HC, karbonmonoksit CO ve azotoksitler NO_x olarak belirlenmiştir. Bunların azaltılması için eksoz çıkışına katalitik dönüştürücüler ilk oksidasyon katalitik konvertörü olarak 1975 yılında ABD'de uygulamaya konulmuştur. Oksidasyon katalitik konvertörleri şekil 2.12.a'da gösterilmektedir. Bunlar ilave hava ile çalışırlar, tek yataklı olup taze hava hemen motor eksoz subabı çıkışına enjekte edilir.



Şekil 2.12. Katalitik konvertör sistemleri

Böylece eksoz gazındaki HC ve CO'lerin yanma odası sonrası oksidasyonu katalitik konvertör içinde olurken NO_x'ler hiç etkilenmeden aynen dışarı atılırlar. Bu uygulama genellikle karbüratörlü motorlarda yapılmıştır. Daha sonra bunu iki yataklı (dual-bed) katalitik konvertörler izlemiştir. Şekil 2.12.b'de 2 yataklı katalitik konvertörler gösterilmektedir. Bunlar 2 tane katalitik konvertörden oluşmuştur. Birinci konvertörde NO_x'ler indirgenirken ikinci konvertörde HC ve CO'lerin oksidasyonu gerçekleşmektedir. Motor karışım hazırlama sisteminde elektronik kontrole gerek yoktur. Zengin karışım esasına göre çalıştığı için yakıt sarfiyatını artırdığından dolayı çok fazla tercih edilmemiştir. Ayrıca azot oksit indirgemesi sırasında amonyak NH₃ ortaya çıkmaktadır. Daha çok Amerika'lı araç üreticileri kullanmıştır. Azotoksit dönüşümü ise 3-yollu katalitik konvertörlere göre oldukça kötüdür. Ve nihayet şekil 2.12.c'de gösterilen ve halen modern araç teknolojisinde içten yanmalı motorların emisyonlarını azaltmak için kullanılan üç-yollu tek yataklı katalitik konvertörler 1990'ların başından itibaren kullanılmaya başlanmıştır. Bunlar tek yataktan oluşup aynı anda yukarıda bahsedilen bu üç kirletici komponentide eksoz gazından büyük bir verimlilikle bertaraf etmektedir. Bunun için ön koşul motorun mutlaka stokiyometrik olarak yani $\lambda = 1$ olacak şekilde çalıştırılmasıdır. Çünkü şekil 2.13'de de görüldüğü üzere lambda penceresi oldukça dar olup dönüşüm verimliliği bu pencerenin iyi kontrol edilmesine bağlıdır. Bunu sağlayabilmek için ise mutlaka kapalı devre λ kontrolü yapabilen motor kontrol sistemlerine gerek vardır. Yani yaygın adıyla elektronik kontrollü yakıt enjeksiyon ve ateşleme sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 2.13'te de görüldüğü üzere üç yollu katalitik konvertörün verimi tamamen motorun hava yakıt karışım oranına bağlıdır (Mellano 1995). Örneğin;

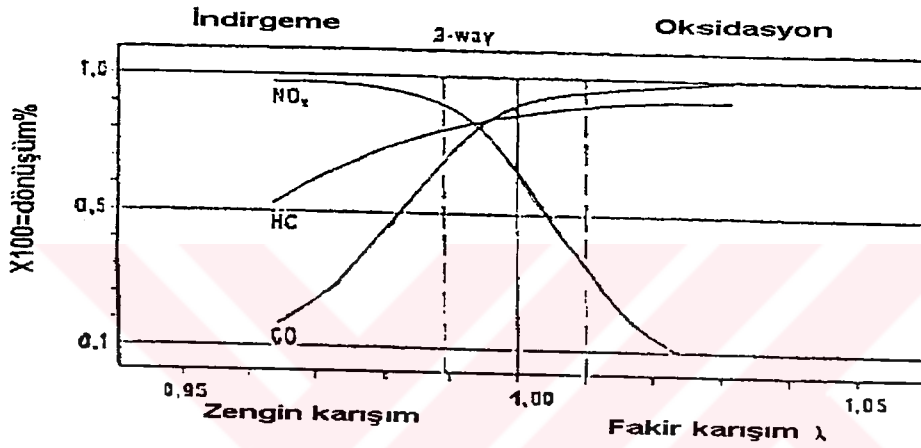
$\lambda = 0.97$ olduğunda yani zengin karışım durumunda

| | | |
|------------------------------|---|--------------|
| HC azaltılması | = | % 30 |
| CO azaltılması | = | % 20 |
| NO _x indirgenmesi | = | % 93 olurken |

$\lambda = 1.02$ fakir karışım durumunda

| | | |
|----------------|---|------|
| HC azaltılması | = | % 90 |
| CO azaltılması | = | % 96 |

- NO_x indirgenmesi = % 5 olmakta ve
 $\lambda=1$ yani stokiyometrik karışım durumunda ise
 HC azaltılması = % 84
 CO azaltılması = % 88
 NO_x indirgenmesi = % 88 olarak gerçekleşmektedir.



Şekil 2.13. Üç-Yollu katalitik konvertörlerde dönüşüm verimliliği

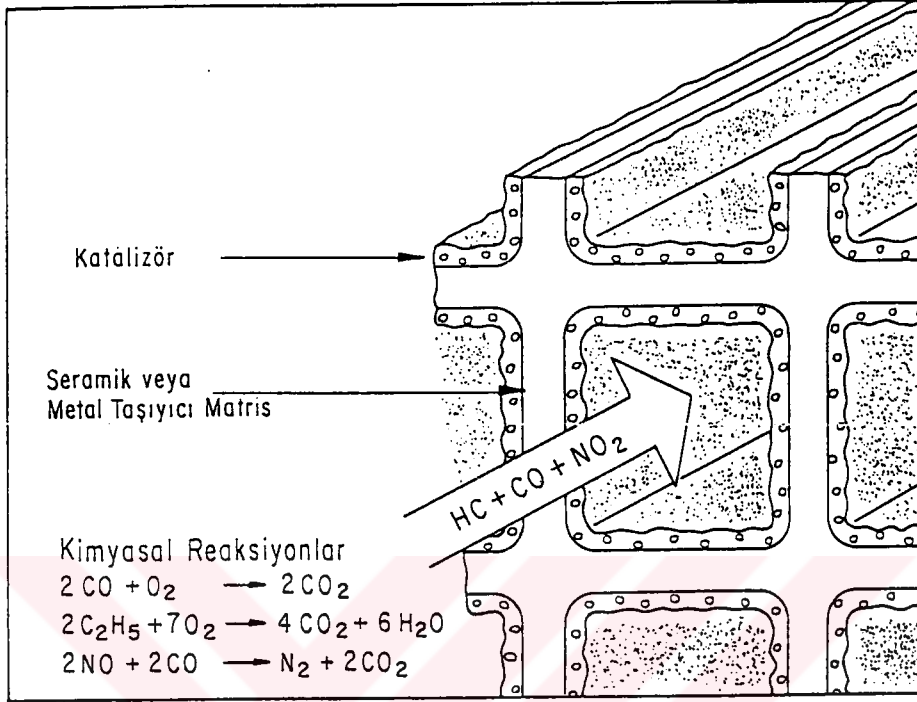
Tipik bir üç-yollu katalitik konvertörün iç yapısı şekil 2.14'te gösterilmektedir. Üç-yollu katalitik konvertörlerin yapısı genellikle şu şekilde olmaktadır.

Taşıyıcı madde : Seramik veya metal

Hücre sayısı : 400 – 600 hücre/inch²

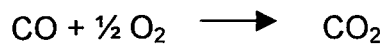
Duvar kalınlığı : ≈ 0.15 mm seramik için, 0.04 mm metal

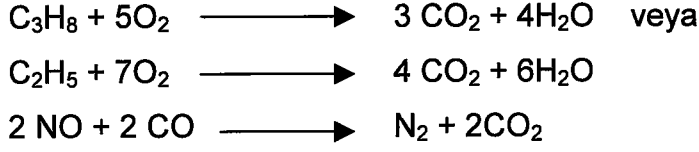
taşıyıcı için öngörülmektedir. Katalitik konvertör taşıyıcısının yüzey alanını artırmak için aktif bir orta tabaka oluşturulur. Bu aktif tabaka aynı zamanda oksijen depolama kapasitesini artırmak için bünyesinde metal ve metalik oksitleyicileri bulundurur. Buna "wash coat" denilmektedir. Genellikle alüminyum oksitten oluşmaktadır ve katalitik yüzeyi 7000 kat artırabilme özelliğine sahiptir. Etkili katalitik kaplama (soymetal kaplaması) bunun üzerine yapılmaktadır. Üç yollu katalitik konvertörlerde aktif madde olarak CO ve HC oksidasyonunu sağlayan palladyum Pd veya platin Pt ve NO_x indirgenmesini sağlayan rodyum Rh kaplanmaktadır.



Şekil 2.14. Üç-yollu katalitik konvertör sisteminin iç yapısı

Katalitik aktif maddeler sıcaklık 250 °C civarında etkili olmaya başlarlar, ideal çalışma sıcaklığı 400°C ile 800°C arasında değişirken 1000°C sıcaklık katalitik konvertörün termal yaşlanmasına neden olmaktadır. Uygun koşullarda kullanılan bir katalitik konvertör 100 000 km üzerinde bir ömüre sahip olabilirken motorda eksik yanma (*misfire*) olması durumunda katalitik konvertör sıcaklığı 1400 °C ye çıkabilmektedir. Bu, katalitik konvertör ömrü için kesinlikle motorda olmaması gereken bir durumdur. Süre olarak toplam bir saatin üzerinde termal yaşlanma sıcaklığına maruz kalmış bir katalitik konvertör tamamen özelliğini yitirebilmektedir. Katalitik konvertörlü araçlar mutlaka kurşunsuz benzin kullanmalıdır. Kurşun aktif maddelerle tepkimeye girerek onların etkisini azaltırken aynı zamanda gözeneklerin tıkanmasına da sebep olabilmektedir. Üç-yollu katalitik konvertörde oluşan kimyasal reaksiyonlar aşağıdaki gibidir.





2.2.6 Faz 3 İçin Uygulanması Düşünölen Araç Teknolojileri

Bölüm 1'de belirtildiği üzere Faz 1, Faz 2 ve Faz 3 Avrupa'da (dolaylı olarak Türkiye'de de) sırasıyla 1993, 1996 ve 2000 yıllarında devreye giren emisyon standartlarıdır. Çizelge 2.3'de bu standartların limit değerleri verilmektedir. Burada da göröleceği üzere Faz 1'den Faz 2'ye geçerken ve Faz 2'den Faz 3'e geçerken limit değerlerinde önemli derecede azalmalar olmuştur.

Faz 3'ün yukarıda belirtilen emisyon limitlerini yakalamak için araç teknolojisinde de Faz 2 çözümlerine göre oldukça büyük değişiklikler yapmak gerekmektedir. Yaygın olan uygulama gerek ekonomik, gerekse de teknolojik açıdan "Close Coupled Catalyst CCC" olup katalitik konvertörün hemen motor eksoz manifold çıkışına monte edilmesini öngörmektedir. Bunun dışında alternatif uygulama olarak ön ısıtmalı katalitik konvertör "heated catalyst", HC emici kapan, fakir karışımı yanmalar için NO_x kapanı ve dizeller için de-NO_x katalizörü araç teknolojisine yeni giren uygulamalar olarak karışımıza çıkmaktadır.

Çizelge 2.3. Faz 1, Faz 2 ve Faz 3 limit değerleri

| Standart | Test Çevrimi | CO gr/km | HC+NO _x gr/km | HC gr/km | NO _x gr/km |
|----------|--------------|----------|--------------------------|----------|-----------------------|
| Faz 1 | ECE+EUDC | 2.72 | 0.97 | -- | -- |
| Faz 2 | ECE+EUDC | 2.20 | 0.50 | -- | -- |
| Faz 3 | NEDC | 2.30 | -- | 0.2 | 0.15 |

Kaynak: AB Komisyonu 91/441/EEC, 94/12/EEC, 98/69/EC Direktifleri ve Anonim 1995.

ECE:Avrupa şehir içi çevrimi, EUDC: Avrupa otoyol çevrimi, NEDC: Avrupa yeni emisyon çevrimi

Üç yollu bir katalitik konvertör ancak 250°C ye ulaştıktan sonra çalışmaya başlamaktadır. Faz 1 ve Faz 2 teknolojisinde genellikle araç gövdesi altına konulan katalitik konvertörlerin devreye girme süreleri oldukça uzundur. Zaten bir emisyon çevrimi sırasında emisyonların büyük bölümü yaklaşık % 90'ı katalitik konvertör henüz soğukken eksozdan atılmaktadır. Eksoz manifolduna birleştirilmiş katalitik konvertör uygulamasının başlıca amacı katalitik konvertörü daha kısa sürede ısıtmak eksozdan çıkan toplam emisyon miktarını düşürmektir. Avrupa Yeni Emisyon Çevrimi'nde *NEDC* eksoz gazı örnekleme sinin hemen marşa basıldıktan sonra yapılmaya başlanması ön ısıtmalı veya eksoz manifolduna birleştirilmiş katalitik konvertör (*CCC*) kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Yukarıda da belirtildiği gibi *CCC* uygulaması Faz 3 için en çok tercih edilen yöntem durumundadır. Faz 1 ve Faz 2 çözümlerinde 850°C olan katalitik konvertör maksimum sıcaklığı, katalitik konvertör teknolojisindeki iyileştirmeler sonunda Faz 3 *CCC* uygulamasında 950°C'ye çıkarılabilmıştır. Sonuçta *CCC* için şimdiki uygulamaya göre daha iyi kaplama teknolojisi ve daha fazla soy metal yüklemesi gerekiyor. Bazı Faz 3 uygulamalarında katalitik konvertörün daha kısa sürede ısıtılması için, ısı yükünü azaltmak amacıyla döküm eksoz manifoldundan kütlesi daha az olan sac eksoz manifolduna geçildiği görülmektedir. Katalitik konvertörün motora yaklaşmasından dolayı karşı basınç artarak motorun hacimsel verimin düşmesi nedeniyle motor performansında azalma söz konusudur. Faz 2 seviyesindeki motor performans değerlerini tutturabilmek için seramik taşıyıcılarda monolit duvarları inceltirirken öteyandan metal monolit kullanılması sık sık Faz 3 uygulamalarında karşılaşılan bir durumdur. Ayrıca katalitik konvertörün devreye giriş zamanını (*light-off zamanını*) azaltmak için katalitik konvertör ısı yükünü düşürmek amacıyla katalitik konvertör hacminin düşürülmesi, dönüşüm veriminin artırılması için farklı miktarlarda ve metodlarla soymetal kaplaması yapılması, katalitik konvertör ömrünün artırılması Faz 3 kapsamında katalitik konvertör tasarlayan ve üreten firmaların yaptığı önemli çalışmalar arasındadır.

Faz 3 uygulamalarında hedeflenen limit değerlerine ulaşmak için dikkat edilmesi gereken en önemli iki faktör katalitik konvertörün veriminin sürekliliğinin sağlanması ve oksijen veya λ sensörünün doğru bir şekilde çalıştırılmasıdır.

Lambda sensöründen alınan bilgilerin bir şekilde yanlış gelmesi ya da gerçek durumu yansıtmaması, yapılacak olan teşhisi de yanıltacaktır. Özellikle kükürt katalitik konvertörün oksijen depolama kapasitesini azalttığından doğrudan katalitik konvertörün veriminin düşmesine neden olmaktadır. Ayrıca kükürt, oksijen sensörünün kısa sürede arızalandırmaktadır.

2.3 Emisyon Parametreleri ve Çevresel Etkileri

Hava kirliliğine neden olan partikül madde ve tozların ana kaynağı kömür ve motorin gibi ağır bileşikli yakıtların yanmasıdır. Halen dünyada tüketilen enerjinin büyük bir bölümü petrol ve kömür kökenli yakıtların yanması sonucu elde edilmektedir. Bu ağır yakıtlar genellikle endüstriyel proseslerde ve enerji üretimi için termik santrallerde kullanılmaktadır. Ayrıca partikül madde ve tozların yaklaşık %10'luk bir kısmı evsel kaynaklardan (özellikle ısınmadan) ortaya çıkarken, %13'lük bir bölümü de kara taşımacılığında kaynaklanmaktadır. Öte yandan hidrokarbonlar sözkonusu olunca durum yukarıda açıklananlardan biraz farklı olmaktadır. Kirletici hidrokarbonların başlıca kaynağı taşıtlardır. Hava kirliliğinde önemli bir unsur olan sülfatların sadece küçük bir oranı içten yanmalı motorlardan kaynaklanırken, büyük bir bölümü termik elektrik santrallerinin prosesinden ortaya çıkmaktadır (Mellona 1995).

Hidrokarbonlardan başka içten yanmalı motorların yanma odası kaynaklı diğer iki kirletici ise azot oksitler NO_x (" NO_x " notasyonu genel olarak değişik azot oksitleri belirtmek için kullanılır bunlar azotmonoksit NO ve azotdioksitlerdir NO_2) ve CO 'tir. Her iki kirleticinin de ana kaynağı taşımacılıktır. Artan motorlu taşıt sayısı ile birlikte motorlu taşıtların hava kirliliğine olan etkileride giderek artmaktadır. OECD'nin verilerine göre 1980 yılında yılında motorlu taşıtların toplam kirletici emisyonlar içindeki payı CO 'te %66, HC 'da %39 ve NO_x 'de %47 civarındadır. Yukarıda sayılan kirletici emisyonlar arasında taşıt kaynaklı olanlar başlıca CO , HC , NO_x 'in olurken özellikle dizel motorlar sülfat ve partikül emisyonunun başlıca nedenleri olmaktadır. Benzinli motorlardan sülfat ve partikül madde emisyonu önemsenmeyecek derecede az olmasına rağmen

motorlu taşıt kaynaklı yanmamış hidrokarbonların dörtte üçü benzinli motorlardan kaynaklanmaktadır. CO emisyonunun da büyük bölümü benzinli motor tarafından üretilmektedir. Bunların dışında benzinli motorlardan yayılan özellikle kurşunlu benzin içine vuruntu özelliğini iyileştirmek için konulan birde kurşun emisyonu vardır. Benzin içine katılan kurşunun yaklaşık %75'i eksoz gazı vasıtasıyla atmosfere atılırken geriye kalan kısmı motor yağına geçmektedir (Adler 1990).

Motorlu taşıt kaynaklı bu emisyonların özellikleri ve insan sağlığına olan etkileri şu şekilde açıklanabilir. Karbonmonoksit CO, tatsız ve kokusuz bir gazdır. Havadan ağır olduğu için birikinti oluşturma meyili yüksektir. En büyük sorun ise kandaki hemoglobine çok yakınlık göstermesi ve onunla birleşmesidir. Bu suretle kanda oksijen taşımakla yükümlü olan hemoglobinin oksijen taşıma kapasitesi azalır, eğer kandaki karboksihemoglobin oranı %40 mertebesine ulaşırsa CO'ya maruz kalan bir kişinin ölüm tehlikesi çok yüksektir. Bu ancak CO konsantrasyonunun çok yüksek olduğu ortamlarda söz konusudur. Normal kirlilik düzeylerinde CO'nun etkileri insan organizması tarafından pek hissedilmez. Kanda muhtemelen oluşan karboksihemoglobinler ise bir kaç gün içinde normal hücre değişim kanalıyla yok edilirler (Mellona 1995).

HC toplam hidrokarbonlar için kullanılan bir notasyon olup emisyon sınırlamasında (standartlarda) da doymuş ve doymamış bütün hidrokarbonları ve aromatikleri temsil eder. Doymuş hidrokarbonlar (parafinler) kokusuz olup narkotik etkisi vardır ve aynı zamanda solunum yolundaki mukozayı tahriş edici özelliğe sahiptirler. Doymamış hidrokarbonlar (olefinler ve asetilenler) hafif kokulu olup solunum yolu mukozasını tahriş ederler. Bu HC'lar, insanlar ve bitkiler için zararlı olan *smog* veya fotokimyasal sis oluşumunda önemli rol oynarken, ortamda NO olması durumunda güneş ışığında etkisiyle tekrar oksidasyon tepkimesine girerek diğer bir zararlı olan ozon NO₃ oluşmasına neden olurlar. Aromatik HC'ların (benzen, aldahit) karakteristik bir kokusu vardır. Bunlar bir kısmı kanserojen olup bir kısmıda sinir sistemini olumsuz etkileyip düşük konsantrasyonda bile olsa göz ve burun tahrişlerine neden olurlar (Adler 1990).

NO_x'lerden azotmonoksit NO da kokusuz ve renksiz bir gazdır. Yüksek konsantrasyon ciddi akciğer rahatsızlıklarına neden olabilir. Uzun süreli maruz kalmalar kronik bronşitin kaynağı olabilir. Azotdioksit NO₂ ise kokulu ve kızıl kahverengi renkli olan bir gazdır. Solunum ve idrar yollarında tahrişe neden olabilir. Yüksek konsantrasyon akciğer ödemi oluşumuna yardımcı olur. Fakat NO₂'nin genel özelliği üst solunum yollarının tahrişine neden olmasıdır.

Karbondioksit CO₂ tam anlamıyla bir kirletici değildir. Şu an kontrol altına alınmaya çalışılan CO₂'nin ikincil etkisi dünyanın global ısınmasına neden olan sera etkisi yaratmasıdır. Havadan daha ağır olup kokusuz ve tatsızdır. Ortamda eğer CO₂ konsantrasyonu yüksek olursa solunum bozuklukları ortaya çıkabilir. Bunun sebebi CO₂'nin zararlı olması değil yüksek CO₂ konsantrasyonunun ortamdaki oksijen miktarının azalmasıdır.

Partikül maddelerin basit kimyasal formülleri olmayıp içeriğinde karbon ihtiva eden değişik kimyasal bileşkenin oluşturduğu bir harmonidir. Solunum yollarının tahrişine neden olurken öksürük ve astımda neden olmaktadır. Bunun etkisi geçecedir. Partiküllerin bir kısmı yanmamış hidrokarbonları bünyelerinde bulundurlar ki bunlardan bazıları çok olmamakla birlikte kanserojen özellik gösterirler.

Yukarıda bahsedilen kirletici gazlar haricinde araçlardan kaynaklanan birde ağır metal emisyonları vardır. Bunlardan kurşun emisyonu kirletici olarak üzerinde durulan bir konudur. Çünkü kurşun tetraetil motor amaçlı, yakıtın oktandırılarak numarasını yükseltmek için yakıt içerisinde bulunan bir katkı maddesidir. Ekolojik benzin diye adlandırılan kurşunsuz benzinde kurşun oranı oldukça sınırlı olup motor teknolojisinde de bu benzini kullanabilmek için iyileştirmeler yapılmıştır. Kurşun insan sağlığı için tehlikeli olup sinir sisteminin kılcal damarlarında birikerek nervo psikolojik sorunlara neden olabilmektedir (Mellona 1995).

2.3.1 Avrupa Birliği Emisyon Standartları

Daha önceden de belirtildiği üzere motorlu taşıtlardan kaynaklanan zararlı emisyonlar için oluşturulan çeşitli uluslararası standartlarla sınırlamalar

getirilmiştir. Dünyada motorlu taşıtlardan kaynaklanan emisyonlarla ilgili ilk sınırlama ABD'nin Kaliforniya eyaletinde 1966 yılında uygulamaya konmuştur. Bu uygulamayı daha sonra ABD geneli, Japonya ve Avrupa izlemiştir.

Avrupa Birliği'nde EEC 70/220 direktifiyle ilk kez 1970 yılında motorlu taşıtların motorlarından çıkan CO ve yanmamış HC'lerin limitleri belirlenmiştir. Bu limitler EEC 74/290 direktifiyle ilk kez aşağı çekildikten sonra, EEC 77/102 direktifiyle CO ve HC'ye ilaveten NO_x'lere de sınırlama getirilmiştir. Daha sonra bu 3 kirletici için limit değerleri sırası ile EEC 78/665, EEC 83/351, EEC 88/76 direktifleriyle aşağı çekilmiştir. Dizel motorlardan partikül maddeler için ise ilk sınırlama EEC 88/436 direktifiyle belirlenmiştir. EEC 89/458 direktifi 1400 cc'nin altındaki motorlu taşıtlara daha sıkı (gaz formundaki kirleticiler için) limitler getirmiştir. Faz 1 diye bilinen EEC 91/441 direktifiyle 1991 yılında yukarıda bahsedilen standartlar, motor hacimlerinden bağımsız olarak bütün binek araçlarını kapsayacak şekilde genişletildi. Test çevrimine şehir dışı çevrimi ilave edildi. İlk defa buharlaşmadan kaynaklanan HC emisyonları için sınırlama getirildi. Dizel taşıtlar için partikül sınırı daha aşağı çekildi. Bu direktifin gereği olarak 3-yollu katalitik konvertör kullanımına başlandı. Faz 2 diye bilinen EEC 94/12 direktifiyle binek araçlarında her 3 kirletici için daha sıkı limitler getirilirken (Faz1'e göre CO'te %19, HC+NO_x'de ise %48'lik bir azalma) 2500 kg'in üzerindeki yolcu taşıtları, hafif ticari taşıtlar ve off-road arazi araçları için de EEC 93/59'a uyması şart koşulmuştur. Faz 3 diye adlandırılan EEC 98/69 direktifi ise yeni tip onayı alınacak araçlar için 2000 yılı, tüm imalat için ise 2001 yılı başından itibaren uygulamaya konulacaktır.

Çizelge 2.4. Faz 4 Emisyon limitleri

| CO (gr/km) | HC (gr/km) | NO _x (gr/km) |
|------------|------------|-------------------------|
| 1.0 | 0.1 | 0.08 |

Faz 3'le birlikte araçların kullanım sırasında da (80 000 km) emisyon değerlerini kontrol edip sınır değer dışına çıktığında kullanıcıyı uyanan EOBD sistemi

benzinli araçlarda uygulanmaya başlayacaktır. Faz 3'e göre emisyon limit değerleri %50 azalacak olan Faz 4 emisyon limit değerleri (çizelge 2.4) 2005 yılından itibaren tüm binek araçlarda zorunlu hale gelecektir.

2.3.2 Türkiye'de Emisyona İlişkin Uygulamalar

2.11.1986 tarihinde yayınlanan Hava Kalitesinin Korunması Yönetmeliği, Türkiye'de her türlü faaliyet sonucu atmosfere yayılan emisyonları kontrol altında tutan, insanı ve çevresini hava alıcı ortamındaki kirlenmelerden doğacak tehlikelerden koruyacak düzenlemelerin tanımlandığı tek yönetmeliktir. Yönetmelikte ulaşım, sanayi, ısınma vb. faaliyetler sonucu insan ve çevre sağlığını etkileyen kısa ve uzun vadeli hava kalitesi sınır değerleri çeşitli parametreler bazında tanımlanmıştır. Kirliliğin yoğun olduğu mevsim ve kritik hava şartlarında çeşitli uyarı kademeleri ile Valiliğe taşıt trafiğinin sınırlandırılması veya yasaklanması dahil bir çok önlem alma yetkisi verilmiştir. Sanayi kuruluşları öncelikle A ve B grubu "İzine Bağlı Tesis" olarak sınıflandırılmış olup, her birisi için Resmi Mercî'den "Emisyon İzni" alınması için gerekli düzenlemeler tanımlanmıştır. Bu tesislerden kaynaklanan emisyon sınır değerleri konsantrasyon bazında verilmiş, ayrıca baca yüksekliği, gaz hızı, kirlenme yayılımı, ölçüm standartları vb. teknik detay ve düzenlemeler de belirlenmiştir. Yönetmelikte motorlu kara taşıtlarından kaynaklanan emisyonlar konusunda Sanayi ve Ticaret Bakanlığı tarafından yürürlüğe konulan "Araçların İmal, Tadil ve Montajı Hakkındaki Yönetmeliğe" atıfta bulunulmuştur. Motorlu kara taşıtlarının ekzos gazındaki hava kirleticiler için emisyon sınır değerleri T.S.E 4236'ya uygun olmalıdır. T.S.E standardı olmayan konularda ise standart hazırlanıp yürürlüğe konuluncaya kadar A.B. sınır değerleri uygulanmaktadır. Türkiyede 1995 öncesi sadece binek araçlarda sadece T.S.E 4236 karşılığı olan, ECE R 15.04 regülasyonu uygulanmaktaydı. Bu regülasyon herhangi bir yanma sonrası önlem alınmasını gerektirmemektedir. 1995'ten itibaren motor silindir hacmine bağlı olarak kademeli bir şekilde Faz 1 veya EEC 91/441 direktifine uyulmaya başlanmıştır. Bu direktif üç yollu katalitik konvertör kullanımını ve buharlaşma ile ilgili kanister sisteminin kullanılmasını zorunlu

kılmaktadır. 2000 yılının başından itibaren üretilen tüm araçların Faz 1'e uygun olarak üretilmesi zorunlu olmuştur. 2001 yılının başından itibaren ise Faz 3 emisyon seviyesi tüm yeni araçlarda uygulanacaktır. Böylece Türkiye Avrupa'nın uyduğu emisyon normlarına Faz 2 seviyesini atlayarak uyumuş olacaktır.

Yakıtta ise Türkiye'de durum pek parlak görülmemektedir. Gerek benzinde ve de gerekse motorinde Avrupa yakıt seviyesi tutturulamamaktadır. Katalitik konvertör kullanılmasıyla birlikte araçlarda kurşunsuz benzin kullanımı teknolojik olarak zorunlu hale gelmiştir. Kurşunsuz benzin teminini yurt geneline yaymaya çalışılmaktadır. Batıda kurşunsuz benzin temininde pek sıkıntı yaşanmazken zaman zaman kalite sorunları yaşanmaktadır. Rafinerilerin teknolojisi Faz 3'e uygun yakıtın üretilmesi için yeterli değildir. Yeni yatırımların yapılması gerekmektedir. Yatırım için hemen karar verilse bile ancak 2005 yılında yeni teknoloji uygulamaya konulabilecekken 2005 yılında ise Avrupada yakıt spektleri tekrar değişecektir. Türkiye bu konuda doğrudan 2005 yılı Avrupa yakıt spesifikasyonlarını hedeflemelidir.

3 MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Giriş

Bu çalışmada benzinli motorların eksoz emisyonları ele alınarak halen Faz 1 emisyon seviyesinde olan tek noktadan yakıt enjeksiyonlu bir motor eksoz manifoldu çıkışına ikinci bir 3-yollu katalitik konvertör ilave edilerek Faz 3 emisyon seviyesine ulaşip ulaşmayacağı araştırılmıştır. Bunu yaparken motorun performans değerlerinin de nasıl etkilendiği karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu kısımda, tanımlanan hedefe ulaşmak için yapılması gereken çalışmanın teorisi hakkında geniş bilgi verilmiştir. Ayrıca deney düzeneğini oluşturan deney motoru, deney katalitik konvertörleri ve deney aracı hakkında detaylı bilgi verilerek deney ve testlerde kullanılan ekipmanlar ve cihazlar tanıtılmıştır. Deney ve ölçümlerde kullanılan prensip ve yöntemlerde tek tek ele alınmıştır.

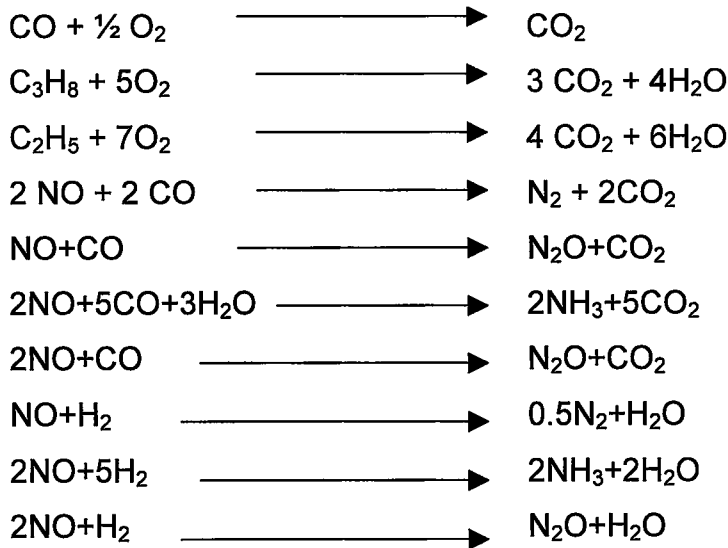
3.2 Teorik Çalışma

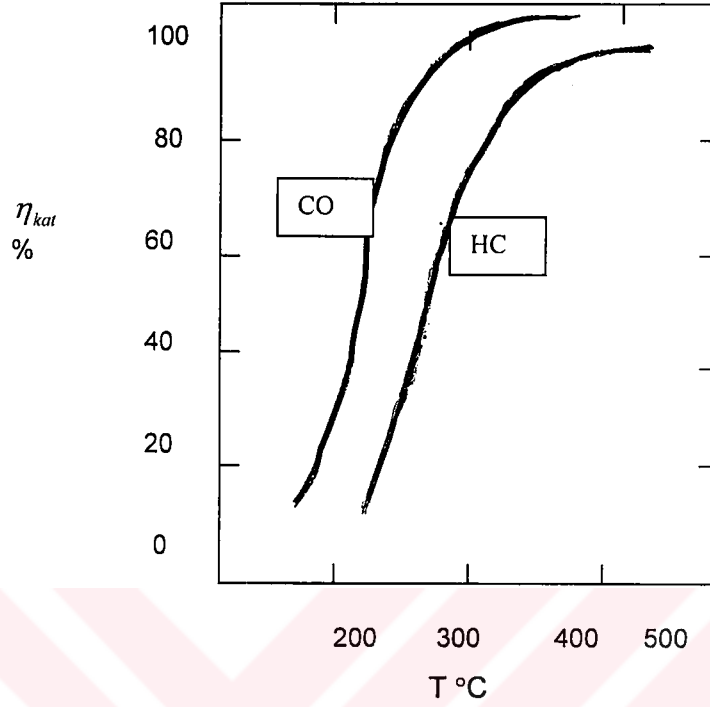
Motor tasarımında yapılan iyileştirmelerle, örneğin kompakt yanma odası şekli, silindir başına artırılan sübap sayısı, elektronik kontrollü yakıt hazırlama ve ateşleme sistemleri, EGR vs. ile zararlı eksoz emisyonlarının azaltılması bir yere kadar mümkün olmaktadır. Emisyonlarla daha etkili mücadele ancak motorun eksoz sisteminde zararlı eksoz gazı bileşenlerinin CO, HC ve NO_x'lerin bertaraf edilmesiyle mümkündür.

Benzinli motorlarda eksoz gaz sıcaklığı motorun rölanti devrinde 300 ile 400°C arasında değişirken yüksek güç gerektiren çalışma bölgelerinde 900°C'ye kadar ulaşmaktadır. Fakat genellikle eksoz gaz sıcaklığı 400 ile 600°C arasında değişmektedir. Benzinli motorlar genellikle $\lambda = 0.9$ ile 1.2 arasındaki hava-yakıt karışımıyla çalışmaktadırlar. Bu yüzden eksoz gazında kararlı bir seviyede O₂ bulunurken daha çok CO mevcuttur. Gaz kirleticileri eksoz gazında bertaraf etmek için ya termal ya da katalitik yöntemler kullanılabilir. Katalizör kullanmadan HC'ların oksidasyonu için 600°C'nin

üstündeki bir sıcaklığın en az 50 msn muhafaza edilmesi gerekir. Öteyandan CO'in oksidasyonu için 700°C'nin üstünde bir sıcaklığa ihtiyaç duyulmaktadır. Halbuki, CO ve hidrokarbonların katalitik oksidasyonu 250°C'den başlamaktadır ve eksoz gaz sıcaklığının büyük bir bölümünde etkili bir şekilde oksidasyon tepkimesi gerçekleşebilmektedir. Şekil 3.1'de CO ve HC'ların bir katalitik konvertör vasıtasıyla dönüşüm verimleri (η_{kat}) sıcaklığa (T) bağlı olarak gösterilmektedir. NO'in bertaraf edilmesinin tek yolu katalitik proseslerdir. Eksoz gazına amonyak NH₃ ilave edilerek yapılan NO'in katalitik reaksiyonu pratikte uygulanması mümkün değildir. Çünkü motorun geçiş (*transient*) çalışma bölgelerinde üretilen NO miktarı çok farklılık göstermektedir. Bu yüzden eksoz gazındaki NO'lerin CO, HC ve H₂ katalitik prosesiyle N₂'a dönüştürülmesi en tercih edilen yoldur.

Soymetallerin doğasındaki tepkimeye kolay girme özelliğinden dolayı katalitik konvertörlerde aktif malzeme olarak Platin Pt, Palladyum Pd ve Rodyum Rh kullanılmaktadır. CO, olefin ve metanın oksidasyonu için Pd'un katalitik özelliği Pt'den daha iyi olmasına rağmen aromatik HC'lara karşı Pt ve Pd aynı oranda aktiviteye sahiptirler. NO'in indirgenmesi için ise Rh, Pd ve Pt'den daha etkilidir. Muhtemel CO ve HC'ların oksidasyon, NO'lerin indirgeme reaksiyonları aşağıdaki şekilde gerçekleşmektedir.





Şekil 3.1. Katalitik konvertör sıcaklığının fonksiyonu olarak CO ve HC'ların katalitik konvertörde dönüşüm verimi

Bir katalitik konvertörün dönüşüm verimi bertaraf edilen ilgili bileşenin kütle debisinin konvertöre giren ilgili bileşenin kütle debisine oranı olarak verilebilir. Örneğin HC'lar için

$$\eta_{kat} = \frac{m_{HCgiren} - m_{HCcikan}}{m_{HCgiren}} \quad (3.1)$$

Genellikle katalitik konvertörlü araçlarda emisyonun büyük bölümü yaklaşık %60'ı katalitik konvertör soğukken yani sıcaklık 250 – 300°C'ye ulaşmadan eksozdan atılmaktadır. 250°C'ye kadar etkili olmayan katalitik konvertör yeterince sıcaklığa (400°C'ye) ulaştığında eksoz gazındaki CO'leri %98-99 oranında HC'ları da %95'in üzerinde dönüştürme potansiyeline sahiptir.

Avrupa Faz 1 seviyesindeki bir motoru Faz 3 emisyon seviyesine çıkarmak için katalitik konvertörü mümkün olduğu kadar çabuk ısıtmak

gerekiyor. Faz 3'le birlikte Avrupa emisyon çevriminin ilk 40 sn'lik soğuk çalıştırma kısmı iptal edilip gaz örneklemesinin hemen marş sonrası yapılması katalitik konvertörün hızlı bir şekilde ısıtılmasını zorunlu hale getirmiştir. Bunun için bir kaç yöntem mevcuttur. Katalitik konvertörün önceden elektrikli bir düzenele ısıtılması hem pahalı hem de aracın elektrik sisteminde köklü değişiklikler gerektirdiğinden burada tercih edilmemiştir. Zaten aynı nedenlerden dolayı bu sistem otomotiv sektörü tarafından da pek ilgi görmemiştir. Bu nedenle bu çalışmada göreceli olarak hacmi daha küçük ve metal taşıyıcılı olduğu için ısı yükü daha az olan ve bu yüzden daha çabuk sıcaklığı yükselebilen Pd/Rh soymetal yüklemesi yapılmış bir katalitik konvertör hemen motor çıkışına yerleştirilmiştir. Amaç, kısa sürede ısınabilen bu katalitik konvertörü eksoz sıcaklığının Faz 1 katalitik konvertör yerine göre daha da yüksek olduğu bir yere, eksoz manifold çıkışına yerleştirerek katalitik konvertörün daha kısa sürede devreye girmesini sağlamaktır. Ayrıca CO, olefin ve metan oksidasyonu için daha etkili olan Pd aktif malzeme olarak seçilmiştir. Öteyandan, araçta Faz 1 için kullanılan ana katalitik konvertör aynen daha önceden bulunduğu yerde muhafaza edilmiştir. Bunun amacı emisyon açısından uzun süre boyunca dönüşüm güvenilirliğini sağlamaktır. Bunu sağlamak için genellikle katalitik konvertör hacmi motorun toplam silindir hacminin en az yarısına eşit olacak şekilde seçilir.

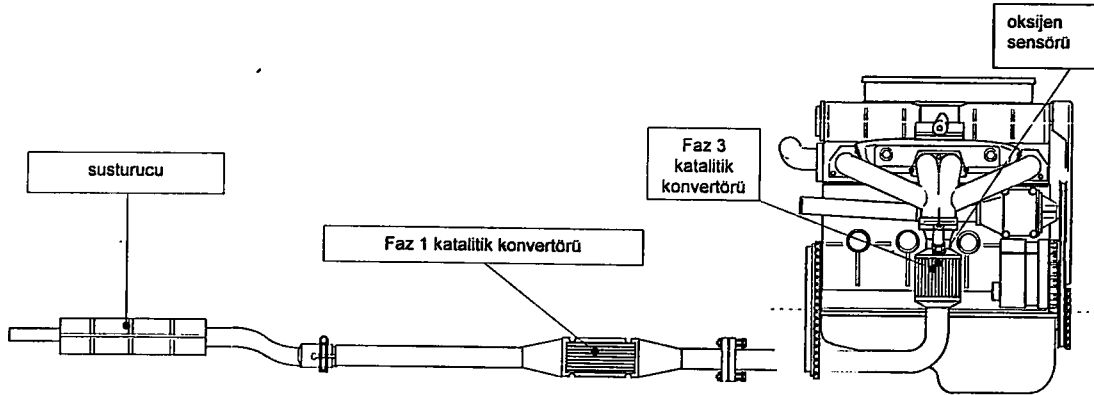
Hazırlanan bu konfigürasyonla aşağıda çizelge 3.1'de verilen Avrupa Faz 3 emisyon seviyelerinin tutturulması hedeflenmiştir.

Çizelge 3.1. Avrupa Faz 3 (EEC 98/69) eksoz emisyon limitleri

| TEST | CO g/km | HC g/km | NOx g/km |
|------|------------|------------|-------------|
| NEDC | 2.3 | 0.2 | 0.15 |

Deney motorunun önceki Faz 1 halinde, katalitik konvertör araç gövdesinin altına yerleştirilmiş durumdadır. Şekil 3.2'de görüldüğü üzere daha

küçük bir katalitik konvertör aracın motor bölmesine motora en yakın olabilecek şekilde yerleştirilmiştir. Öncelikle aracın o bölümünde, konulan bu katalitik konvertörün çevresindeki diğer parçalara yüksek sıcaklık nedeniyle zarar vermemesi için, yeni bir yerleşim düzenlemesi yapılmıştır. Bu yerleşime uygun olarak hazırlanan bir deney motoru banko çalışmaları için Tofaş'ta zaten kurulu halde olan motor test bankosuna bağlanmıştır. Motor üzerinde yapılacak her türlü değişikliğin sonuçlarının karşılaştırılabilir ve tekrarlanabilir olması amacıyla deney motoru ilk önce 50 saatlik yorma testine tabi tutularak motorun rodajı tamamlanmıştır. Motor eksoz sistemine ilave edilen bu ikinci katalitik konvertörün motor performansını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Bunun için deney motorunun Faz 1 eksoz sistemi ve Faz 3 eksoz sistemi ile motor frenleme torku, net güç ve yakıt sarfiyat karşılaştırılması yapılmıştır. Motora oldukça yakın olarak yerleştirilen yeni katalitik konvertörün, motorun araç üzerindeki bütün çalışma şartlarında katalitik konvertör imalatçısının teknik spektlerinde belirtilen sıcaklık değerlerini aşmaması için motor kalibrasyon parametreleri yeniden belirlenmiştir.

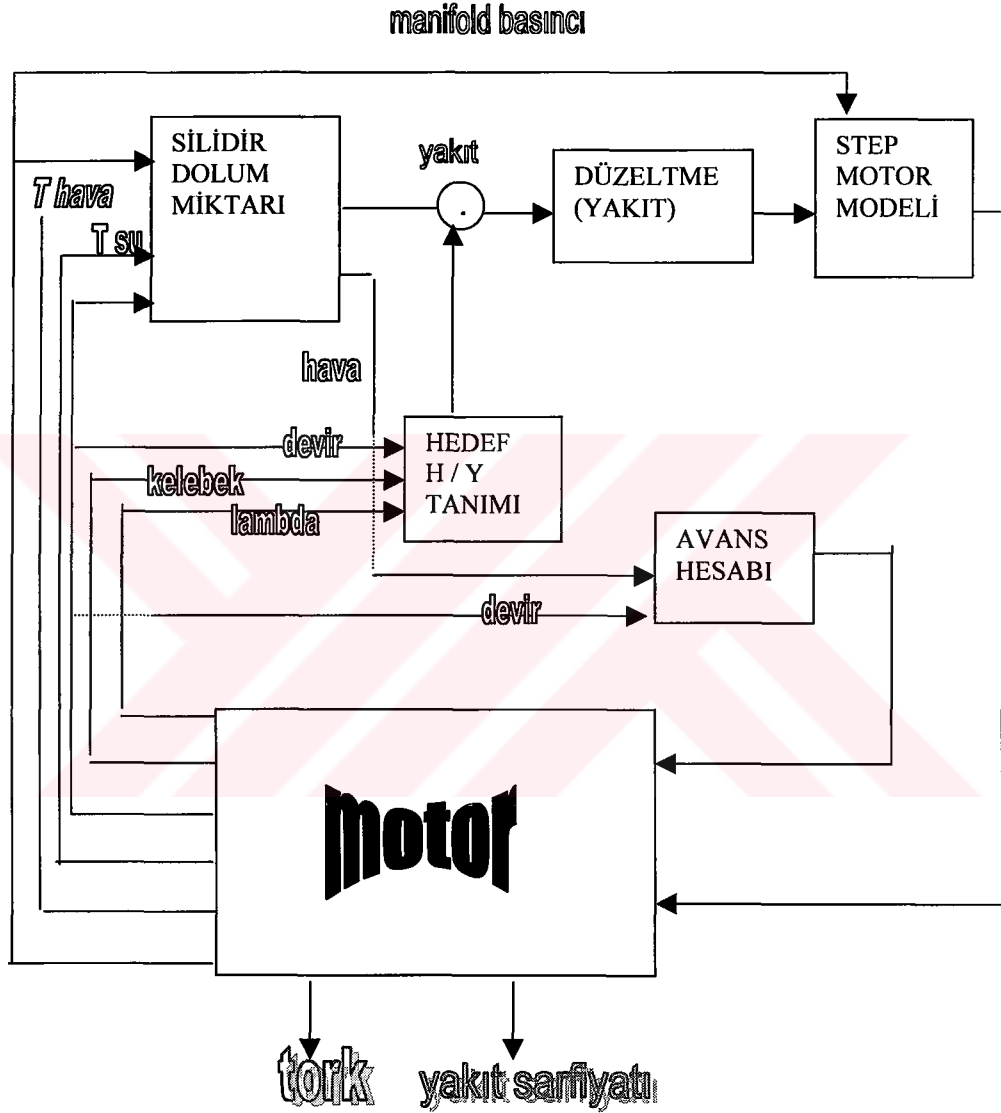


Şekil 3.2. Faz 3 eksoz sistemi ve katalitik konvertörlerin yerleşimi

Bunun için özellikle motorun yakıt enjeksiyon zamanları ve ateşleme zamanları üzerinde değişiklikler yapılmıştır. Katalitik konvertörün dayanabildiği maksimum sıcaklığın elverdiği ölçülerde, yakıt enjeksiyon zamanı stokiyometrik bir karışım elde edecek şekilde ayarlanmıştır. Yani mümkün olduğu kadar $\lambda = 1$ yapılmıştır. Burada amaç 3-yollu katalitik konvertörün CO, HC ve NO_x'lerin bertaraf edilmesinde maksimum düzeyde etkili olduğu lambda penceresinin muhafaza edilmesidir. Motorun yakıt ölçümü ve ateşlemesi elektronik olarak şekil 3.3'de gösterilen mantık kapsamında motor kontrol ünitesi tarafından, motorun yük durumu, ortam sıcaklığı, su sıcaklığı, motorun bulunduğu ortamın rakımı, motor devri, kelebek açıklığı, eksoz gazı içindeki oksijen miktarı çeşitli sensörlerle milisaniye mertebesindeki aralıklarla ölçülerek motorun durumu saptanır ve bir sonraki çevrimde ne kadar benzin gerektiği ve bu benzinin optimum şekilde yakılabilmesi için en uygun ateşleme zamanının ne olması gerektiği hesaplanıp uygulamaya konulur. Motora girdi olarak yakıt miktarı ve ateşleme zamanı olurken, çıktı olarakta motor torku ve yakıt sarfiyatı olmaktadır. Motorun bir yanma çevrimi sonunda ortaya çıkan eksoz gazları eksoz manifolduna yakın eksoz borusu üzerine konulan bir oksijen sensörü tarafından hissedilip bir önceki çevrimin fakir karışım, zengin karışım veya stokiyometrik karışım olup olmadığı algılanıp kapalı devre λ kontrolünün yapıldığı motor şartlarında benzin miktarı göreceli şekilde düzeltilir.

Motorun bütün çalışma noktalarında (yük/devir) katalitik konvertörün düzenli bir şekilde çalışması motor test bankosunda yapılan bu çalışmalarla garanti altına aldıktan sonra, deney motoru emisyon deneyleri ve araç motor bölmesi sıcaklık deneylerinin yapılması için deney aracına monte edilmiştir. Deney aracı da yapılan deney sonuçlarının ve ölçümlerin karşılaştırılabilir ve tekrar edilebilir olması amacıyla deneyler öncesi yaklaşık 3000 km'lik bir güzergahta yorulma ve rodaj testine tabi tutulmuştur. Motor bölmesinde katalitik konvertör ve civarındaki sıcaklık haritasının oluşturulması için kritik bulunan değişik yerlere sıcaklık duyarları konulmuştur. Sıcaklık değerleri Tofaş'ta halen kurulu olan emisyon laboratuvarı kullanılarak araç eksoz sıcaklığı maksimum seviyesine ulaşacak şekilde şasi dinamometre tarafından yüklenerek elde edilmiştir. Deney esnasında ortam sıcaklığıda kontrol altında bulundurulmuştur.

Bu şekilde olabilecek maksimum sıcaklık değerleri tesbit edilen parçaların fonksiyonel açıdan ve malzeme bakımından herhangi bir sorun teşkil edip etmediği analiz edilmiştir.



Şekil 3.3. Motor kontrol ünitesi çalışma diagramı

Sıcaklık deneylerinden sonra yine emisyon laboratuvarında deney aracı Faz 3 eksoz çözümü olduğu halde Avrupa yeni emisyon çevrimi NEDC kullanılarak eksoz emisyon testlerine tabi tutulmuştur. Bu testler esnasında motor bankosunda belirlenen yeni motor kalibrasyonu kullanılmıştır. Aynı

araçla, eksoz sistemi ve motor kalibrasyon parametreleri Faz 1 seviyesine döndürülüp ECE+EUDC emisyon çevrimi kullanılarak eksoz emisyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Her iki durumda da katalitik konvertörlerin sıcaklık profilleri, emisyon dönüşüm verimleri ve *light-off* zamanları (katalitik konvertörün %50 civarında dönüşüm etkinliğine ulaştığı zaman) tesbit edilmiştir.

Çalışma sonuçları değerlendirilerek böyle bir uygulamanın gerçek hayata geçirilip geçirilemeyeceğinin ekonomik ve teknik açıdan bir değerlendirilmesi yapılmıştır.

3.3 Deneysel Düzeninin Tanıtılması

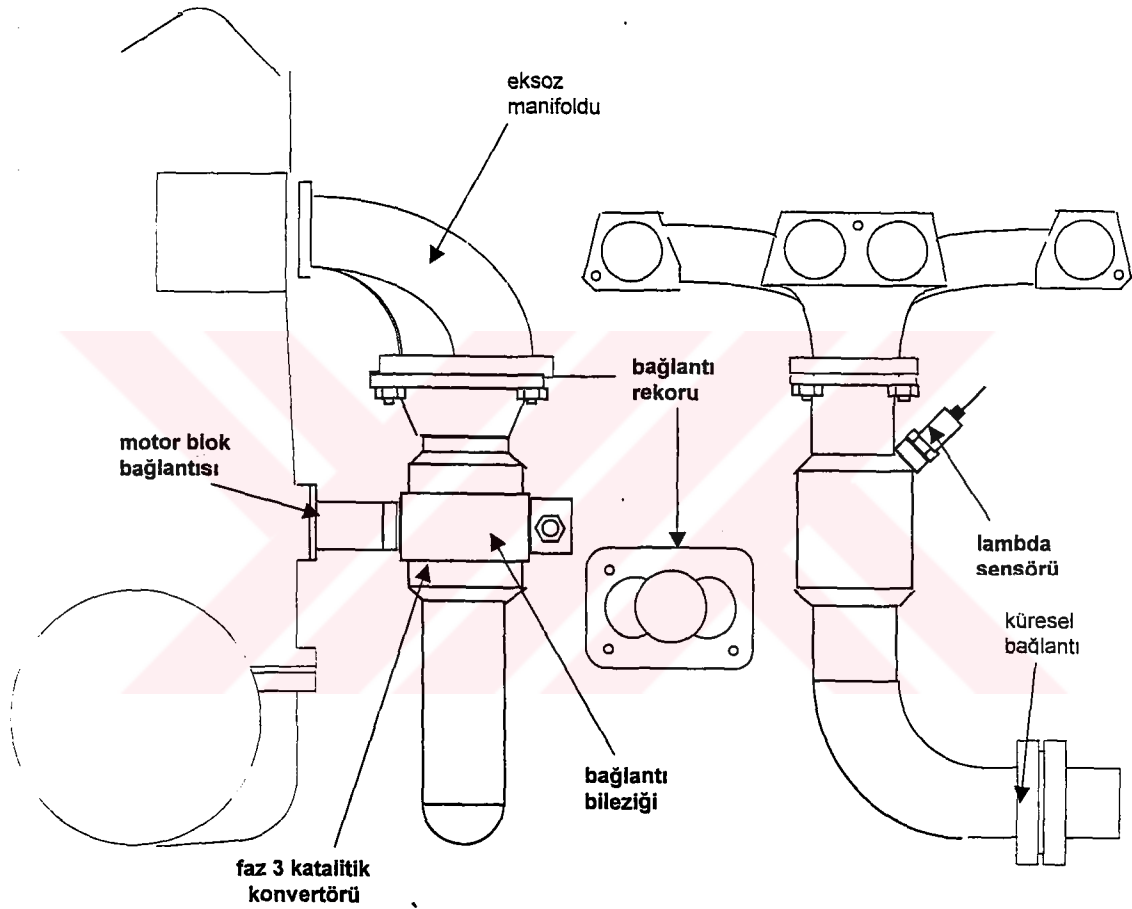
Deneylerde TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş.'de zaten kurulu olan test cihaz ve ekipmanları kullanılmıştır. Deneysel motoru, aracı ve eksoz sistemi spesifik olarak bu çalışma için hazırlanmıştır. Deneysel Motoru: Yapılan testlerde dört zamanlı, dört silindirli, 1600 cc silindir hacmi olan, üstten kam milli, tek noktadan enjeksiyonlu içten yanmalı benzinli bir motor kullanılmıştır. Motorun teknik verileri aşağıda verilmiştir.

| | |
|------------------|--|
| Silindir Hacmi | : $V_d = 1600$ cc |
| Motor Kursu | : $B = 67.4$ mm |
| Silindir Çapı | : $L = 86.4$ mm |
| Sıkıştırma Oranı | : $r_c = 9.2 / 1$ |
| Ateşleme sistemi | : elektronik, distribütörsüz |
| Yakıt Sistemi | : tek noktadan enjeksiyonlu, M.Marelli IAW |
| Maksimum Güç | : $P_b = 80$ HP EEC (5750 devir/dak) |
| Maksimum Tork | : $T_b = 12$ kgm EEC (3250 devir/dak) |

Faz 3 katalitik konvertörü: Motorun eksoz sistemine eksoz manifolduna yakın olacak şekilde ilave edilen ikinci katalitik konvertörün yerleşimi şekil 3.4'te gösterilmektedir. Katalitik konvertörün teknik özellikleri ise aşağıda verilmiştir.

| | |
|---|--------------------------|
| Taşıyıcı ölçüleri (mm) | : $\phi = 90$, boy = 90 |
| Taşıyıcı malzemesi ve şekli | : metal, bal peteği |
| Hücre yoğunluğu (hücre ad./inc ²) | : 400 |
| Hacim (dm ³) | : 0.57 |

| | |
|--|---------|
| Toplam yüzey alanı (m ²) | : 1.95 |
| Soy metal yüklemesi (g/ft ³) | : 50 |
| Pt:Pd:Rh oranı | : 0:5:1 |
| Maksimum kullanım sıcaklığı(°C) | : 900 |
| Maksimum sıcaklık, 5sn (°C) | : 1050 |



Şekil 3.4. Faz 3 katalitik konvertörünün motora bağlantısı

Faz 1 katalitik konvertörünün teknik özellikleride F3 ile karşılaştırmak amacıyla aşağıda verilmiştir.

| | |
|---|--------------------------------------|
| Taşıyıcı ölçüleri (mm) | : r = 37, eksen arası=115, boy = 167 |
| Taşıyıcı malzemesi ve şekli | : seramik, bal peteği |
| Hücre yoğunluğu (hücre ad./inc ²) | : 400 |
| Hacim (dm ³) | : 1.507 |
| Toplam yüzey alanı (m ²) | : 6.05 |

| | |
|---|---------|
| Soymetal yüklemesi (g/ft ³) | : 50 |
| Pt:Pd:Rh oranı | : 5:0:1 |
| Maksimum kullanım sıcaklığı(°C) | : 830 |
| Maksimum sıcaklık, 5sn (°C) | : 950 |

Deney aracı olarak deneylerde Tofaş-Fiat 131 Şahin model bir araç kullanılmıştır. Halen Faz 1 Avrupa emisyon normuna uygun katalitik konvertörlü olarak üretilmekte olan bir araç alınıp eksoz sisteminde yukarıda bahsedilen değişiklikler yapılmıştır.

Bu çalışmada motor dinamometre testleri 20m² büyüklüğündeki motor test odasında yapılmıştır. Burası motor gücü, motor torku, yakıt sarfiyatı, yağ sarfiyatı, blow-by miktarı, motorun değişik yerlerinden sıcaklık, basınç ve debi ölçümünün yapılabildiği komple bir odadır. Aşağıda belirtilen cihaz ve donanımların yanı sıra motor emiş havasının sıcaklık ve nem bakımından şartlandırıldığı birde havalandırma sistemi mevcuttur. Otomatik test çevrimini kontrol eden ve değişik testlerin programlanabildiği bir AVL PUMA 3 test bankosu otomatik kontrol sistemi sayesinde motor deney çevrimlerinin bir kısmı otomatik olarak gerçekleştirilmiştir. Bu sistem programlanarak motor değişik yüklerde ve devirlerde otomatik olarak test edilmiştir. Motor su sıcaklığı, yağ sıcaklığı, yağ basıncı kontrol altına alınıp motorun üzerine konulabilen bir çok basınç, sıcaklık, tork duyargalarından ve yardımcı test ekipmanlarından (yakıt terazisi, blow-by metre vs.) alınan sinyaller kayıt edilerek otomatik olarak bu veriler işlenebilmektedir. Burada alınan veriler elektronik ortamda başka bir programa aktarılıp motorun yakıt, sıcaklık, eksoz basınç haritaları çıkarılabilmektedir. Oda içinde kurulu Eddy Current prensibiyle çalışan bir fren sayesinde sabit yük, sabit devir ve değişken kelebek açıklığı şartlarında motor test edilerek, frene bağlı olan bir yük hücresi (*load cell*) kanalıyla motorun tork değeri ölçülmüştür. Bu tork değerleri ve motor devir değerleri AVL PUMA 3 kontrol sistemi tarafından kullanılarak motor güç değerleri hesaplanmıştır. Bu frenin teknik özellikleri şu şekildedir: Maksimum güç 260 HP, maksimum devir ise 12000 devir/dk'dır. Rodaj testleri sırasında da fren tarafından motora yorma amacıyla değişik yükler uygulanmıştır.

Deneyler sırasında motorun sarfettiği yakıt AVL Fuel Balance 733 yakıt terazisi ile ölçülmüştür. Ağırlık tartma prensibiyle ölçüm yapan ve ölçüm sonuçlarını her 10 saniyede bir analog değer olarak PUMA test bankosu otomatik kontrol sistemine gönderen bu yakıt terazisi dizel yakıt ölçme özelliğine de sahiptir.

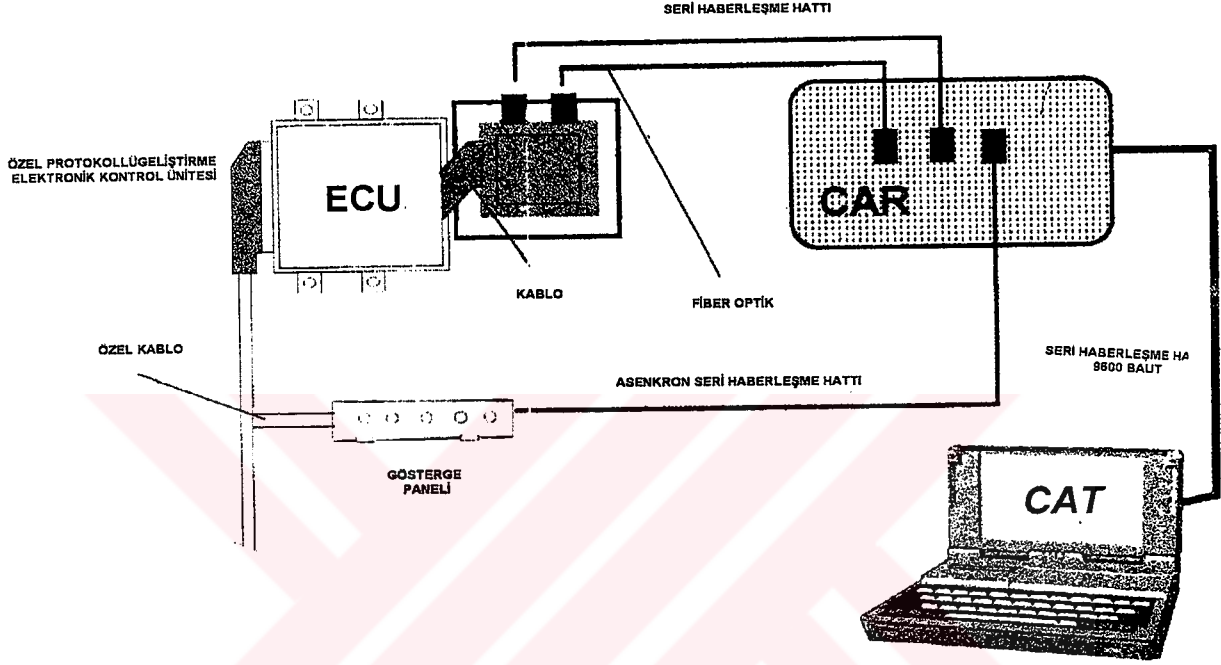
Ayrıca Faz 1 ve Faz 3 eksoz sistemleri arasındaki geri basınç farklarının ölçümünde kullanılan ve aynı zamanda motorun kartere kaçan gazlarını ölçme özelliğine sahip AVL Blowby Meter odanın standart donanımları arasında olup deney motorunun geri basıncı bu sistemle ölçülmüştür.

Deney motorunun yağ sarfiyatı klasik yöntemle yani deney öncesi ve sonrası motora konulan yağ miktarı bir terazide tartılarak aradaki fark test süresine bölünerek bulunmuştur. Ayrıca karşılaştırma amacıyla test odasında mevcut olan AVL Oil Consumption Meter 403 yağ sarfiyat cihazıyla da motorunun yağ sarfiyatı ölçülmüştür.

Motorun elektronik kontrol ünitesinin yeniden programlanması için Magneti Marelli firmasının şekil 3.5'te gösterilmekte olan CAR sisteminin kullanılmıştır. Veri toplamaya ve parametreleri değiştirmeye yarayan, Hardware ve Software'den oluşan komple bir sistemdir ve spesifik olarak M.Marelli firması tarafından kendi ürettikleri MKÜ'lerini programlamak için tasarlanmıştır. Bu sistem kullanılarak MKÜ için programlanabilir cip (EEPROM) hazırlanmıştır. MKÜ kalibrasyonu esnasında özellikle yakıt enjeksiyon zamanlarının tayininde karışımın zengin veya fakir olduğunun tesbiti gereklidir. Motorun kendi lambda sensörü 0 veya 1 şeklinde sinyal verdiği için kalibrasyon amaçlı kullanılması mümkün değildir. Bunun için eksoz gazındaki oksijen miktarını lineer bir şekilde ölçerek hava fazlalık katsayısının hesaplanmasına yarayan, bir oksijen sensörü ve ona bağlı elektronik ünitelerden oluşan bir ETAS firması LSH 3 lambda metresi kullanılmıştır.

Bu çalışmada aracın eksoz emisyon deneylerinin ve motor bölmesi sıcaklık deneylerinin gerçekleştirilmesi için araç deney odası olarak Tofaş'ta daha önceden kurulmuş olan emisyon laboratuvarı kullanılmıştır. Aşağıda laboratuvarın sadece bu çalışmada kullanılan bölümü hakkında bilgiler verilmektedir. Deney odası yaklaşık 350 m³ hacime sahip yalıtımlı bir odadır.

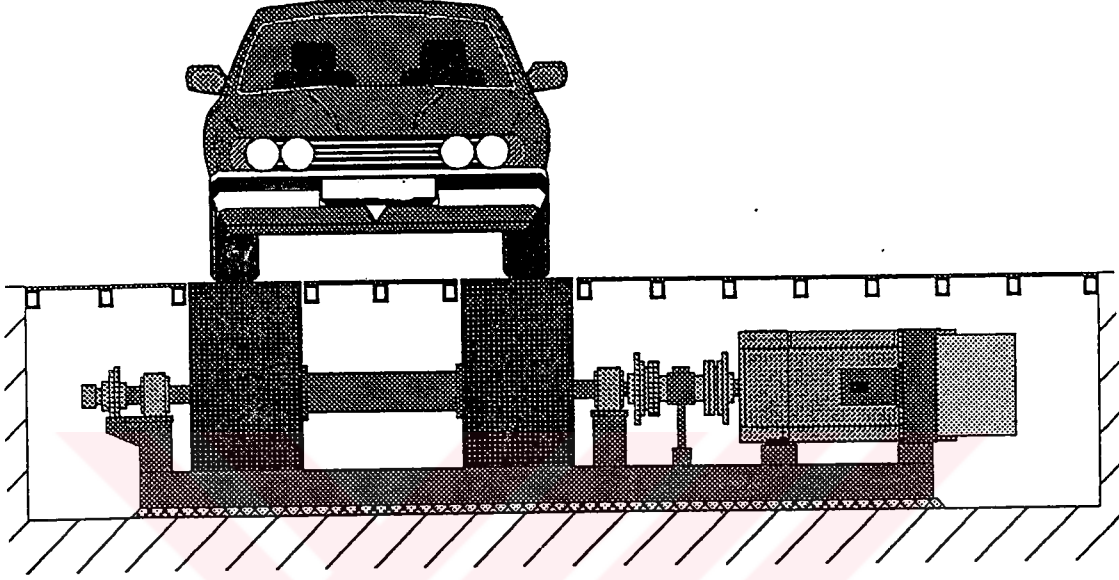
İklimlendirme sistemi sayesinde deney sırasında ortam sıcaklığı ve nemi istenilen değerde tutulabilmektedir. Oda sıcaklığı -35 ile $+45^{\circ}\text{C}$ arasında ayarlamak mümkündür.



Şekil 3.5. CAR motor kontrol ünitesi kalibrasyon düzeneği

Deney odasının en önemli deney düzeneği şekil 3.6'da gösterilmekte olan şasi dinamometredir. Deney aracının yoldaki bütün kullanım şartlarını deney esnasında araca simüle edebilen bir sistemdir. Araç deney odasına alınmadan düz bir yolda belirlenen hız aralıklarındaki ΔV yavaşlama zamanları Δt (*coast down* zamanları) ölçülüp bu zamanlar şasi dinamometrenin kontrol ünitesine girilerek oluşturulan $\Delta V - \Delta t$ ilişkisinden her türlü yol simülasyonun yapıldığı (yol direnci, sürtünme direnci, araç ağırlığı, lastik direnci, yol eğimi vs.) bir fonksiyon oluşturulmaktadır. Deney esnasında da oluşturulan bu $f(t)$ fonksiyonu araca uygulanmıştır. Emisyon deneyleri esnasında NEDC emisyon çevrimi bu sistem kullanılarak simüle edilmiştir. Ayrıca aracın yoldaki rüzgar etkisiyle soğumasını simüle eden bir tane de hava üfleyici fan kullanılmıştır.

Emisyon deneyi öncesi 98/69/EC direktifi gereği olarak deney aracını en az 6 saat boyunca test sıcaklığında tutulması gerekmektedir. Bu işlemin yapıldığı ön şartlandırma odasında yalıtımlı ve 42 m² alana sahip bir odadır.



Şekil 3.6. Emisyon şasi dinamometresi

Deney sırasında aracın eksozundan çıkan gazlar, yalıtımlı borularla (dizel ve benzinli araç deneyleri için ayrı ayrı olmak üzere) gaz analiz odasına aktarılır. Test esnasında araç eksozundan çıkan gazın tamamı hacimsel büyüklüğü nedeniyle torbalarda toplanamayacağı için, seyreltilen eksoz gazından test çevrimi boyunca bir miktar gaz polietilen naylon bazlı torbalarda toplanır, eksoz gazının büyük bir bölümü ise atmosfere atılır. Toplanan bu gaz aracın test sırasındaki eksoz gazının tamamını temsil eder, bu gaz analiz edilir ve aracın emisyon seviyesi buna göre tesbit edilir. Önemli olan, aracın emisyon seviyesini belirlemek için peşinde koşulan CO, HC ve NO_x gazlarının motordan (modal analiz durumunda) veya eksoz borusundan çıktıktan sonra her hangi bir bozulmaya uğramaksızın gaz analizatörlerine kadar taşınmasıdır. Bunun için eksoz gazı sıcaklığı 191 °C olan yalıtımlı borularla seyrelme tüneline getirilir (yoğuşma nedeniyle borularda su oluşmasını diye, borulardaki su örneklenen HC'ların bozulmasına neden olabilir). Seyreltme tüneline eksoz gazı, sabit hacimli bir pompa vasıtasıyla emilen ortam havası ile seyreltilir. Seyreltme

oranı bilinen bir oran olup hesaplamalarda sistem tarafından dikkate alınmaktadır. Bu şekilde yukarıda bahsedilen üç tane gazın hava içindeki oksijenle herhangi bir tepkimeye girmesi önlenmiş olur.

Emisyon deneyleri sırasında örneklenerek çantalarda toplanan gazlar hassasiyeti daha yüksek olan katalitik konvertör sonrası analizör grubunda analiz edilirler. Burada CO, HC, NO analizatörlerinin yanı sıra yardımcı hesaplamalarda (yakıt sarfiyatı, ERG oranı vs.) kullanılmak üzere O₂ ve CO₂ analizatörleride mevcuttur. Eş zamanlı ölçüm (on-line) ve katalitik konvertörün verimini hesaplamak için katalitik konvertör öncesi alınan örneklerin analiz edilmesi içinde ayrı bir grup analizör (CO, HC, NO, O₂ ve CO₂) mevcuttur. Kullanılan bu analizörlerin kalibrasyonunu yapabilmek için, temsil ettiği gaz değeri sertifikalandırılmış toplam 26 adet basınçlı tüpte saklanan farklı konsantrasyonlardaki kalibrasyon gazları ayrı bir odada muhafaza edilmektedir. Tüplerle gaz analizatörleri arasındaki borular, bağlantı elemanlarının tamamı sertifikalandırılmış bu gaz değerlerini bozmayacak malzemelerden seçilmiştir.

Yukarıda sayılan bütün bu ısıtma, seyreltme, örnekleme, analizörlerin kontrolü, şasi dinamometrenin kontrolü, test çevriminin gerçekleştirilmesi vs. gibi bir çok işlem tek bir merkezden yapılmaktadır. Bu merkeze ana bilgisayar veya ana kumanda merkezi adı verilmektedir. Bunun yanı sıra bütün bu birimlerden alınan bilgiler değerlendirilerek ve atmosfer şartları göz önünde bulundurularak bir çok hesaplamaların yapıldığı bu merkez sonunda aracın kilometre başına ne kadar CO, HC ve NO_x çıkardığını hesaplar.

3.4 Akış ve Ölçme Prensipleri

Sıcaklık ölçümleri: Bu çalışmada sıcaklık ölçümleri ısı ile gerilimi değişen sıcaklık duyargaları kullanılarak yapılmıştır. Sıcaklık duyargalarının çıktısı olan analog akım değeri her 20 sn de bir olmak üzere kayıt cihazı tarafından kayıt edilmiştir.

Basınç ölçümleri: Motor banko deneylerinde eksoz ve emme sistemi basınç değerleri U manometresi kullanılarak atmosferle ölçülen ortam arasındaki fark basıncı su yüksekliği türünden okunarak tesbit edilmiş ve basınç

değeri 3.2 bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır. Suyun sıkıştırılmaz (*incompressible*) $\rho = \rho_0$ akışkan olduğu varsayılarak eş yükseklik için

$$\frac{dp}{dz} = -\rho_0 g = \text{sabit}$$

şeklinde olup z_0 seviyesinden z seviyesine basınç değişimi şu şekilde bulunabilir

$$\int_{p_0}^p dp = - \int_{z_0}^z \rho_0 g dz$$

veya

$$p - p_0 = -\rho_0 g(z - z_0) = \rho_0 g(z_0 - z)$$

$$z_0 - z = h$$

kabul edilirse basınç farkı değişimi denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$p = p_0 + \rho_0 g h \quad (3.2)$$

Motorun frenleme yükü bir yük hücresi (*load cell*) kullanılarak ölçülmüştür. Yük hücresi, üzerinde elektriksel direnci hareket mesafesine göre değişebilen bir duyargadan oluşmuştur. Bu duyarga daha önceden kütlesi belli olan bir ağırlık vasıtasıyla ürettiği voltaj değeri uygulanan kuvvetle kalibre edilir. Yük hücresi değerleri kullanılarak motorun ürettiği tork ve güç değerleri sırasıyla 2.7 ve 2.8 formüller kullanılarak hesaplanmıştır.

Emisyon ölçümleri ve analizi test edilecek araç ve motor için karmaşık ekipmanlarla yol şartlarının simüle edildiği atmosfer şartlarının kontrol edildiği bir laboratuvar ortamını gerektirmektedir. Emisyon ölçümünde daha önceleri çeşitli yöntemler denenmesine rağmen 1982 yılından itibaren Avrupa'da uygulamaya konulan ve halen uluslararası kabul gören sabit hacim örnekleme (*constant volume sampling CVS*) yöntemi (şekil 3.7) bütün dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem yoğunlaşmayı önlemek için eksoz gazının

şartlandırılmış ortam havası ile seyreltilmesini öngörmektedir. Emisyon hesaplamasını kolaylaştırmak için eksoz ve ortam havası karışımının sabit hacimde yapılması gereği vardır. Bu yüzden eksoz gazının seyreltme oranı motorun yük durumuna göre 4:1'den 30:1'e kadar değişebilmektedir. Seyreltilmiş toplam gaz miktarı kritik akış lülesi kullanılarak ölçülmüştür. Akış lülesindeki debi aşağıdaki bağıntı ile ifade edilmektedir.

$$Q_s = \frac{K_v P}{\sqrt{T}} \quad (3.3)$$

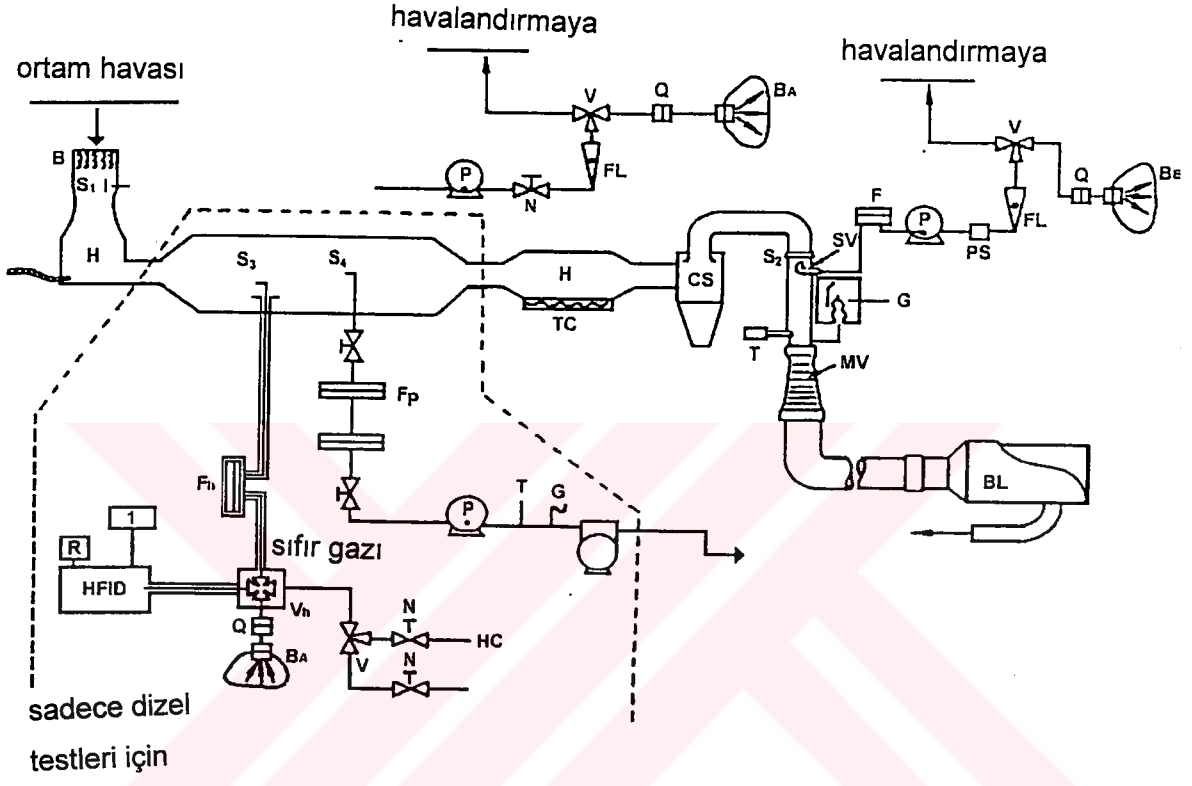
Burada Q_s :toplam debiyi, K_v : lülenin kalibrasyon sabitini, P : mutlak basıncı (kPa) ve T :sıcaklığı (K) belirtmektedir.

Seyreltilen eksoz gazından bir miktar örnek alınarak çevrim esnasında çantalarda biriktirilmekte ve çevrim sonunda çantadaki gaz analiz edilmektedir. CO ve CO₂ miktarları fiziksel optik (dağılmayan kızıl ötesi ışık *non-dispersive infrared NDIR*) yöntemiyle belirlenmiştir. Burada ölçülecek olan örnek gaz içinde kızıl ötesi ışın bulunan bir odanın içinden geçirilir. Burdaki ışığın dalga boyu, ölçülecek olan bileşene göre özel olarak seçilmektedir. Örnek içindeki CO veya CO₂ kızıl ötesi ışınları soğurur ve geriye kalan ışın referans ışın kaynağı ile karşılaştırılarak ilgili gazların konsantrasyonu tayin edilir.

Toplam hidrokarbonların THC ölçümü kimyasal alev iyonlaşması (*flame ionization detector – FID*) yöntemiyle yapılmıştır. Burada örnek gaz hidrojen alevinin içinden geçirilir. Örnek içindeki hidrokarbonlar içlerindeki karbon atomuna oranlı bir şekilde iyonlaşma akımı üretirler. Alevi çevreleyen bir elektrot kollektörü iyonlaşma akımındaki değişimi ölçer. Örnek içindeki HC miktarı ppm C olarak ifade edilir.

NO_x gazlarının ölçümü yine bir kimyasal ışımaya yöntemiyle (*chemiluminescent detector CLD*) gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem örnek gaz içindeki nitrik oksit NO'ü belirlemek üzere kurulmuştur. NO ile ozon O₃ arasındaki kimyasal reaksiyon foton ışımaya yapmaktadır. Bu ışımada bir detektör tarafından algılanmaktadır. Işıma miktarı doğrudan NO

konsantrasyonuna eşittir. Ölçüm öncesi örnek içindeki bütün NO_x'ler NO'e dönüştürülürler.



Şekil 3.7. Sabit hacim örnekleme sistemi

B:seyreltme havası filresi, H:karışım odası, CS: siklon ayırıcı, S₁:seyreltme havası örnek alma noktası, S₂:seyreltilmiş egzoz gazı örnek alma havası, SV:kritik akış lülesi, F: filtre elemanı, P:pompa, N:akış kontrol vanası, FL:debimetre, V:solenoid valf, B: caz toplama çantaları, G:basınç ölçer, T: sıcaklık ölçer, MV:kritik akış lüle borusu, BL: fan

Yapılan test çevriminde kat edilen yolun km'si başına eksozdan atılan kirlenici bileşenlerin miktarı aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$M_i = \frac{V_{mx} Q_i k_H C_i 10^{-6}}{d} \quad (3.4)$$

Burada, M_i : ilgili kirleticinin km başına gram türünden kütlesini, V_{mix} : eksoz gazının litre türünden toplam hacmini (standart şartlarda düzeltilmiş hali), Q_i : ilgili kirleticinin yoğunluğu (gr/l), k_H : nem düzeltme faktörünü, C_i : ilgili bileşenin seyreltilmiş eksoz gazı içindeki ppm türünden konsantrasyonu ve d : test çevriminde katedilen gerçek yol mesafesini (km) göstermektedir.



4 ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1 Giriş

Faz 3 eksoz emisyon seviyesini yakalayabilmek için tek noktadan enjeksiyonlu bir motora yerleştirilen ikinci bir katalitik konvertörün motor performansına olan etkilerinin araştırılması amacıyla motor deney odasında motor tork, güç ve yakıt sarfiyat deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları Faz 1 çözümüyle karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda motorun en ağır çalışma şartlarında katalitik konvertör sıcaklığının kontrol altına alınması, performans ve emisyon optimizasyonu için motor deney odasında MKÜ'nin değişkenleri kalibre edilmiştir. Araç üzerinde motor bölgesine konulan Faz 3 katalitik konvertörünün çevresindeki diğer parçalara sıcaklık açısından zarar verip vermediği, araç şasi dinamometresi üzerinde yapılan deneyler aracılığıyla araştırılıp sorunlu parçalar üzerinde tasarım değişikliği önerilerinde bulunulmuştur. Araç ve katalitik konvertör yorma testine tabi tutularak araç emisyon laboratuvarında gerçekleştirilen emisyon deneylerine hazırlanmıştır. Avrupa yeni emisyon çevrimine ENDC göre test edilen araçta sürekli olarak ölçülen emisyon değerleri dikkate alınarak emisyon optimizasyonu yapılmıştır.

4.2 Deney Sonuçlarının İncelenmesi

4.2.1 Motor Performans Değerlerinin Karşılaştırılması

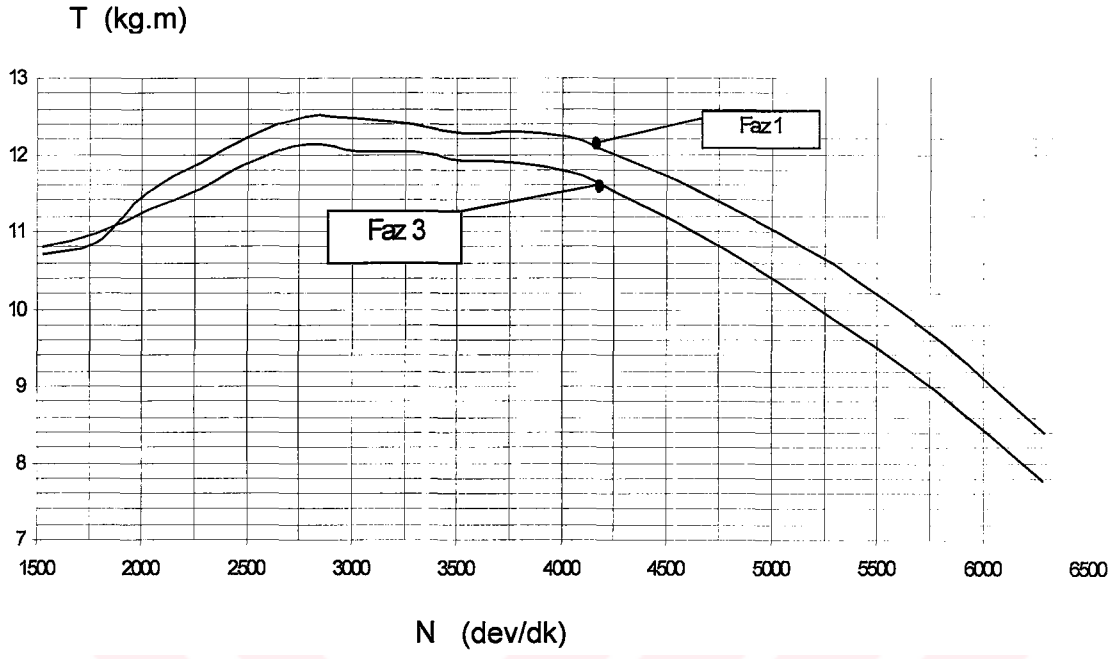
Enjeksiyon ünitesi kelebeği tam açık olacak şekilde (*open throttle*) gerçekleştirilen tam yük Faz 3 motoru performans deneyi sonucunda elde edilen güç, tork ve yakıt sarfiyat değerleri çizelge 4.1'de verilmiştir. Aynı şekilde Faz 1 motoruda test edilerek Faz 3 ve Faz 1 motorlarının, motor frenleme torku (şekil 4.1), frenleme gücü (şekil 4.2) ve yakıt sarfiyat değerlerinin (şekil 4.3) motor devrine göre değişim eğrileri çizilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Her üç grafikte görüldüğü üzere Faz 3 çözümünün performans değerleri Faz 1'e göre biraz daha düşük olduğu gözlenmektedir. Maksimum tork ve güç değerleri dikkate alındığında bu fark %4 civarında gerçekleşmektedir. Bu farkın olacağı çalışmanın başında beklenen bir

durumdu. Çünkü motor eksoz sistemine konulan Faz 3 katalitik konvertör yerleşimi için motor eksoz çıkışı çift borudan tek boruya indirilmiştir. Ayrıca bu ikinci katalitik konvertörde eksoz sisteminde eksoz gazlarının çıkışını zorlaştırmaktadır. Şekil 4.4'de görüldüğü üzere Faz 3 eksozuyla özellikle yüksek devirlerde eksoz basıncı daha yüksek olmaktadır. Bu şekilde Faz 3 eksozuyla motorun hacimsel verimi düşmektedir. Silindire dolan hava miktarının azalması sonucu yakılan yakıt miktarı ve buna bağlı olarak motor performansıda azalmaktadır.

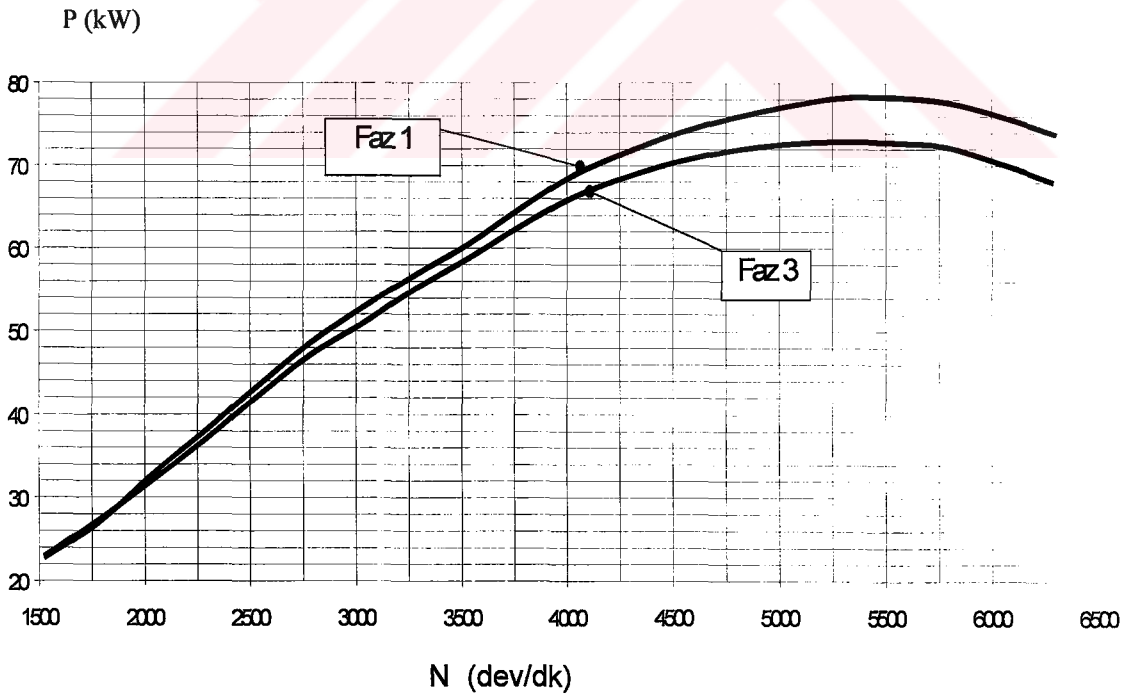
Çizelge 4.1. Faz 3 motor test bankosu verileri

| Devir dev/dk | Güç Hp (EEC) | Tork Kg.m | Co g/hp s | Cs l/s |
|-----------------|-----------------|--------------|--------------|-----------|
| 6230 | 70,9 | 7,96 | 246 | 23 |
| 5982 | 73,2 | 8,56 | 237 | 22,8 |
| 5731 | 73,8 | 9,01 | 231 | 22,5 |
| 5483 | 72,4 | 9,23 | 228 | 21,7 |
| 5233 | 71,3 | 9,53 | 232 | 21,8 |
| 4986 | 69,4 | 9,72 | 233 | 21,3 |
| 4738 | 67,9 | 10,01 | 227 | 20,2 |
| 4489 | 65,4 | 10,16 | 223 | 19,1 |
| 4243 | 63,6 | 10,45 | 217 | 18,1 |
| 3996 | 60,2 | 10,48 | 212 | 16,7 |
| 3746 | 56,6 | 10,50 | 213 | 15,7 |
| 3498 | 53,2 | 10,54 | 214 | 14,9 |
| 3249 | 49,7 | 10,58 | 214 | 13,8 |
| 3001 | 45,2 | 10,38 | 216 | 12,6 |
| 2753 | 40,7 | 10,15 | 222 | 11,7 |
| 2503 | 36,9 | 10,07 | 224 | 10,6 |
| 2256 | 32,6 | 9,81 | 225 | 9,4 |
| 2010 | 28,9 | 9,69 | 224 | 8,2 |
| 1762 | 25,2 | 9,55 | 220 | 7 |
| 1514 | 21,5 | 9,37 | 230 | 7 |

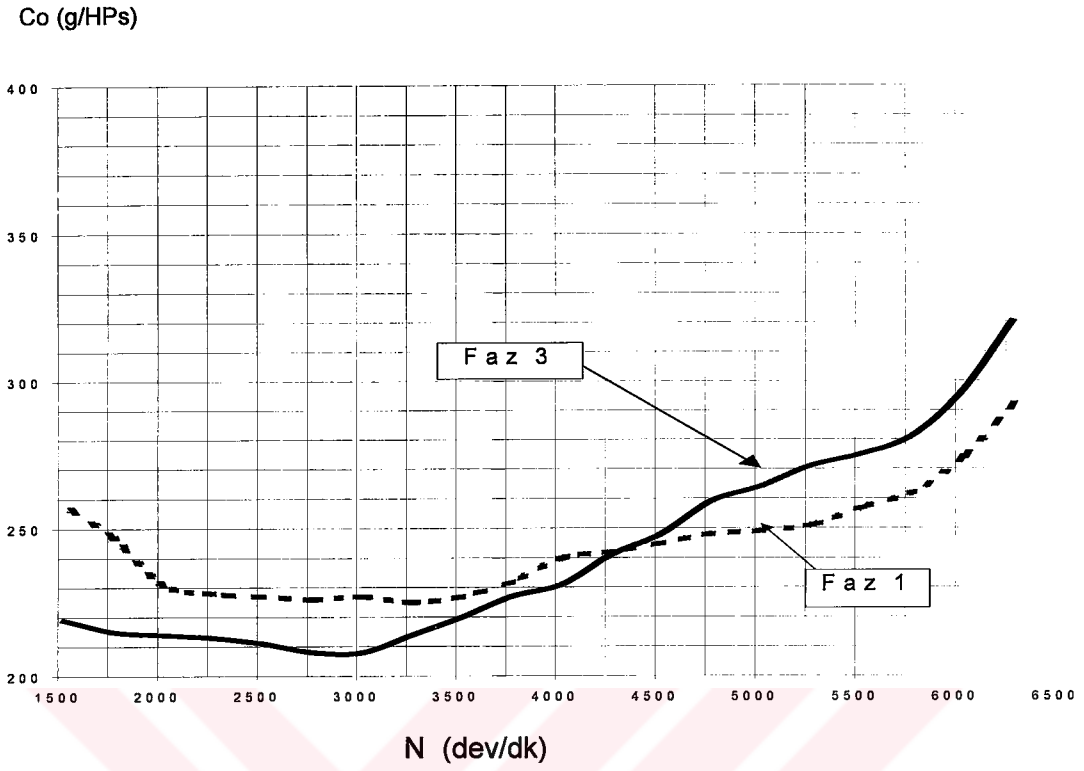
Co: özgül yakıt sarfiyatı, Cs:yakıt sarfiyatı



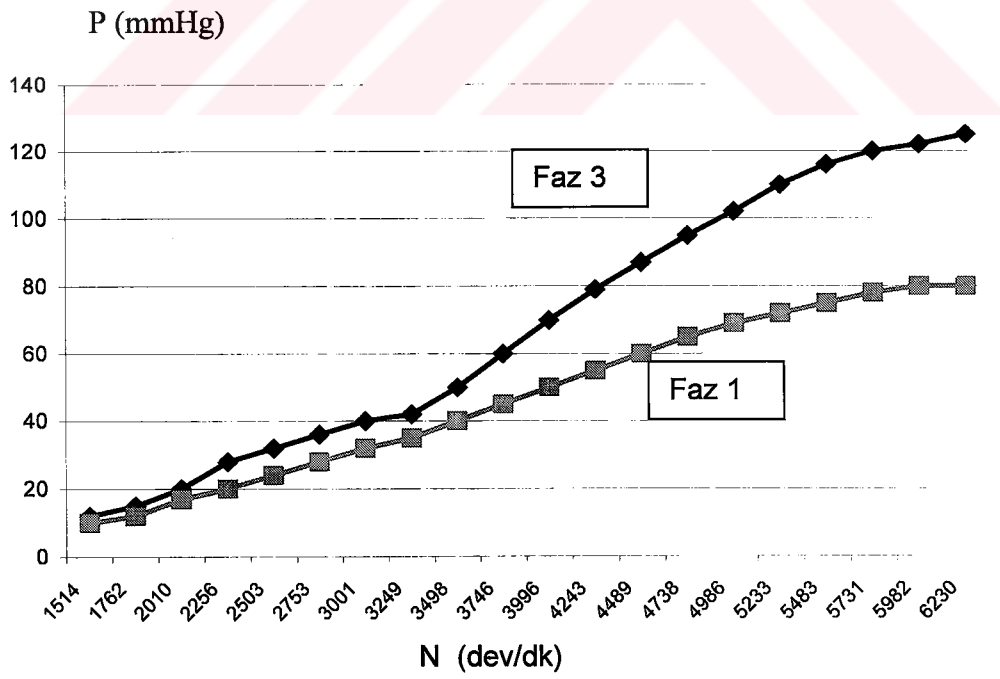
Şekil 4.1. Faz 3 ve Faz 1 motor tork değerleri karşılaştırması



Şekil 4.2. Faz 3 ve Faz 1 motor güç değerleri karşılaştırması



Şekil 4.3. Faz 3 ve Faz 1 yakıt sarfiyat değerleri karşılaştırması



Şekil 4.4 Faz1 ve Faz 3 eksoz basınç karşılaştırması

4.2.2 Araç Motor Bölmesi Sıcaklık Dağılımı

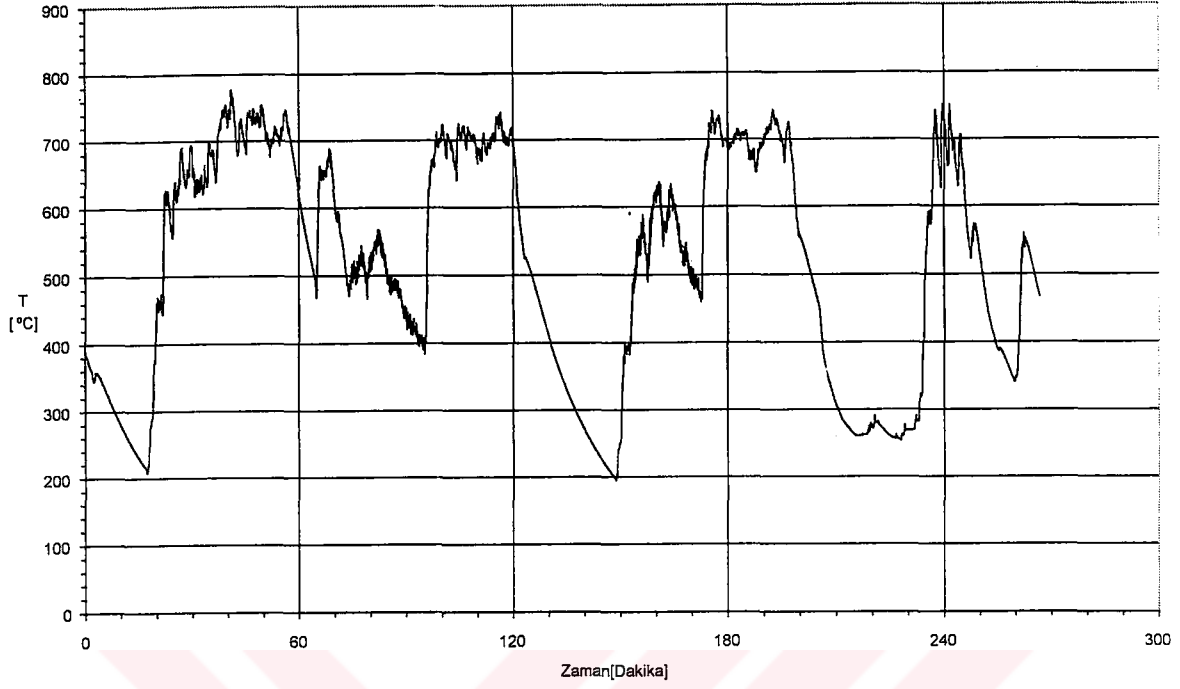
Motor bölümünde konvertöre yakın olan parçalar üzerine ısı duyargaları yerleştirilerek araç şasi dinamometre üzerinde aracın maruz kalabileceği en ağır çalışma şartları simüle edilerek test edilmiştir. Deney sonuçları ve değerlendirmesi çizelge 4.2'de verilmiştir.

Şasi dinamometreyle simüle edilen araç test şartları: 1.adım: 30 dakika, 2.vites düz yol, motor açısal hız= 2750 dev/dk; 2.adım: 30 dakika, 2.vites %10 eğim, motor açısal hız =3600 dev/dk; 3.adım: 20 dakika, 5.vites düz yol, araç hızı =100 km/s; 4.adım:60 kez dur-kalk 1.vites 4000 devirden gaz keserek yavaşlama; 5.adım:40 dakika, yüksüz, motor açısal hız= 850 dev/dk; 6.adım:20 dakika, düz yol, araç hızı=140 km/s; 7.adım: 30 dakika motor çalıştırılmadan bekleme; 8.adım:20 dakika, 5.vites, düzyol, motor açısal hız= 3300 dev/dk; 9.adım:40 dakika, 1 vites, %13 eğim, motor açısal hız=3600 dev/dk. Çizelge 4.2'de görüldüğü üzere Faz 3 katalitik konvertörünün motora yakın bir şekilde yerleştirilmesi 4 noktada kritiklik yaratmaktadır. Bunlarla ilgili alınması gereken önlemlerde yukarıda açıklanmıştır. Ayrıca bu şekilde hazırlanan bir araç 30 000 km gerçek şartlarda yol testine tabi tutulmuştur. Test sonunda yukarıda kritik olarak görülen parçalarda herhangi bir anormallik gözlenmemesine rağmen yukarıda belirtilen değişikliklerin yapılması gereklidir. Şekil 4.5 ve şekil 4.6'da gerçek yol şartlarında ve laboratuvarında (yukarıda tanımlanan test esnasında) araç test edilirken katalitik konvertörün içinden kaydedilen sıcaklık değerleri görülmektedir. Yolda yapılan testte Uludağ yolu kullanılmıştır. Bu parkurun seçilmesinin nedeni, çıkış sırasında motora tam yükleme yapılacağı ve fazla hız yapılamayacağından gerek motor bölümü gerekse katalitik konvertördeki sıcaklık en uç noktalara ulaşmaktadır. Ayrıca dönüş parkurunda iniş aşağı motorun yakıt kesme sistemi sık sık devreye gireceğinden yakıt fakiri karışım nedeniyle katalitik konvertör sıcaklığının maksimum değerine ulaşması söz konusudur. Bu parkurda araç 0-20, 120-150, 200-230'uncu dakikalar arasında motor kapatılarak soğumaya bırakılmıştır. Bu yüzden katalitik konvertör sıcaklığında düşmeler görülmektedir. Her iki durumda da katalitik konvertör sıcaklığı imalatçı firmanın müsaade ettiği maksimum sıcaklığın altında kalarak

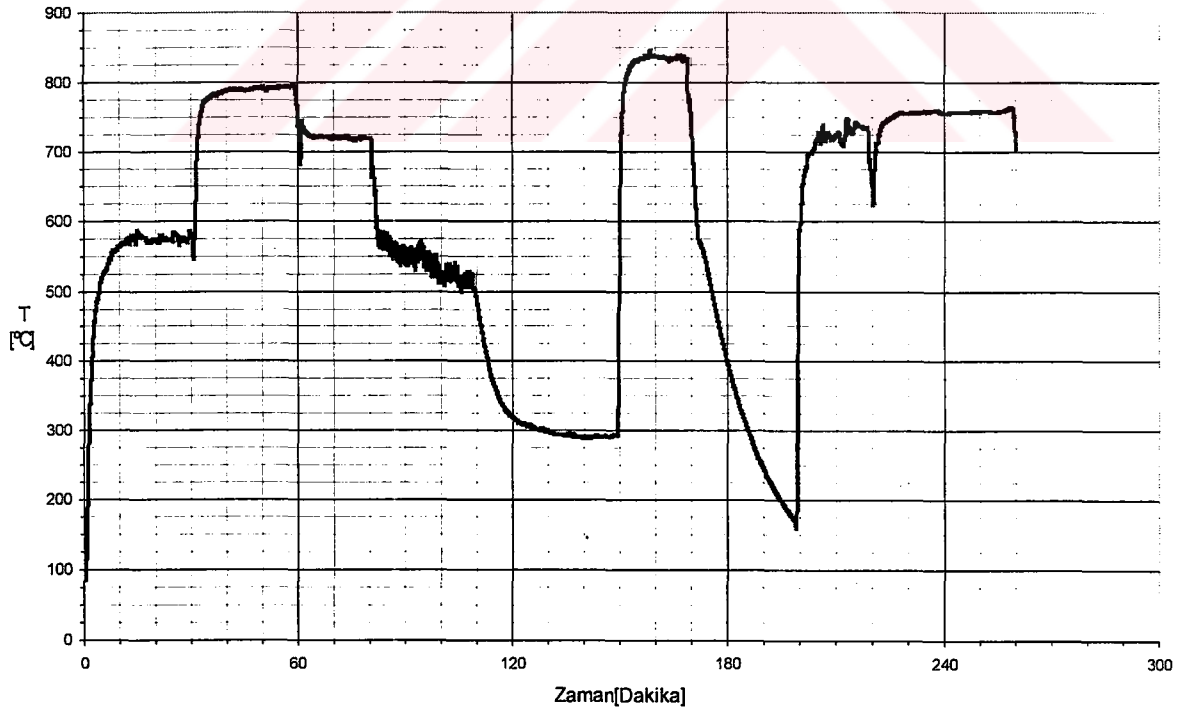
katalitik konvertörün motora yakın bir şekilde yerleştirilmesinden kaynaklanan herhangi bir sorun olmayacağı kanıtlanmıştır.

Çizelge 4.2. Motor bölümü sıcaklık dağılımı

| No | Ölçüm noktası | Ölçülen maksimum T °C | Müsade edilen maksimum T °C | Sonuç | Alınacak önlemler |
|----|--|-----------------------|-----------------------------|--------|---------------------------------------|
| 1 | Alternatör kapağı | 145 | 240 | ✓ | |
| 2 | Motor takozu | 109 | 250 | ✓ | |
| 3 | Direksiyon kutusu körüğü | 106 | 165 | ✓ | |
| 4 | Direksiyon kutusu koruma sacı | 192 | 280 | ✓ | |
| 5 | Ön göğüs (katalitik konvertöre en yakın yer) | 147 | 170 | ✓ | |
| 6 | Hidrolik pompa giriş hortumu | 126 | 160 | ✓ | |
| 7 | Hidrolik pompa çıkış hortumu | 163 | 160 | | hortumun geçiş parkuru değiştirilmeli |
| 8 | Radyatör hortumu | 165 | 160 | | hortum malzemesi değiştirilmeli |
| 9 | LPG redüktörü gövdesi | 125 | 125 | kritik | yerleşim değiştirilmeli |
| 10 | LPG redüktörü su giriş hortumu | 156 | 160 | kritik | yerleşim değiştirilmeli |
| 11 | LPG bakır borusu (motora gidiş) | 99 | 200 | ✓ | |
| 12 | 1. Katalitik konvertör yüzeyi | 511 | 950 | ✓ | |
| 13 | 2. Katalitik konvertör yüzeyi | 450 | 950 | ✓ | |
| 14 | Arka egzoz stepne sacı yüzeyi | 77 | 200 | ✓ | |
| 15 | LPG tankı giriş borusu | 69 | 200 | ✓ | |
| 16 | Lambda sensör gövdesi | 420 | 450 | ✓ | yol testinde gözlem |
| 17 | Lambda sensör kablosu | 155 | 230 | ✓ | |
| 18 | Vites kutusu yağı | 125 | 200 | ✓ | |
| 19 | Motor yağı | 157 | 200 | ✓ | |
| 20 | 1. Katalitik konvertör içi | 880 | 950 (1050) | ✓ | |
| 21 | 2. Katalitik konvertör içi | 800 | 850 (950) | ✓ | |
| 22 | Direksiyon hidrolik deposu | 116 | 180 | ✓ | |
| 23 | Silecek suyu deposu | 115 | 180 | ✓ | |
| 24 | Motor soğutma suyu | 120 | 140 | ✓ | |
| 25 | Dış ortam sıcaklığı | 25 | -- | ✓ | |



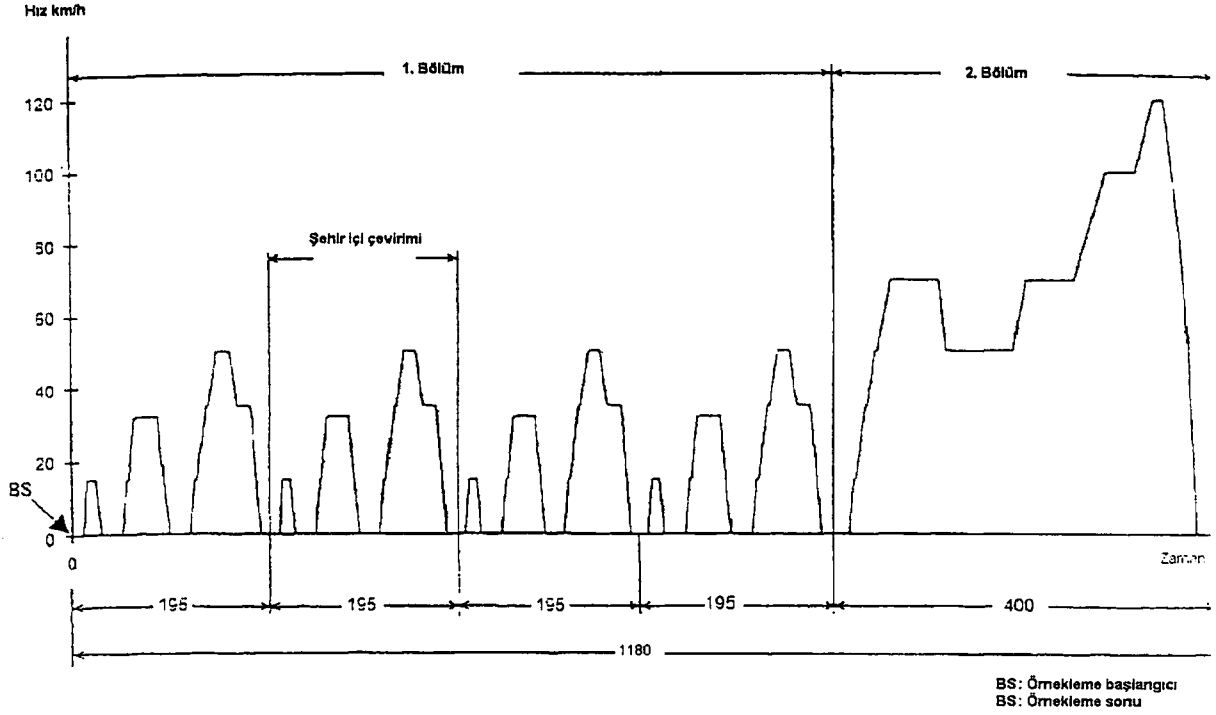
Şekil 4.5. Faz 3 katalitik konvertör sıcaklık değerleri (yolda)



Şekil 4.6. Faz 3 katalitik konvertör sıcaklık değerleri (laboratuvarda)

Faz 1 konfigürasyonunda hazırlanan bir araç 5000 km yol yaptıktan sonra emisyon laboratuvarında Avrupa eski emisyon çevrimi (ECE+EUDC) ve Faz 3 aracıyla eşit şartlarda karşılaştırma yapmak amacıyla yeni emisyon çevrimi Faz 3 (NEDC) kullanılarak test edilmiştir. Aynı araç Faz 3 şekline dönüştürülüp yine 5000 km yol testi yapıp (emisyonla ilgili değişkenlerin kararlılık gösterdiği nokta) emisyon laboratuvarında Avrupa yeni emisyon çevrimi kullanılarak eksoz emisyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Faz 1 ve Faz 3 çözümleri arasında katalitik konvertörlerin başlangıç sıcaklık profilleri karşılaştırılarak her çözümde katalitik konvertör devreye giriş (*light-off*) zamanları tesbit edilmiştir. Ayrıca her iki durumda da katalitik konvertör devreye girinceye kadar eksozdan ne kadar gazın her hangi bir işleme uğramaksızın atmosfere atıldığı tesbit edilip yeni Faz 3 konfigürasyonunun ne kadar etkili olduğu ölçülmeye çalışılmıştır.

Eksoz emisyon deney prosedürü: Araç 25°C'de ön şartlandırma odasında en az 8 saat bekletilerek araç sıcaklığının ortam sıcaklığı ile dengeli hale gelmesi sağlandıktan sonra şasi dinamometre üzerinde gerekli bağlantıları yapılır. Şekil 4.7'de gösterilen Faz 1 ve Faz 3 deney çevrimleri araç hız-zaman grafiği bakımında tamamen aynı olup aralarındaki tek farklılık Faz 3'te motor marşıyla birlikte gaz örnekleme yapılırken Faz 1'de ilk 40 sn gaz örnekleme yapılmamaktadır. Deney çevriminin tamamı 4 tane 195 sn'lik şehir içi çevrimi ve 1 tane 400 sn'lik şehir dışı çevriminden oluşmaktadır. Şasi dinamometre tarafından aracın yolda üzerine etki eden tüm kuvvetler (araç ağırlığı, rüzgar direnci, yuvarlanma direnci, sürtünme kayıpları vs.) simüle edilerek aracın tekerleğine yük uygulanmaktadır. Toplam 1180 sn esnasında araç eksozundan çıkan gazlar örneklenecek çantalarda biriktirilir ve test sonunda gaz konsantrasyonu ölçülerek test esnasında ortama atılan eksoz gaz bileşenleri gr türünden hesaplanmaktadır. Bulunan bu değerler toplam çevrim süresi olan 11 km'ye bölünerek aracın Avrupa çevrimi sırasında km başına ortama atmış olduğu emisyon değerleri bulunmaktadır.



Şekil 4.7. Avrupa eksoz emisyon test çevrimi

Çevrim menzili: 11km, ortalama hız: 32.5 km/sa, maksimum hız: 120km/sa

Yukarıdaki yeni emisyon çevrimi kullanılarak yapılan Faz 1 ve Faz 3 araçlarının emisyon deney sonuçları çizelge 4.3'te çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Faz 1 aracının yeni emisyon çevrimi (NEDC) test sonuçları

Şehir içi çevrimi deney sonuçları

| | | THC | CO | NO _x | CO ₂ | yakıt |
|--|-------------------|-------|--------|-----------------|-----------------|-----------|
| | | (ppm) | (ppm) | (ppm) | (%) | (l/100km) |
| p = 100.2 kPa | Seyreltilmiş gaz | 20.27 | 115.11 | 9.959 | 0.538 | |
| T = 22.9°C | ortam havası | 4.12 | 1.16 | 0.032 | 0.053 | |
| φ = 61.8 % | net konsantrasyon | 16.31 | 113.99 | 9.989 | 0.486 | |
| X _r = 10.8 mg/kg | | | | | | |
| V _{mix} = 109.68 m ³ | | | | | | |
| seyr. faktörü = 24.94 | gram/deney | 1.126 | 15.851 | 2.290 | 1068.162 | 11.262 |
| menzil = 4.052 km | gram/km | 0.278 | 3.912 | 0.565 | 263.593 | |
| çevrim süresi = 780 sn | | | | | | |

Şehir dışı çevrimi deney sonuçları

| | | THC | CO | NO _x | CO ₂ | yakıt |
|-----------------------------|-------------------|-------|--------|-----------------|-----------------|-----------|
| | | (ppm) | (ppm) | (ppm) | (%) | (l/100km) |
| p = 100.2 kPa | Seyreltilmiş gaz | 15.12 | 156.31 | 60.4 | 1.102 | |
| T = 23.9°C | ortam havası | 2.99 | 1.25 | 0.3 | 0.054 | |
| φ = 59.8 % | net konsantrasyon | 12.38 | 155.16 | 60.1 | 1.052 | |
| X _r = 11.0 mg/kg | | | | | | |

menzil = 6.947 km gram/km 0.062 1.578 1.022 168.762
 çevrim süresi = 400sn

iki çevrim ortalama deney sonuçları

| | | <u>THC</u> | <u>CO</u> | <u>NO_x</u> | <u>CO₂</u> | yakıt (l/100km) |
|-----------------------------|------------------------------------|------------|-----------|-----------------------|-----------------------|--------------------|
| p = 100.2 kPa | | | | | | |
| T = 23.2°C | toplam gram | 1.560 | 26.817 | 9.387 | 2240.61 | 8.655 |
| ϕ = 60.9 % | toplam gram/km | 0.142 | 2.438 | 0.853 | 203.698 | |
| X _r = 10.9 mg/kg | yorulma faktörlü toplam gram/km | 0.170 | 2.926 | 1.024 | | 8.691 |

Çizelge 4.4. Faz 3 aracının yeni emisyon çevrimi (NEDC) test sonuçları

Şehir içi çevrimi deney sonuçları

| | | <u>THC</u> (ppm) | <u>CO</u> (ppm) | <u>NO_x</u> (ppm) | <u>CO₂</u> (%) | yakıt (l/100km) |
|--|-------------------|---------------------|--------------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------|
| p = 101.2 kPa | | | | | | |
| T = 26.5°C | Seyreltilmiş gaz | 11.75 | 64.76 | 1.976 | 0.538 | |
| ϕ = 34.5 % | ortam havası | 3.66 | 2.02 | 0.049 | 0.053 | |
| X _r = 107.4 g/kg | net konsantrasyon | 8.26 | 62.84 | 1.93 | 0.486 | |
| V _{mix} = 110.97 m ³ | | | | | | |
| seyr. faktörü = 21.49 | gram/deney | 0.568 | 8.717 | 0.397 | 1068.162 | 11.262 |
| menzil = 4.083 km | gram/km | 0.139 | 2.135 | 0.097 | 263.593 | |
| çevrim süresi = 780 sn | | | | | | |

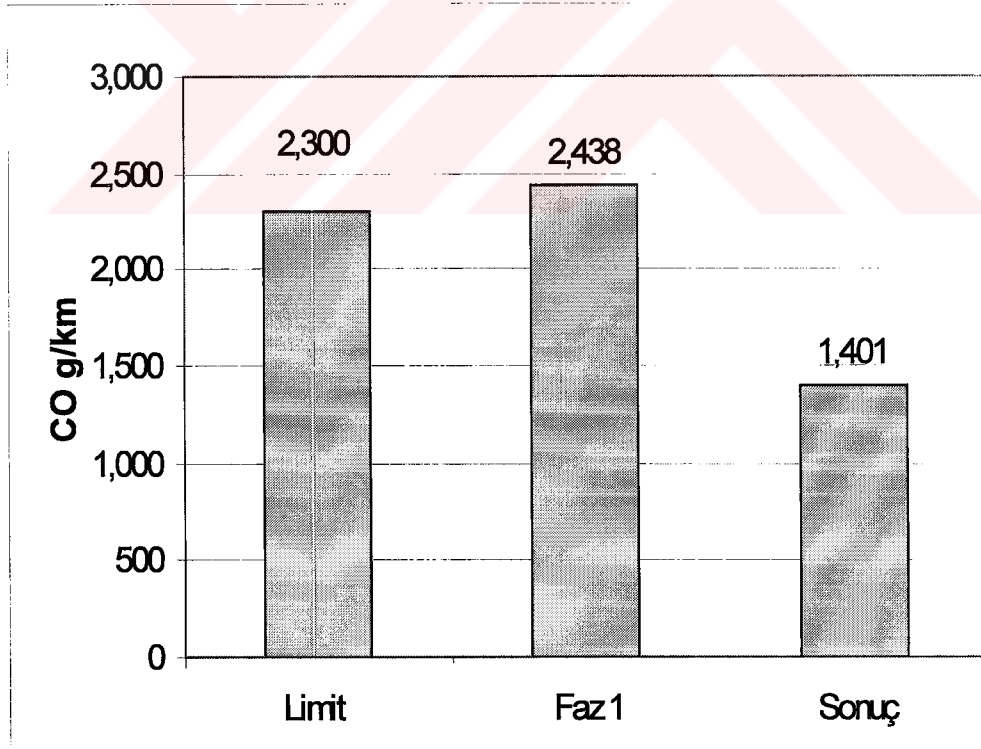
Şehir dışı çevrimi deney sonuçları

| | | <u>THC</u> (ppm) | <u>CO</u> (ppm) | <u>NO_x</u> (ppm) | <u>CO₂</u> (%) | yakıt (l/100km) |
|---|-------------------|---------------------|--------------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------|
| p = 101.2 kPa | | | | | | |
| T = 26.9°C | Seyreltilmiş gaz | 12.12 | 97.06 | 4.97 | 1.102 | |
| ϕ = 33.4 % | ortam havası | 3.65 | 2.25 | 0.06 | 0.054 | |
| X _r = 7.3 g/kg | net konsantrasyon | 9.20 | 95.02 | 4.91 | 1.052 | |
| V _{mix} = 56.89 m ³ | | | | | | |
| seyr. faktörü = 11.007 | gram/deney | 0.32 | 6.75 | 0.517 | 1172.45 | 7.135 |
| menzil = 6.999 km | gram/km | 0.047 | 0.97 | 0.074 | 168.762 | |
| çevrim süresi = 400sn | | | | | | |

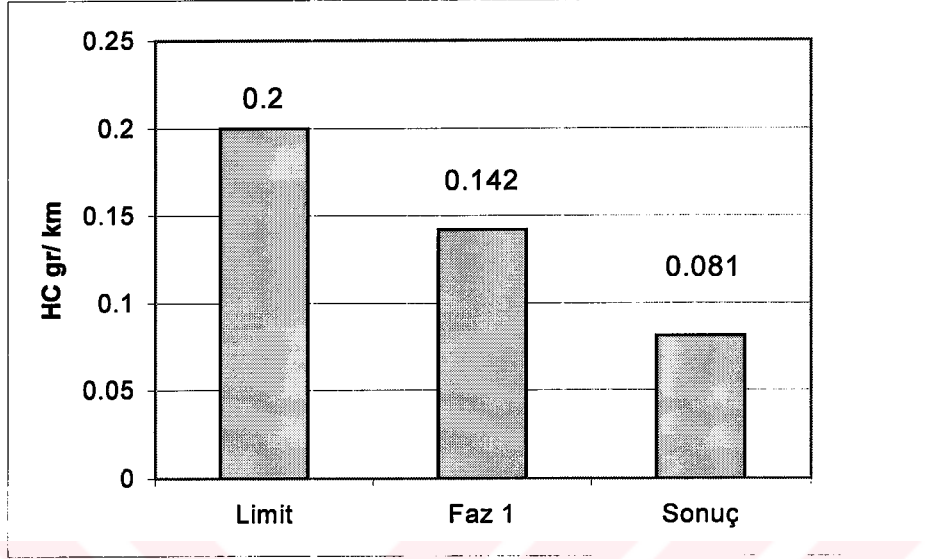
iki çevrim ortalama deney sonuçları

| | | THC | CO | NO _x | CO ₂ | yakıt (l/100km) |
|-----------------------------|------------------------------------|-------|--------|-----------------|-----------------|--------------------|
| p = 100.2 kPa | | | | | | |
| T = 23.2°C | toplam gram | 0.892 | 15.475 | 0.913 | 2240.61 | 8.655 |
| φ = 60.9 % | toplam gram/km | 0.081 | 1.401 | 0.083 | 203.698 | |
| X _r = 10.9 mg/kg | yorulma faktörlü toplam gram/km | 0.097 | 1.681 | 0.099 | | 8.691 |

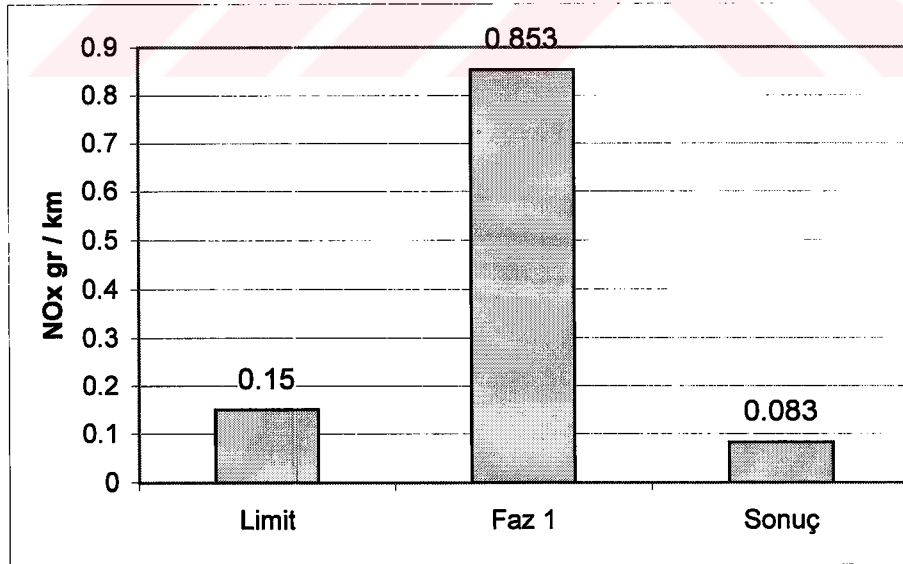
Emisyon deneyleri sonunda bulunan CO değerleri şekil 4.8'de, HC değerleri şekil 4.9'da ve NO_x değerleri ise şekil 4.10'da karşılaştırılmıştır. Burada da görüldüğü üzere Faz 3 aracıyla elde edilen CO, HC ve NO_x emisyon değerleri hedeflenen Faz 3 limit değerlerinden küçüktür. Emisyon açısından bu çalışmada hedeflenen sonuca ulaşılmıştır. Öteyandan Faz 1 aracıyla Faz 3 emisyon limitlerine ulaşamayacağıda grafiklerdeki karşılaştırmada da açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.8. Karbonmonoksit CO karşılaştırması



Şekil 4.9. Hidrokarbon HC karşılaştırması



Şekil 4.10. Azotoksit NO_x karşılaştırması

Avrupa emisyon çevrimi sırasında hem Faz 1 hemde Faz 3 çözümlerinde katalitik konvertörlerin sıcaklıkları kaydedilmiştir. Yapılan bu kayıta Faz1 çözümünde katalitik konvertörün 250°C sıcaklığa 180 sn'de ulaştığı gözlenmiştir. Öteyandan Faz 3 katalitik konvertörü 250°C sıcaklığa sadece 65 sn'de ulaşmaktadır. Yani Faz 3 katalitik konvertörünün tasarlandığı gibi çok kısa sürede devreye girmesi sağlanmıştır.

Burada tek noktadan enjeksiyonlu bir Faz 1 motorunun ikinci bir katalitik konvertör ilavesiyle Faz 3 emisyon seviyesine çıkarılabileceği görülmüştür. Bunu yapmak için Faz 1 aracına yaklaşık 50\$'lık ikinci bir katalitik konvertör ilavesi gerekmektedir. Öteyandan Faz 3 emisyon seviyesine uyabilen araç teknolojisi mutlaka çok noktadan enjeksiyonlu motor kullanılmasını gerektirmektedir. Bunun yanında ayrıca teknolojik seviyesi Faz 1 veya Faz 2'de kullanılan katalitik konvertörlerden daha iyi olan katalitik konvertörlerin kullanılmasında (maksimum sıcaklığın 850°C'den 950°C'ye çıkması ve daha fazla soy metal yüklemesinden dolayı) zorunludur. Bunların ikisi birlikte düşünüldüğünde Faz 1 aracının maliyetine yaklaşık 150\$'lık bir ilave söz konusudur. Burada önerilen Faz 3 çözümü ekonomik olarak uygulanabilir durumdadır.

4.3 Hata Analizi

Deneysel test sonuçları genellikle analiz ve tasarımlarda kullanılmaktadır. Fakat bütün değerler aynı doğrulukta değildir. Bu sonuçlar bir yerde kullanılmadan önce mutlaka hata analizi yapılmalıdır. Deneysel bir çalışmada hata mutlaka oluşmaktadır. Hatalar iki tür olabilir. Sabit veya sistematik hatalar. Bunlar kalibrasyon veya düzeltme ile giderilebilir. Düzensiz veya tekrarı zor olan hataların ise önlenmesi mümkün değildir. Hata analizinin amacı deneyler esnasında olabilecek düzensiz hatalar için öngöründe bulunmaktır.

Emisyon ölçümleri daha karmaşık sistemler aracılığıyla yapıldığı için analizatörler her ölçüm öncesi daha önceden belgelenmiş kalibrasyon gazları kullanılarak kalibre edilmektedir. Buradaki ölçüm hassasiyeti Avrupa normunda da belirtildiği üzere % 2 dir. Kalibrasyon gazlarının büyük bir kısmı Avrupa'dan

diğer bu konuda çalışan kuruluşların aldığı kaynaklardan temin edilmiştir. Ölçümler otomatik yapılmakta ve raporlanmaktadır. Bu yüzden okuma hatası olması ihtimali yoktur. Ayrıca emisyon laboratuvarı sonuçları aynı aracın Fiat Auto'nun emisyon laboratuvarlarında test edilmesi yöntemiyle oradaki birden fazla laboratuvar sonuçları ile karşılaştırılmış ve aralarında korelasyon olduğu görülmüştür.

Tork, $T = Fb$ bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır. Burada F dinamometrenin yük hücreesine uyguladığı kuvvet, b ise dinamometre tork kolu uzunluğudur. F 'nin ölçüm hassasiyeti ± 0.1 kg'dır. b 'nin boyundaki hassasiyet ise 0.5mm yani % 0.1'dir. Bir ölçüm zincirinde oluşan hatanın tamamı zincirde bulunan parçaların hata oranlarının karelerinin toplamının kare kökü ile ifade edilmektedir (Kuratle 1992). $E_{tot} = \sqrt{E_{torkkolu}^2 + E_{sensör}^2 + \dots}$ Bu durumda tork ölçümündeki hata miktarı $E_{tork} = \sqrt{0.1^2 + 0.1^2} = 0.14$ kg.m'dir. Motorun verdiği güç ise tork ile motor açısal hızının çarpımına eşittir. $P = 2\pi NT$. Açısal hız ölçümleri ise % ± 0.02 olarak gerçekleştirilmiştir. Güç ölçümündeki hassasiyet ise $E_{güç} = \sqrt{E_{devir} + E_{tork}} = \sqrt{0.02^2 + 0.14^2} = 0.14$ HP'dir.

Sıcaklık ölçümlerinde kullanılan sıcaklık duyargalarının hassasiyeti ölçülen değer üzerinden \pm % 1'dir. Sıcaklık ölçümlerinde de kalibrasyonlu duyargalar kullanılmış ve sıcaklık değerleri bir veri kayıt edici tarafından sürekli kaydedilmiştir. Ayrıca sıcaklık ölçümleri dört kez tekrarlanarak ölçüm sisteminin tekrar edilebilirliği test edilmiştir. Tekrar edilebilirlik %1 olarak tesbit edilmiştir.

4.4 Sonuç

Bu çalışmada tek noktadan yakıt enjeksiyonlu bir Faz 1 motorunun eksoz sistemine ilave edilen ikinci bir katalitik konvertörle Faz 3 Avrupa emisyon değerlerini sağlayıp sağlamadığı araştırılmıştır. Bunun için motorun mevcut Faz1 eksoz sistemine 90x90 ebatlarında ikinci bir üç-yollu metal taşıyıcılı katalitik konvertör motora çok yakın olacak şekilde yerleştirilmiştir. Eksoz sisteminde yapılan bu değişiklikten dolayı motorun EKÜ'sinde parametre kalibrasyonu yapılarak katalitik konvertör sıcaklığı kontrol altına alınırken

emisyon ve motor performans optimizasyonu yapılmıştır. Ayrıca motor bölmesine konulan bu ikinci katalitik konvertör çevresindeki diğer parçalara sıcaklık bakımından hasar verip vermediği araştırılmıştır. Emisyon bakımından 5000 km yol yapılarak kararlı duruma getirilen araçla Avrupa yeni emisyon çevrimi kullanılarak emisyon testleri gerçekleştirilmiştir.

Yapılan performans testlerinde motor performansında Faz 1 çözümünden Faz 3 çözümüne geçerken yaklaşık %4 kayıp olduğu gözlenmiştir. Öteyandan emisyon testi karşılaştırmasında Faz 1 çözümünden Faz 3'e geçerken %42 CO emisyon azalması, %43 HC emisyon azalması ve %90 NO_x emisyon azalması sağlanmıştır. Önerilen çözümün Avrupa Faz 3 emisyon limitlerini oldukça rahat sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca motor bölümünde yapılan sıcaklık ölçümleri neticesinde katalitik konvertöre yakın olan dört tane parçanın yerlerinde değişiklik yapılması gereği görülmüştür.

5 SONUÇ VE TAVSİYELER

Araçların eksozlarına konulan üç-yollu katalitik konvertör uygulaması taşıtların eksozlarından kaynaklanan emisyon değerlerini önemli derecede azaltmaktadır. Uygun bir şekilde çalışan katalitik konvertör araç eksozundan kaynaklanan emisyonların %95'ini bertaraf etme özelliğine sahiptir. Üç-yollu katalitik konvertörlerin kullanılabilmesi için mutlaka elektronik donanımlı motor kontrol sistemlerine ihtiyaç vardır. Bu çalışmada üç-yollu katalitik konvertörlerin iyi bir şekilde araca monte edilmeleri ve motor kontrol ünitesi parametrelerinin yeniden kalibrasyonu sonucunda Faz 1 çözümüne göre CO emisyonlarında %42, HC emisyonlarında %43 ve NO_x emisyonlarında %90 iyileşme sağlanmıştır. Tek noktadan enjeksiyonlu bir motorla Avrupa Faz 3 emisyon seviyesini yakalamak mümkündür. Yapılan bu çalışma bir başka araçta uygulanabilir. Yalnız burada bahsedilen bütün çalışmaların o araç içinde tekrarlanması gerekmektedir. Özellikle motor kontrol ünitesi kalibrasyonu ve motor bölmesi sıcaklık kontrollerinin dikkatli bir şekilde yapılması gerekir.

Emisyon iyileştirmesi için motora yakın bir şekilde yerleştirilen ikinci katalitik konvertör motor performansında (hacimsel verimin düşmesinden kaynaklanan) %4'lük bir kötüleşmeye neden olmaktadır. Farklı katalitik konvertör yapılarıyla (hücre sayısı daha az olan) veya aracın emme ve eksoz sisteminin geçirgenliğinin artırılması sonucunda kaybedilen bu performans değeri geri kazanılabilir. Burada bu konu üzerinde pek fazla durulamamıştır. Bu konu bundan sonra araştırılmaya açık bir durumdur.

Bu çalışmada eksoz emisyonlarının Faz 3'e uydurulması için mevcut Faz 1 katalitik konvertörüne ilave olarak onun yarı büyüklüğünde bir katalitik konvertör kullanılmıştır. Ekonomi yapmak için uygun hacimde tek bir katalitik konvertör (motor bölmesinde gerekli boşluğu oluşturduktan sonra) veya iki tane küçük katalitik konvertörle de denemeler yapılabilir. Bunu dışında katalitik konvertöre farklı miktarlarda soymetal yüklemesi yapılarak emisyon denemeleri yapılabilir. Bu konular da araştırmaya açıktır.

Katalitik konvertörle ancak araçlarda yanma sonrası oluşan kirletici gazların yok edilmesi mümkün olabilmektedir. Mevcut katalitik konvertörler %95 oranında bu gazları dönüştürme potansiyeline sahip olmasına rağmen bu

oran aracın kullanım şartlarından ve kullanılan yakıttan etkilenebilmektedir. Katalitik konvertörlü araçlarda mutlaka kurşunsuz benzin kullanılmalıdır. Kurşun katalitik konver üzerindeki aktif malzemelerle (Pt, Pd ve Rh) tepkimeye girerek onların tamamen etkisiz hale gelmesine neden olmaktadır. Katalitik konvertörün ömrünü artırmak için daha fazla palladyum kullanılması mümkündür. Fakat palladyum kükürte karşı oldukça duyarlı durumdadır. Bu yüzden benzindeki kükürt oranının düşürülmesi gerekmektedir. Emisyonla mücadele için araç başına yapılan ilave yatırım miktarı her geçen gün emisyon normlarının dahada sıkılaşması nedeniyle artmaktadır. Bu rakam Faz 3 seviyesindeki bir araç için 1000\$ civarında olmaktadır. Kalitesiz yakıt ve yanlış kullanım sonucunda bu sistemler hasar görmektedir. Yurdumuzda kalitesiz yakıt nedeniyle katalitik konvertörü arızalanan bir çok kullanıcı aracına yeni bir katalitik konvertör takmak yerine hiç katalitik konvertörü olmayan eksozları tercih etmektedir. Bu tür uygulamalar hem yapılan yüklü miktarlardaki yatırımların boşa gitmesine neden olmaktadır, hem de çevre adına yapılan bu çalışmaların etkinliğini azaltmaktadır. Geçen yıl yapılan bir araştırma sonunda yurdumuzdaki benzinin %20'sinin standart dışı olduğu tesbit edilmiştir. Hava kalitesini iyileştirmek için, bir taraftan araç teknolojisinde bu çalışmada da ele alınan türde iyileştirmeler yapılırken diğer taraftan yurdumuzda yakıt kalitesi mutlaka Avrupa standartlarına getirilmeli ve pazardaki yakıt dağıtımı kontrol altına alınmalıdır. Araca dolum yapılan yerde yakıt kalite güvencesi sağlanmalıdır. Öteyandan da teknolojisi yüksek araçlarla araç parkı yenilenmelidir.

6 KAYNAKÇA

ADLER, U. 1990. Emission Control for Spark-Ignition Engines Technical Instruction. Robert BOSCH, 37 p.

ANONIM. 1976. Theory of Engines, Joint Indo-Soviet Board, english translation Mir Publishers, 608 p.

ANONIM. 1995. Emission Standards Passenger Cars Worldwide, Delphi Technical Center Luxembourg, September 1998, 24 p.

ANONIM. 1991. Directive 91/441/EEC of the European Parliament and of Council relating to measures to be taken against air pollution by emission from motor vehicles, 125 p.

ANONIM. 1994. Directive 94/12/EEC of the European Parliament and of Council relating to measures to be taken against air pollution by emission from motor vehicles, 65 p.

ANONIM. 1998. Directive 98/68/EC of the European Parliament and of Council relating to measures to be taken against air pollution by emission from motor vehicles, 87 p.

ANONIM. 1998. Automotive Engineering International, March 1998, p.23-28.

ARIOSI, V. 1996. BOSCH Automotive Handbook, Ulrico Hoepli Editore SpA, 706 p.

BEJAN, A. 1988. Advanced Engineering Thermodynamics. John Wiley & Sons, 759 p.

ÇENGEL, A.Y. 1989. Thermodynamics – An Engineering Approach, Mc Graw-Hill Editions, Singapore, 867 p.

DUGHERA, E. LEVERONI E. 1995. Development of Catalytic Converter Technology, Fiat Auto, Centro Ricerca FIAT, 30 p.

GIUSEPPE, R. 1999. Fuel Economy Technologies in 2000's Vehicles. Research & Development , ATA Mart 1999- Vol. 52- n.3, p. 69-71.

GREENING, P. 1998. On Board Diagnostics European Agreement. SAE TOP-TEC Symposium, Torino , 8 September 1998. 46 p.

GSCHWEITL, K. 1995. Real Time Knock Analysis for Automatic Engine Mapping and Calibration, AVL List GmbH, 13 p.

HEYWOOD, J.B. 1988. Internal Combustion Engine Fundamentals, Mc Graw-Hill International Editions, Singapore, 930 p.

JACKSON, N.S. 1998. A Gasoline Direct Injection (GDI) Powered Concept With 3 litre/100 km Fuel Economy and EC Stage 4 Emission Capability, Ricerca e Sviluppo January- February 1998, Vol.51, n.1/2, p.17-23.

KAYE, G.W.C. and LABY, T.H. 1973. Tables of Physical and Chemical Constants, Logmans, London, 230 p.

KURATLE, H. and MARKI, B. 1992. Influencing Parameters and Error Sources During Indication on Internal Combustion Engines, SAE paper 920233, 8 p.

MELLANO, R. 1995. Motori a Combudtione Interna Sistemi per il Controllo delle Emissioni, Fiat Auto Direzione Tecnica, p. 1-159.

ÖZDEMİR, İ.B. Haziran 2000. Alevsiz Yanma Teknolojisinin Yanma Sistemlerinde Ortaya Çıkan NO_x Emisyonlarının Azaltılmasında Bir Yöntem Olarak Kullanılması, Mühendis ve Makina Dergisi, s. 21-26.

SAROGLIA, G. 1998. Catalizzatori per Motori Lean Burn, Fiat Auto DT-M-AV, 10 p.



7 TEŞEKKÜR

Tez çalıőmasındaki katkılarından dolayı danışmanım Doç. Dr. Habib UMUR'a, Uludağ Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Öğretim Elemanlarına, Sig. Roberto SCHIAVUZZI'ye ve TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ő.'ye teşekkür ederim.



8 ÖZGEÇMİŞ

1964 yılında Eskişehir'de doğdu. İlk ve Orta öğrenimini Eskişehir'de tamamladı. 1987 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makina Bölümünden mezun oldu. Ankara'da Aytemizler Makina Sanayii firmasında 1.5 yıl çalıştı. 1990 yılında çalışmaya başladığı Tofaş'ta halen Motor Mühendisliği ve Ar-Ge Bölümünde düşük oktanlı motorlar, araçlarda sıvılaştırılmış petrol gazı uygulamaları ve taşıtlardan kaynaklanan emisyonların kontrolü konularında çalışmalarını sürdürmektedir.

