

TC
MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İÇTEN YANMALI MOTORLARDA DOĞAL GAZIN
ALTERNATİF YAKIT OLARAK KULLANILMASI

78259

HAZIRLAYAN
MAK. MÜH. METİN GÜMÜŞ

DANIŞMAN VE KOORDİNATOR : Doç. Dr. Mehmet TEKİN
JÜRİ ÜYESİ : Prof. Dr. Bahri ŞAHİN
JÜRİ ÜYESİ : Doç. Dr. Korhan BİNARK

MAKİNA EĞİTİMİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

İSTANBUL 1998

78259
T.C. YÜKSEK ÖĞRETİM KURULU
EĞİTİM ARAŞTIRMALARI MERKEZİ

ÖNSÖZ

Günümüzde içten yanmalı motorlarda kullanılan petrol ürünü yakıtların zararlı egzoz gazları hava kirliliğine sebep olmaktadır. Artan dünya nüfusu ile paralel olarak artan enerji tüketimi ise mevcut petrol rezervlerinin gelecek yüzyılın ortalarına kadar ihtiyacı karşılayabileceği konusunda, bilim dünyasında derin endişelere neden olmaktadır. Hava kirliliğinin kalıcı önlemler gerektiren bir çevre sorunu haline gelmesi ve mevcut enerji kaynaklarının hızla tükenmekte olması, taşıtlarda kullanılabilecek alternatif yakıt tipleri konusunda araştırmalar yapılmasını gerektirmiştir.

Son yıllarda artan çevre bilincine ve mevcut enerji kaynaklarının biteceği kuşklarına paralel olarak özellikle gelişmiş ülkelerde hükümetlerin yaptırımları, üniversitelerin yönlendirmeleri üretici firmaları çevreyi kirletmeyen, alternatif yakıtlı ve tahrikli ürünlerin imalatına sevk etmiştir. Bu nedenle otomotiv sektörü egzoz emisyonlarını aşağıya çekecek tedbirler almaya ve alternatif yakıtları kullanabilecek motorlar üretmeye başlamıştır.

Ülkemizde, dünyadaki bu gelişmelere paralel olarak İstanbul ve Ankara Belediyelerine bağlı otobüslerde doğal gazın alternatif yakıt olarak kullanılması ve LPG' nin taşıtlarda yakıt olarak kullanılmasının yasallaşması insan sağlığının ve doğal güzelliklerin korunması hem de enerji politikalarımızın gelişmesi açısından atılmış olan önemli bir adımdır.

Bu çalışmanın yapılmasında tüm emeği geçenlere, özellikle yayınlarından istifade ettiğim Prof. Dr. Oğuz BORAT'a ve değerli fikirleri ile çalışmamı yönlendiren danışmanım, Doç. Dr. Mehmet TEKİN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Aralık 1998

Makine Mühendisi

Metin GÜMÜŞ.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
KISALTMALAR VE İNDİSLER.....	V
TABLO LİSTESİ.....	VI
ŞEKİL LİSTESİ.....	VII
ÖZET.....	IX
ABSTRACT.....	X
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın amacı.....	3
BÖLÜM 2. DOĞAL GAZ ALTERNATİF YAKITININ İÇTEN YANMALI MOTORLARDA KULLANIMI.....	4
2.1. Doğal gazın fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	5
2.2. Doğal gaz motoru.....	8
2.3. Doğal gazın dizel motorlarında kullanımı.....	11
2.3.1. Çift yakıtlı dizel motoru.....	11
2.3.2. %100 doğal gaz yakıtı ile çalışan dizel motoru	14
2.4. Doğal gazın otto motorlarında kullanımı.....	17
2.5. Egzoz gazları emisyonu.....	21

2.5.1. Doğal gaz motorunda oluşan egzoz gazları emisyonu.....	22
2.5.2. Doğal gazın dizel motorlarında kullanımı durumunda oluşan egzoz gazları emisyonu.....	23
2.5.3. Doğal gazın otto motorlarında kullanımı durumunda oluşan egzoz gazları emisyonu.....	27
2.7. Doğal gaz yakıtının taşıtlarda depolanma şekilleri.....	29

BÖLÜM 3. DİĞER ALTERNATİF YAKITLARIN İÇTEN YANMALI

MOTORLARDA KULLANIMI.....	31
3.1. Hidrojen yakıtının içten yanmalı motorlarda kullanımı.....	31
3.1.1. Hidrojenin fiziksel ve kimyasal özellikler.....	31
3.1.2. Karışımın oluşturulması ve motor performansına etkisi.....	33
3.1.3. Egzoz gazları emisyonu.....	35
3.1.4. Hidrojen yakıtının taşıtlarda depolanma şekilleri.....	37
3.2. LPG Yakıtının içten yanmalı motorlarda kullanılması.....	39
3.2.1. LPG yakıtının fiziksel ve kimyasal özellikleri	39
3.2.2. Motor performansı ve egzoz gazları emisyonuna etkisi.....	42
3.2.3. LPG yakıtının taşıtlarda depolanması	43
3.3. Alkol yakıtların içten yanmalı motorlarda kullanılması.....	44
3.3.1. Metanol.....	44
3.3.1.1. Metanolün fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	44
3.3.1.2. Karışım oluşturulması ve yanma performansı	47
3.3.1.3. Egzoz gazları emisyonu	49
3.3.2. Etanol.....	50
3.3.2.1. Etanolün fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	50
3.3.2.2. Yanma Performansı.....	53
3.3.2.3. Egzoz gazları emisyonu.....	53

BÖLÜM4.DOĞAL GAZ KULLANIM ORANININ TESPİTİ VE MALİYET ANALİZİ	54
4.1. Doğal gazın kütleli kullanım oranı.....	56
4.2. Doğal gaz kullanımının sağladığı yakıt tasarrufu.....	56
4.3. Deltec dönüşüm sisteminin geri ödeme süresi.....	57
BÖLÜM 5. BİLGİSAYAR PROGRAMI.....	59
5.1. Genel bilgiler.....	59
5.2. Bilgisayar programına ait özellikler.....	60
5.3. Programın akış diyagramı.....	67
5.4. Programın sonuçları ve irdelenmesi	70
SONUÇLAR.....	75
KAYNAKLAR.....	78
EKLER.....	81
ÖZGEÇMİŞ.....	94

KISALTMALAR VE İNDİSLER

ROS	:Araştırma oktan sayısı
MOS	:Motor oktan sayısı
SS	:Setan sayısı
PB	:Püskürtme başlangıcı
PS	:Püskürtme sonu
TG	:Tutuşma gecikmesi
LPG	:Sıvılaştırılmış petrol gazı
CNG	:Sıkıştırılmış doğal gaz
EURO	:Avrupa topluluğu gaz emisyon standartları
HYO	:Hava yakıt oranı
HFK	:Hava fazlalık kat sayısı
PM	:Partikül emisyonları
TY	:Tam yanma
TTY	:Tam teorik yanma
EY	:Eksik yanma
KEY	:Kısmi eksik yanma
ϕ	:Sıkıştırma oranı
λ	:Hava fazlalık katsayısı

TABLO LİSTESİ

2.1. Dünya doğal gaz rezervleri.....	5
2.2. Metan gazının fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	6
2.3. T.B. green motorunun egzoz gaz emisyonu değerleri.....	22
3.1. Hidrojen gazının fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	32
3.2. Propan ve bütan gazının fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	40
3.3. Metanolün fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	45
3.4. Metanolün dizel motorlarında kullanımı için geliştirilen metotlar.....	46
3.5. Etanolün fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	51
3.6. Etanolün dizel motorlarında kullanımı için geliştirilen metotlar.....	52
4.1. Çift yakıt sistemli otobüslerin yakıt tüketimleri.....	55
4.2. Ikarus otobüslerin yakıt tüketimleri.....	55
5.1. Programa girilmiş olan sabit değerler.....	61
5.2. Programa girilen doğal gaz kullanım oranları.....	61
5.3. Dizel yakıtın elemensel analiz değerleri ve mol ağırlığı.....	62
5.4. Gaz yakıtın bileşenleri ve doğal gazın bileşenlerinin hacimsel oranları.....	62
5.5. Bilgisayar programında kullanılan kısaltmalar.....	65

ŞEKİL LİSTESİ

2.1. Stokiyometrik karışimli ve lambda kontrollü bir doğal gaz motoru.....	9
2.2. TB 180- GRS doğal gaz motorunun güç değişimi.....	10
2.3. Motor devrine bağlı olarak güç değişimi.....	12
2.4. Motor devrine bağlı olarak moment değişimi.....	12
2.5. Gaz enjektörlü bir taşıt motoru örneği.....	13
2.6. Doğal gaza dönüştürülmüş MAN D28 motorunun kesiti.....	14
2.7. MAN doğal gaz motorunun diyagramı.....	15
2.8. Dizel motoru ile doğal gaza dönüştürülmüş motorun güç diyagramı.....	16
2.9. Dizel motoru ile doğal gaza dönüştürülmüş motorun moment diyagramı.....	16
2.10. Dizel motoru ile doğal gaza dönüştürülmüş motorun yakıt sarfiyatı diyagramı.....	16
2.11. Hava fazlalık katsayısının fonksiyonu olarak ısı verimin değişimi.....	18
2.12. Hava fazlalık katsayısının fonksiyonu olarak maksimum momenti sağlayacak ateşleme avansının değişimi.....	19
2.13. Sıkıştırma oranına bağlı olarak ısı verimin değişimi.....	19
2.14. Ford doğal gaz ve benzin motorunun güç değişimi.....	20
2.15. Ford doğal gaz ve benzin motorunun moment değişimi.....	20
2.16. TB Green motorunun egzoz gaz emisyon değerlerinin EURO-II değerleriyle mukayesesi.....	22
2.17. Orta güçlü, direkt püskürtmeli bir motorda doğal gaz kullanımı sonucu oluşan ısı değerleri.....	23
2.18. Motor devrine bağlı olarak HC emisyonu değişimi.....	24
2.19. Motor devrine bağlı olarak HC emisyonu değişimi.....	24
2.20. Orta güçlü, direkt püskürtmeli bir motorda doğal gaz kullanımı sonucu oluşan NOx değerleri.....	25
2.21. Doğal gaza dönüştürülmüş MAN D28 motorunun zararlı egzoz emisyonlarının EURO -I,II,III standartlarıyla mukayesesi.....	26
2.22. Hava fazlalık katsayısına bağlı olarak HC emisyonu miktarının değişimi.....	27
2.23. Hava fazlalık katsayısına bağlı olarak CO emisyonu miktarının değişimi.....	28
2.24. Hava fazlalık katsayısına bağlı olarak NOx emisyonu miktarının değişim.....	28

5.1.	Doğal gaz kullanım oranının motor yükü ve motor devrine bağlı olarak değişimi..	60
5.2.	Yanma ürünlerindeki CO_2 ' nin hacimsel kesrinin motor yükü ve motor devrine bağlı olarak değişimi.....	72
5.3.	Yanma ürünlerindeki CO ' nun hacimsel kesrinin motor yükü ve motor devrine bağlı olarak değişimi.....	72
5.4.	Yanma ürünlerindeki H_2O ' nun hacimsel kesrinin motor yükü ve motor devrine bağlı olarak değişimi.....	73
5.5.	Yanma ürünlerindeki N_2 ' nin hacimsel kesrinin motor yükü ve motor devrine bağlı olarak değişimi.....	73
5.6.	Yanma ürünlerindeki SO_2 ' nin hacimsel kesrinin motor yükü ve motor devrine bağlı olarak değişimi.....	74
5.7.	Yanma ürünlerindeki H_2 ' nin hacimsel kesrinin motor yükü ve motor devrine bağlı olarak değişimi.....	74

ÖZET

Günümüzde içten yanmalı motorlarda kullanılan fosil kökenli yakıtların hızla tükenmekte olması ve bu yakıtların yanması sonucu oluşan zararlı egzoz gazlarının çevreyi kirletmeleri içten yanmalı motorlarda alternatif yakıt arayışlarını hızlandırmıştır.

Bu çalışma da doğal gazın sahip olduğu özellikler ve içten yanmalı motorlarda kullanılabilirliği üzerinde durulmuştur. Doğal gaz içten yanmalı motorlarda doğal gaz motorları, doğal gaz ve çift yakıt (dizel-doğal gaz) sistemine dönüştürülmüş dizel motorları, doğal gaza dönüştürülmüş otto motorları olarak kullanılmaktadır. Ayrıca doğal gazın taşıtlarda depolanması ve depolama esnasında dikkat edilmesi gereken hususlar incelenmiştir.

Üçüncü bölümde ise diğer alternatif yakıtlar (LPG, Hidrojen, Alkoller) 'ın özellikleri ve bu yakıtların içten yanmalı motorlarda kullanımı esnasında gösterdikleri üstünlükler ve dezavantajları belirtilmiştir. Alternatif yakıtların içten yanmalı motorlarda kullanımı durumunda ortaya çıkan zararlı egzoz emisyonları, motor performansı ve yakıt tüketimleri açısından irdelenmiştir.

Çalışmanın son bölümlerinde ise çift yakıt (dizel+doğal gaz) ile çalışabilecek şekilde dönüştürülmüş bir dizel motorunun özellikleri incelenmiştir. Genel yanma bilgileri verilerek bu motorun doğal gaz kullanım oranına bağlı olarak yanma ürünlerinin değişimi, hazırlanan bir bilgisayar programında incelenmiştir. Programdan elde edilen sonuçlar grafiklendirilerek yorumlanmıştır.

Sonuç olarak alternatif yakıtların hepsi teorik olarak içten yanmalı motorlarda kullanılabilir. Zararlı egzoz emisyonu en düşük olan hidrojenin elde edilmesi ve taşıtta depolanması gibi zorlukları göz önüne alınırsa, günümüzde egzoz emisyonları azlığı açısından ikinci sırada olan doğal gaz ön plana çıkmaktadır. Doğal gazın taşıtta depolanma zorluğu göz ardı edilirse doğal gaz günümüzde en çok tercih edilen alternatif yakıt olarak kabul edilebilir.

ABSTRACT

Nowadays fossil rooted fuels used in the internal combustion engines being exhausted and taking form harmful exhaust gases conclusion of burning these fuels soiling environment have cause to increase investigations about alternative fuels used in the internal combustion engines.

In this study specifications of natural gas and usefulness in the internal combustion engines are dwelled. Naturel gas engines in the internal combustion engines used naturel gas are used in two sort; diesel engines converted to naturel gas and dual fuels (diesel + natural gas) system and otto engines converted to natural gas. Furthermore using naturel gas in vehicles and particularities which must payed attention to in the course of storing are examined.

In the third section specifications of the other alternative fuels (LPG, Hydrojen, Alcohol) and superiorities and disadvantages of these fuels in the course of using in the internal combustion engines are stated.

Finally specifications of a diesel engine converted into dual fuels (diesel + natural gas) are examined. Giving essential combustion knowledge, variations of combustion products in proportionate to natural gas consumed by the engine are examined by using a computer. Data recieved from the computer program is presented in form of diagrams and commented.

Teorically all the alternative fuels can be used in the internal combustion engines. Being procured of hydrogen which has the lowest harmful exhaust emission and storing in vehicles are very difficult. For this reason nowadays natural gas which is the second order fallen of harmful exhaust emission is prepared.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Teknoloji geliştikçe insanoğlu daha refah içinde yaşayacağını hayal etmektedir. Ne var ki insanoğlu kendine teknolojik bir gelecek hazırlarken doğanın içinden çıkamayacağı, kolayca altından kalkamayacağı problemler oluşturduğu bilincine varamamaktadır. Yüz yılı aşkın bir süredir içten yanmalı motor teknolojisi hızla yenilenmiş, en verimli hale gelmesine çalışılmış fakat dünya atmosferindeki tehlikeli değişimler dikkate bile alınmamıştır. Tek oksijen kaynağımız, dünya bitki örtüsü hızla yok edilmekte, dünya buna çaresiz gözlerle bakakalmaktadır. Denizlerin kirlenmesi, yeraltı su kaynaklarının hızla kullanılamaz duruma getirilmesi, atmosferdeki sera etkisi ile buzulların hızla erimesi gibi sayacağımız bir çok olumsuz gerçek, insanoğlunun kendine nasıl bir gelecek hazırladığını anlatmaktadır.

Otomobillerin, insanlara sağladığı ulaşım rahatlığı, hareket özgürlüğü büyüktür. Ancak egzozundan çıkan gazlarla şehir havasını dolayısıyla tüm atmosferi kirleterek, sera etkisi dediğimiz ve gittikçe artan tehlikeyi de beraberinde getirmektedir. Hava kirliliğinin büyük boyutlara ulaştığı günümüzde, motorlu taşıtlardan gelen kirliliğin ihmal edilemez boyutlarda olduğu bilinmektedir. Özellikle büyük şehirlerde taşıtlardan gelen kirletici emisyonlar, ısınmadan kaynaklanan kirlilikten çok daha fazladır. Motorlu taşıtların havayı kirletmelerinin temel sebebi, içten yanmalı motorların yeterince verimli çalışmamalarıdır. Bu durum yarı yanmış yada hiç yanmamış yakıtın karbonmonoksit, hidrokarbon ya da kurum olarak motordan atılmasına yol açmaktadır. Yakıt tam yandığında çıkması gereken karbondioksit gazı ve sudur. Ayrıca havadaki azot, yüksek basınç ve ısı altında azotoksit oluşturmaktadır. Öte yandan, yakıt içerisindeki kükürt ve kurşun bileşikleri de tam bir yanmayı engellemekte ve egzoz gazlarının tehlikesini artırmaktadır. Taşıtların egzozlarından, bilhassa benzin motorlu taşıtlarından çıkan karbonmonoksit, hidrokarbon ve azot bileşikleri ve parçacıkların meydana getirdiği çevre sorunları, birçok şehirde ciddi boyutlara ulaşmıştır. Milyonlarca taşıttan kükürtdioksit, kurşun gibi tehlikeli maddelerinde atmosfere yayıldığını düşünürsek çevreye verilen zararın boyutunu da kolaylıkla anlayabiliriz. Bu

nedenle motorlu taşıt egzoz gazlarından kaynaklanan hava kirliliği, kalıcı önlemleri gerektiren acil çevre sorunu haline gelmiştir [1].

Fosil yakıtların yanmasında oluşan karbondioksit gazının atmosferde sera etkisi üzerinde ve atmosferde bulunan ozon tabakasının incelmesinde çok önemli payı bulunmaktadır. Ozon gazı (O_3) atmosferin üst katmanı olan stratosferde bulunan, üç adet oksijen atomunun birbirine kovalent bağ ile bağlanması sonucu oluşan, koyu yeşil renkli, yanıcı ve çok zehirli bir gazdır. Ozon tabakası dünyadaki bütün canlıları güneşin morötesi ışınımının zararlı etkilerinden korur. Ozon tabakasının azalması demek bu ışınların dünyaya geçen miktarının artması anlamına gelmektedir. Ozon tabakası olmasa idi, onun soğurduğu ultraviyole radyasyon yeryüzüne kadar inip tüm canlıları olumsuz yönde etkileyecekti. Bu olumsuz etkilerin başında deri kanseri, kataraktlar, genetik yapıdaki DNA'ların hasar görmesi, tüm kara ve deniz canlılarının büyüme hızına ve yaşama tarzına etkisi sonucu ömürlerinin kısalması gibi rahatsızlıkların oluşacağı düşünülmektedir. Ozon moleküllerini çözen karbondioksit gazlarının diğer bir olumsuz etkisi de, atmosferde biriken bu gazların, güneşten gelip yeryüzünden geriye yansıyan enfraruj radyasyonu soğurmalarıdır. Dünyadan yansıyan ısı dalgaları bu gazlar tarafından soğurulmasa idi atmosferi terk edeceklerdi. Bu gazların son yıllarda atmosferde birikmesi, atmosferin ısınmasına neden olmaktadır. Isınan atmosfer yeryüzü üzerindeki canlılar için sera etkisi yaratmaktadır. Atmosferdeki sıcaklık değişimi, çevre ikliminin değişmesine yol açacak, bu da canlıların doğal yaşam tarzlarını etkileyecektir [2,3,4,5,].

Dünya nüfusunun hızla artışı, teknolojik gelişmeye paralel olarak sanayileşmenin artması ve enerjinin bilinçsizce kullanılması yeryüzündeki enerji kaynaklarının hızla tükenmesine sebebiyet vermektedir. Dünya üzerindeki petrol yataklarının belirli bölgelerde toplanması ve izlenen politikalar zaman zaman petrol krizlerini ortaya çıkarmıştır. Kalkınmakta olan ve petrolü bulunmayan ülkeler, enerji ihtiyaçlarını zor şartlarda karşılamaktadırlar. 1973 petrol krizi ve 1991 Körfez Savaşı; dünya petrol fiyatlarının artmasına sebep olmuş ve özellikle ekonomik güçleri zayıf olan ülkelerin ekonomilerini

sarsmıştır. Ülkemiz de petrol fiyat dalgalanmalarından en fazla etkilenen ülkeler arasındadır. Petrol kökenli olmayan alternatif motor yakıtlarının üretilmesi ve kullanılmaya başlamasıyla, petrole olan bağımlılık azalabilecek ve özellikle kalkınmakta olan ülkeler gelecekte olabilecek enerji krizlerini daha kolay atlatabileceklerdir [6].

1.1. Çalışmanın amacı

Günümüzde, insan yaşamında vazgeçilmez bir öneme sahip olan taşıtlarda kullanılan enerjiler büyük oranda fosil kökenli yakıtlardan elde edilmektedir. Alternatif enerji kaynaklarının taşıtlarda kullanımı son zamanlarda önem kazanmıştır. Burada kullanılacak alternatif yakıtın, mevcut teknolojiye önemli bir yapısal değişiklik gerektirmeden, doğrudan kullanılması önem taşımaktadır. Devletler, otomobil üreticileri, petrol firmaları, çevre koruma örgütleri, araştırmacılar taşıtların ürettiği kirliliği azaltmak veya petrol kökenli yakıtlar yerine daha temiz bir yakıt kullanmak üzere araştırmalar yapmaktadırlar.

Bu çalışmada taşıtlarda kullanılabilen alternatif yakıtlar (doğal gaz, hidrojen, LPG, ve alkoller)'ın özellikleri, içten yanmalı motorlarda kullanılabilirlikleri üzerinde durulacaktır. Çift yakıtlı (Doğal gaz + dizel) çalışabilecek şekilde dönüştürülmüş bir dizel motorundaki yanma ürünlerinin doğal gaz kullanım oranına bağlı olarak değişimi hazırlanan bir bilgisayar programında hesaplanarak incelenecektir. Çalışmada, doğal gaz kullanım oranının artışıyla yanma ürünlerindeki gazlarda oluşan değişim tespit edilecektir. Ayrıca çift yakıt sisteminin maliyet analizi yapıp, sağladığı yakıt ekonomisi tespit edilecek ve buna bağlı olarak sistemin geri dönüşüm süresi incelenecektir.

BÖLÜM 2. DOĞAL GAZ YAKITININ İÇTEN YANMALI MOTORLARDA KULLANIMI

Doğal gazın taşıtlarda benzin ve motorine göre düşük emisyonlu bir alternatif yakıt olarak yaygınlaşması, özellikle son senelerde dikkat çekmektedir. Doğal gazın birçok ülkede zengin kaynakları olması, diğer birçok ülkede ise boru hatları ile yaygınlaştırılmasına rağmen taşıtlarda yakıt olarak kullanılması, diğer uygulamalarına göre biraz yavaş kalmıştır. Son senelerde ise gerek doğal gazın yaygınlaşması, gerekse ekonomik ve çevresel faktörlerin tercihi, taşıtlarda doğal gaz kullanımını bir alternatif yakıt olarak gündeme getirmiştir.

Özellikle çevre açısından doğal gaz son yıllarda önem kazanmıştır. Son 25 yıldır doğal gaz rezervleri devamlı artmıştır. 1991 rakamları ile 124 trilyon m³'e ulaşmıştır. Dünyanın toplam doğal gaz üretimi ise 1992 yılında 1818 milyar TEP olmuştur. Bu günkü üretim şekli ile 65 yıl daha doğal gazın yeteceği tahmin edilmektedir. Tablo 2.1'de Dünya doğal gaz rezervleri görülmektedir.

Ülkemizdeki doğal gaz toplam rezervi 17.4 milyar m³, üretilebilir gaz 11.9 milyar m³, şimdiye kadar toplam olarak üretilen doğal gaz miktarı 2.13 milyar m³ olmuştur. Kalan üretilebilir rezerv ise 9.8 milyar m³'tür. Türkiye'nin 2000'li yıllardaki doğal gaz tüketiminin 18-20 milyar m³'e ulaşacağı beklenmektedir.

Günümüzde 700000 adetten fazla doğal gazlı taşıt, 38 ülkede kullanılmaktadır. Bu ülkeler arasında 300000 adet ile İtalya başta gelmektedir. Diğer ülkeler Yeni Zelanda, Rusya, ABD, Kanada ve Arjantin'dir. ABD'de yaklaşık olarak 30000 adet doğal gaz yakıtlı taşıt ve 300 adet doğal gaz yakıtı satan istasyon bulunmaktadır. ABD'de doğal gazla çalışan taşıtların çoğu, taşımacılıkta kullanılan otobüsler, kamyonlar ve minivanlar şeklindedir. New York şehrinde Flxible Corp. firması tarafından geliştirilen sıkıştırılmış doğal gaz yakıtı kullanılan otobüsler taşımacılıkta kullanılmaktadır. ABD'de doğal gazla çalışan ve taşımacılıkta kullanılan otobüsler devreye girmiş durumdadır. Ayrıca Kaliforniya ve Houston'da doğal gaz yakıtı kullanılan otobüsler devreye girmiş durumdadır. Ülkemizde de Ankara ve İstanbul'da taşımacılıkta kullanılan belediye otobüslerinin egzoz gazlarının neden olduğu hava kirliliğini azaltmak için birtakım projeler geliştirilmekte ve doğal gaza dönüşümleri tamamlanan

otobüslerin kullanılmasına başlanmıştır. Otomotiv şirketleri doğal gazın taşıtlarda kullanımı üç farklı tipte uygulamaktadırlar.

- a) Taşıtta yakıt olarak doğal gazın tek başına kullanılması,
- b) Taşıtta yakıt olarak doğal gazın dizel benzin ile beraber kullanılması (duel fuel),
- c) Taşıtta doğal gaz ve benzinin ayrı ayrı kullanılabilir olması (bi fuel).[7,8,9,10]

Tablo 2.1. Dünya doğal gaz rezervleri (Milyar m³)

Cezayir	3.707	Malezya	680
Arjantin	623	Meksika	1.839
Avustralya	849	Nijerya	1.160
Kanada	2.462	Norveç	1.217
Çin	846	Katar	1.700
Ekvator	113	Sarabistan	3.113
Almanya	170	B.A.E.	623
Endonezya	340	İngiltere	708
İran	680	A.B.D.	5.405
Irak	13.725	Eski S.S.C.B.	26.036
İtalya	792	Venezüella	1.189
Libya	877		

2.1. Doğal gazın fiziksel ve kimyasal özellikleri

Doğal gazın büyük bölümünü %90-96 CH₄ (metan) gazı oluşturmaktadır. Geri kalan bölümünü ise %2.411 C₂H₆ (etan), %0.736 C₃H₈ (propan), %0.371 C₄H₁₀ (bütan), % 0.776 N₂ (azot), % 0.164 C₅H₁₂ (pentan) ve % 0.085 CO₂ (karbondioksit) oluşturmaktadır. [11,12]

Doğal gazın ısı değeri benzin ve alkole göre yüksek olması bir avantaj sağlamaktadır. Doğal gaz benzine oranla daha yüksek hava fazlalık katsayısı değerlerinde tutuşma olanağına sahiptir. Böylece motorun fakir karışımla çalıştırılıp, yakıt ekonomisi ve egzoz gazları emisyonu açısından yarar sağlanması da mümkün olmaktadır. [11]

Aşağıda doğal gazın %90-96 'sını oluşturan metan (CH_4) gazının fiziksel ve kimyasal özellikleri görülmektedir. [13]

Tablo 2.2. Metan (CH_4) gazının fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Kimyasal denklemi		CH_4
C/H oranı		0.25
Moleküler ağırlığı		16.04
Özgül ağırlığı	sıvı : kg / dm^3	0.242
	gaz : kg / dm^3	0.78×10^{-3}
Isıl değeri	(Mj / kg)	50.8
	(Mj / litre)	20.8
Stokiyometrik karışım için	hava / yakıt (kütlesel)	17.2
	hava / yakıt (hacimsel)	9.53
	(kj / litre)	3.4
mol _{ürünler} / mol _{reaktantlar}		1.00
Buharlaşma ısısı (Mj / kg)		0.509
Tutuşma sınırları	% hacim	5 - 15.4
	λ	0.59 - 2.0
Laminer alev hızı (m / s)		0.37
Adyabatik alev sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)		1954
Difüzyon katsayısı (m^2 / s)		0.16
Kaynama noktası ($^{\circ}\text{C}$)		-161.3
Kendi kendine tutuşma sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)		632
Oktan sayısı	ROS	130
	MOS	105

Stokiyometrik karışım içindeki yakıtın hacimsel oranının yüksek oluşu (benzin için %1.65, metan için %9.47) nedeni ile, motorun birim hacimdeki stokiyometrik karışımın ısı değeri benzine göre %10 mertebesinde daha az olmaktadır. Ayrıca laminer alev hızının da benzin-hava karışımına göre düşük olması, benzin motorlarında, performans açısından olumsuz

etkiler oluşturmaktadır. Laminer alev hızının benzin-hava karışımına göre düşük olması, yanma süresini arttırmaktadır. Bu süre zamanlama kaybını arttırdığından güç ve verim değerlerinde azalma meydana gelmektedir. Ancak doğal gazın motor performansı üzerindeki bu olumsuz etkisi, sahip olduğu yüksek oktan sayısı avantajı kullanılarak motorun sıkıştırma oranının artırılması sonucunda giderilebilmektedir. [11,12,14]

Yüksek performansa ve düşük emisyonlara sahip bir doğal gaz motorunun yapımı doğru sıkıştırma oranının tespiti ile sağlanmaktadır. Bu oran her motor için değişebilir. Sıkıştırma oranının artırılmasını motor vuruntusu sınırlamaktadır. Benzin motorunun sıkıştırma oranı 8:1 ve benzin oktan sayısı 90'dır. Doğal gaz motorunda ise sıkıştırma oranı 12:1 ve yakıtın oktan sayısı ROS 130, MOS 105'dir. Oktan sayısı yakıtın kalitesine göre daha da az olabilmektedir. Yüksek oktan sayısı demek; vuruntunun ortadan kalkması, daha uzun buji ömrü, yağlama yağının ömrünün artması ve soğuk havalarda iyi çalışma demektir. Doğal gaz motorlarında sıkıştırma oranının yüksek tutulması önemlidir. Sıkıştırma oranının artırılması daha fazla termik verim sağlar. Termik verimin artması yakıt tüketiminde azalma demektir. Doğal gaz daha hafif moleküler yapıya sahiptir. Ve silindire giren havanın %10'unu teşkil etmektedir. Hava miktarının azaltılması genellikle güç kaybına neden olurken sıkıştırma oranının artırılması bu durumu azaltabilir. Ayrıca doğal gazın yanması sonucu oluşan maksimum basınç ve sıcaklıklar benzin motorlarından daha düşük olduğundan, sıkıştırma oranının artırılması sonucu artacak olan basınç ve sıcaklıklar tehlikeli boyutlara ulaşmayıp, ancak benzin motorlarındaki değerlere gelecektir. Dizel motorlarının sıkıştırma oranının yüksek tutulabilmesinden dolayı, eğer dizel motorlarında uygun değişiklikler yapılırsa, doğal gazın dizel motorlarında rahatlıkla kullanılabileceğine yaygın olarak inanılmaktadır [7,8,11,12].

Doğal gazın difüzyon katsayısının benzine oranla iki kat fazla olması, hava ile daha kolay ve hızlı karışması, çift yakıtlı motorlarda kullanımı açısından yarar sağlamaktadır. Dizel ilkesine göre çalışan motorlarda doğal gaz, ortam içerisine yapılan pilot püskürtme yardımıyla tutuşturulabilmektedir. Bu özelliği nedeni ile doğal gaz, benzin ve dizel motorlarında önemli değişiklik yapılmadan kullanılabilmektedir [11].

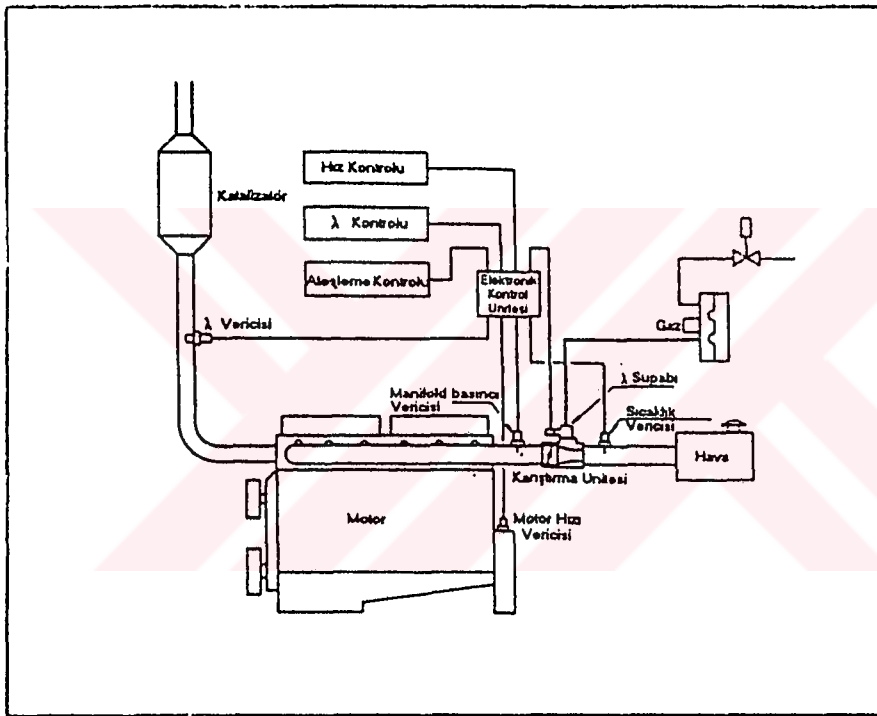
Doğal gazın korozyon özellikleri yoktur. Fakat bazen dünyada değişik bölgelerde elde edilen doğal gaz içerisinde nem olabilmekte; bu da motoru aşındırıcı etki göstermektedir. İçten yanmalı motorlarda, yakıt olarak doğal gazın kullanılması durumunda yanma sonu sıcaklığında düşme olmaktadır. Yanma sonu sıcaklığının düşmesi NO_x emisyonlarında azalma sağlayacaktır. Bunun yanında doğal gazın kullanımı, motorlu taşıtların gürültü düzeyinde azalmalar temin edecektir [15].

Doğal gazın dağıtımını borularla kullanımı yerine kadar yapılabilir. Çok temiz ve özellikleri sabit kalan bir yakıt türüdür. Çevre kirliliği yapmaz. Doğal gazın depolanması, buharlaştırılması ve karbürasyonu farklı bir şekilde düzenlenmelidir. Ayrıca sıvı yakıtı gaz haline getirmek, basıncını düşürmek ve motora uygun şartlarda vermek için özel ekipmanlara ihtiyaç vardır [16].

2.2. Doğal gaz motoru

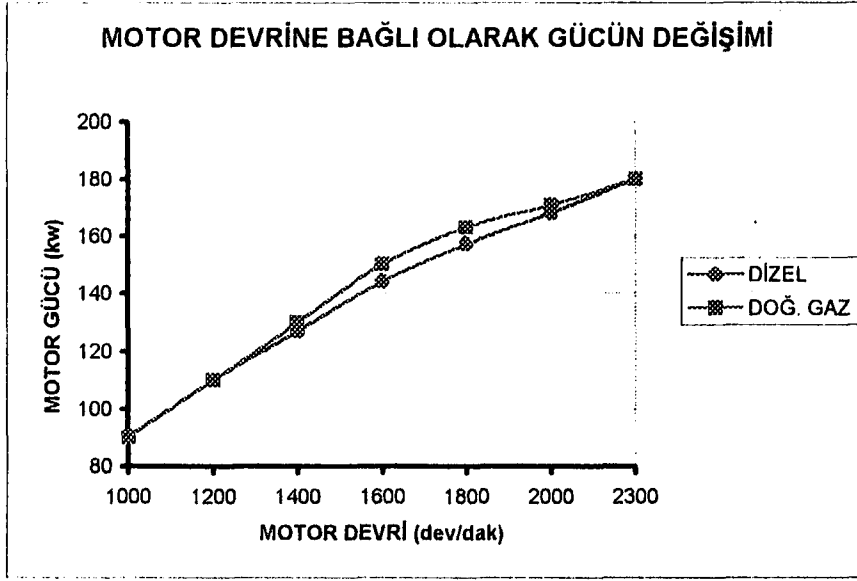
Motorların kirlilik emisyonlarına getirilen sınırlamalar nedeni ile, daha küçük kirlilik emisyon değerleri elde etmek için, mevcut motorları doğal gaz motoruna dönüştürmek yerine, sadece doğal gaz ile çalışan motorların geliştirilmesine ağırlık verilmiştir. Emisyonu azaltmak için hava/yakıt oranı kontrolünün daha hassas yapılması gerekmektedir. Bu nedenle üretici firmalar tarafından, elektronik kontrol sistemleri ile donatılmış vericiler geliştirilerek hava/yakıt oranının hassas olarak ayarlanması sağlanmıştır. Motorun doğal gaz motoru olarak yapılması halinde, ateşlemeyi kolaylaştırmak için farklı yanma odaları tasarlanmıştır. Bu yanma odalarından biri kademeli dolgu şeklinde olup ilk ateşleme zengin karışimli çekirdeğe yapılır. Bir diğer uygulama, ön yanma odalı motor olup burada da yanma olayı ön yanma odasında başlamakta, ana yanma odasına türbülans ile geçen yanmış gazlar buradaki tutuşmayı da sağlamaktadırlar. Dizel motorunda olduğu gibi yakıtın bir kısmının, bir veya birkaç jet ile yanma odasına püskürtülmesi tutuşmayı kolaylaştıran bir diğer yöntemdir. Doğal gaz motorlarında kirlilik emisyonu azaltmak için iki farklı prensip düşünülmüştür. Bunlar; fakir karışimli motorlar ve stokiometrik karışimli motorlardır.

a) **Stokiyometrik karışimli doğal gaz motoru:** Doğal gaz motorunun stokiyometrik karışimli olarak çalıştırılması durumunda motorda maksimum güç elde edilebilmektedir. Otto çevrimi ile çalışan bu motorun buji ile ateşlemesi yapılmakta, sıkıştırma oranı arttırılarak benzin motoruna göre daha verimli çalışması sağlanmaktadır. Ancak bu karışım oranında NOx emisyonu maksimum değerdedir. Egzoz gazı resirkilasyonu veya üç yollu katalizör kullanılarak egzoz gazları emisyonu değerleri düşürülmektedir. Şekil 2.1 'de stokiyometrik karışimli ve lambda kontrollü bir doğal gaz motoru görülmektedir [17].



Şekil 2.1. Stokiyometrik karışimli ve lambda kontrollü bir doğal gaz motoru

Şekil 2.2 'de Van Tilburg - Bastianen Groep adlı bir Hollanda şirketinin geliştirmiş olduğu stokiyometrik karışimli lambda kontrollü TB 180-GRS model TB - Green engine adlı doğal gaz motorunun güç karakteristiği benzer özellikteki dizel motoruyla mukayeseli olarak verilmiştir. Bu motor altı silindirli ve silindir hacmi 8.65 litredir. Turbo şarjlı olan motor elektronik yakıt püskürtmeli olup üç yollu katalitik konverter ilavelidir[18].



Şekil 2.2. TB 180-GRS doğal gaz motorunun güç değişimi[18].

b) Fakir karışimli doğal gaz motoru: Fakir karışimli doğal gaz motorlarında hava fazlalık katsayısı 1,5-1,6 değerlerine kadar çıkabilmektedir. Bu durumda NOx emisyonunda büyük azalmalar söz konusudur. Ayrıca yanma sırasında maksimum basınç ve sıcaklıkların düşmesi motor elemanlarının ısıl gerilmelerini azaltacak ve motorun ömrünü uzatacaktır. Ancak fakir karışimde motorun gücü azalacaktır. Fakir karışimli motorda ön yanma odaları kullanılarak alevin yanma odası içindeki yolu kısaltılabilir. Böylece yanma hızının artması ile vuruntu direnci yükselmekte, buda motorun daha yüksek sıkıştırma oranı ile çalıştırılmasını mümkün kılmaktadır. Sonuç olarak motorun güç ve verimi artmaktadır. Böylece fakir karışimli hızlı yanmalı motorda, stokiyometrik karışıma göre yakıt tüketiminde %15-20 oranında iyileşme sağlanmaktadır. Fakir karışımın diğer bir uygulama şekli de, değişken hava fazlalık katsayılı motorlardır. Bu motorlar tam yükte stokiyometrik karışimde çalışmakta, kısmi yüklerde ise fakir karışım ile çalışılarak verimin artması ve NOx emisyonunun azalması sağlanmaktadır. Fakir karışımın güç azaltıcı etkisini önlemek için yapılan uygulamalardan bir diğeri aşırı doldurmadır. Silindir içindeki dolgu miktarının artması ile güç artışı meydana gelmektedir. ısıl gerilmelerin artışı için dolgunun ara soğutulması bir çözümdür[17].

2.3. Doğal gazın dizel motorlarında kullanımı

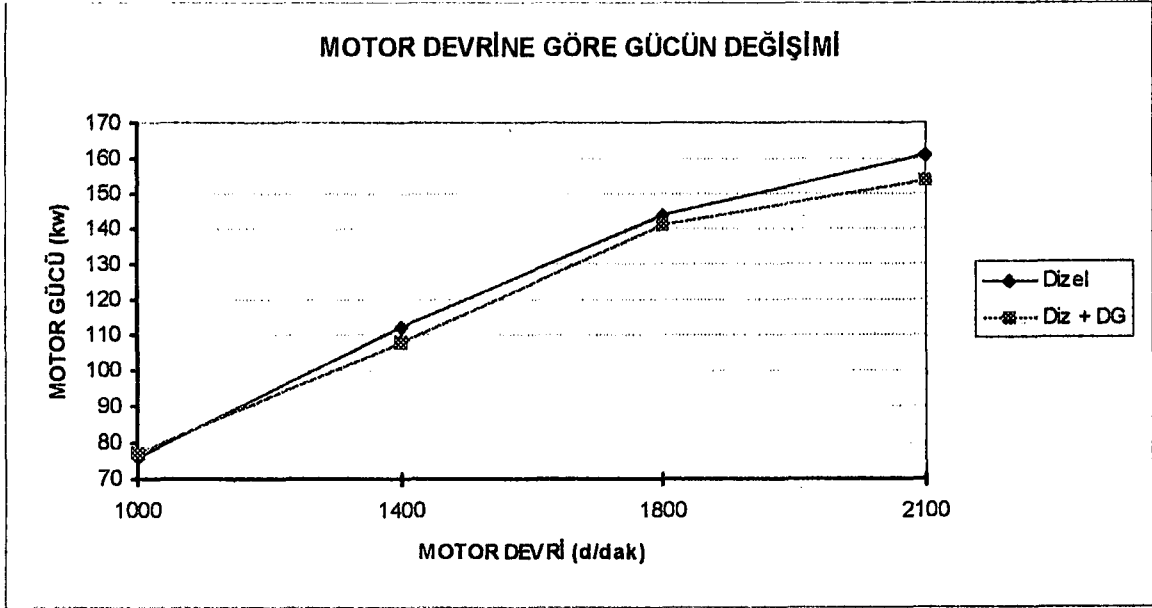
Dizel motorları, sadece doğal gaz kullanılacak şekilde veya doğal gaz ve dizel yakıtının birlikte kullanılacağı çift yakıtlı motor şeklinde düzenlenmektedir.

2.3.1. Çift yakıtlı dizel motoru

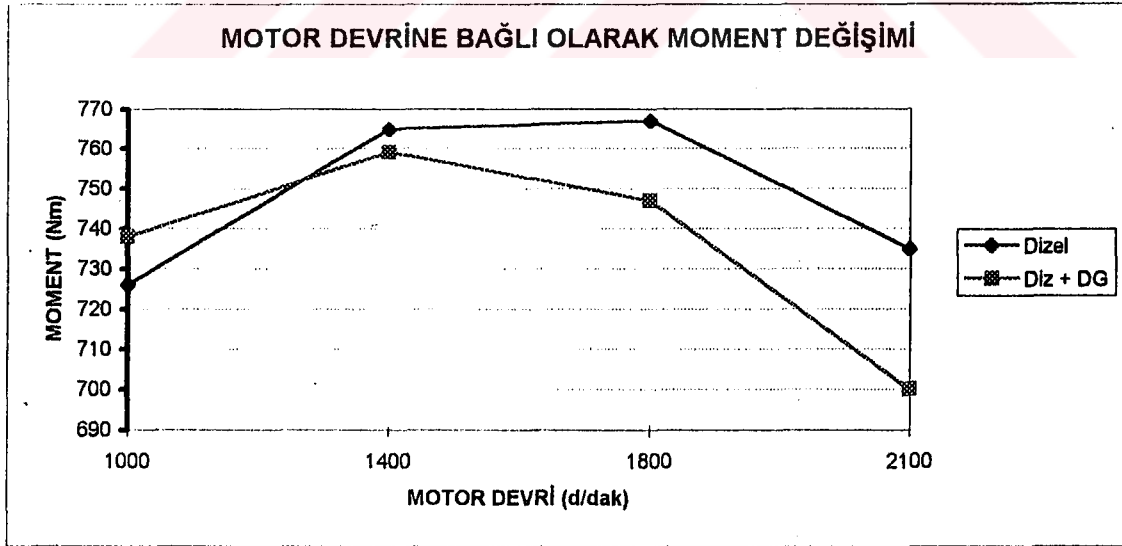
Çift yakıtlı motorlarda silindir içindeki doğal gaz-hava karışımının tutuşmasını sağlamak amacıyla, motorun kendi püskürtme sistemi ve püskürtme pompası kullanılarak pilot dizel yakıtı püskürtülür. Püskürtme anında tutuşan pilot yakıt yardımı ile karışım tutuşur. Kullanılan dizel yakıtı oranı, tam yükte toplam yakıtın %5-30'u arasındadır. Motor yükünün değişmesi halinde dizel yakıtı miktarının sabit kalmasına karşılık doğal gaz miktarı değişmektedir. Böylece kısmi yüklerde doğal gaz oranı düşmekte, rölantide ise hiç doğal gaz kullanılmamaktadır. Çift yakıtlı motorlarda doğal gazın karışım şekline göre iki farklı uygulama söz konusu olur. Bunlar karbüratörlü ve enjektörlü sistemlerdir.

a) Gaz karbüratörlü motorlar: Bir dizel motoruna gaz/hava karbüratörü ilave edilerek silindir içine doğal gaz emilmekte, sıkıştırılan bu karışıma dizel yakıtı püskürtülerek tutuşma sağlanmaktadır. Dolgu miktarı kısılma ile ayarlandığından, motorun verimi dizel motoru veriminden daha azdır. Motorun avantajlı tarafı, herhangi bir değişiklik olmadan motorun tekrar eski haline dönüştürülerek sadece dizel yakıtı ile çalışma imkanının olmasıdır. Bir dizel motorunun doğal gaz motoruna dönüştürülmesi istendiğinde, motorun sıkıştırma oranının uygun olması durumunda, gaz/hava karbüratörü ve kumanda sistemlerinin ilavesi ile dönüşüm sağlanabilmektedir. Bu amaçla değişik tip gaz karbüratörleri geliştirilmiştir. Bunların başlıcaları ventüri karbüratörü, orifis (delikli) karbüratörü, değişken sınırlamalı karbüratör ve girdap (vorteks) karbüratörüdür.

İstanbul Büyük Şehir Belediyesine ait otobüslerin çift yakıtlı sisteme dönüşümü DELTEC dönüşüm kiti ile sağlanmıştır. Bu sistemde gaz karbüratörü kullanılmıştır. Çift yakıtlı sisteme dönüştürülmüş RABA MAN marka motorun İ.T.Ü. de deneysel olarak elde edilmiş güç ve moment değişimleri Şekil 5.2-3'te verilmiştir.

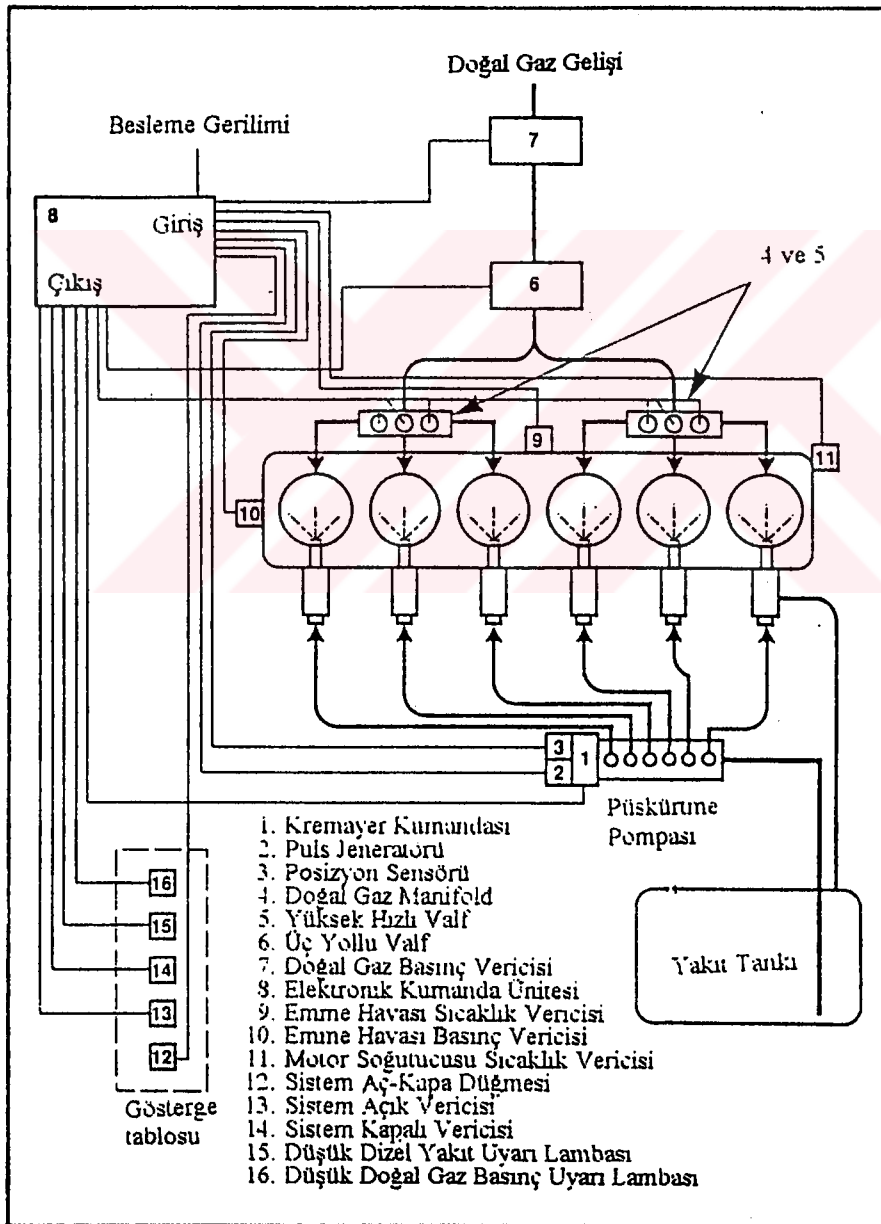


Şekil 2.3. Motor devrine bağlı olarak güç değişimleri [40]



Şekil 2.4. Motor devrine bağlı olarak moment değişimi [40]

b) Gaz enjektörlü motorlar: Gaz enjektörlü motorlarda karışım, gaz/hava karbüratörü yerine, doğal gazın her bir silindire enjektör ile püskürtülmesi şeklinde hazırlanmaktadır. Bu durumda gerek doğal gaz miktarına, gerekse pilot yakıt miktarına elektronik olarak kumanda edileceğinden hava fazlalık katsayısının istenen değerde tutulabilmesi mümkün olacaktır. Yakıtın püskürtülmesi, bir veya iki enjektör ile yapılan merkezi püskürtme şeklinde, veya her bir silindir girişine yerleştirilen yakıt enjektörü şeklindedir. Şekil 2.5' de gaz enjektörlü bir taşıt motoru örneği görülmektedir. İkinci sistemde silindirler arası yakıt/hava oranı değişikliği söz konusu değildir [17].

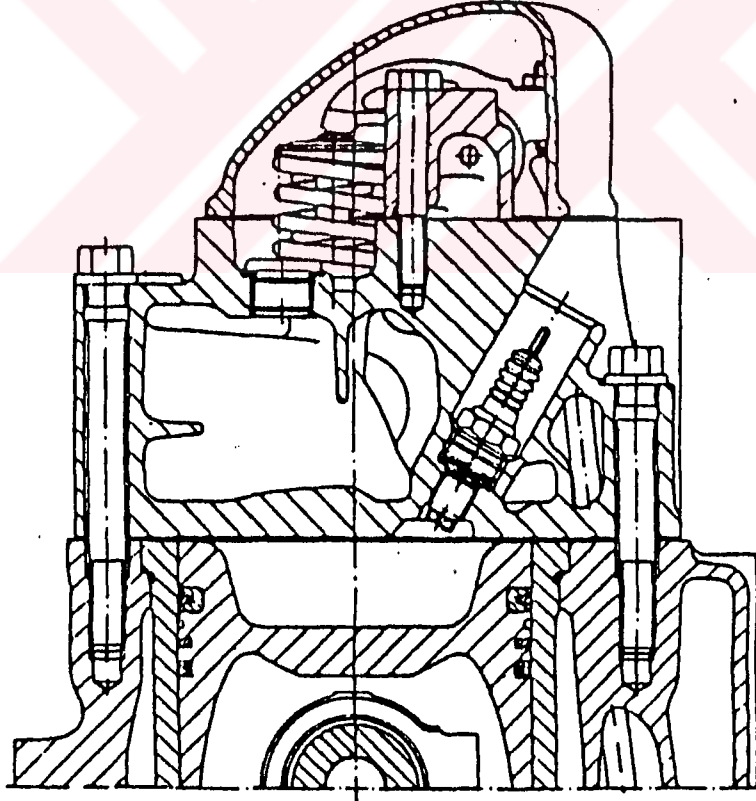


Şekil 2.5. Gaz enjektörlü bir taşıt motoru örneği [19].

2.3.2. %100 doğal gaz yakıtı ile çalışan dizel motoru

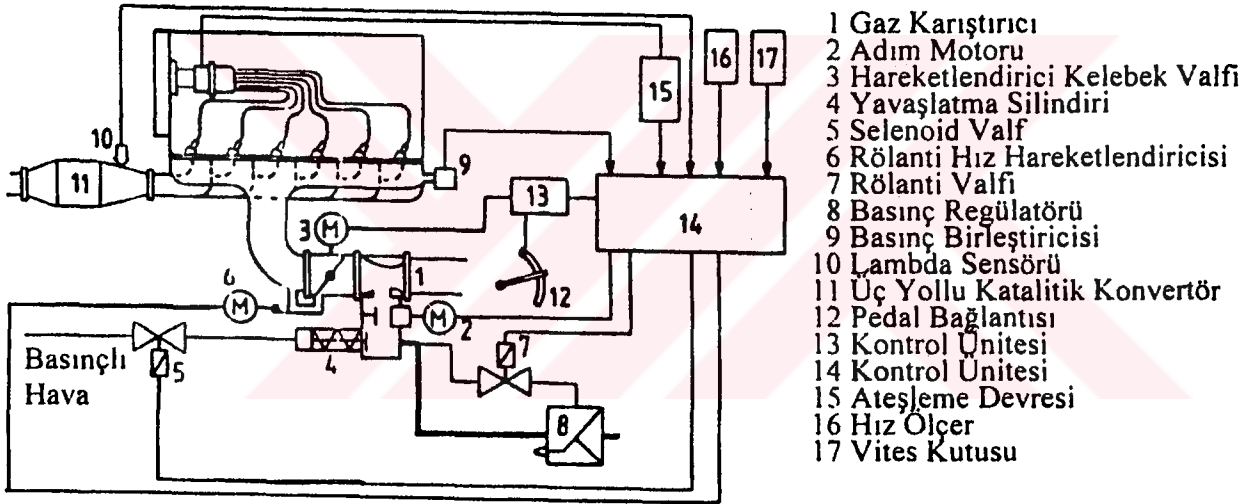
Dizel motorları, doğal gaz motorlarına 2.2. bölümünde açıklanan fakir karışimli doğal gaz motoru veya stokiyometrik karışimli doğal gaz motoru olarak dönüştürülebilmektedir. Bu dönüşüm gaz karbüratörlü motorlar olarak veya gaz enjektörlü motorlar olarak yapılabilmektedir.

MAN firması böyle bir dönüşümü MAN D28 motorları üzerinde yapmıştır. MAN D28 Dizel Motorları stokiyometrik karışimli ve gaz karbüratörlü olarak dönüştürülmüştür. Bu dönüşümde motor parçalarını hiç değiştirmeden aynen kullanarak düşük maliyet ve kalıcı bir çözüm oluşturulmuştur. Silindir başı ve pistonlarda şekil 2.6. 'da görüldüğü gibi, ateşleme ve yanmada gerekli dönüşümler yapılmıştır.



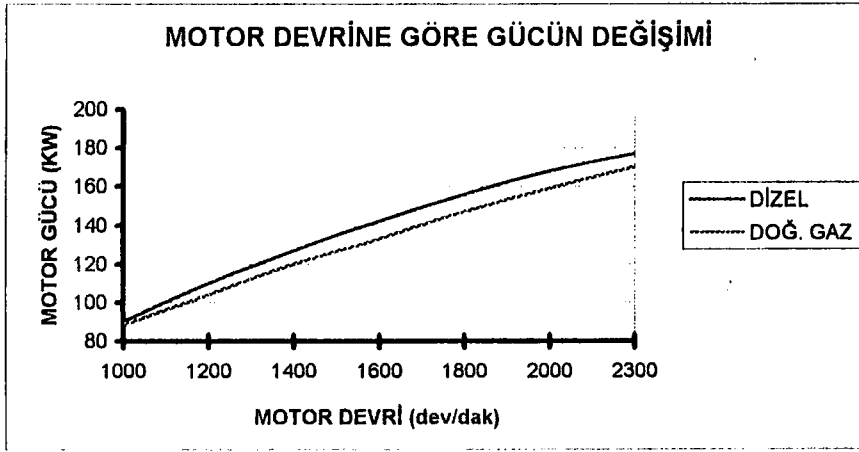
Şekil 2.6. Doğal gaza dönüştürülmüş MAN D28 motorunun kesiti[19]

Yanması otto motorları prensibinde hazırlanmıştır. Burada enjektör yerine buji ve enjeksiyon pompası yerine yüksek gerilim distribütörü takılmıştır. Karışım mevcut karbüratörlere benzeyen bir karıştırıcıda hazırlanmaktadır. Egzoz gazının temizlenmesi için egzoz sistemine üç yollu katalizör monte edilmiştir. Her türlü koşulda işletme ve emisyon tutumunda bir düzeni sağlamak amacı ile, gaz motorlarında ek önlemlerin alınması gerekmektedir. Örneğin relanti devri ayarı ve max. Devir ayarı, relanti karışımını sağlayan manyetik supap ve sürmenin kapatılması vb. Bunlardan başka araçtan gelen farklı enformasyonlar değerlendirilir. Bu değerlendirme, merkezi kumanda birimi kanalı ile yapılmaktadır. Şekil 2.7. doğal gaz motorunun diyagramını göstermektedir.

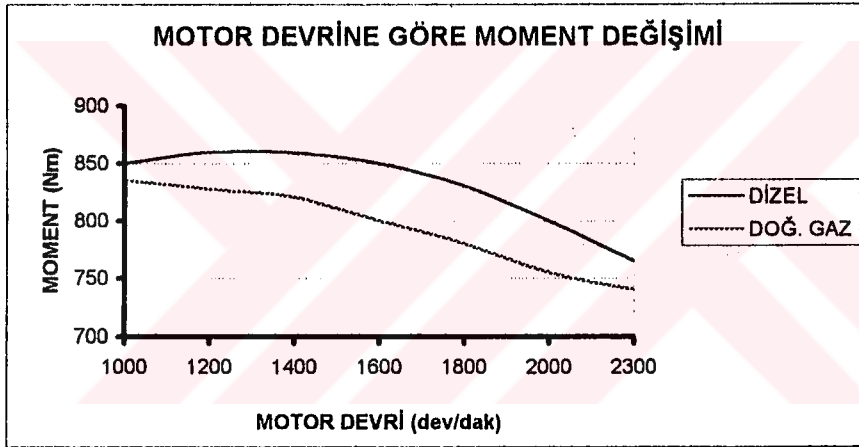


Şekil 2.7. M.A.N. doğal gaz motorunun diyagramı[19].

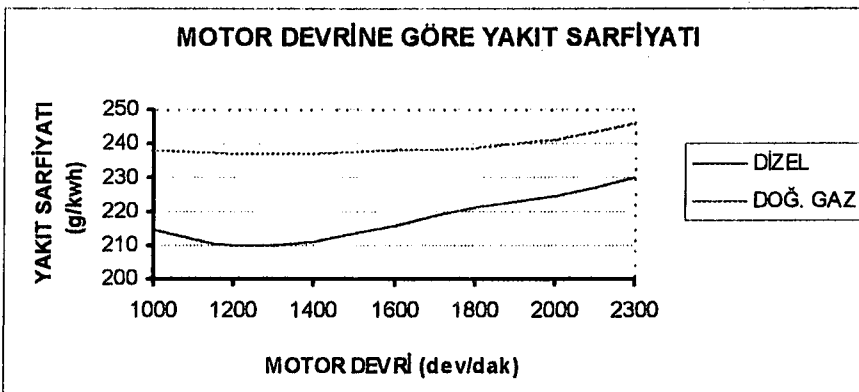
D28 motorlarının şekil 2.8.'de görüldüğü gibi max. güç 170 kw , şekil 2.9.'da max. dönme momenti 840 Nm dir. Dizel motoru ile mukayese edildiğinde %5 'lik bir güç kaybı vardır. Bu kayba gaz miktarı kadar azaltılan hava emiş hacmi sebebiyet vermektedir, ancak gaz sürgüsünün kaçınılmaz sürgü kaybı ve venturi karıştırıcısı da kayba sebebiyet vermektedir. Şekil 2.10.'da dizel motorunun dizel yakıt sarfiyatı ile dönüşüm sonrasındaki gaz yakıt sarfiyatı mukayeseli olarak gösterilmiştir[19].



Şekil 2.8. Dizel motoru ile doğal gaza dönüştürülmüş motorun güç diyagramı[19].



Şekil 2.9. Dizel motoru ile doğal gaza dönüştürülmüş motorun moment diyagramı[19].



Şekil 2.10. Dizel motoru ile doğal gaza dönüştürülmüş motorun yakıt sarfıyatı diyagramı[19].

2.4. Doğal gazın otto motorlarında kullanımı

Doğal gaz benzin motorlarında fazla bir değişiklik yapılmadan kullanılabilir. Benzin motorları istenildiği zaman benzinle, istenildiği zaman doğal gazla çalıştırılabilir. Doğal gaz benzin motorlarında çok az miktarda kullanmamız mümkün olduğu gibi, tek yakıt olarak da kullanmamız mümkündür. Her iki durumda da egzoz emisyonlarında kirlilik azalmakta, özellikle karbonmonoksit miktarında önemli azalmalar olmaktadır. Motorda her iki yakıtta otto çevrimi ile çalışabilir. Elektrikli ateşleme sistemi aynen kullanılır. Doğal gazın benzin motorlarında kullanılması halinde pilot yakıt, ateşleme sistemi ile karışımın ateşlenmesi durumu mevcut olduğundan gerekmemektedir [15].

Bir benzin motoruna gaz/hava karbüratörünün ilavesi ve ateşleme sisteminin motora uygun olarak yeniden düzenlenmesi ile motorun doğal gaz motoru olarak kullanılabilmesi mümkündür. Bunların dışında doğal gazın depolanması ve depodan motora sevki için gerekli basınç regülatörü, emniyet supabı gibi elemanlar ile sistemin donatılması gerekmektedir [17].

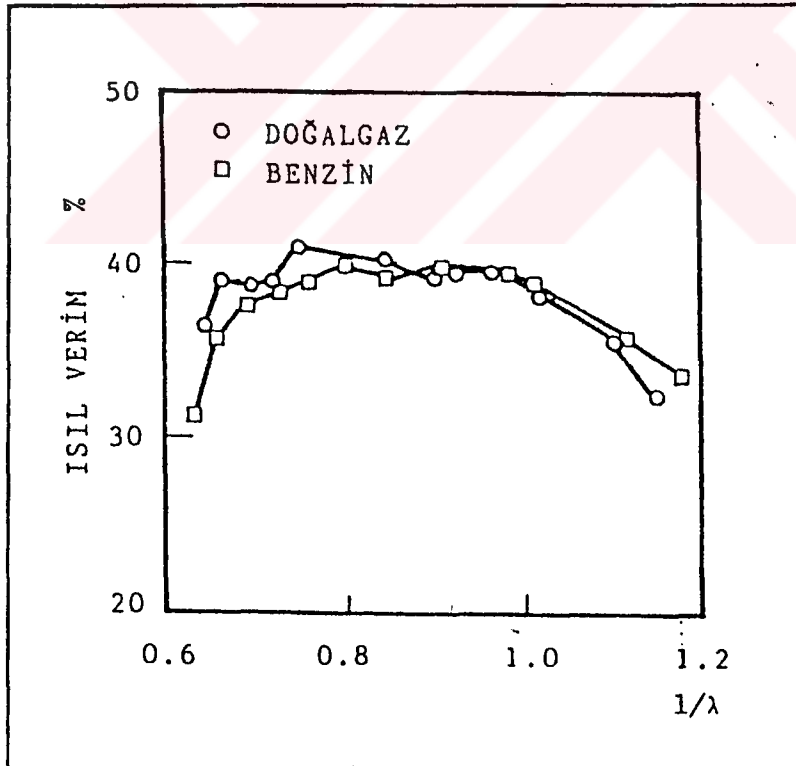
Yüksek basınçta depolanan doğal gazın basıncının regülatörlerde düşürülmesinden sonra gaz karbüratöründe hava ile karışım sağlanmaktadır. Gaz karbüratörlerinin karışımı homojen bir şekilde ve istenen yakıt/hava oranında hazırlanması, motor gücünü düşürmeyecek şekilde akış direncinin mümkün olduğu kadar az olması, motorun tüm çalışma şartlarında emniyetli çalışması, bütün silindirlere aynı yakıt/hava oranında karışım gönderilmesi ve kirlletici egzoz emisyonunu düşük seviyede tutacak şekilde karışımın hazırlanması gerekmektedir.

Benzin motorlarında dizel motorlarında olduğu gibi ventüri karbüratörü, orifis (delikli) karbüratör, girdap (vorteks) karbüratör ve değişken sınırlamalı karbüratör kullanılmaktadır[12].

Günümüzde buji ateşlemeli motorlarda doğal gaz kullanılması çalışmalarında bir takım ilerlemeler sağlandı. Bu amaçla yapılan çalışmalar sonucunda şaft verimi ve taşıtın yağlama yağının dayanıklılığı arttı. Test çalışmaları yağlama yağının 4000 saat kullanılabileceğini göstermektedir. Fakat yinede benzin motorlarında doğal gaz kullanılması durumunda hava sıcaklığının kontrolü, kalibrasyon ve motorun boşa çalışma stabilitesi gibi problemler vardır[8].

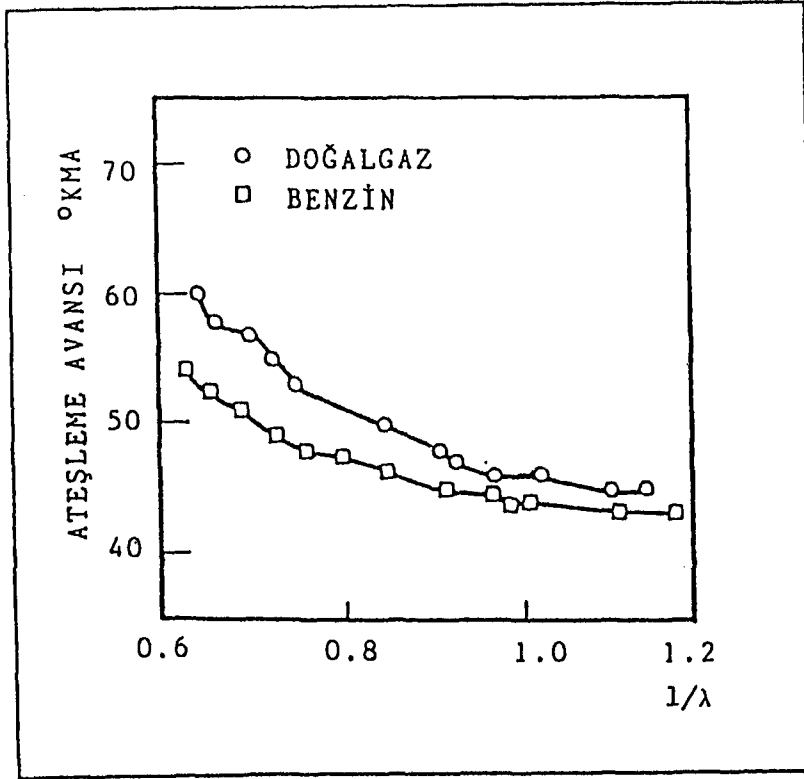
Doğal gaz sahib olduğu yüksek oktan sayısı nedeni ile otto ilkesine göre çalışan motorlar için uygun bir yakıttır. Ancak, benzine oranla birim kütlesinin sahip olduğu enerji yoğunluğu daha fazla olduğu halde (benzin 43 MJ/kg, doğal gaz 50-52 MJ/kg), stokiyometrik oranlarındaki karışım enerji yoğunluğu benzine oranla daha düşüktür. Bu nedenle aynı motordan alınacak güç, doğal gaz kullanıldığında düşmektedir. Ayrıca yanma hızının da düşük olması, ısı verim açısından olumsuz etkiler yaratmaktadır. Ancak doğal gazın tutuşma sınırının, fakir karışımlara doğru gidildikçe, benzine oranla daha geniş olması ısı verimin bu şartlarda daha yüksek olmasına neden olmaktadır.

Şekil 2.11 'de hava fazlalık katsayısının fonksiyonu olarak ısı verimin değişimi görülmektedir. Diğer taraftan doğal gaz kullanımı sırasında maksimum momenti sağlayabilmek için ateşleme avansının arttırılması gerekmektedir. Hava fazlalık katsayısının daha fakir değerlerinde bu fark daha da belirgin olmaktadır.



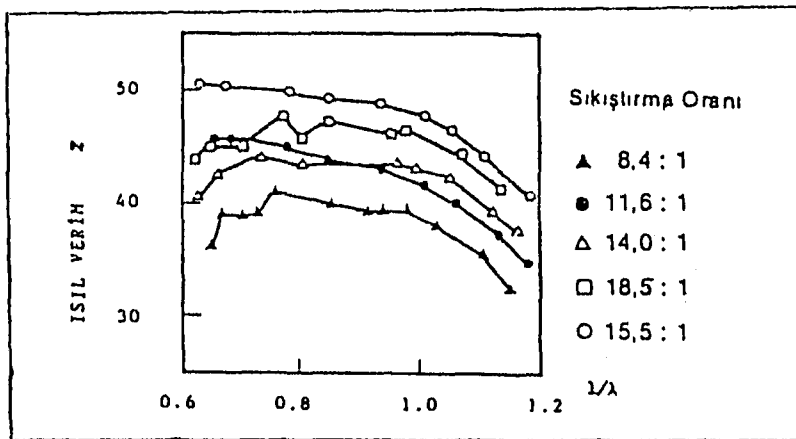
Şekil 2.11. Hava fazlalık katsayısının fonksiyonu olarak ısı verimin değişimi [11].

Şekil 2.12 'de hava fazlalık katsayısının fonksiyonu olarak maksimum momenti sağlayacak ateşleme avansının değişimi görülmektedir.



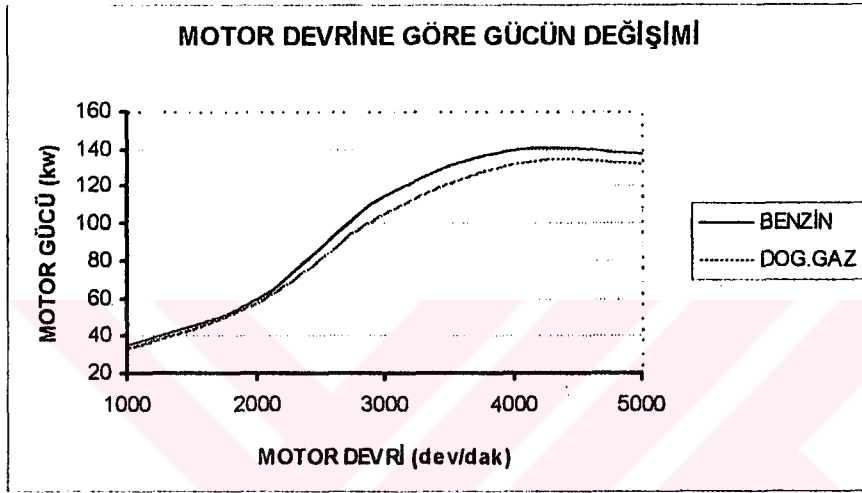
Şekil 2.12. Hava fazlalık katsayısının fonksiyonu olarak maksimum momenti sağlayacak ateşleme avansının değişimi [11].

Doğal gazın yüksek oktan sayısı avantajı kullanılarak motorun sıkıştırma oranı artırıldığında, ısı verim de artacaktır. Ancak sıkıştırma oranının belirli sınırların üzerine çıkartılması durumunda, vuruntu sınırına gelindiği için ısı verim tekrar düşecektir. Şekil 2.13. 'de sıkıştırma oranına bağlı olarak ısı verimin değişimi görülmektedir. Motordan maksimum güç alınabilmesi için sıkıştırma oranının değişimi ile ateşleme avansının da ayarlanması gerekmektedir [11].

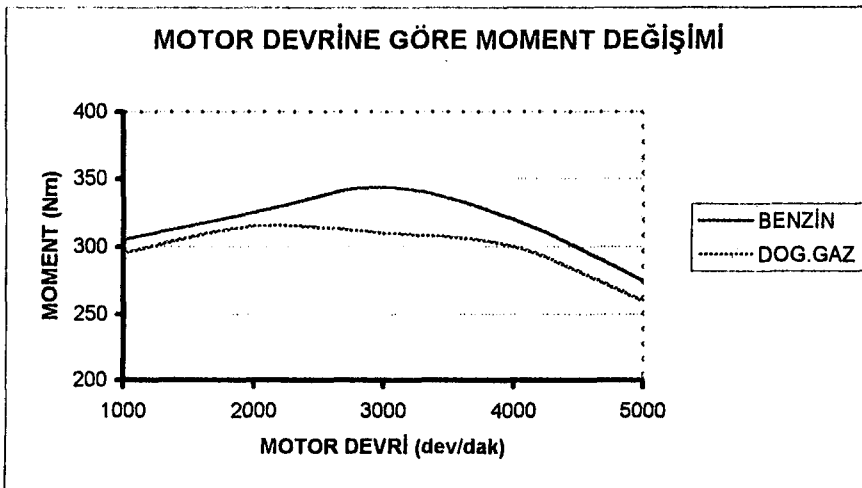


Şekil 2.13. Sıkıştırma oranına bağlı olarak ısı verimin değişimi [11].

Şekil 2.14-15 de 1996 model 4.6L S.O.H.C. Ford motorunun doğal gaz motoruna dönüşümü yapıldıktan sonraki güç ve moment değişimleri, motorun benzinle çalışırken elde edilen güç ve moment değişimleriyle mukayeseli olarak verilmiştir. Stokiyometrik karışımda çalıştırılan motor doğal gaza dönüşümde sıkıştırma oranı 9:1 den 10:1 çıkarılmıştır. Motor elektronik yakıt püskürtmelidir[20].



Şekil 2.14. Ford doğal gaz ve benzin motorunun güç değişimi[20].



Şekil 2.15. Ford doğal gaz ve benzin motorunun moment değişimi[20].

2.5. Egzoz gazları emisyonu

Motorlu taşıtlarda yakıt olarak doğal gazın kullanılmasıyla veya az miktarda devreye ilave edilmesiyle egzoz emisyonlarında azalmalar olmaktadır. Büyük şehirlerdeki hava kirliliğinde motorlu taşıtların payının fazla olması, egzoz emisyonlarındaki zehirli gazların azalmalarını temin eden doğal gazın kullanımının önemini ortaya çıkartmaktadır. Doğal gazın yakıt olarak motorlu taşıtlarda kullanımı, özellikle şehir trafiğinde seyreden, dizel motorlarında NO_x ve HC emisyonlarında azalmalar, benzin motorlarında da CO ve HC emisyonlarında azalmalar temin edecektir. Doğal gazın karbon oranının, diğer petrol yakıtlarına göre, düşük olması egzoz gazlarındaki karbondioksit oranının azalmasına sebep olacaktır. Ayrıca doğal gaz kullanımı, benzinli taşıtların egzoz emisyonlarındaki zehirli kurşun türevlerini tamamen yok edecektir. Doğal gaz oktanı yüksek kurşunsuz bir yakıttır.

Benzin motorlarında ve dizel motorlarında doğal gaz kullanılması durumunda yanma sonu sıcaklığında bir düşme olmaktadır. Yanma sonu sıcaklığının artmasıyla NO_x emisyonlarında artma gözlenmektedir. Yapılan deneylerde, dizel motorunda ve benzin motorunda, doğal gaza geçilmesi durumunda yanma sonu sıcaklıklarında düşme gözlenmektedir. Bu da NO_x emisyonlarında bir azalma sağlayacaktır. CO emisyonları yanma sonu sıcaklığı, yanma verimi, su buharı miktarı ve NO_x emisyonlarının oluşumu ile ve hava fazlalığı ile değişim göstermektedir. İyi bir yanma ile CO miktarında düşmeler görülür. Zengin karışımlarda, CO emisyonlarında artmalar gözlenir. Hava katsayısının belirli değerleri arasında sıcaklıkla beraber NO_x 'de artmalar olurken, buna ters olarak CO emisyonlarında azalmalar görülür. HC emisyonlarında da CO emisyonlarına benzer değişimler görülür. İyi bir yanmayla HC ve CO emisyonlarında düşmeler olurken, sıcaklığın artması ile NO_x emisyonlarında artmalar görülür. Doğal gazın yakıt olarak kullanılması ile daha iyi yanma ve yanma sonu sıcaklıklarında azalma sağlanır. Bu da CO, HC ve NO_x emisyonlarında azalma olacağını göstermektedir [15].

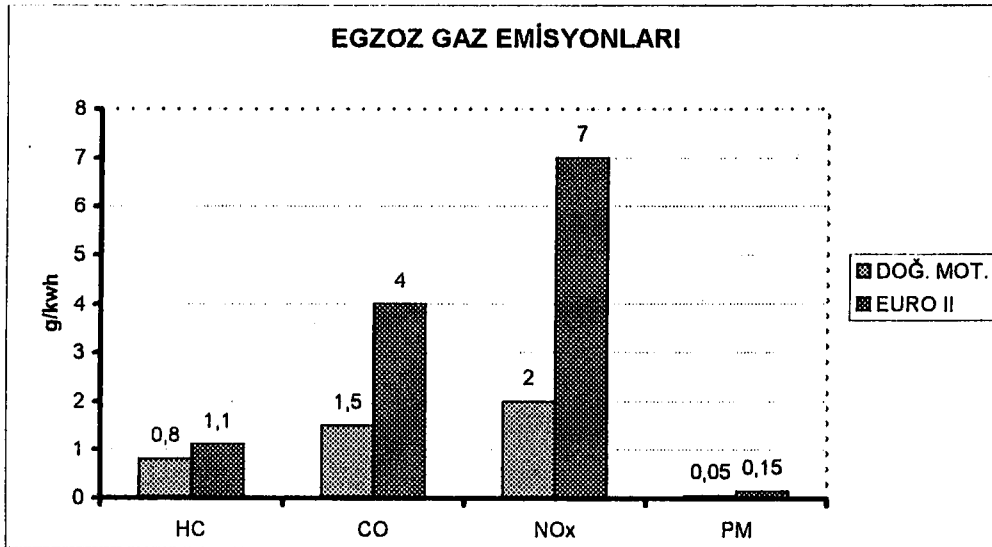
Doğal gaz yakıtı kullanılan motorların egzoz emisyonlarında, benzin motorlarına göre daha az miktarda karbondioksit, karbonmonoksit, nitrojenoksit ve metan bulundurmayan hidrokarbonlar olması için, genellikle üç yollu katalitik konvertör kullanılması tavsiye edilmektedir. Fakat doğal gaz motorundan yayılan egzoz emisyonları kullanılan doğal gazın cinsine, kullanılan motor tipine göre de değişmektedir [8].

2.5.1. Doğal gaz motorunda oluşan egzoz gazları emisyonu

Tablo 2.3. te TBB- Green engine 180 - GRES model doğal gaz motorunda oluşan maksimum egzoz gaz emisyon değerleri EURO II değerleriyle beraber verilmiştir. Tabloda verilen değerlerden bu doğal gaz motorunun egzoz gaz emisyonu değerlerinin EURO II Standartlarının çok altında kaldığı görülmektedir. Buna göre doğal gaz motorların da oluşan zararlı egzoz emisyonları düşüktür. Doğal gaz motorlarının egzoz emisyonu değerleri Avrupa Topluluğu standartlarını sağlar. Şekil 2.16.'da TB Green motorunun egzoz gaz emisyonu değerleri EURO II değerleriyle mukayeseli olarak verilmiştir[18].

Tablo 2.3. TB Green motorunun egzoz gaz emisyonu değerleri

gr/kwh	EURO II 1996	TB GREEN ENGINE
NOx	7	<2
CO	4	<1.5
HC	1.1	<0.8
PM	0.15	<0.05

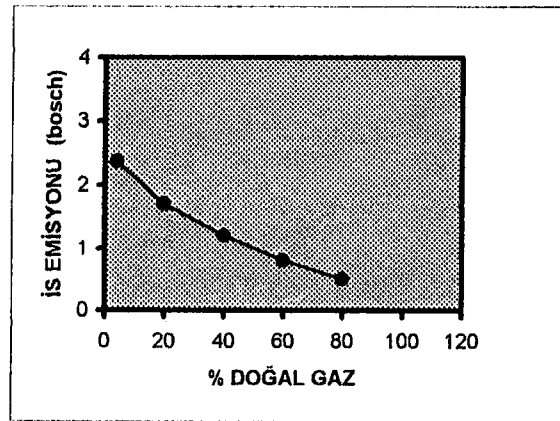


Şekil 2.16. TB Green motorunun egzoz gaz emisyonu değerlerinin EURO II değerleriyle mukayesesi[18].

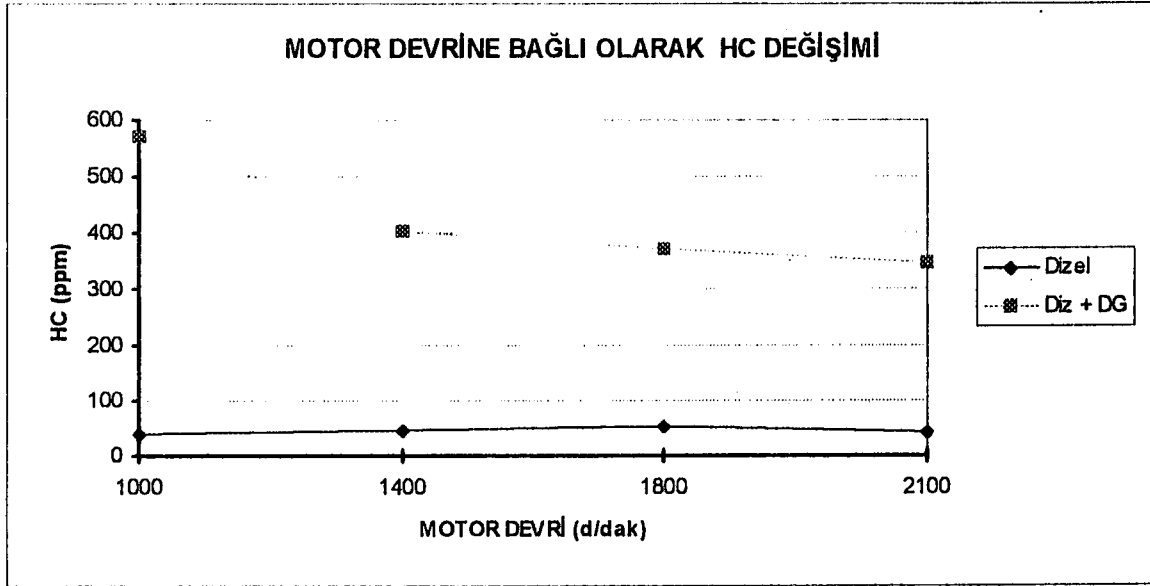
2.5.2. Doğal gazın dizel motorlarında kullanımı durumunda oluşan egzoz gazları emisyonu

a) Çift yakıt (doğal gaz +dizel) kullanılması durumunda oluşan egzoz gazları emisyonu: Doğal gaz ile çalışmada is ve NO_x emisyonlarının normal dizel yakıtı ile çalışmadaki seviyelerin yarısının da altına inmesi, doğal gazı özellikle toplu taşımacılıkta kullanılan taşıtların motorları için çekici hale getirmiştir. Bu amaçla doğal gaz, orta güçlü (silindir çapı = 125-150 mm, $V_{II} = 8-12$ l, 150-250 kw) dizel motorlarında giderek daha yaygın bu şekilde kullanılmaktadır.

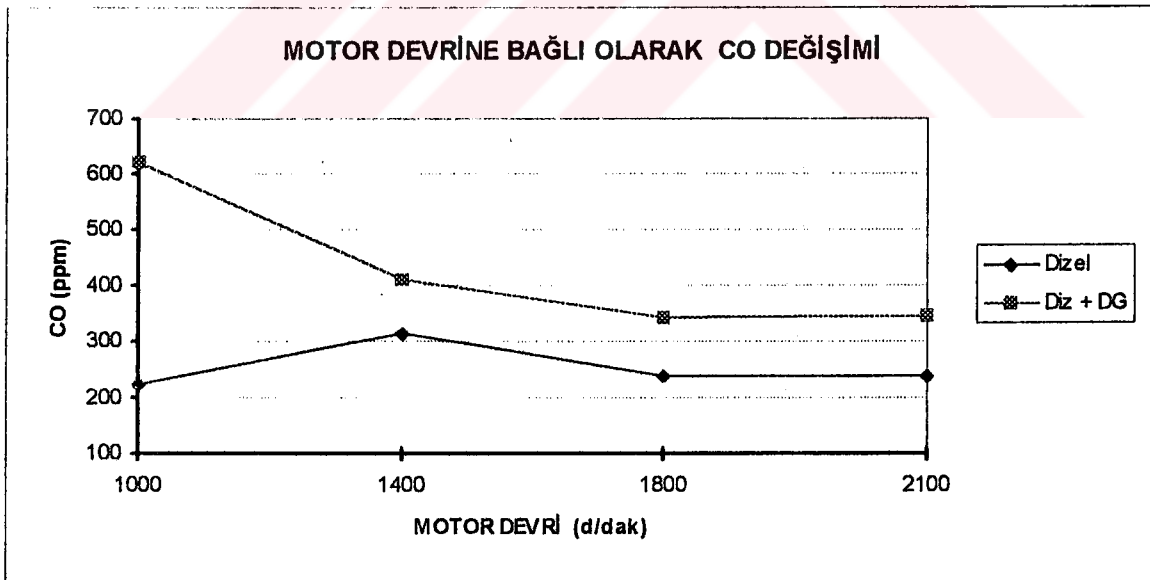
Dizel yakıtı yerine doğal gaz kullanıldığında, orta güçlü dizel motorlarının CO ve özellikle HC emisyonları artar. Bunun nedeni, yanma odasına yayılan doğal gazın yerel olarak yanmasını tamamlayamamasıdır. Şekil 2.18-19'da dizel motorunun ile çift yakıtlı (doğal gaz + dizel) sisteme dönüştürülmüş dizel motorunun oluşturduğu CO ve HC miktarları mukayeseli olarak gösterilmiştir. Doğal gaz ile de püskürtme enjektörü kullanıldığında, yakıt tüketimine paralel olarak, %100 dizel yakıtın CO emisyonu seviyesine inmek mümkün olmaktadır. Ancak bu durumda pilot püskürtme miktarı %10-15'i geçmemelidir. Aksi durumda püskürtme süresi çok uzadığından CO ve HC emisyonlarında yeniden artma başlamaktadır. Şekil 2.17 'da silindir çapı 125 mm, stroku 135 mm, sıkıştırma oranı 17 olan, oyuk pistonlu, direkt püskürtmeli bir deney motorundan elde edilmiş is değerleri görülmektedir.



Şekil 2.17. Orta güçlü, direkt püskürtmeli bir motorda doğal gaz kullanımı sonucu oluşan is değerleri [11].

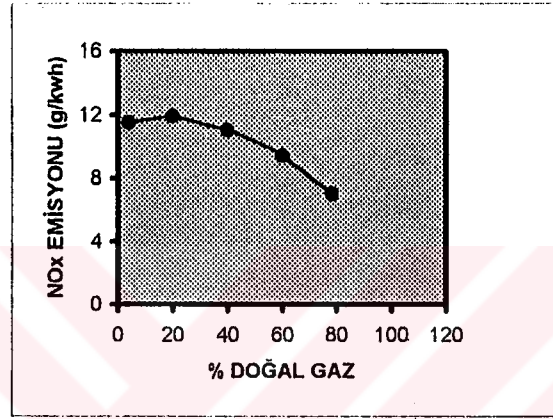


Şekil 2.18. Motor devrine bağlı olarak HC emisyonunun değişimi [40]



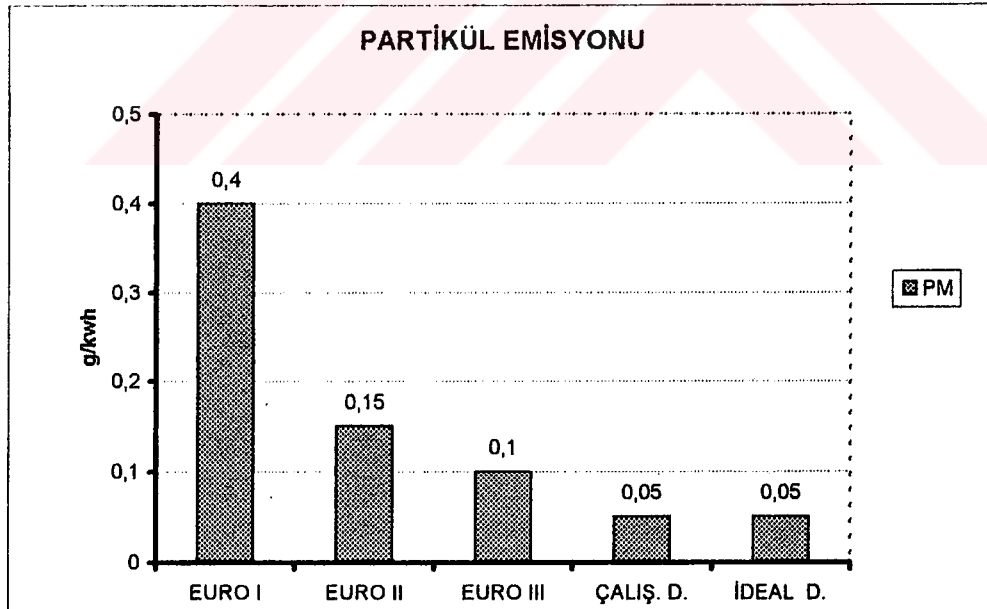
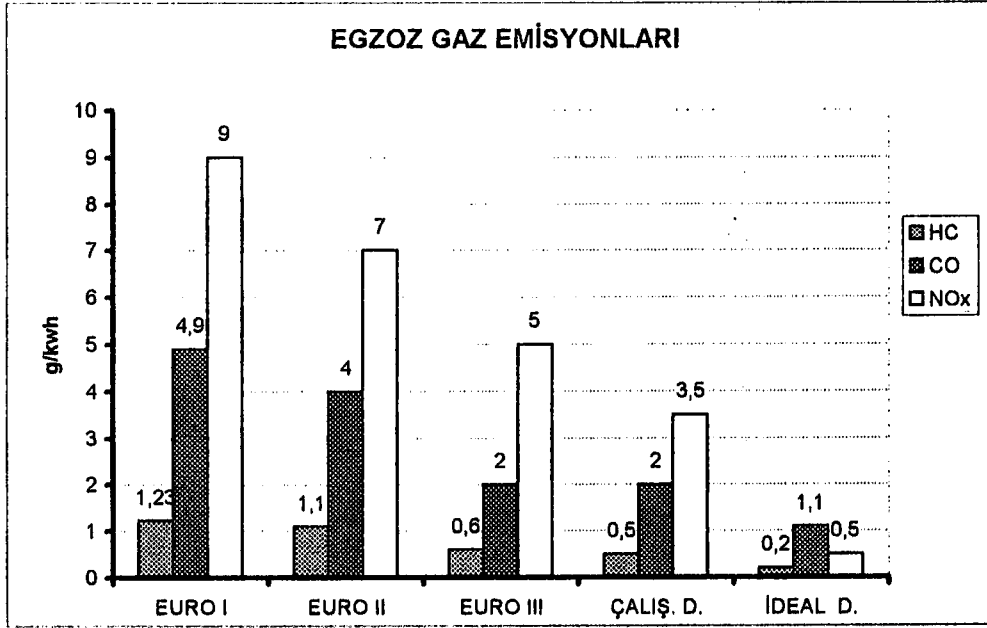
Şekil 2.19. Motor devrine bağlı olarak CO emisyonunun değişimi [40]

Gaz yakıt yüzdesi sıfır iken, yani dizel yakıtı ile çalışırken 2.5 olan “Bosch is sayısı”, %90’lık gaz çalışmasında 0.6’ya düşmüştür. Pilot püskürtme enjektörü kullanılırsa, is pratik olarak ortadan kalkmaktadır. Aynı motorda ölçülen NOx emisyonu değerleri Şekil 2.20 ’da verilmiştir. Gaz çalışmasına geçildiğinde, NOx emisyonunda yarıdan fazla bir düşme elde edilmektedir.



Şekil 2.20. Orta güçlü, direkt püskürtmeli bir motorda doğal gaz kullanımı sonucu oluşan NOx değerleri [11].

b) Dizel motorunda %100 doğal gaz kullanımında oluşan egzoz gaz emisyonları: Şekil 2.21’ da %100 doğal gaza dönüştürülmüş MAN D28 doğal gaz motorunun egzoz gaz emisyonları EURO I,II,III standart değerleriyle beraber verilmiştir. İssiz yanma yapabilen doğal gaz motoru bunun yanı sıra son derece düşük olan gaz şeklindeki zararlı emisyonları ile de dikkat çekmektedir. Ancak bu motorda üç yollu katalizör kullanılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi çalışma anındaki (eskimiş katalizör ve oksijen sensörü) zararlı egzoz emisyonları EURO III standartlarında belirtilen emisyon sınır değerlerinin altında kalmaktadır. İdeal durumdaki (yeni basınç regülatörü, katalizör ve oksijen sensörü) emisyon değerleri ise daha da azalmaktadır [19].

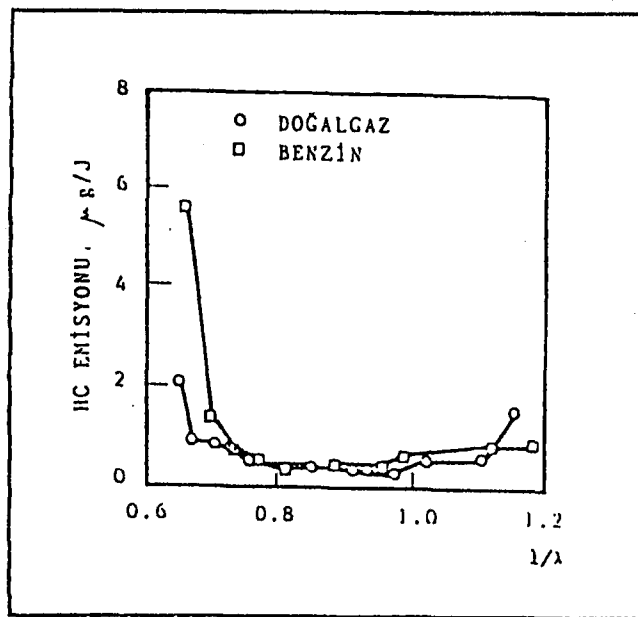


Şekil 2.21. Doğal gaza dönüştürülmüş MAN D28 motorunun zararlı egzoz emisyonlarının EURO standartlarıyla mukayesesi[19].

Sonuç olarak doğal gaz dizel motorlarında kirletici emisyonu azaltmak için kullanılabilecek alternatif bir yakıttır. Mevcut motorların çeşitli yöntemlerle çift yakıt ile çalışabilir hale dönüştürülmesi her ne kadar bir çözüm şekli ise de, bu uygulamalarda doğal gaz ile çalışan motorun emisyon değerleri, son yıllarda AT ülkelerinde uygulanan sınır değerini karşılaması mümkün olmamaktadır. Geçici olarak kullanılacak bu çözümün yerine, sadece doğal gaz kullanılan motorların üretilmesi daha kalıcı bir çözüm olarak görülmektedir. [17].

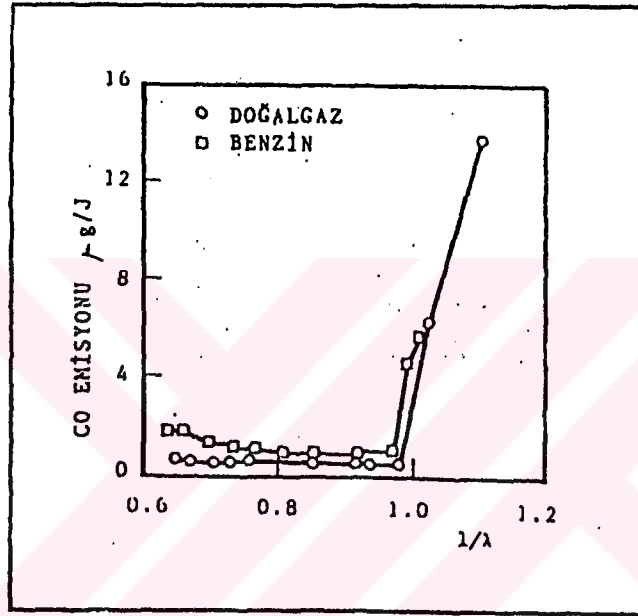
2.5.3. Doğal gazın Otto motorlarında kullanımı durumunda oluşan egzoz gazları emisyonu

Doğal gaz hava kirliliği açısından avantajlı bir yakıttır. Yanmamış HC emisyonu açısından doğal gaz ve benzin motorları arasında hava fazlalık katsayısının 0.9 ile 1.4 arasında değişen değerleri için belirgin bir fark bulunmamaktadır. Ancak karışımın daha da fakirleştirilmesi durumunda doğal gaz avantajlı olmaktadır. Şekil 2.22 'de hava fazlalık katsayısına bağlı olarak HC emisyonu miktarının değişimi görülmektedir. CO emisyonu açısından bir karşılaştırma yapıldığında stokiometrik ve fakir karışımlar için doğal gaz daha avantajlı durumdadır. Ancak zengin karışımlara doğru gidildikçe benzin motoruna benzer şekilde CO emisyonu artış göstermektedir. Şekil 2. 23 'de hava fazlalık katsayısına bağlı olarak CO emisyonu miktarının değişimi görülmektedir.

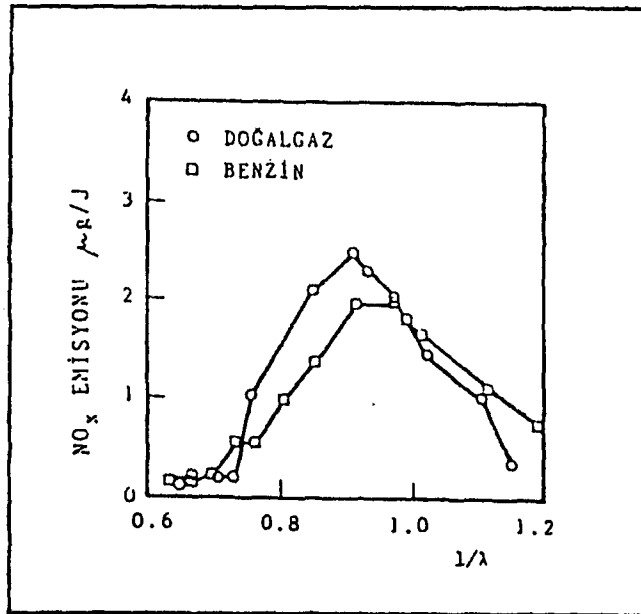


Şekil 2.22. Hava fazlalık katsayısına bağlı olarak HC emisyonu miktarının değişimi [11].

NOx emisyonundaki genel eğilim benzin motorlarına benzer şekilde olup, stokiyometrik karışımdan biraz daha fakir tarafta bir tepe noktası oluşturacak şekilde eğri çizmektedir. Ancak maksimum değer benzine göre biraz daha yüksektir. Maksimum momenti sağlayan ateşleme avansı değerindeki farklılıktan dolayı, hava fazlalık katsayısının 1.3 değerinin altında, doğal gazın NOx emisyonları benzine göre daha az bir değerde kalmaktadır. Şekil 2.24 'de hava fazlalık katsayısına bağlı olarak NOx emisyonu miktarının değişimi görülmektedir [11].



Şekil 2.23. Hava fazlalık katsayısına bağlı olarak CO emisyonu miktarının değişimi [11].



Şekil 2.24. Hava fazlalık katsayısına bağlı olarak NOx emisyonu miktarının değişimi [11]

Doğal gazın taşıtlarda depolanması ekonomik ve teknolojik yönden problemler doğurmaktadır. Çünkü ister gaz olarak, ister sıvı olarak depolansın, doğal gaz yüksek basınç altında depolanmaktadır. Bu da, bir yandan depo ağırlığının artmasına, diğer yandan emniyet açısından bazı problemlere yol açmaktadır [11].

Doğal gaz, yüksek basınç ile sıkıştırılmış gaz formunda (CNG) veya sıvı formda (LNG) depolanabilir. Doğal gaz kullanımı durumunda yakıt tankı oldukça geniş ve ağırdır; fakat geniş taşıtların kullanılması ile bu fazla önem teşkil etmemektedir. Fakat geniş yakıt tanklarının sorun olmadan yerleştirilebileceği büyük taşıtlar seçilmesine rağmen, doğal gaz kullanan bir taşıtın menzili 320 km'den az olmaktadır [8]. Yakıt tankı kapasiteleri taşıttan ne kadar menzil beklendiği ve taşıta en fazla ne kadar ekstra ağırlık yükleneceğine bağlıdır. Genel olarak arabalarda 37 litre benzine eşit hacimde iki adet doğal gaz tankı kullanılmaktadır. Kamyon ve otobüslerde menzilin 480-640 km'ye çıkarılabilmesi için ekstra tanklar kullanılmaktadır [7].

Doğal gazın yüksek basınçta, sıvı halde yakıt istasyonlarında depolanması gerekmektedir. Doğal gaz ilk önce 7.03-8.44 kgf/cm² (100-120 psi) basınca yükseltilir, daha sonra 49.21-56.24 kgf/cm² (700-800 psi) basınca çıkartılır ve son olarak 210.9-253.08 kgf/cm² (3000-3600 psi) basınca çıkartılarak depolanır. 210.9-253.08 kgf/cm² basınçta sıvı halde yakıt istasyonlarında depolanan doğal gazın, taşıtlarda kullanımında en önemli nokta, taşıtlarda yakıt tankı olarak kullanılacak hacmin sınırlı olması nedeni ile doğal gazın sıvı halde kullanılmasının daha makul olduğudur [21]. Sıvı doğal gaz diğer sıvı yakıtlara nazaran oldukça farklıdır. Doğal gazın kaynama sıcaklığının suyun donma sıcaklığının altında ve çok düşük olması, bu yakıtın normal sıcaklıklarda yüksek buharlaşma basıncına sahip olması demektir. Sonuç olarak düşünülen basınca dayanabilir sızdırmaz tank içerisinde depolanmalıdır [16]. Sıvı doğal gaz sıvı hidrojenle (LH₂) ile karşılaştırıldığında yakıt tankında daha fazla yalıtım yapılması gerekmektedir. Eğer sıvı doğal gaz düşük sıcaklıkta tutulabilirse çıkış performansı artacaktır. Buda NOx emisyonlarının azaltılması ve sıkıştırma oranının artırılması bakımından avantajdır [22].

Sıkıştırmış doğal gaz alüminyum veya çelik tanklar içerisinde depolanmaktadır. Taşıtlarda 140.6-210.9 kgf/cm² (2000-3000 psi) basınç altında depolanan sıkıştırılmış doğal gazın enerjisi düşüktür. Bu yüzden taşıtlar belli bir mesafe gidebilmek için, geniş yakıt depolarına ihtiyaç duyarlar [23]. Taşıt çalışmaya başladığında doğal gaz silindire gelene kadar

birkaç basınç düzenleyiciden (regülatör) geçer. Tank içerisinde $140.6-210.9 \text{ kgf/cm}^2$ basınçta bulunan doğal gazın basıncı ilk regülatörde 10.55 kgf/cm^2 'ye (150 psi) düşürülür ve donmaya karşı gaz ısıtılır. Daha sonra ikinci regülatörde doğal gazın basıncı $0.84-1.05 \text{ kgf/cm}^2$ 'ye (12-15 psi) ve en son regülatörde de doğal gazın basıncı 0.014 kgf/cm^2 'ye (0.2 psi), düşürülür. Daha sonra doğal gaz ve hava karışımı ayarlanarak, elektrikle kontrol edilen bir selenoid vanadan geçerek silindire gönderilir. Basınç düşürücü ilk regülatörden önce ve son regülatörden sonra emniyeti sağlamak için emniyet vanaları kullanılmaktadır. Bu vanalar kontak anahtarı kapalı iken motor kapalı iken kapanarak doğal gaz akışını keserler [7].

Doğal gazın $140.6-210.9 \text{ kgf/cm}^2$ gibi yüksek basınçlarda sıkıştırılmış olarak taşıtlarda depolanması, bu taşıtların herhangi bir kaza durumundaki emniyetleri bakımından kullanıcıları şüpheye götürmesine rağmen, yapılan test sonuçlarına göre sıkıştırılmış doğal gaz tanklarının emniyetli olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Philadelphia Electric Co. (PECo) şirketinden Sheldon Cramer herkesin benzini güvenli bir yakıt olarak bildiğini halbuki doğal gazın havadan daha hafif oluşu nedeni ile herhangi bir kaza durumunda çabukça yayıldığını ve tutuşma sıcaklığının benzinin tutuşma sıcaklığından daha yüksek olduğunu belirtmektedir. Doğal gazın alev alma aralığı sınırlıdır. Ancak havadaki doğal gaz miktarı %5-%15 arasında olursa doğal gaz yanabilir [7].

BÖLÜM 3. DİĞER ALTERNATİF YAKITLARIN İÇTEN YANMALI MOTORLARDA KULLANIMI

3.1. Hidrojen yakıtının içten yanmalı motorlarda kullanımı

3.1.1 Hidrojenin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Hidrojen, kömür ve doğal gaz gibi fosil yakıtlardan, güneş enerjisi ve nükleer enerjiden, su gibi sonsuz bir kaynaktan elde edilebilir. Hidrojenin yakıt olarak kullanılmasında, yanma ürünü olarak su buharı açığa çıkarması nedeni ile çevreye hiçbir zararı yoktur. Sınırsız kaynaklara sahip olan ve havayı kirletmesi açısından içten yanmalı motorlarda kullanılan diğer alternatif yakıtlara göre daha iyi durumda olan hidrojenin, içten yanmalı motorlarda kullanımı çalışmalarına 1900'li yılların başlarında başlanmıştır ve 1970'den sonra çalışmalar yoğunlaştırılmıştır.

Kokusuz, renksiz, tatsız ve saydam bir yapıya sahip olan hidrojen doğadaki en hafif kimyasal elementtir. Gaz halindeki hidrojen aynı hacimdeki havadan yaklaşık 15 kez daha hafiftir. İçten yanmalı motorlarda kullanılmakta olan diğer alternatif yakıtlarla karşılaştırıldığında sıvı hidrojenin, sıvı hidrokarbonlara oranla yaklaşık 10 kat daha hafif, gaz halindeki hidrojenin ise metan gazından 10 kat daha hafif olduğu görülmektedir [13].

Hidrojen motorlarda yakıt olarak kullanılması durumunda petrol kökenli motor yakıtlarına oranla birçok önemli avantaja sahip olduğu bilinmektedir. Yüksek alev hızı ve tutuşma yeteneği, düşük ateşleme enerjisi gerektirmesi, geniş tutuşma ve yanma sınırları, yüksek ısı değeri ve termik verim, kirletici egzoz gazı emisyonlarının azlığı ve sahip olduğu yüksek oktan sayısı nedeni ile vuruntuya karşı dirençli olması hidrojeni çekici kılmaktadır [24]. Ayrıca benzin ve mazotla birlikte çeşitli karışım oranlarında çift yakıtlı motor olarak çalışabilme olanağına sahip olması, geçiş döneminde mevcut motorlarda önemli değişiklikler yapılmadan hidrojen kullanımını olanaklı kılacaktır.

Hidrojenin yakıt olarak kullanılmasında yarar sağlayacak en önemli özelliklerinden birisi, hidrojenin çok fakir karışımlardan, çok zengin karışımlara kadar uzanan geniş hava-yakıt karışım oranı aralığı içerisinde tutuşabilir olmasıdır. Hava fazlalık katsayısının 0.15-4.35

değerleri arasında tutuşma sağlanabilmektedir. Hidrojen hava karışımlarını ateşlemek için gerekli minimum enerji miktarı da diğer yakıtlara oranla daha düşüktür. Bu durum Otto prensibi ile çalışan motorlarda tutuşma garantisi yönünden bir avantaj gibi gözükse de, erken tutuşma ve geri tutuşma gibi sorunlara da neden olmaktadır. Hidrojenin kendi kendine tutuşma sıcaklığının oldukça yüksek olması (1 atm. Basıncıta 574-591 °C) ve oktan sayısının yüksek olması Otto motorlarında kullanımında avantaj teşkil etmektedir [13].

Tablo 3.1. Hidrojenin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal denklemi		H ₂
C/H oranı		0
Moleküler ağırlığı		2.02
Özgül ağırlığı	sıvı : kg /dm ³	0.07
	gaz : kg /dm ³	0.84 x 10 ⁻⁴
Isıl değeri (Mj / kg)	alt	119.93
	üst	141.86
Isıl değeri (MJ / litre)		8.41
Stokiyometrik karışım için	hava / yakıt (kütlesel)	34.32
	hava / yakıt (hacimsel)	2.38
	(kj / litre)	3.20
mol _{ürünler} / mol _{reaktantlar}		0.85
Buharlaştırma ısısı (Mj / kg)		0.447
Tutuşma sınırları	% hacim	4.1 - 74
	λ	0.15 - 4.35
Laminer alev hızı (m / s)		2.91
Adyabatik alev sıcaklığı (°C)		2110
Difüzyon katsayısı (m ² / s)		0.61
Kaynama noktası (°C)		-252.35
Donma noktası (°C)		-259
Kendi kendine tutuşma sıcaklığı (°C)		574-591
Oktan sayısı (ROS)		130

1980 yılında Kyoto Üniversitesi öğretim üyelerinden Prof. Ikegami, hidrojen yakıtını dizel motorunda uygulamaya çalıştı. Hidrojenin kendi kendine tutuşma sıcaklığının yüksek olması nedeni ile dizel motorlarında kullanılmasında bir takım güçlüklerle karşılaştı. Yüksek yükleme durumlarında eğer hava yakıt oranı stokiyometrik karışım oranına yaklaştığında erken tutuşma ve geri tutuşma meydana gelmekteydi. Erken tutuşma taşıt relanti durumundayken de olmaktaydı [22]. Bu durum hidrojenin dizel motorlarından çok, Otto ilkesi ile çalışan motorlar için daha uygun bir yakıt olacağını göstermektedir. Ancak dizel motorlarında hidrojenin tek başına veya mazotla birlikte kullanımının gerçekleştirildiği örnekler de bulunmaktadır.

Hidrojenin yanması sonucu elde edilen alev hızı oldukça yüksektir. Bu değer stokiyometrik karışımlar için benzin hava karışımlarındaki alev hızının yaklaşık dört katı düzeyindedir. Hidrojen ayrıca öteki mevcut motor yakıtlarından daha yüksek ısı değere sahiptir (alt ısı değeri 119.93 MJ/kg, üst ısı değeri 141.86 MJ/kg). Ancak volümetrik olarak ele alındığında, hidrojenin ısı değerinin öteki yakıtlardan çok daha düşük olduğu görülecektir. Bu durum, bazı çözümler sağlanmadığında motorun maksimum gücü açısından, eşdeğer özellikteki benzin motoruna göre bazı kısıtlamalar getirecektir.

Hidrojenin difüzyon katsayısı da öteki yakıtlardan daha fazladır. Ayrıca gaz halindeki hidrojen kağıt, kumaş, kauçuk gibi malzemelerden, platin, demir, çelik gibi bazı metallerden difüzyon yolu ile geçebilmektedir. Hidrojenin bu özelliği ise depolanmasına ilişkin bazı sorunlar oluşturmaktadır [13].

3.1.2. Karışım oluşturulması ve motor performansına etkisi

Hidrojen yakıtlı motorlarda yanma karakteristiklerini, emisyon miktarını ve dolayısı ile motor performansını etkileyen en önemli etken karışımın hazırlanış yöntemidir. Hidrojen ile hava karışımı, sırasıyla dahili ve harici olarak adlandırabileceğimiz yöntemlerle motorun yanma odası içerisinde veya motorun giriş manifoldunda hazırlanmaktadır. Her iki yöntemde de hidrojenin difüzyon hızının yüksek olması nedeni ile, yüksek motor devir sayılarında bile homojen bir karışım sağlamak olasıdır. Harici karışım hazırlama yönteminde, basit bir gaz karıştırıcı içerisinde, düşük basınçlarda, hidrojenin hava ile karıştırılması veya hidrojenin düşük basınçlarda motorun emme manifolduna sürekli veya aralıklı olarak gönderilmesi söz konusudur. Aralıklı olarak yakıt gönderilme durumunda, Diesel ilkesi ile çalışan motorlardaki

gibi yüke göre karışım ayarı yapılacaktır. Bu durumda karbüratördeki gaz keleşbeği ortadan kalkacağı için motorda kısılma kayıpları da kaldırılacak ve volümetrik verim, dolayısı ile motorun maksimum gücü artacaktır. Benzin motorlarından farklı olarak, karışım oranının böyle değiştirilmesine olanak sağlayan etken, hidrojen hava karışımlarının geniş tutuşma sınırlarına sahip bulunmasıdır. Harici karışım hazırlama yöntemlerinin sağladığı bazı avantajlar yanında getirdiğı önemli sorunlarda bulunmaktadır. Geri tutuşma ve erken tutuşma sorunları bu yöntemde ortaya çıkmaktadır. Geri tutuşma yanma odasına gönderilen karışımın emme tamamlanmadan çeşitli etkenlerle tutuşması sonucu motorun giriş manifoldunda alevin geriye doğru ilerlemesidir. Emme sistemindeki elemanların tahrip olmasına yol açabilecek ve emniyet açısından sakıncalı bu olayın önlenmesi gerekmektedir. Önlenmesi gereken diğer bir etken de erken tutuşmadır. Erken tutuşma yanma odası içerisine ulaşmış karışımın bujide ateşleme olmadan önce tutuşmasıdır. Hidrojenin tutuşma enerjisinin düşük olması nedeni ile;

- a) Yanma odasındaki sıcak noktalar,
- b) Supap bindirmesi sırasındaki sıcak egzoz gazları,
- c) Çok fakir karışımlarda yanma hızlarının düşük olması nedeni ile yanma süresinin artması sonucu yanan gazlarla yeni karışımın teması,
- d) Motor yağından gelen sıcak partiküller, yanmayı istenilenden önce başlatabilmektedir.

Bunun önlenmesi için yanma odası sıcaklığının düşürülmesi gerekecektir. Bu amaçla;

- a) Karışımın bir miktar fakirleştirilmesi,
- b) Egzoz gazları resirkülasyonu (EGR) uygulanması,
- c) Yanma odasına su püskürtülmesi,
- d) Supap bindirmesinin azaltılması,
- e) Giriş havasının sıvı hidrojen kullanımı sonucu soğutulması

gibi çeşitli yöntemler uygulanabilir. Ancak karışımın EGR uygulanması veya gönderilen hidrojenin azaltılması sonucu fakirleştirilmesi çevrimden çevrime olan farklılıkları arttıracak ve motorun düzgün çalışmasını engelleyecektir. Ayrıca EGR sonucu ortalama efektif basınç da düşecektir.

1920'lerden itibaren günümüze kadar, geri tutuşma ve erken tutuşma, hidrojen yakıtlı motorlarda çözülmesi gereken bir sorun olmuş ve bu nedenle çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu soruna çözüm sağlanması açısından dahili karışım hazırlama yöntemi uygulamaları oldukça etkili olmaktadır. Sıvı hidrojenin 10 Mpa gibi yüksek bir basınçta direkt olarak her silindire ayrı ayrı gönderilmesi yukarıda belirtilen sorunlardan bir kısmına çözüm getirecektir. Sıkıştırma zamanı sonuna doğru, supaplar kapandıktan sonra yakıtın püskürtülmeye başlanması nedeni ile karışımın geç hazırlanması ve emme manifoldunda yakıt hava karışımının bulunmaması erken tutuşma ve geri tutuşma sorunlarına çözüm getirecektir. Böylece burada Diesel ilkesine benzer bir şekilde, yük durumuna göre karışım oranının değiştirilmesi ve gaz keleşinin kullanılmaması sonucu kısılma kayıplarının kaldırılması, sonuç olarak da volümetrik verimin artırılması mümkün olacaktır.

Benzin motorlarında, stokiyometrik karışımlarda tam buharlaşmış yakıtın yanma odası içerisinde kapladığı hacim oranı %1.7 düzeyindedir. Buna karşılık gaz halindeki hidrojenin, stokiyometrik koşullarda kapladığı hacim oranı %30 olacağından, eşdeğer motordan alınacak maksimum güç miktarında, benzine oranla %15 dolayında bir düşüş görülecektir. Sıvı halindeki hidrojenin aynı koşullar altında, ancak emme supaplarının kapanmasından sonra yanma odasına direkt olarak püskürtülmesi sonucunda benzine oranla yaklaşık %20 dolayında, ön karışimli gaz hidrojen yakıtlı motorlara oranla da %40 düzeyinde güç artışı sağlanabilecektir. Yanma odasında iyi karışım sağlanabilmesi için basıncın yüksek değerlerde sabit tutularak, gönderilen yakıt miktarının ayarı için püskürtme süresinin değiştirilmesi gerekli olacaktır. Ancak bu tür sıvı hidrojen püskürtme pompalarının yağlama sorunları gibi hala araştırmaya açık noktaları bulunmaktadır [13,22].

3.1.3. Egzoz gazları emisyonu

Hidrojenin hava ile yanması sonucunda, yakıtta karbon bulunmaması nedeni ile yanma ürünleri arasında CO, CO₂ ve HC'ler mevcut olmayacak, sadece motorun yağlama yağının yanması nedeni ile çok az miktarda oluşan HC'ler egzoz gazları arasında bulunacaktır. Diğer yandan bu motorlarda, yüksek yanma sıcaklıkları nedeni ile havanın kimyasal reaksiyonu sonucu azot oksitler, NO_x, bol miktarda üretilmektedir. Üretilen azotoksitlerin büyük kısmını

oluşturan NO'ler egzoz sistemi içerisinde veya atmosfere çıktıktan sonra NO₂ 'ye dönüşmektedir [13,23].

NOx genelde hava fazlalık katsayısının ve karışımın yerel sıcaklığının bir fonksiyonu olarak üretilmektedir. Bu nedenle zengin ($\lambda < 0.9$) ve fakir ($\lambda > 1.7$) karışımlarda NOx emisyonu önemli ölçüde azalacaktır. Hidrojen yakıtlı motorların fakir karışımlarla çalışma özelliği bu konuda önemli yararlar sağlamaktadır.

Hidrojen yakıtlı motorlarda egzoz gazları içerisinde hava kirliliğini etkileyecek tek ürün olarak bulunan NOx'lerin miktarı, yanma odası sıcaklıklarının azaltılması, oksijen konsantrasyonunun azaltılması veya yanma süresinin kısaltılması sonucu düşürülebilmektedir. Bu amaçla;

- a) Egzoz gazları resirkülasyonu,
- b) Emme manifolduna su püskürtülmesi,
- c) Ateşleme zamanının geciktirilmesi,
- d) Hidrojenin direkt olarak yanma odasına püskürtülmesi

gibi yöntemler kullanılmaktadır. İnert egzoz gazlarının resirkülasyonu sonucu, özellikle fakir karışımlarda oksijen konsantrasyonu düşürüldüğü için etkin bir şekilde NOx azalmaktadır. Ancak bu durumda motorun gücü de bir miktar düşecektir. Motorun emme manifolduna su püskürtülmesi sonucunda karışım sıcaklığı düşmekte, yanma hızı azalmakta ve sonuç olarak NOx emisyonu da azalmaktadır. Her iki yöntem ayrıca geri tutuşma eğilimini de azaltmaktadır. Ateşleme zamanının geciktirilmesi motorun termik verimini bir miktar azaltmasına rağmen, maksimum sıcaklıkları düşürmekte ve dolayısı ile de NOx emisyonunu azaltmaktadır. Hidrojenin direkt olarak yanma odasına püskürtmesi de NOx emisyonunu azaltıcı yönde etki etmektedir. Bu durumda püskürtme zamanının etkileri de önem kazanmaktadır [13].

Hidrojen yakıtının yanma odası içerisine püskürtülmesi yönteminde, NOx emisyonlarının azaltılmasında etkili diğer bir etken de hidrojenin püskürtülme sıcaklığıdır. Egzoz gazlarındaki NOx, emisyonu hidrojenin yanma odasına soğuk olarak püskürtülmesi durumunda en iyi olmaktadır [21]. Ayrıca yanma odası şekli ve motorun sıkıştırma oranı da hava hareketlerinin oluşturulması ve ulaşılan sıcaklıklar açısından NOx emisyonu üzerinde etkili olmaktadır [13].

3.1.4. Hidrojen yakıtının taşıtlarda depolanma şekilleri

Hidrojen yakıtının taşıtlarda alternatif bir yakıt olarak kullanılmasında karşılaşılan en önemli sorunlardan birisi, hidrojenin depolanmasıdır. Hidrojenin taşıtlarda kullanımı, metal hidrit, sıvı hidrojen ve basınçlı gaz şeklindedir. Gaz hidrojenin birim kütle başına düşen ısı enerjisinin yüksek olmasına karşın; birim hacim başına düşen ısı enerjisi oldukça düşüktür. Hidrojenin taşıt motorunda gaz olarak kullanılması durumunda bu özelliği dolayısıyla taşıt içerisinde büyük hacimlere ihtiyaç olmakta, bu durum taşıtın faydalı kullanım alanını küçültmektedir. Her ne kadar yüksek basınçlı gaz olarak depolama şekli ile birim hacimde depolanabilecek hidrojen miktarı arttırabilmekteyse de bu basınçlı deponun kendi ağırlığının da sınırlı olması gereği nedeni ile, bir depo hidrojenle taşıtın alabileceği yol oldukça kısa olmaktadır. Hidrojenin bir taşıtta sıvı olarak depolanması durumunda, sıvılaştırma maliyeti artmakta ve hidrojenin depoda çok düşük sıcaklıklarda tutulması gerektiğinden taşıt şartlarında dış havadan olan ısı kazancı nedeni ile buharlaşma kayıpları söz konusu olmaktadır. Hidrojenin metal hidritler şeklinde depolanmasında da taşıtlarda büyük boyutlarda yer gerekmektedir [24].

a) Hidrojenin taşıtlarda metal hidrit şeklinde depolanması

Bu yöntemle depolamada prensip olarak gaz hidrojenin küçük moleküllere sahip oluşu ve yüksek difüzyon özelliğinden faydalanır. Bu özelliğe sahip olan gaz hidrojen katı metallerin kafes şeklindeki iç yapılarına nüfuz ederek kristal yapının çeşitli yerlerine bağlanır. Metal hidrit uygulamaları hidrojen gazının birtakım metal alaşımları üzerine gönderilmesi ve bu alaşımlarla egzotermik bir reaksiyona girerek tüketilmesi şeklindedir. Bu reaksiyon sonucunda hidrojenin hacmi hemen hemen sıfır olur. Eğer egzotermik reaksiyon sonucu açığa çıkan ısı enerjisi ile, aynı miktarda ısı enerjisi ortama verilirse, reaksiyon tersine çevrilerek hidrojen geri kazanılabilir. Reaksiyonu ters yönde oluşturacak ısı, soğutma suyu veya egzoz gazlarından sağlanabilir. Metal hidrit uygulamalarında metallerin seçiminde şu özellikler istenir; düşük ayrışma ısı, hızlı ayrışma, düşük ayrışma basıncı, hidrojen depolama miktarının fazlalığıdır. Sistem ağırlığının büyük olması metal hidrit depolama şeklinin araçlar için kullanılmasını sınırlamaktadır [22,24].

b) Hidrojenin taşıtlarda sıvı hidrojen şeklinde depolanması

Hidrojenin sıvı halde depolanması, düşük sıcaklıklarda gerçekleştiğinden kullanılacak yakıt tankının, ısı yalıtımının çok iyi yapılması gerekmektedir. Depo yalıtımının tam anlamı ile yapılmaması nedeni ile oluşan ısı transferi, depo basıncının artmasına neden olur. Basıncın artmasını önlemek için buharlaşan hidrojenin atmosfere atılması gerekir [26]. Hidrojenin minimum tutuşma enerjisinin düşük olması ve yüksek alev hızına sahip olması nedeni ile, kullanılan deponun herhangi bir kaza durumunda hasar görmesi emniyet açısından riskli olmasına rağmen, aynı zamanda hidrojenin yayılma kabiliyetinin yüksek olması nedeni ile, en ufak bir gaz kaçağında çok kısa bir süre içinde ortama yayılarak yanıcı olmayan bir karışım oluşturması, bu riskli durumu oldukça azaltmaktadır. Hidrojenin dışarı sızması durumunda herhangi bir kıvılcımla tutuşması halinde, zayıf bir karışım oluşturmasından dolayı zayıf bir alev meydana gelir. Hidrojenin kendi kendine tutuşma sıcaklığı yüksektir ve alev süresinin kısa olmasından dolayı ortaya çıkan radyasyon ısısı düşüktür ve bunun sonucunda alev sıcaklığı düşük olur. Bu sebeplerden dolayı hidrojenin güvenli bir yakıt olup olmadığı sonucuna varılmadan önce, bu konuda yapılan araştırmaların kesin sonuçlarının beklenmesi gerekmektedir. Fakat şimdiye kadar yapılan araştırmalarda herhangi bir ciddi olaya rastlanmamıştır.

c) Hidrojenin taşıtlarda basınçlı gaz şekilde depolanması

Bu yöntem en ekonomik çözüm şekli olmakla birlikte hidrojenin enerji yoğunluğunun oldukça düşük oluşu ve taşıt boyutlarına bağlı olarak basınçlı kapların belirli boyutlarda yapılma zorunluluğu nedeni ile depolanan hidrojen miktarı ağırlıksal olarak yetersiz kalmaktadır. Üstelik kullanılan basınçlı kapların emniyetli olmaları gereği nedeni ile kap içindeki hidrojenin az olmasına karşın boş ağırlığı da fazla olmaktadır. Bu durum küçük boyutlardaki taşıtlar için önemli sorunlar yaratmakta ve taşıtın bir depo yakıtla kat edebileceği mesafe kısalmaktadır [24].

3.2. LPG yakıtının içten yanmalı motorlarda kullanımı

Benzin motorlarında yakıt olarak sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) kullanımı genelde yakıt maliyetlerinin ve kirlletici egzoz gazlarının emisyonunun azaltılması amacıyla uygulanmaktadır. Ancak dönüşüm sisteminin başarısı, taşıtın mevcut performansını korumasına, sistemin bakım ayar sürelerinin mevcut durumdan daha uzun olmamasına ve bunların yanı sıra yakıt maliyeti açısından kullanıcıya avantaj sağlamasına bağlıdır. LPG fiyatlarının benzine göre daha düşük düzeyde olması, dönüşüm sisteminin getirdiği ek maliyetlere rağmen, genelde ekonomik yönden bir avantaj sağlamaktadır. Ancak, LPG üretimi kısıtlı olduğu için, tüketimin sınırlandırılması amacıyla bazı önlemlerin uygulanmasına gerek duyulmaktadır. Diğer taraftan bazı ülkelerde de (örneğin İtalya) LPG uygulayan taşıtlara ek vergi uygulamamakta, ancak LPG üzerindeki istihsal vergisi ile fiyat dengelenmesi yapılmaktadır. Her iki uygulamada da dönüşümün ekonomik yönden avantaj sağlayabilmesi taşıtın yılda yaklaşık 20.000 km kadar yol yapması ile mümkün olabilmektedir. Benzin motorlu taşıtlarda LPG kullanımının ekonomiklik dışında getireceği en önemli fayda, egzoz gazları emisyonunun genelde daha düşük seviyede kalmasıdır. LPG dönüşüm sisteminde kullanılan yaklaşıma bağlı olarak taşıtın sağlayacağı emisyon standartları da farklı olmaktadır. Ancak LPG yakıtlı taşıtlarda, mevcut teknolojik olanaklar ile EURO 93 emisyon sınırlarının altındaki değerlerin kolayca sağlanması mümkündür[27].

3.2.1. LPG yakıtının fiziksel ve kimyasal özellikleri

LPG, propan (C_3H_8) ve bütanın (C_4H_{10}) belirli oranlardaki karışımından oluşmaktadır. Propan ve bütanın farklı kaynama noktalarına sahip olması, diğer bir deyişle atmosfer basıncı altında gaz fazından sıvı fazına geçiş sıcaklıklarının farklı olması nedeniyle depolamada iklim koşullarına göre farklı karışım oranları uygulanmaktadır. Atmosfer basıncında, propan $-43\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta sıvı fazında bulunurken, bütan $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta sıvı fazında bulunmaktadır. Bu nedenle özellikle soğuk iklimlerde ve soğuk mevsimlerde karışım içindeki propan oranı artırılarak sıvı fazından gaz fazına geçiş kolaylaştırılmaktadır. Karışım oranındaki bu değişime bağlı olarak yakıtın özellikleri de değişim gösterir.

Tablo 3.2. Propan - bütanın fiziksel ve kimyasal özellikleri

		Propan	Bütan
Kimyasal denklemi		C_3H_8	C_4H_{10}
C/H oranı		0.375	0.40
Moleküler ağırlığı		44.08	59
Özgül ağırlığı	(kg/Litre, 15 °C)	0.508	0.584
Alt ısı değeri	(KJ/kg)	46500	45460
	(KJ/Litre)	23420	26550
Tutuşma noktası (°C)		470	365
Tutuşma sınırları hava/yakıt (hacimsel)		2.1-9.5	1.5-8.5
Buhar basıncı	(bar, 38 °C)	12.1	3.6
Kaynama Sıcaklığı (°C)		- 43	-0.5
Stokiyometrik oran		15.16	15.4
Karışımın alt ısı değeri (KJ/m ³)		3414	3446
Oktan sayısı	ROS	111	103
	MOS	97	89

LPG, benzin vb. sıvı yakıtlardan farklı olarak, emme zamanında tamamen buharlaştıktan sonra yanma odasına gaz fazında gönderilmektedir. Bu nedenle benzine oranla silindir içerisinde daha fazla hacim kaplamakta ancak sıvı yakıtlara oranla daha homojen bir karışım elde edilmektedir. Ayrıca LPG nin silindir dışında buharlaşması nedeniyle motor çevrimi yakıtın buharlaşma gizli ısısından etkilenmez.

LPG'nin birim kütle başına alt ısı değeri benzinden daha yüksektir (44000 kJ/kg'a karşın 46300 kJ/kg). Bu nedenle özgül yakıt tüketimi (g/kwh) bakımından LPG yakıtlı motorlar benzinli motorlara göre daha avantajlıdır. Ancak hacimsel açıdan karşılaştırıldığında, özgül kütlesi daha küçük olduğundan, LPG'nin avantajlı olmadığı görülmektedir. Teorik olarak hacimsel yakıt tüketimi LPG bünyesindeki propan/bütan oranına bağlı olarak benzine oranla

1.22 ile 1.38 kat daha fazladır. Ancak gaz yakıtların hava ile daha iyi karışma özelliği nedeniyle, daha homojen bir karışım sağladığından silindirler arası farklılıklar azalmakta motor performansı %10 mertebesinde iyileşmektedir. Bu nedenle gerçek hacimsel yakıt tüketimi oranları teorik olarak belirtilen oranların altında kalmaktadır.

Propan/Bütan 50/50 mertebesinde olan LPG'nin hava ile stokiyometrik karışımının alt ısı değeri 3430 kJ/m^3 'tür. Stokiyometrik karışım oranına sahip benzin hava karışımının alt ısı değeri ise 3482 kJ/m^3 'tür. Karışımın ısı değeri yönünden bakıldığında, LPG yakıt kullanımı sonucunda, benzine oranla motorda kayda değer bir güç azalması söz konusu değildir. Ancak, uygulamada gaz fazındaki yakıtın dolgu içinde kapladığı hacim nedeniyle LPG kullanımı sonucunda maksimum motor gücünde %5 mertebesinde bir azalma olduğu görülmektedir. Genelde motor parametrelerinin aynı performansı sağlayacak şekilde ayarlanması mümkün olup, sıvı LPG püskürtmeli ve elektrik kontrol sistemli motorda bu azalma önlenabilmektedir [27] .

LPG yakıtı sıvı olarak bulunduğu tanktan buharlaştırıcıya ulaştığında burada buhar fazına geçer ve karıştırıcıda hava ile karıştırılarak silindirlere gönderilir. LPG yakıtlı motorların emme manifoldu sıcaklığı düşük olduğu için daha yüksek verimle çalışırlar. Eğer emme manifoldu soğutuluyor ise bu durumda silindire giren LPG buharı daha yoğun olacağından motorun volümetrik veriminde artış olacaktır. Bu nedenle özel soğutma aparatları kullanarak LPG hava karışımının silindire daha soğuk olarak girmesi sağlanır. Manifold sıcaklığının, hava sıcaklığından her 5.5°C fazla olması durumunda motor gücünde %1 azalma olduğunu yapılan deneyler göstermiştir. Atmosfer sıcaklığıyla manifold sıcaklığı arasındaki fark 37°C olduğunda motor gücü %10 azalmaktadır. Yüksek manifold sıcaklıkları yanma odasında vurutuya sebebiyet vermekte, düşük manifold sıcaklıkları ilave ateşleme avansını gerektirdiği gibi yakıt ekonomisi ve motor performansını da iyileştirmektedir.

LPG yakıtının optimum gücü ve ekonomikliği elde etmek için, motorun uygun sıkıştırma oranına sahip olması gerekir. Benzinli motorlardaki sıkıştırma oranı 8.2:1 dolayındadır. Motorlarda kurşunsuz benzinle katalitik dönüştürücülerin kullanılması motor üreticilerini daha düşük sıkıştırma oranına sahip motor üretimine zorlamıştır. LPG'nin oktan sayısı benzine oranla daha yüksektir. LPG ile çalışan motorlar vuruntusuz olarak

10.5:1 sıkıştırma oranında çalışabilmektedir. Bazı LPG yakıtlı motor üreten firmalar, ürettikleri motorların sıkıştırma oranlarını daha da yükseltmişlerdir[28].

3.2.2. Motor performansı ve egzoz gazları emisyonuna etkisi

Uygulanan dönüşüm sisteminin yapısına bağlı olarak motor performansı ve kirletici egzoz gazları emisyonun miktarı değişim göstermektedir. Genelde amaç aynı motor gücünü korurken, yakıt tüketimi egzoz emisyonlarında azalma sağlamaktır. Birinci nesil sistemlerde (karbüratörlü sistemler) LPG dönüşümü sonucunda motor gücünde % 5 - 10 mertebesinde bir azalma olur. Ancak elektronik kontrol sistemlerinin ve LPG püskürtmenin kullanımı ile bu güç düşüşünün bir miktar telafi edilmesi mümkün olabilmektedir. Bu nedenle bu sistemlerde güç kaybı yoktur.

LPG dönüşümü sonucu genelde egzoz emisyonlarında azalma olmaktadır. Özellikle CO benzin motoruna oranla daha düşük değerlere inerken, HC ve NOx' deki azalma ise daha az olmaktadır. LPG'nin diğer bir avantajı da motorun fakir karışımla çalışmasına olanak tanımasıdır. Bu özelliğini kullanarak optimize edilmiş bir dönüşüm sistemi NOx emisyonu bakımından, katalizörsüz olarak, standartları sağlayabilmektedir. Fakir karışımın getirdiği güç azalmasını karşılayacak şekilde motor strok hacmi artırılıp sıkıştırma oranı da artırıldığında enerji bazında yakıt tüketimi düşerken emisyon değerleri de önemli ölçüde azalmaktadır. Ancak CO ve HC emisyonlarının standartları sağlayabilmesi için oksidasyon katalizörü kullanmak gerekir.

Elektronik kontrol sistemli ve LPG püskürtmeli sistemlerde elektronik kumanda modülünün yardımıyla emisyon değerleri çok düşük seviyelere indirilebilmektedir. Ancak orijinalinde benzin püskürtme sistemi ve katalitik reaktör bulunan taşıtlarda sağlanan fayda, oransal olarak, karbüratörlü taşıtlara göre daha az olmaktadır.

LPG yakıtlar içerisinde, benzine oktan sayısının arttırımı için eklenen kurşun tetraetil ile benzen vb. aromatik hidrokarbonlar da bulunmamaktadır. Bu da ayrıca kirletici emisyonların azalmasını sağlamaktadır [27].

3.2.3 LPG yakıtının taşıtlarda depolanması

LPG'nin en önemli özelliklerinden biri buhar basıncıdır. Buhar basıncına bağlı olarak yakıt deposundaki yakıtın sıvı ve buhar fazları arasında belli bir denge durumu sağlanmaktadır. Sıcaklıktaki artışla birlikte sıvı fazındaki propanın ve bütanın hacmi azalmakta ve basınç artmaktadır. Bu husus yakıt tankları açısından önemlidir. Benzin ve dizel yakıtının kaynama noktasının normal ortam sıcaklıklarının üzerinde olmasına karşın, LPG 0 °C'nin altında ki sıcaklıklarda da buharlaşmaktadır. Bu nedenle konvansiyonel yakıtlar taşıt üzerinde atmosfer basıncı altında sıvı fazında saklanabilirken, LPG'nin yakıt deposunda sıvı fazında saklanabilmesi için yüksek basınca gerek duyulmakta ve depolama işlemi 4-10 bar arasında değişen basınçlar altında yapılmaktadır[27]. LPG -42 °C de kaynamakta ve buharlaşmaktadır. Başka bir deyişle -43 derecenin altındaki sıcaklıklarda, LPG yakıt tankının iç basıncı sıfır olacaktır. Halbuki yakıtın tanktan dışarıya itilmesi olayı bu basınç sayesinde olmaktadır. Buradan hareketle; sıcaklığın -43 derecenin altına düştüğü iklim şartlarında LPG yakıt sisteminin çalışmayacağı aşikardır. Bir çok iklim kuşağında bu durum bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Bunun aksine havanın sıcak olduğu bölgelerde mesela 38-40 derecelik hava sıcaklıklarında yakıt tankının iç basıncı 1330 kPa'ın üzerine çıkmaktadır. Bir çok ülkede dıştan monte edilmiş olan LPG yakıt tankları 1750 kPa, içten monte edilmiş olanlar ise 2200 kPa basınçla rahatlıkla çalışacak şekilde ayarlanmışlardır. Tankların emniyet basınçları bu rakamların çok üzerinde olup fabrikalarda sıkı deneylerden geçirilmek suretiyle satışa sürülmüşlerdir Dolayısıyla bu tanklar emniyetlidirler ve rahatlıkla monte edilebilirler [29].

Sonuç olarak teknik açıdan bakıldığında, mevcut bir taşıtın LPG ile çalışacak şekle dönüştürülmesinin taşıt performansı, yakıt tüketimi vb. açılardan bir problem doğurmayacağını söylemek mümkündür (yakıt deposunun kaplayacağı hacim hariç tutulacak olursa). Emisyon açısından ise LPG uygulaması belli bir avantaja sahiptir. Sistemin emniyeti ile ilgili problemler de, gerekli standartlara uyulduğunda, kolayca çözülebilecek niteliktedir. Ancak bu standartlara uygun projelendirme, imalat ve uygulamanın emniyet açısından çok gerekli olduğu açıktır.

Taşıtlarda yaygın olarak LPG kullanımının asıl proplemi, kısıtlı olan LPG üretimine (veya) arzına denk tüketimi sağlayacak bir fiyat politikasının belirlenmesi ve uygulanmasıdır [27].

3.3. Alkol yakıtların içten yanmalı motorlarda kullanımı

Çeşitli alkoller saf veya benzine karıştırılmış olarak, içten yanmalı motorların tarihi boyunca, değişik zamanlarda yakıt olarak kullanılmıştır. İlk uygulama 1890 yılında gerçekleşmiştir. Günümüzde bir çok ülke alkolü alternatif yakıt olarak değerlendirmektedir. Alkollerin kullanımının temel gerekçesi; genellikle bazı ülkelerdeki petrol yetersizliği, alkolün yenilebilir enerji kaynaklarından elde edilebilir ve temiz bir yakıt olması şeklinde özetlenebilir.

Motorlu taşıtlarda alkol kullanımının yaygınlaşmasını engelleyen temel faktörler ise; Dünya petrol üretiminin henüz talebi karşılayamayacak düzeye inmemiş olmasının yanı sıra alkollerin birim kütesinin ısı değerinin düşük, dolayısıyla birim kütle başına maliyetinin benzine göre yüksek olmasıdır [30].

3.3.1. Metanol

3.3.1.1. Metanolün fiziksel ve kimyasal özellikleri

Metanol içerisinde metil alkol (CH_3OH) bulunan, odun, kömür gibi fosil yakıtların ısı altında damıtılmaları yolu ile, doğal gaza birtakım distilasyon işlemleri uygulanarak veya CO ve H_2 'nin katalitik ortamda sentezleri sonucunda elde edilir. Fakat doğal kaynaklarının yenilenebilir olmamasından dolayı metanolün alternatif bir yakıt olarak kullanılması kısa bir süre için söz konusu olacaktır. Ayrıca günümüzdeki metanol üretiminin enerji dengesi negatiftir. Yani metanolün üretimi için, yanması sonunda vereceği enerjiden fazla enerjiye gereksinim vardır[13,26,21,32].

Metanolün kaynama sıcaklığı 65.1°C , donma sıcaklığı -97.6°C 'dir ve su ile her oranda karışabilir. Metanol taşıtlarda çok küçük değişikliklerle kolaylıkla kullanılır. Yapılan ilk metanollü prototiplerde benzin motorları metanol yakabilecek şekilde değiştirilmekteydi. Daha sonraları metanol yakıtı kullanabilecek yeni motorlar tasarlandı. Prototipler üzerinde yapılan araştırmalara göre, metanol yakıtlı taşıtların, gelişmiş teknolojiye sahip benzinli taşıtlara göre %5-10 oranında daha fazla verime ve olağanüstü ivmeye sahip olduğu görüldü[13,33].

Metanol yakıtının yüksek oktan sayısı daha yüksek sıkıştırma oranlarının seçilebilmesine ve verimin yükselmesine olanak sağlamaktadır. Metanolün oktan sayısı ROS 110 ve MOS 87'dir. Oktan sayısının yüksek olması motor tipine bağlı olarak gücün 5-7.5 kw artmasını sağlar. Metanol oktan sayısı yüksek olduğundan, motorlarda sıkıştırma fazının ilk dönemlerinde, yani sıkıştırma basıncının düşük olduğu sırada silindire püskürtülebilmektedir.

Tablo 3.3. Metanolün fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal denklemi		CH ₃ OH
C/H oranı		0.25
Moleküler ağırlığı		32.04
Özgül ağırlığı (sıvı : kg /dm ³)		0.79
Isıl değeri	(Mj / kg)	20.1
	(Mj / litre)	15.9
Stokiyometrik karışım için	hava / yakıt (kütlesel)	6.44
	hava / yakıt (hacimsel)	7.14
	(kj / litre)	3.53
mol _{ürünler} / mol _{reaktantlar}		1.06
Buharlaşma ısısı (Mj / kg)		1.102
Tutuşma sınırları	% hacim	6 - 37
	λ	0.24 - 2.22
Laminer alev hızı (m / s)		0.52
Adyabatik alev sıcaklığı (°C)		1878
Kaynama noktası (°C)		65.1
Donma noktası (°C),		-97.6
Kendi kendine tutuşma sıcaklığı (°C)		470
Oktan sayısı	ROS	110
	MOS	87

Metanol yüksek oktan sayısına sahip olmasına karşın çok küçük setan sayısına sahiptir. Bu sebeple dizel motorlarında kullanımında birtakım problemler vardır. Metanol yakıtı düşük

setan sayısı, yüksek ateşleme sıcaklığı ve kendi kendine tutuşma direnci nedeni ile dizel motorlarında sıkıştırma strokunun sonuna doğru, silindir içerisinde sıkıştırılmış hava içerisine püskürtülmesi ile başlayacak yanmada, birtakım problemler yaratır. Yakıtın tutuşmasını geciktirir ve dizel motorunda vuruntuya sebep olur. Fakat kendi kendine tutuşma direnci, otto motorlarında sıkıştırma oranının artırılmasına olanak sağladığından metanol otto motorlarında rahatlıkla kullanılabilir. Bu sebepten dolayı dizel motorlarında ancak buji kullanılması durumunda veya dizel yakıtıyla karıştırılması durumunda kullanılabilir. Düşük setan sayısına sahip olan yakıtların dizel motorlarındaki yanmasını düzeltmek için birtakım çalışmalar yapılmaktadır. Tablo 3.4. 'de uygulanabilecek metotlar ve bu metotların avantaj ve dezavantajları gösterilmektedir[26,21,32,23].

Tablo 3.4. Metanolün dizel motorlarında kullanımı için geliştirilen metotlar.

METOD	AVANTAJLAR	DEZAVANTAJLAR
Kimyasal katkı maddeleri	Motorda değişikliğe gerek yok	Katkı maddelerinin pahalı olması ve gerekli miktarın çokluğu
Emülsiyon	Motorda çok az değişiklik gerektirir.	Yakıtın %50 sinin dizel olması nedeni ile iki ayrı yakıt tankı gerektiriyor
Metanol ve dizel enjektörlerinin ayrı kullanımı	Pilot enjeksiyon için az miktarda dizel yakıtı gereksinimi	Karmaşık kontrol sistemi ve iki ayrı enjeksiyon sistemi gereksinimi
Metanolün dizel yakıtla beraber kullanımı	İki ayrı enjektör kullanımından daha ucuz	Yakıtın %50 sinin dizel olması nedeni ile iki ayrı yakıt tankı gerektiriyor.
Yüzey ateşlemesi	Tek bir yakıt gerektirmesi	Sıcak yüzey eldesi için gerekli enerjinin büyük olması
Buji ateşlemesi	Tek bir yakıt gerektirmesi	Ateşleme sisteminin fiyatı

Metanolün belirli bir hacimdeki enerji yoğunluğu benzine göre daha düşük olduğundan benzin ile kat edilen bir mesafeyi kat etmek için daha fazla metanol kullanımına ihtiyaç vardır. 1.7 litre metanol 1 litre benzinin verdiği enerjiye eşit miktarda enerji vermektedir. Bu da yakıt tanklarının daha geniş ve ağır olması demektir. Böylece hem taşıtlardaki depoların büyütülmesi gerekecek ve yer kaybına neden olunacak, hemde taşıtta benzine göre daha fazla bir yükün taşınmasına neden olunacaktır. Ayrıca Standart yakıt pompalarının kullanılması durumunda dizel yakıtın verdiği enerjiye eşdeğer enerjiyi metanol yakıtından elde etmek için, daha fazla

miktarda metanol yakıtının püskürtülmesi gerekmektedir. Bu sebeple pompa ve enjektörden geçen yakıt miktarı önemlidir [26,21,23].

Metanolün ısı değeri petrole göre daha düşüktür, buharlaşma ısısı yüksektir. Buharlaşma ısısının yüksek oluşu motorda soğukta ilk hareketi zorlaştırmaktadır. Metanolün buharlaşmasına yardım etmek amacı ile su ile ısıtılan emme manifoldu, 10 °C den düşük sıcaklıklarda ilk harekete yardımcı yakıt sistemleri kullanılmaktadır[32].

Metanolün kullanımında karşılaşılan diğer bir problem aşırı derecede korozyona neden olmasıdır. Bu sebeple kullanılabilmesi için özel yakıt püskürtme pompalarına, yakıt depolarına, yakıt sistemlerine ve yakıt istasyonlarında özel depolama tanklarına ihtiyaç vardır. Silindir duvarlarındaki yağın etkisini tamamen ortadan kaldırıcı eğilimi olduğundan özel yağlama yağları kullanılması gerekir. Korozyonu önlemek için yakıt ve emme sistemi, koruyucu maddelerle kaplanmaktadır. Metanolün korozif özellikleri benzinden farklı olduğu için, benzinden farklı olarak alüminyum ve çinko karbüratör kullanılır. Yakıt tankı çinko alaşımı ile kaplanmaktadır. Ayrıca paslanmaz çelik kullanılan depolarda iyi sonuç vermektedir. Metanolün benzine göre daha fazla nem tutuculuk özelliği vardır. Ve diğer yakıtların bir yerden bir yere nakledilmesi gibi taşınırsa bu durum nedeni ile kolaylıkla nemlenebilir. Nem de korozyonu hızlandırır. Bu sebeple gelecekteki metanol taşıyıcı ekipmanları su geçirmez olacaklardır. Ayrıca metanolün nem tutuculuk özelliğinin yüksek olması ve kolaylıkla nemlenmesi, metanol benzin karışımı olan yakıtlarda faz ayrışmasına neden olabilir. İçerisinde su bulunmayan alkol ve benzini karıştırmak mümkün olmasına rağmen az miktarda su ihtiva eden karışımlarda bu mümkün olmamakta ve faz ayrışması oluşmaktadır Metanolün diğer olumsuz yönleri zehirli ve gözü tahriş eder bir nitelikte olmasıdır. Ancak zararlı seviyeye ulaşacak birikme çok nadir şartlarda olabilmekte buda kolayca dağıtılabilmektedir[26,32,35].

3.3.1.2. Karışım oluşturulması ve yanma performansı

Metanol yakıtının içten yanmalı motorlarda kullanılması durumunda hava yakıt karışımının hazırlanması için mevcut taşıtlarda kullanılan karbüratör ve yakıt püskürtme sistemleri kullanılabilir. Gerek karbüratör gerekse püskürtme sisteminin kullanılması durumunda metanolün fiziksel ve kimyasal özellikleri dikkate alınarak karbüratör ve püskürtme sistemlerinde gerekli değişiklikler yapılır. Ayrıca metanol karbüratöre ve emme subabına gerek

duyulmadan silindire doğrudan püskürtülebilir. Metanol, oktan sayısı yüksek olduğundan, sıkıştırma fazının ilk dönemlerinde, yani sıkıştırma basıncının düşük olduğu zamanlarda bile püskürtülebilmektedir. Bu da basit ve ucuz bir yakıt sistemi ve aynı zamanda değişik yüklerde motorun verimli olarak çalıştırılabilmesi için, püskürtme zamanının ayarlanabilmesi demektir[23].

Metanolün yanma sıcaklığının düşük olması, silindirden kaçan ısının azalmasına dolayısıyla verimin artmasına sebep olur. Düşük sıcaklıkta oluşan yanma reaksiyonu, soğutma sistemlerinde basitleştirmeye gidilmesini sağlar. Seramik gibi termal bariyerlerin silindirlerde kullanılması gerçekleşirse, radyatör ve vantilatör kullanılmayabilir[23].

Kendi kendine ateşleme dirençlerinden dolayı metanol Otto motorlarda rahatlıkla kullanılabilir. Bu özelliği bu yakıtın dizel motorlarında kullanılmasını güçleştirmektedir. Metanol yakıtı dizel motorlarında yüksek enerji bujileri ile beraber kullanılmalıdır. Yanma enjeksiyon zamanlamasına bağlıdır. Enjeksiyon zamanlamasının iyi olmaması karışımın erken yanmasına neden olabilir.

Metanol benzine göre daha düşük buharlaşma basıncına ve daha yüksek buharlaşma ısısına sahiptir. Ve buji ateşlemesi olmadan çalışması güçtür. Özellikle kışın çalışma güçlükleri göstermektedir. Bu sebepten ötürü %15 benzin ile %85 metanol karışımları kullanmak daha caziptir. Çoğu otomobil üreticileri çalışmalarını %85 metanol %15 benzin karışımı olan M85 yakıtı yakabilecek motorlar üzerinde sürdürmektedirler. Metanole benzin karıştırılması ile soğuk havalarda yalnız metanol yakıtı kullanımı durumunda meydana gelebilecek çalışmama durumu ortadan kaldırılmış olur. Benzin, buharlaşması az olan saf metanolün uçuculuğunu arttırarak, motorun soğuk havalarda çalışmasını kolaylaştırır. İyi bir yanma için zengin yakıt-hava karışımı temin eder [21,23].

Ayrıca saf metanol, alevsiz, görünmez şekilde yanar ve yanması gün ışığında belli olmaz. Benzin, alev reklendirici rolü oynayarak, alevin görülmesini temin eder. Bu bir kaza veya yangın sırasında önemlidir. Metanolün benzinle karıştırılması ile metanolün yüksek oktan sayısında bir azalma olmamaktadır [21,23].

3.3.1.3. Egzoz gazları emisyonu

Metanol gazının yanması sonucu oluşan, bazı egzoz gazları emisyonları benzinle aynı olmaktadır. Metanolün yanması sonucu CO, CO₂, ve NO_x gazları oluşmaktadır. Ayrıca metanolün benzine göre daha düşük alev sıcaklığının olması, yanmanın iyileşmesini yanma ürünleri içindeki NO_x ve CO nun azalmasını sağlamaktadır. Sera etkisini önemli ölçüde etkileyen CO₂ emisyonlarında %7-15 azalma olmaktadır. Doğal gazdan üretilen metanol yandığında, benzine göre %10 daha az CO₂ emisyonu verir. Kömürden üretildiğinde ise bu değer benzinin yaklaşık iki misli olur. Geniş kömür yataklarının varlığına rağmen kömürden metanol elde etme fikri anlamsız gözükmemektedir. Zira proses sırasında ortaya çıkan CO₂ emisyonu egzoz gazlarından oluşan emisyonlardan çok daha fazla olacaktır. Metanol benzinin aksine yanmamış HC üretmez.

Metanolün motorda yanması tam olarak gerçekleşmekte parçacık oluşmamaktadır. NO_x motor silindiri içinde yüksek sıcaklık ve basınç altında, havadaki azot ve oksijenin birleşmesiyle oluşur. Metanolün yanmasıyla oluşan ısı azdır; dolayısıyla çok fazla miktarda NO_x meydana gelmesi için gerekli koşul oluşmaz.

Diğer taraftan metanol yandığında benzine göre iki kat daha fazla formaldehit üretilir. Bu madde daha önceleri biyolojik maddeleri korumak ve saklamak için kullanılıyordu; ancak kanserojen madde olduğu anlaşıldı. Bazı araştırmacılar, formaldehit emisyonu olayını metanolün kullanılmasını yagınlaşmasına engel olacağını söylerken, bazıları da bunların kontrol altına alınarak azaltılabileceğini iddia ediyorlar. Araştırmacılar formaldehit emisyonunun motorun çalışmaya başlaması ile ilk iki dakika içerisinde oluştuğunu ve katalitik konvertörle azaltılabileceğini belirtmektedirler. Fakat katalitik konvertörlerin ısıtılması gereklidir. Isıtma işlemi aküden alınacak elektrik enerjisi ile mümkün olabilir [32,23].

3.3.2. Etanol

3.3.2.1. Etanolün fiziksel ve kimyasal özellikleri

Etanol içerisinde etil alkol (C_2H_5OH) bulunan, şeker, şekerle çevrilebilen selüloz veya nişasta gibi maddelerin fermentasyonu sonucu elde edilen alkol türüdür. Etanol patates, tahıllar, şeker kamışı ve şeker pancarı gibi tarım ürünlerinden elde edilir.

Etanolün içten yanmalı motorlarda kullanımı düşüncesi tarım ürünlerinin bolca yetiştirildiği ülkeler için geçerlidir. Bu sebeple etanol yakıtının alternatif bir yakıt olarak içten yanmalı motorlarda kullanılması dünya çapında sınırlı kalacaktır. Ayrıca günümüzdeki etanol üretimindeki enerji dengesi negatiftir. Yani etanolün üretimi için yanması sonunda vereceği enerjiden fazla enerjiye gereksinim vardır.

Etanol kaynama sıcaklığı $78.7^{\circ}C$, donma sıcaklığı $-117.1^{\circ}C$, yoğunluğu 0.79 kg/dm^3 , ısı değeri 26.9 MJ/kg olan temiz, renksiz ve zehirli olmayan bir sıvıdır. Etanolün ısı değeri benzinden daha düşüktür. Etanol su ile her oranda karışabilme özelliğine sahiptir [13,37].

Etanol yakıtının yüksek oktan sayısı daha yüksek sıkıştırma oranlarının seçilebilmesine ve verimin yükselmesine olanak sağlamaktadır. Etanolün oktan sayısı ROS 106, MOS 89'dır.

Etanolün yüksek oktan sayısına sahip olmasına karşın çok düşük setan sayısına sahip olması ve kendi kendine tutuşma direnci nedeni ile, dizel motorlarında kullanımında birtakım problemler vardır. Fakat kendi kendine tutuşma direnci, otto motorlarında sıkıştırma oranının artırılmasına olanak sağladığından etanolün otto motorlarında kullanımı daha avantajlıdır. Bu sebepten dolayı etanol, dizel motorlarında ancak buji kullanılması durumunda veya dizel yakıtla karıştırılması durumunda kullanılabilir.

Etanolün enerji yoğunluğu metanolden fazla, benzinden düşüktür. Etanolün enerji yoğunluğu benzinden daha düşük olduğu için benzinle katedilen bir mesafeyi katetmek için daha fazla etanol kullanımına ihtiyaç vardır. Bu da yakıt tanklarının daha geniş ve ağır olması demektir.

Tablo 3.5. Etanolün fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal denklemi		C_2H_5OH
C/H oranı		0.333
Moleküler ağırlığı		46.07
Özgül ağırlığı	sıvı : kg / dm^3	0.79
Isıl değeri	(Mj / kg)	26.9
	(Mj / litre)	21.3
Stokiyometrik karışım için	hava / yakıt (kütlesel)	8.96
	hava / yakıt (hacimsel)	14.3
	(kj / litre)	3.61
mol _{ürünler} / mol _{reaktantlar}		1.06
Buharlaşma ısısı (Mj / kg)		0.856
Tutuşma sınırları	% hacim	3.5 - 19
	λ	0.24 - 1.92
Adyabatik alev sıcaklığı ($^{\circ}C$)		1924
Kaynama noktası ($^{\circ}C$)		78.7
Donma noktası ($^{\circ}C$)		-117.1
Kendi kendine tutuşma sıcaklığı ($^{\circ}C$)		392
Oktan sayısı	ROS	106
	MOS	89

Düşük setan sayısına sahip olan yakıtların dizel motorlarındaki yanmasını düzeltmek için birtakım çalışmalar yapılmaktadır. Tablo 3.6. 'da uygulanabilecek metotlar ve bu metotların avantaj ve dezavantajları gösterilmektedir[32,33].

Etanolün ısı değeri petrole göre daha düşüktür, buharlaşma ısısı yüksek ,buhar basıncı düşüktür. Buharlaşma ısısının yüksek oluşu motorlarda soğukta ilk hareketi zorlaştırmaktadır. Etanolün en önemli dezavantajlarından biri içinde bulunan suyun yakıt donanımı ve emme

sistemi üzerindeki korozif etkisidir. Etanolün korozif özellikleri nedeni ile korozyonu önlemek için yakıt ve emme sistemi, koruyucu maddelerle kaplanmaktadır. Ayrıca etanolün nem tutuculuk özelliğinin yüksek olması ve kolaylıkla nemlenmesi etanol benzin karışımı olan yakıtlarda faz ayrışmasına neden olabilir. İçerisinde su bulunmayan alkol ve benzini karıştırmak mümkün olmasına rağmen az miktarda su ihtiva eden karışımlarda bu mümkün olmamakta ve faz ayrışması oluşmaktadır[32,35,37].

Tablo 3.6. Etanolün dizel motorlarında kullanımı için geliştirilen metotlar.

METOD	AVANTAJLAR	DEZAVANTAJLAR
Kimyasal katkı maddeleri	Motorda değişikliğe gerek yok	Katkı maddelerinin pahalı olması ve gerekli miktarın çokluğu
Emülsiyon	Motorda çok az değişiklik gerektirir.	Yakıtın %50 sinin dizel olması nedeni ile iki ayrı yakıt tankı gerektiriyor
Etonol ve dizel enjektörlerinin ayrı kullanımı	Pilot enjeksiyon için az miktarda dizel yakıtı gereksinimi	Karmaşık kontrol sistemi ve iki ayrı enjeksiyon sistemi gereksinimi
Etanolün dizel yakıtla beraber kullanımı	İki ayrı enjektör kullanımından daha ucuz	Yakıtın %50 sinin dizel olması nedeni ile iki ayrı yakıt tankı gerektiriyor.
Yüzey ateşlemesi	Tek bir yakıt gerektirmesi	Sıcak yüzey eldesi için gerekli enerjinin büyük olması
Buji ateşlemesi	Tek bir yakıt gerektirmesi	Ateşleme sisteminin fiyatı

Etanolün içten yanmalı motorlarda kullanımı düşüncesi daha çok geniş tarım alanlarına sahip ülkelerde yaygındır. ABD’de tarımla uğraşan eyaletlerde, %80 etanol %20 benzin karışımı olan E80 yakıtı, yıllardan beri otomobillerde yakıt olarak kullanılmaktadır. Petrol rezervlerinin hemen hemen olmadığı fakat özellikle şeker kamışının bol bulunduğu Brezilya’da otomobiller 10 yıldan fazla bir süredir etanolle çalışmaktadır, Brezilya hükümeti kendi ürettiği petrolü tekelleştirdi ve şeker kamışından etanol üretmeye başladı. Hükümet etanolü benzinden %75 daha ucuz fiyata sattı. Brezilya’da 1987 yılında 387000 adet etanol yakıtlı taşıt satılırken satılan benzin yakıtlı taşıtların sayısı 23000 adettir. Dünya bankasının raporuna göre, Brezilya hükümetinin sübvans ettiği etanol yıllık 2.7 milyar dolarlık bütçe açığı oluşturdu. fakat bu bütçe açığına rağmen etanolün yaygınlaştırılması çalışmalarına devam edilmektedir. Etanolün

işlenmesi benzinden iki kat, metanolden 2-3 kat pahalı olması nedeni ile alternatif bir yakıt olarak küçük bir pazar oluşturacağı sanılmaktadır[38,39].

3.3.2.2. Yanma performansı

Etanolun buharlaşma ısısının yüksek oluşu soğukta çalışmayı güçleştirmektedir. Kendi kendine ateşleme direncinden dolayı etanol otto çevrimli motorlarla rahatlıkla kullanılabilir, bu özelliği bu yakıtın dizel motorlarında kullanılmasını güçleştirmektedir. Etanol yakıtı metanol yakıtı gibi dizel motorlarında yüksek enerji bujileri ile beraber kullanılmalıdır. Yanma enjeksiyon zamanlamasına bağlıdır. enjeksiyon zamanlamasının iyi olmaması karışımın erken yanmasına neden olabilir[39].

3.3.2.3. Egzoz gazları emisyonu

Etanolün benzine göre daha düşük alev sıcaklığının olması, yanma işleminin iyileşmesini, yanma ürünleri içindeki azot oksitlerin NO_x ve CO 'nın azalmasını sağlamaktadır[32,47].

BÖLÜM 4. DOĞAL GAZ KULLANIM ORANININ TESPİTİ VE MALİYET ANALİZİ

İstanbul Büyükşehir Belediyesinin İ.E.T.T' ye ait 100 adet ikarus otobüsü çift yakıtlı (doğal gaz + dizel) sisteme Hollanda firması DELTEC'in geliştirdiği sistem ile dönüştürülmüştür. DELTEC çift yakıt (Doğal gaz +Dizel) sisteminde doğal gaz kullanımı 950 dev/dak' dan sonra devreye girer. Doğal gaz kullanım oranı yük ve devir sayısına bağlı olarak değişim gösterir. İstanbul gibi, insan nüfusunun fazla ve trafik yoğunluğunun çok olduğu bölgelerde toplu taşıma araçları sürekli farklı yük ve devirlerde seyretmektedir.

Bu nedenle DELTEC çift yakıt sistemine dönüştürülmüş toplu taşıma araçlarının doğal gaz kullanım oranları hakkında genel bir tahmin yapmak zordur. Dolayısıyla dönüşüm sisteminin sağlamış olduğu yakıt ekonomisini ve egzoz emisyonlarında sağlamış olduğu iyileşmeleri tespit etmek mümkün olamamaktadır.

Bu nedenlerden dolayı DELTEC çift yakıt sistemine dönüştürülmüş motorlu taşıtların sağladığı yakıt ekonomisini tespit etmek için bir arşiv çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada İ.E.T.T. Genel Müdürlüğüne ait 99 adet, DELTEC çift yakıt sistemine dönüştürülmüş IKARUS otobüsün dört ayrı döneme ait yaptıkları seyir mesafeleri ve bu dönemlere ait yapılan toplam doğal gaz+mazot tüketimleri Tablo 4.1. de çıkarılmıştır. Ayrıca bu çalışmada 48 adet 94 model IKARUS otobüsün aynı dönemlere ait dizel yakıt tüketimleri Tablo 4.2. de çıkarılmıştır.

Bu verilere göre çift yakıtlı sisteme dönüştürülmüş otobüslerin İstanbul trafiğindeki doğal gaz kullanım oranı ve bu otobüslerin bir yılda sağladığı yakıt ekonomisi tespit edilmiştir. Ayrıca deltec dönüşüm projesinin 100 araç için, yapılan yakıt tasarrufuyla, geri ödeme süresi tespit edilmiştir.

Tablo 4.1. 99 adet çift yakıt sistemli otobüslerin yakıt tüketimleri

DÖNEM	TOPLAM SEYİR (km/ay)	TOPLAM. MAZ. TÜK. (Litre/ay)	TOPLAM GAZ TÜK. (m ³ /ay)	MAZOT TÜK. (litre/km)	GAZ TÜK. (m ³ /km)	YAKIT MALİYETİ (TL/km)
MART 96	498.698	187.089	61.377,730	0,3751	0,1230	57.042,58
NİSAN 96	471.021	156.808	78.655,600	0,3329	0,1669	53.930,595
MAYIS 96	474.039	147.986	93.789,540	0,3121	0,1978	53.226,98
HAZİRAN 96	430.993	125.354	93.628,140	0,2908	0,2172	51.198,34

Tablo 4.2. 48 adet İkarus otobüslerin yakıt tüketimleri

DÖNEM	TOPLAM SEYİR (km/ay)	TOPLAM MAZOT TÜK. (Litre/ay)	MAZOT TÜKETİMİ (litre/km)	YAKIT MALİYETİ (TL/km)
MART 96	397.720	194.172	0,4882	65.077,06
NİSAN 96	374.240	182.831	0,4885	65.117,05
MAYIS 96	378.111	181.997	0,4813	64.157,29
HAZİRAN 96	359.750	170.382	0,4736	63.130,88

4.1. Doğal gazın kütlesele kullanım oranı:

Doğal gazın kütlesele kullanım oranı şöyle bir bağıntıyla hesaplanabilir

$$\%D.K.O = [(v_g * \rho_g) / [(v_d * \rho_d) + (v_g * \rho_g)]] * 100 \quad (4.1)$$

Burada;

v_g = Aylara göre toplam gaz tüketiminin ortalaması [m^3/ay]
 v_d = Aylara göre toplam dizel tüketiminin ortalaması [litre/ay]
 ρ_g = Doğal gazın özgül ağırlığı [kg/m^3]
 ρ_d = Dizel yakıtının özgül ağırlığı [$kg/litre$]

dır. Buna göre yukarıda verilen yakıt tüketim verilerine göre;

$$\%D.K.O. = [(81.862,75 * 0,780) / [(154.309,25 * 0,830) + (81.862,75 * 0,780)]] * 100$$

$$\%D.K.O. = 33,269$$

olarak bulunur.

4.2. Doğal gaz kullanımının sağladığı yakıt tasarrufu:

Çift yakıtlı otobüslerin ortalama yakıt sarfiyat = 53.849,624 TL / km
 Solo otobüslerin ortalama yakıt sarfiyatı = 64.370,54 TL / km

Çift yakıtlı otobüsün km başına sağladığı yakıt ekonomisi;

$$= 64.370,54 - 53.849,624 = 10.520,916 \text{ TL/km dır.}$$

Bir otobüsün günde 250 km yaptığını kabul edecek olursak bir yılda yapmış olduğu yakıt ekonomisi;

$$= 365 * 250 * 10.520,916 = 960.036.322,5 \text{ TL/yıl dır.}$$

100 otobüsün bir yılda yapmış olduğu yakıt ekonomisi;

$$= 100 * 960.036.322,5 = 96.003.632.250 \text{ TL /yıl}$$

olarak bulunur.

4.3. Deltec dönüşüm sisteminin geri ödeme süresi

Deltec dönüşüm sisteminin 100 araçta uygulanabilmesi için gerekli olan ilk yatırımlar ve maliyetleri aşağıda belirtilmiştir[41].

- Kompresör yatırımı:

2 adet sulzer doğal gaz kompresörü , dolum istasyonu, dolum pompaları:.....450.000£

- İnşaat ve tesisat yatırımı:

Kompresör temel inşaatı, kanallar inşaatı, 30 adet yavaş + 1 adet hızlı dolum pompası otobüs park yeri inşaatı, kumanda odası inşaatı ve malzemeleri.....90.500£

- Otobüs dönüşüm kitlerinin yatırımı:

100 adet dönüşüm kiti.....465.000£

- Doğal gaz depolama tüplerinin yatırımı:

Her otobüse 40 m3'lük 5adet tüp olmak üzere 100 otobüs için 500 adet tüp.....325.000£

Sistemin toplam yatırımı : $1.330.500£ = 1.330.500 £ * 515.000 \text{ TL/£} = 685.207.500.000 \text{ TL}$

Projenin geri ödeme süresi : $685.207.500.000 / 96.003.632.250 = 7,137 \text{ yıl}$

olarak bulunur.

Hesaplamalarda Aralık 1997 tarih itibariyle;

Bir İngiliz Sterlini = 515.000 TL/£

Mazot ücreti = 133.300 TL/litre

Doğal gaz ücreti = 57.250 TL/m³

olarak alınmıştır.

Deltec dönüşüm sistemini kullanan araçlarda %60 doğal gaz kullanımı beklenirken İ.E.T.T'nin 100 adet otobüsünde bu oran %33 civarlarında değişmektedir. Bu kullanım oranına göre projenin geri ödeme süresi yaklaşık 7 yıl olmaktadır. Çift yakıtlı şehir içi otobüslerinde, kullanılacak gaz oranının artmasını sağlamak amacıyla, kısmî yüklerde çalışma oranının daha düşük olacağı hatların seçilmesi özellikle şarttır.

Kullanım açısından dikkat edilmesi gereken diğer bir hususta, işletme sırasında %100 dizel çalışmasına geçme durumudur. Doğal gaz kullanımında, tam yükteki egzoz gazı sıcaklıkları dizeldekinden daha düşük olmaktadır. Dönüştürülen motorda püskürtme zamanı geciktirilerek egzoz gazlarındaki NOx emisyonları seviyesi azaltılmaktadır. Ancak dönüştürülen motorun %100 dizel yakıtı ile çalışmasında egzoz sıcaklıkları aşırı artmaktadır. Bu durumun motor elemanlarına zarar vermemesi için bu şartlarda çalışmayı kısa kesmek ve tam yüke çıkmamak gerekir.

BÖLÜM 5. BİLGİSAYAR PROGRAMI

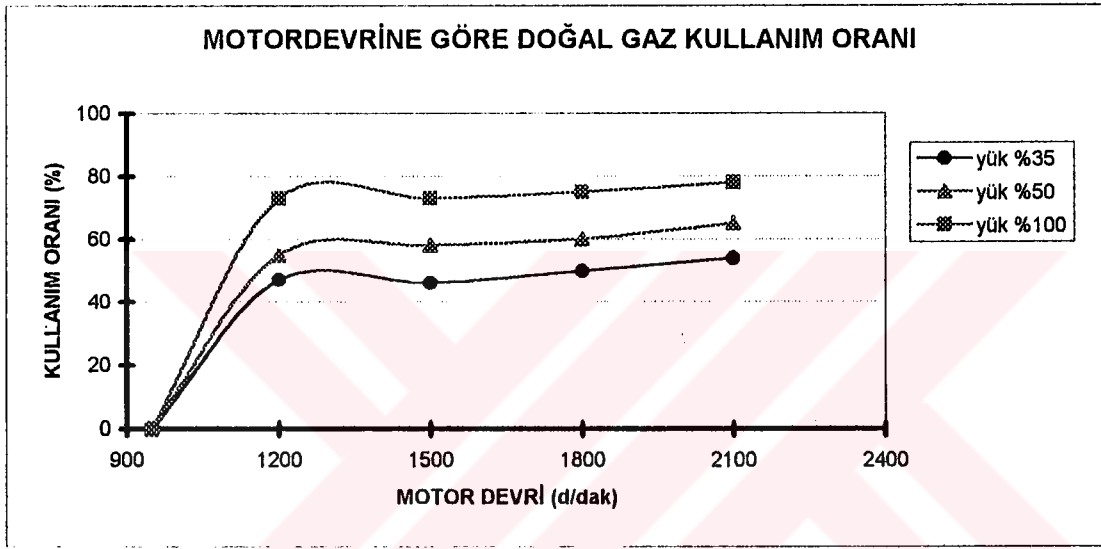
5.1. Genel bilgiler

Bu bölümde çift yakıt (doğal gaz + dizel) ile çalışan bir motorun doğal gaz kullanım oranına bağlı olarak yanma ürünlerinin hacimsel kesirlerinin değişimini hesaplayan bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Program BASIC programlama dilinde hazırlanmıştır. Programda kullanılan datalar İ.T.Ü. Makine Fakültesi Otomotiv Anabilim Dalı Motorlar ve Taşıtlar Laboratuvar' nda üzerinde deneysel çalışmalar yapılan ve DELTEC dönüşüm kiti ile çift yakıtlı sisteme dönüştürülen RABA MAN 2156 HM6UT marka motora aittir.

Deltec dönüşüm sisteminin ana karakteristiği, bir dizel motorunun çift yakıt (dizel + doğal gaz) kullanabilecek şekilde dönüşümünü sağlamasıdır. Doğal gaz ile hava belirli oranlarda bir gaz karıştırıcısında karıştırılarak yanma odasına gönderilmekte ve bu karışım az bir miktar dizel yakıtı (pilot yakıt) ile tutuşturulmaktadır. Bir dizel pilot enjeksiyon sistemi, motorun kendisinde herhangi bir değişiklik yapılmadan motora monte edilmektedir. Dönüşümü yapılmış motorda tam yükte kullanılan dizel yakıt miktarı, dizel motorunda kullanılan miktarın %5'ine kadar düşmektedir. Çift yakıta dönüştürülmüş motorun güç çıkışı, gaz miktarı ayarlanarak kontrol edilmektedir. Motor bir dizel motoru olarak çalıştırılır, motor devri ve motor yükünün değişimine bağlı olarak doğal gaz kullanmaya başlar. %100 dizel yakıt kullanımına dönmek daima mümkündür.

Doğal gazın fiziksel özelliklerine uygun olarak, mazotun yerine yaklaşık %80 doğal gaz kullanılabilir. Mazot yerine kullanılacak doğal gaz miktarı motorun yüküne göre değişmektedir. Sistemin özelliği olarak, doğal gazla çalışmaya geçiş ancak 950 dev/dak' dan sonra olmakta ve relantide %100 mazot kullanılırken tam yükte yaklaşık %20 mazot kullanılmaktadır. Sistem ayrıca, motor devir sayısı 2100 d/dak' ya ulaşıncaya doğal gaz kullanım oranını otomatik olarak kesmektedir. Deneysel çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada motor imalatçı firmanın verileri doğrultusunda, püskürtme başlangıç açısı Ü.Ö.N.' dan 28° KMA önce ve tam püskürtme miktarı 110 mm³/ strok/ silindir olacak şekilde ayarlanıp %100 dizel yakıtı ile çalıştırılmıştır. İkinci aşamada ise motor dizel + doğal gaz çift yakıtı ile

çalıştırılmıştır. Bu çalışma şeklinde püskürtme başlangıç açısı Ü.Ö.N.'dan 20° KMA önceye alınmıştır. Püskürtme pompası kremayer kolunun hareketi ise Maksimum püskürtme miktarı $25 \text{ mm}^3/\text{strok/silindir}$ olacak şekilde sınırlandırılmıştır. İkinci aşamadaki deney şartlarında ölçülmüş doğal gaz kullanım oranının motor yüküne ve motor devrine bağlı olarak değişimi şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Doğal gaz kullanım oranının motor yükü ve motor devrine bağlı olarak değişimi

5.2. Bilgisayar programına ait özellikler

Program hazırlanırken doğal gaz kullanım oranı 35,50,100 motor yüklerindeki 1200, 1500, 1800, 2100 devir sayılarına karşılık gelen 12 noktadan ölçülmüş olan doğal gaz kullanım oranları bilgisayara girilmiştir. Bu değerlere bağlı olarak istenilen herhangi bir yük ve devir sayısındaki doğal gaz kullanım oranını tespit edilmesini sağlayacak interpolasyon işlemleri yapılmıştır. Deltec dönüşüm kitinin özelliğinden dolayı program motor yükünün sıfır olduğu ve motor devrinin 950 d/dak küçük, 2100 d/dak büyük olduğu değerlerde doğal gaz kullanım oranını sıfır kabul etmektedir.

Kullanılan doğal gaz kullanım oranına bağlı olarak oluşan karma yakıtın kapalı formülü sıvı ve gaz yakıtın mol oranlarına bağlı olarak tespit edilmekte ve kapalı formüle bağlı olarak dördüncü bölümde izahı yapıldığı üzere yanma ürünleri zengin karışımlarda su gazı dengesine göre, fakir karışımlarda ise ısı ayrışma reaksiyon denklemlerine göre hesaplanmaktadır.

Yukarıdaki açıklamalara göre program şu şekilde düzenlenmiştir.

- Atmosfer basıncı, atmosfer sıcaklığı, bağıl nem, doyma basıncı elementlerin mol ağırlığı ve deneysel olarak ölçülmüş olan doğal gaz kullanım oranları programa girilmiş olup sabittir. Bu değerler Tablo 5.1 ve Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.1. Programa girilmiş olan sabit değerler [25]

Simge	Mi	Simge	
C	12.001	P_{atm}	101.325 kpa
H	1.008	T_{atm}	293 K
O	15.999	φ	0.60
N	14.008	P_{doyma}	2.339 kpa
S	32.064		

Tablo 5.2. Programa girilen doğal gaz kullanım oranları [40]

devir yük	1200	1500	1800	2100
%35	47	46	50	54
%50	55	58	60	65
%100	73	73	75	78

- Motorda kullanılan sıvı yakıtın elemansel analiz değerleri ve mol ağırlığı, gaz yakıtın bileşenlerinin hacimsel kesirleri, denge basıncı, denge sıcaklığı ve hava fazlalık katsayısı, motor yükü ve motor devri kullanıcı tarafından programa girilmektedir.
- Sıvı yakıtın kapalı formülü programa girilen sıvı yakıtın elemansel analiz değerlerine ve yakıtın mol kütlesine bağlı olarak tespit edilmektedir[25]. Dizel yakıtının elemansel analiz değerleri ve mol ağırlığı Tablo 5.3' te verilmiştir

Tablo 5.3. Dizel yakıtının elemansel analiz değerleri ve mol ağırlığı [25]

Yakıt Adı	Elemansel Analiz (kütlesel)					M_d
Dizel	C	H	O	N	S	(kg/kmol)
Yakıtı	0.859	0.133	0	0	0.005	170

- Gaz yakıtın kapalı formülü programa girilen gaz yakıtın hacimsel bileşenlerine göre tespit edilmektedir[25]. Yakıtın bileşenleri ve hamitabat doğal gazının bileşenlerinin hacimsel oranları Tablo 5.4' de verilmiştir.

Tablo 5.4. Gaz yakıtının bileşenleri ve doğal gazın bileşenlerinin hacimsel oranları

Bileşen	Hacimsel Oran (%)	Bileşen	Hacimsel Oran (%)
CO	0	C ₆ H ₆	0
H ₂	0	C ₂ H ₄	0
CH ₄	95.456	C ₃ H ₆	0
C ₂ H ₆	2.411	C ₄ H ₈	0
C ₃ H ₈	0.736	H ₂ S	0
C ₄ H ₁₀	0.371	CO ₂	0.085
C ₅ H ₁₀	0	N ₂	0.776
C ₅ H ₁₂	0.164		

- İstenilen motor yükü ve motor devrindeki doğal gaz kullanım oranı programa önceden yüklenilmiş olan değerlerin lineer enterpolasyonu alınarak bulunmaktadır. Programa yüklenilmiş olan doğal gaz kullanım oranlarının ait oldukları motor devirleri ve motor yükleri sırasıyla n_n, y_n ile, doğal gaz kullanım oranının bulunması istenen motor devri ve motor yükü sırasıyla n_x, y_x ile ifade edilerek bağıntılar yazılmıştır.

- Bilinen bir yük kademesinde, doğal gaz kullanım oranları bilinen n_n ve n_{n+1} devirleri arasında, herhangi bir n_x devrindeki doğal gaz kullanım oranı

$$GYO = GYO(n_n) + [(n_x - n_n) * [GYO(n_{n+1}) - GYO(n_n)] / (n_{n+1} - n_n)] \quad (5.1)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

- Bilinen bir devir kademesinde, doğal gaz kullanım oranları bilinen y_n ve y_{n+1} devirleri arasında, herhangi bir y_x devrindeki doğal gaz kullanım oranı

$$GYO = GYO(y_n) + [(y_x - y_n) * [GYO(y_{n+1}) - GYO(y_n)] / (y_{n+1} - y_n)] \quad (5.2)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

- Bilinen y_n ve y_{n+1} yük kademeleri arasındaki herhangi bir y_x yük kademesindeki ve bilinen n_n ve n_{n+1} devir kademeleri arasındaki herhangi bir n_x devir kademesindeki doğal gaz kullanım oranının bulunması için önce y_n yüküne göre (5.1) bağıntısında n_n ve n_{n+1} devirleri kullanılarak n_x devrindeki GYO bulunur. Aynı işlem y_{n+1} yüküne göre yapılarak GYO bulunur. Daha sonra y_x yük kademesinde ve n_x devir kademesindeki GYO oranı (5.2) bağıntısında y_n, y_{n+1} yükleri ve bu yüklerdeki n_x motor devrine göre bulunan iki GYO değeri kullanılarak bulunur.

- Doğal gaz kullanım oranına bağlı olarak oluşan karma yakıtın kapalı formülü sıvı ve gaz yakıtın mol oranlarına göre hesaplanmaktadır.

$C_{cg}H_{hg}O_{og}N_{ng}S_{sg}$ gaz yakıtın kapalı formülü

$C_{cs}H_{hs}O_{os}N_{ns}S_{ss}$ sıvı yakıtın kapalı formülü

M_g = gaz yakıtın mol ağırlığı

M_s = sıvı yakıtın mol ağırlığı

GYO = doğal gaz kullanım oranı

olmak üzere karma yakıtı oluşturan elementlerin mol sayıları

$$\begin{aligned} c &= c_g + c_s * M_g(100-GYO) / (M_s*GYO) \\ h &= h_g + h_s * M_g(100-GYO) / (M_s*GYO) \\ o &= o_g + o_s * M_g(100-GYO) / (M_s*GYO) \\ n &= n_g + n_s * M_g(100-GYO) / (M_s*GYO) \\ s &= s_g + s_s * M_g(100-GYO) / (M_s*GYO) \end{aligned} \quad (5.3)$$

bağıntılarıyla tespit edilmiştir.

- Yanma sonu ürünleri karma yakıtın kapalı formülüne bağlı olarak $\lambda < 1$ için su gazı dengesine göre EY ürünleri olarak ve $\lambda \geq 1$ için ise CO_2 ve H_2O nun ısı parçalanma reaksiyonlarının dengesine göre KEY ürünleri olarak hesaplanmaktadır[25].
- Programın son kısmında ise sıvı yakıtın, gaz yakıtın, karma yakıtın kapalı formülleri, doğal gaz kullanım oranı, yanma sonu ürünlerinin toplamı ve yanma ürünlerinin kesirleri sonuç olarak verilmektedir. Ayrıca bilgisayar programında kullanılan kısaltmalar Tablo 5.5’de gösterilmiştir.

Programın hazırlanmasında 25 nolu kaynaktan, (BORAT, O., BALCI, M., SÜRMEN, A., Yanma Bilgisi, Ankara, 1992) bazı bölümlerinden kısmen bazı bölümlerinden bütünen alıntılar yapılarak istifade edilmiştir.

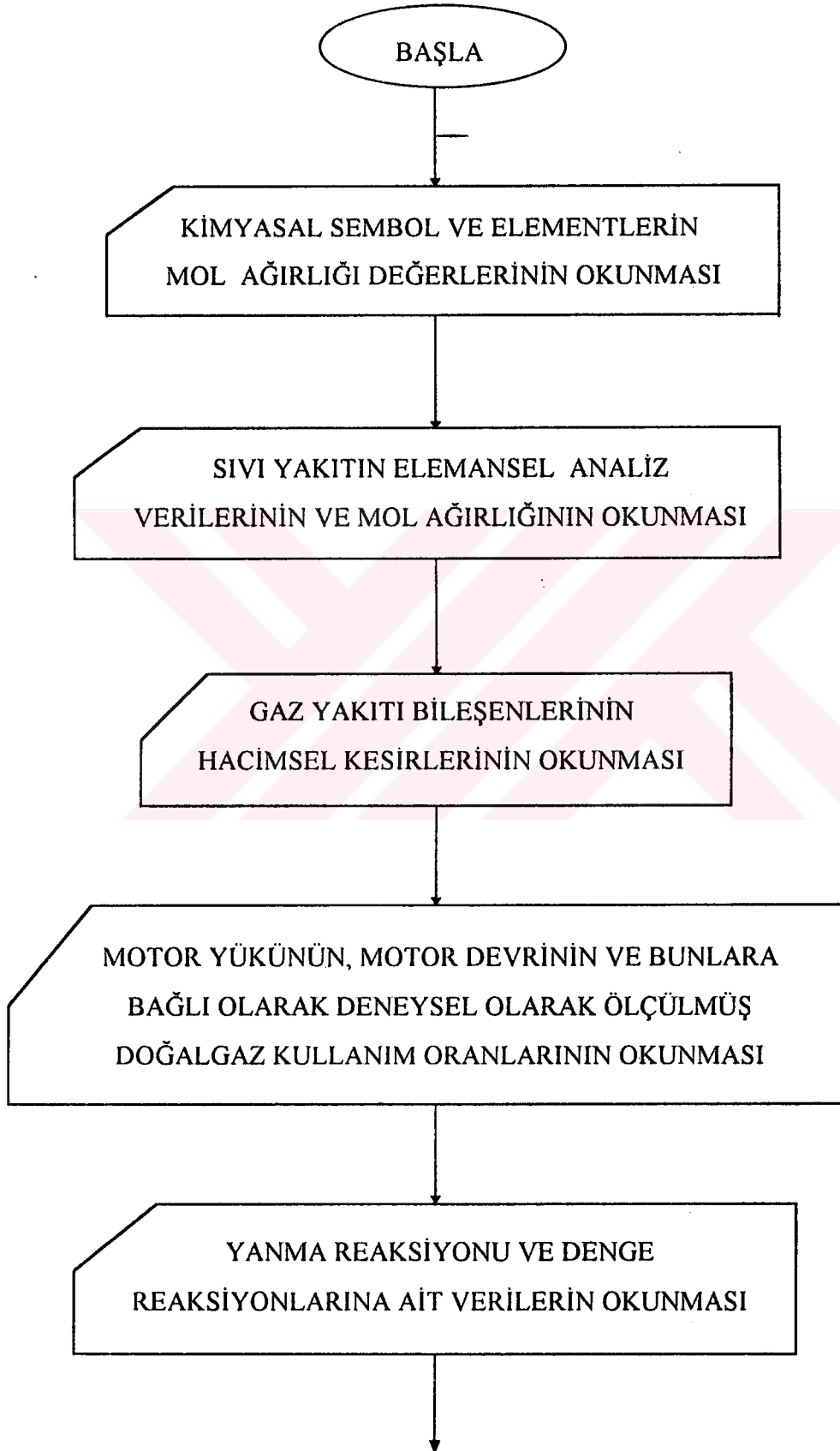
Tablo 5.5. Bilgisayar programında kullanılan kısaltmalar

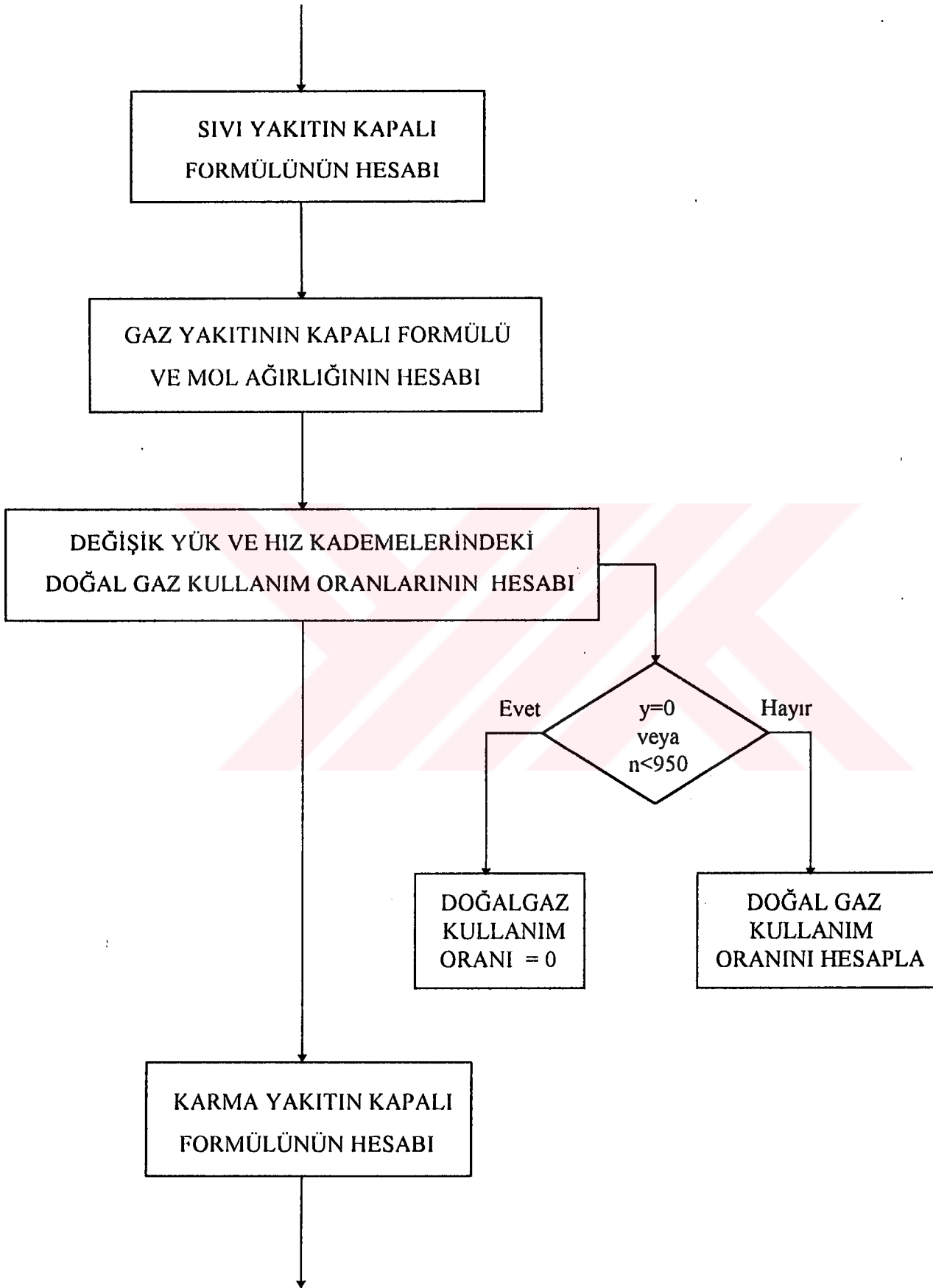
KISALTMALAR	AÇIKLAMA
SY	sıvı yakıt (dizel)
GY	gaz yakıt (doğal gaz)
KY	karma yakıt
EA	sıvı yakıtın elemensel analiz değerleri
YSU	yanma sonu ürünleri
GYB	gaz yakıtın bileşimleri
MA	mol ağırlığı
GYO	gaz yakıtın kullanım oranı
MAYS	sıvı yakıtın mol ağırlığı
MAYG	gaz yakıtın mol ağırlığı
MAYK	karma yakıtın mol ağırlığı
PATM	atmosfer basıncı
TATM	atmosfer sıcaklığı
XR	mutlak nem
BNEM	bağıl nem
PDOYMA	doyma basıncı
PDENGE	denge basıncı
TDENGE	denge sıcaklığı
LAMBDA	hava fazlalık katsayısı
QMIN	TTY için gerekli olan minimum oksijen miktarı
SIGMA	1kmol C için TTY yanmada gerekli olan minimum O ₂ miktarı
ITA	1kmol C için TTY yanmada gerekli olan havadaki N ₂ miktarı
TETA	1kmol C için TTY yanmada gerekli olan havadaki H ₂ O miktarı
KAPA	1 kg yakıttaki C nun hacimsel miktarı
PSI	1 kmol C içeren yakıtın TY ürünleri
KSG	su gazı denge sabiti
KH2O	H ₂ O denge sabiti

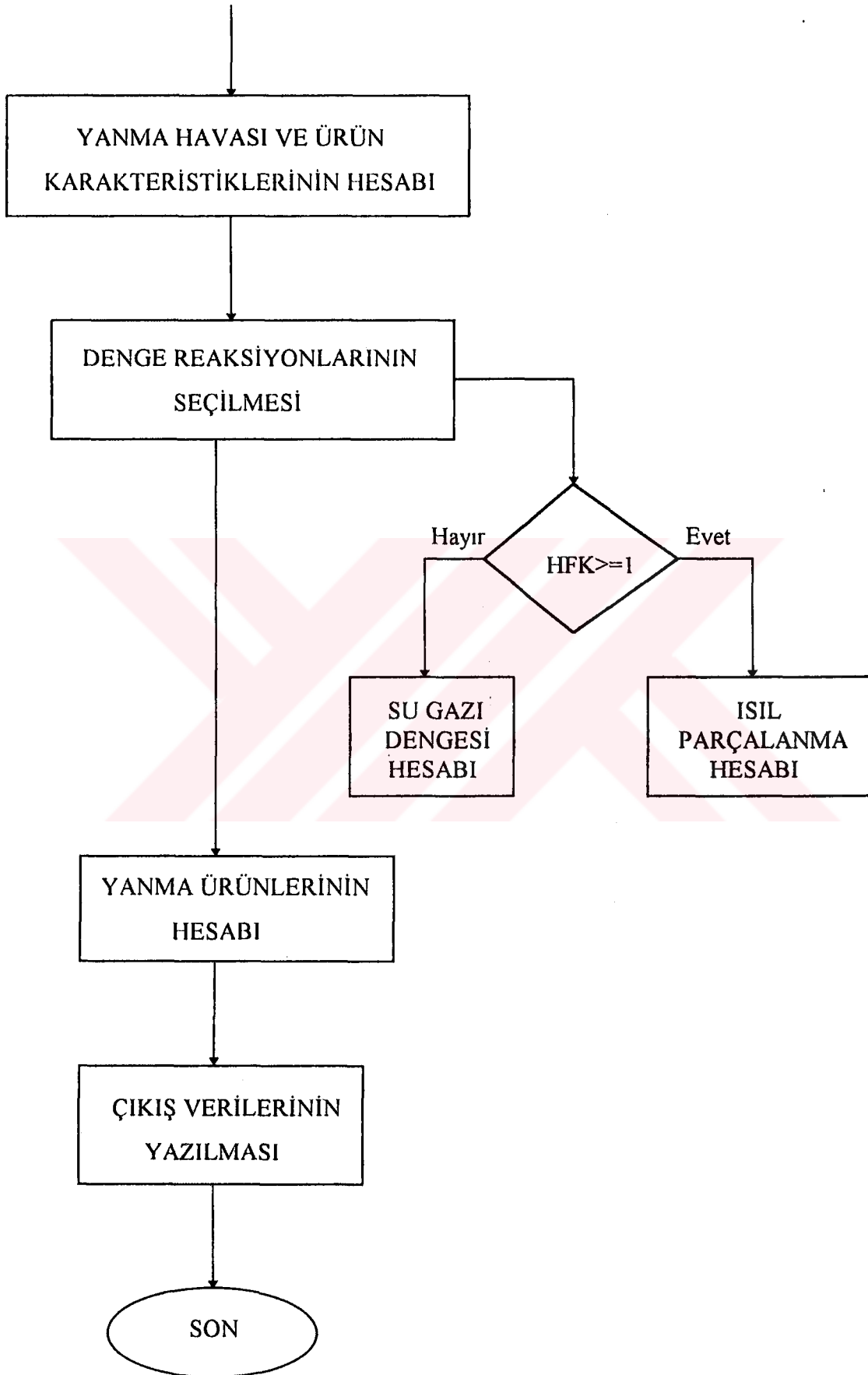
KCO2	CO ₂ denge sabiti
ALFA1	1
ALFA2	1 kmol C içeren yakıtın yanma ürünlerindeki CO miktarı
BETA1	1 kmol C içeren yakıtın yanma ürünlerindeki H ₂ O miktarı
BETA2	1 kmol C içeren yakıtın yanma ürünlerindeki H miktarı
YU	yanma ürünleri
VUR	tam yanma rutubetli ürünleri
VUREY	eksik yanma rutubetli ürünleri
VURKEY	kısmi eksik yanma rutubetli yanma ürünleri



6.3. Programın akış diyagramı







6.4. Programın sonuçları ve irdelenmesi

Program sonuçlarının gerçek sonuçlara yaklaşabilmesi için denge basıncı ve özellikle denge sıcaklığının motor şartlarına bağlı olarak değişiminin tespit edilip programa yüklenilmesi gerekirken çalışmamızda bunlar sabit olarak alınmıştır. Ayrıca motorun çalıştırıldığı hava fazlalık katsayısını belli değerlerde kabul etmemiz program sonuçlarını gerçek sonuçlardan uzaklaştırmıştır.

Programa dizel yakıtının elemansel analiz değerleri ve mol ağırlığı için Tablo 5.3 te verilmiş olan değerler, gaz yakıtın bileşenlerinin hacimsel kesirleri için Tablo 5.4 de verilmiş olan değerler girilmiş olup denge sıcaklığının 1900 K, denge basıncının 101.325 kpa ve hava fazlalık katsayısının 0.9, 1, 1.2, 1.5 olduğu değerlerdeki sonuçlar ekler bölümünde tablolar halinde verilmiştir.

Bilgisayar programından elde edilen sonuçlara göre doğal gaz kullanım oranının artışına bağlı olarak yanma ürünlerindeki CO_2 , CO , N_2 , SO_2 ve O_2 'nin hacimsel kesirlerinde azalma gözlenirken H_2O ve H_2 'nin hacimsel kesirlerinde artma gözlenmektedir.

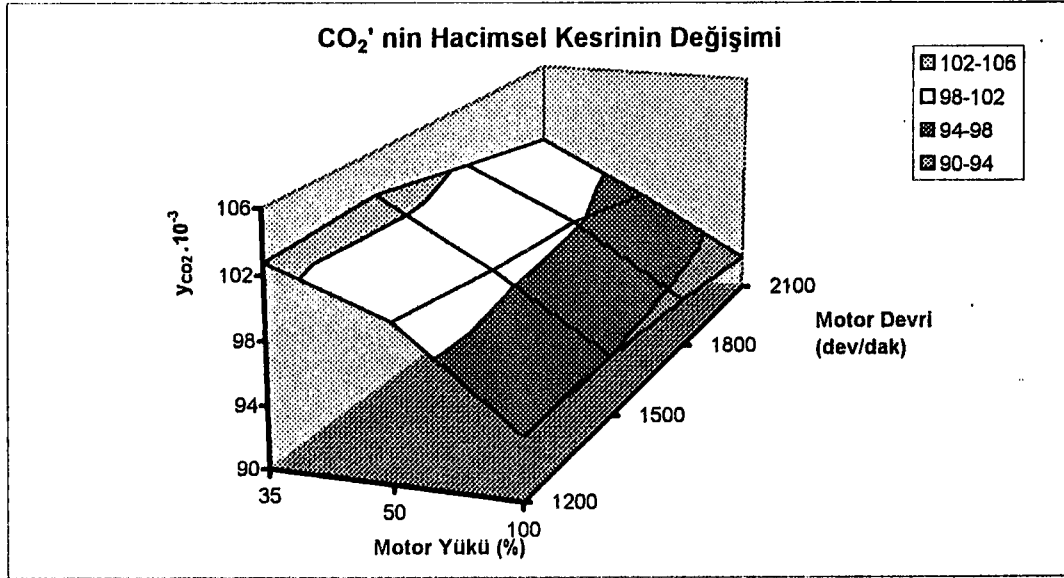
Doğal gaz hemen hemen hiçbir artık bırakmaksızın yanar. Bu nedenle programın hazırlanmasında kullanılan hesaplamalarda C emisyonları ihmal edilmiştir. Oluşan partikül emisyonları kullanılan pilot dizel yakıtın ve motor yağlama yağının yanmasından kaynaklanır[19].

Doğal gazın yanmasında atmosferin sera etkisi üzerinde ve atmosferde bulunan ozon tabakasının incelmesinde çok önemli payı olan CO_2 egzoz emisyonlarında azalma olmaktadır. Doğal gaz içindeki karbon oranı dizel yakıtındaki karbon oranından daha düşüktür. Doğal gazın kapalı formülündeki C/H oranı 0.25 civarlarında değişirken dizel yakıtında bu oran daha fazla olmaktadır. Bu temel sebepten dolayı Şekil 5.2'de görüldüğü gibi doğal gazın kullanımının artmasıyla CO_2 emisyonlarında azalma olmaktadır. Doğal gaz içerisindeki hidrojen miktarının fazla olmasından dolayı zararsız emisyonlardan olan H_2 ve H_2O 'da doğal gazın kullanım oranının artmasıyla artma göstermektedir. Şekil 5.4 -7'de görüldüğü gibi H_2O ve H_2 'de doğal gaz kullanım oranının artmasıyla artma olmaktadır.

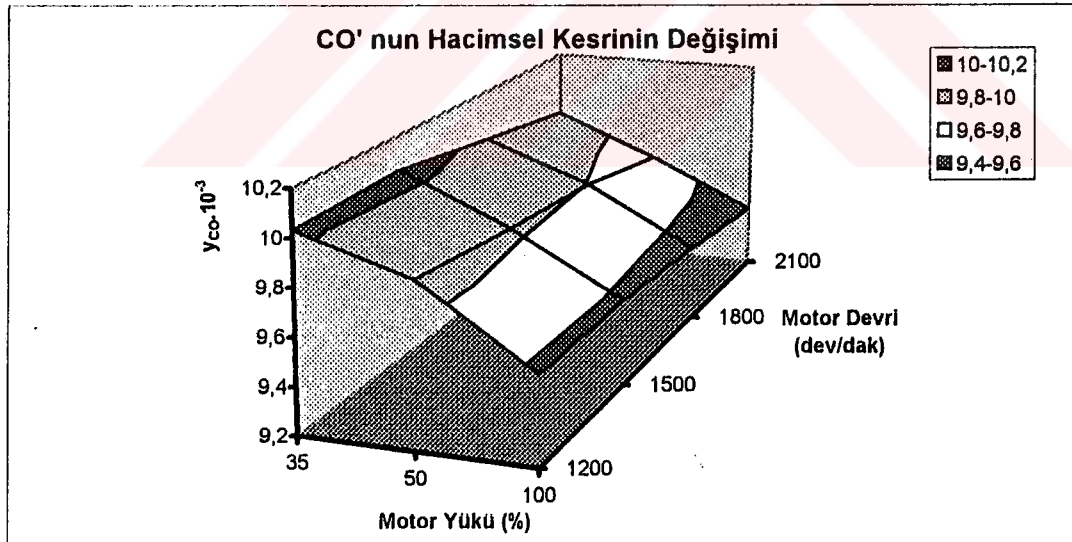
Doğal gaz içerisinde bulunan çok az miktardaki azot gazından dolayı yanma ürünlerindeki azot miktarının artması beklenir. Ancak doğal gaz içerisinde bulunan CO_2 gazı yanma için gerekli olan minimum hava miktarını azaltmaktadır. Buna paralel olarak yanmaya giren azot miktarında da azalma olmaktadır. Bundan dolayı doğal gazın yanmasında Şekil 5.5'de görüldüğü gibi doğal gazın kullanım oranının artmasıyla azot miktarında azalma olmaktadır.

Doğal gazın içinde kükürt bulunmamaktadır. Bundan dolayı doğal gaz kullanım oranının artmasıyla birlikte egzoz emisyonlarında Şekil 5.6'da görüldüğü gibi SO_x emisyonunda azalma olmaktadır.

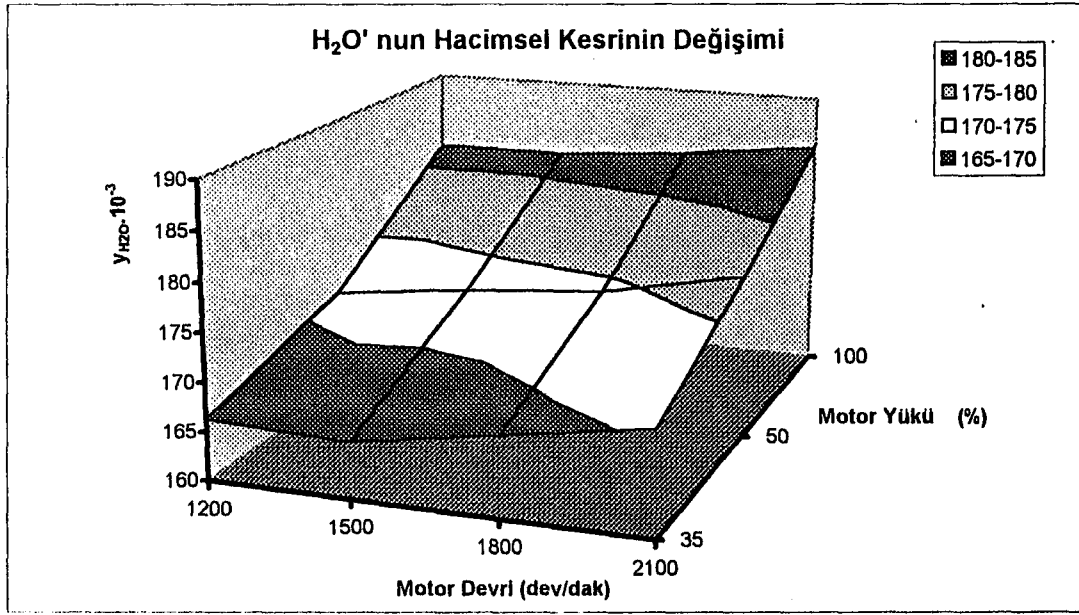
Bilgisayar programında elde edilen CO miktarında şekil 5.3' te görüldüğü gibi doğal gaz kullanım oranının artmasıyla birlikte azalma gözlenmektedir. İstanbul Teknik Üniversitesinde aynı motor üzerinde deneysel olarak ölçülmüş zararlı CO emisyonlarında ise şekil 2.19'da görüldüğü gibi doğal gaz kullanım oranının artmasıyla birlikte artış göstermektedir. Bunun nedeni denge basıncının ve denge sıcaklığının sabit alınması, seçilen hava fazlalık katsayısı değerlerinin deney motorundakinden farklı olabilmesi ve doğal gazın difüzyon etkisinin ihmal edilmiş olmasından kaynaklanmıştır.



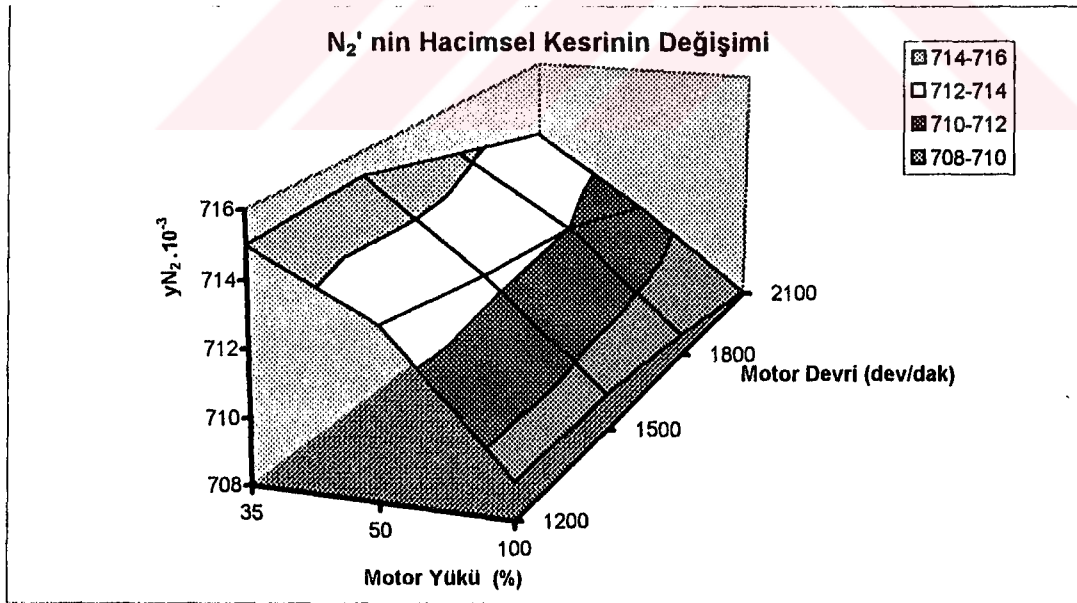
Şekil 5.2. Yanma ürünlerindeki CO₂' nin hacimsel kesrinin $\lambda=1$ değerindeki motor yükü ve motor devrine bağlı olarak değişimi.



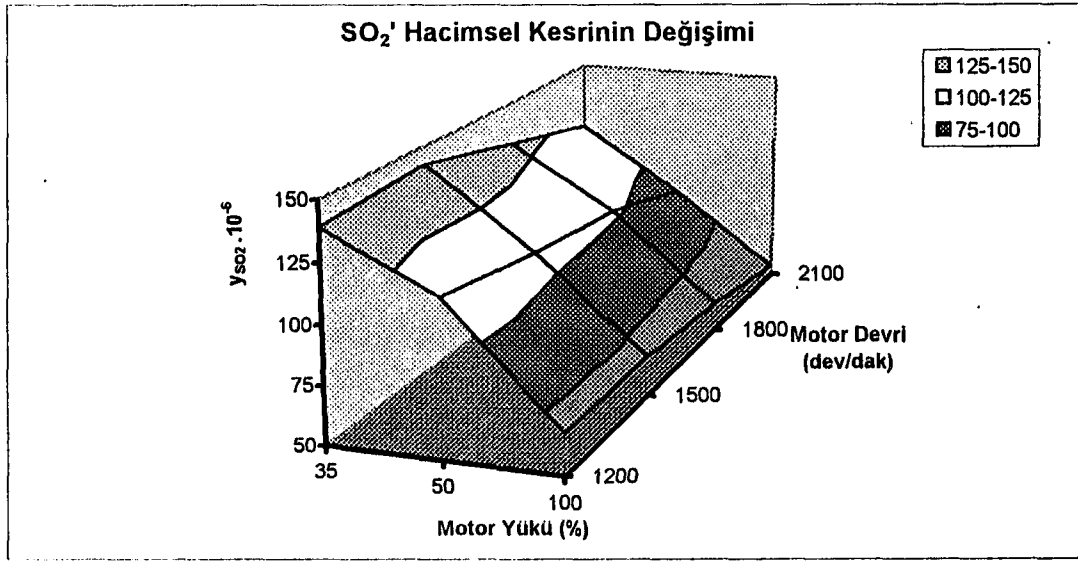
Şekil 5.3. Yanma ürünlerindeki CO' nun hacimsel kesrinin $\lambda=1$ değerindeki motor yükü ve motor devrine bağlı olarak değişimi.



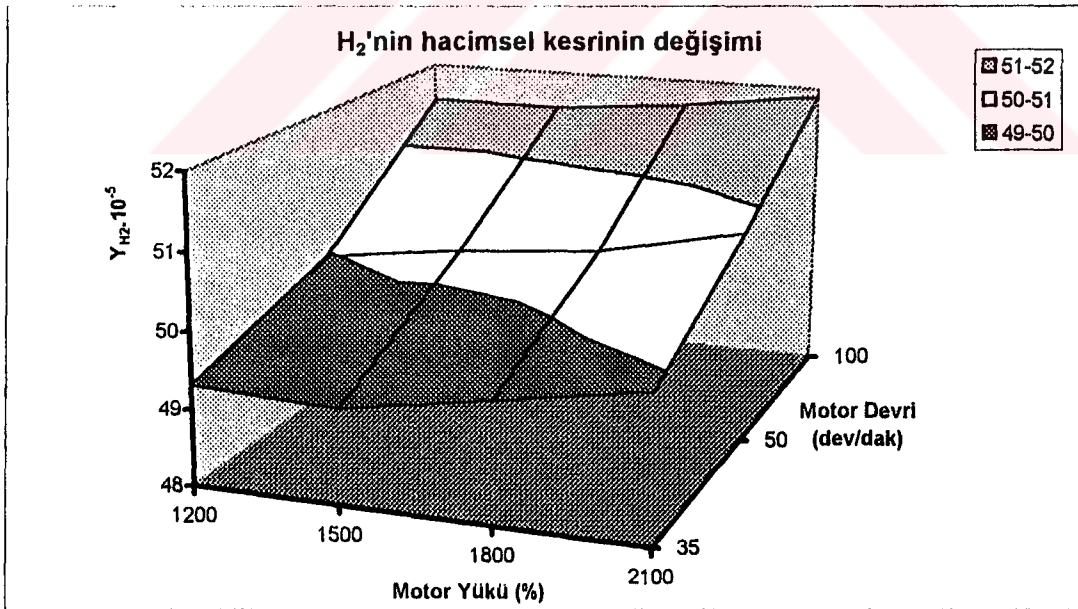
Şekil 5.4. Yanma ürünlerindeki H₂O' nun hacimsel kesrinin $\lambda=1$ değerindeki motor yükü ve motor devrine bağlı olarak değişimi.



Şekil 5.5. Yanma ürünlerindeki N₂' nin hacimsel kesrinin $\lambda=1$ değerindeki motor yükü ve motor devrine bağlı olarak değişimi.



Şekil 5.6. Yanma ürünlerindeki SO₂'nin hacimsel kesrinin $\lambda=1$ değerindeki motor yükü ve motor devrine bağlı olarak değişimi.



Şekil 5.7. Yanma ürünlerindeki H₂'nin hacimsel kesrinin $\lambda=1$ değerindeki motor yükü ve motor devrine bağlı olarak değişimi.

SONUÇLAR

Günümüzde içten yanmalı motorlarda kullanılan fosil kökenli yakıtların hızla tükenmekte olması ve bu yakıtların yanması sonucu oluşan zararlı egzoz gazlarının çevreyi kirletmeleri içten yanmalı motorlarda alternatif yakıt arayışlarını hızlandırmıştır.

Bu çalışmada, alternatif yakıtlar (Doğal Gaz, Hidrojen, LPG, Alkoller) 'ın özellikleri ve bu yakıtların içten yanmalı motorlarda kullanımı esnasında gösterdikleri üstünlükler ve dezavantajlar belirtilmiştir. Buna göre alternatif yakıtların hepsi teorik olarak içten yanmalı motorlarda kullanılabilir. Zararlı egzoz emisyonu en düşük olan hidrojenin elde edilmesi ve taşıtta depolanması gibi zorlukları göz önüne alınırsa, günümüzde egzoz emisyonları azlığı açısından ikinci sırada olan doğal gaz ön plana çıkmaktadır. Doğal gazın taşıtta depolanma zorluğu gözardı edilirse doğal gaz günümüzde en çok tercih edilen alternatif yakıt olarak kabul edilebilir.

Doğal gaz içten yanmalı motorlarda doğal gaz motorları, doğal gaz ve çift yakıt (dizel-doğal gaz) sistemine dönüştürülmüş dizel motorları, doğal gaza dönüştürülmüş otto motorları olarak kullanılmaktadır.

DELTEC dönüşüm kiti ile çift yakıt (doğal gaz + dizel) ile çalışabilecek şekilde dönüştürülen dizel motorunda doğal gazın kullanılmasıyla;

- Yanma sonu ürünlerindeki CO_2 'nin hacimsel oranları şekil 5.2'de görüldüğü gibi doğal gaz içindeki karbon oranı dizel yakıtındaki karbon oranından düşük olmasından dolayı azalmaktadır.

- Yanma sonu ürünlerindeki SO_2 'nin hacimsel oranları şekil 5.6'da görüldüğü gibi doğal gazın içinde kükürt'ün bulunmamasından dolayı azalmaktadır.

- Deltec sisteminde pilot dizel yakıtının püskürtülmesinin geciktirilip yanma sonu gazlarının yanma odasında kalma süresinin azaltılması, şekil 5.5'te görüldüğü gibi doğal gazın kullanım oranının artmasıyla yanma ürünlerindeki N_2 'nin hacimsel oranlarının azalması ve doğal gazın yanma sonu sıcaklığının petrol kökenli yakıtlara göre düşük olması NO_x emisyonlarını azaltıcı faktörler olarak kabul edilebilir. Ancak ideal sonuçlara ulaşabilmek için NO_x emisyonlarının oluşumu kinetik mekanizmalarla incelenmelidir.

- Yanma sonu ürünlerindeki H_2O ve H_2 'nin hacimsel oranları şekil 5.4-7'de görüldüğü gibi doğal gaz içindeki hidrojen oranı dizel yakıtındaki hidrojen oranından yüksek olmasından dolayı artmaktadır.

- Yanma sonu ürünlerindeki CO 'nun hacimsel oranları şekil 5.3'te görüldüğü gibi azalmaktadır. Buna bağlı olarak CO emisyonlarında da azalma beklenirken zararsız olarak kabul edilen doğal gazın yanmasını tamamlayamamasından dolayı şekil 2.18-19'da görüldüğü gibi CO ve HC emisyonları artmaktadır.

- Doğal gaz hemen hemen hiç artık bırakmaksızın yanmasından dolayı partikül emisyonları azalmaktadır. Oluşan partikül emisyonları kullanılan pilot dizel yakıtının ve motor yağlama yağının yanmasından kaynaklanmaktadır.

DELTEC dönüşüm kiti ile dönüştürülmüş dizel motorlu taşıtlarda doğal gaz kullanım oranı motor devri ve motor yükünün artışıyla, paralel olarak artmaktadır. Bu dönüşüm sisteminin trafik yoğunluğunun yaşandığı bölgelerde kullanılması gerek maliyet ve gerekse egzoz emisyonları açısından, dönüşümün verimlilik sınırlarını zorlayabilir. İ.E.T.T'nin dönüşümü yapılmış 100 adet otobüsünde;

- %60 olarak beklenen doğal gaz kullanım oranı %33 civarlarında değişmektedir.

- Bu kullanım oranına göre projenin geri ödeme süresi yaklaşık 7 yıl olmaktadır.

Çift yakıtlı sisteme dönüştürülen şehir içi otobüslerinde kullanılacak doğal gaz kullanım oranının artmasını sağlamak amacıyla, kısmî yüklerde ve düşük devirlerde çalışma oranının daha düşük olacağı hatların seçilmesi özellikle şarttır.

DELTEC dönüşüm sisteminin kullanımı açısından dikkat edilmesi gereken diğer bir hususta, motorun %100 dizel yakıtı ile çalıştırılmasında egzoz sıcaklıklarının aşırı artmasıdır. Bu durumun motor elemanlarına zarar vermemesi için bu şartlarda çalışmayı kısa kesmek ve tam yüke çıkmamak gerekir.

Çift yakıt (dizel+doğal gaz) ile çalışacak şekilde dönüştürülmüş dizel motorlarının zararlı egzoz emisyonlarında özellikle is ve NO_x'te belirgin bir azalma elde etmek mümkün olabilir. Fakat çift yakıtlı sistemlerde Avrupa Topluluğu Standartlarının sağlanması genelde olanaksız görülmektedir. Ancak genel olarak bakıldığında mevcut dizel motorlarının %100 doğal gazla çalışan motorlarla değiştirilmesi yerine çift yakıtlı hale dönüştürülmesi orta vadede daha ekonomik görünmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] ÖZTÜRK, G., Egzoz Gazlarından Kurtuluşa Doğru, Bilim ve Teknik, Cilt 22, Sayı 263, Sayfa 30-33, 1989.
- [2] AYGÜN, E., Ozon Tabakasındaki Deliklerin Sebepleri ve Sonuçları, Bilim ve Teknik, Cilt 22, Sayı 255, Sayfa 46-49, 1989.
- [3] ÇAKALLI, A., Dünyayı Değiştirecek 3 Derece, Bilim ve Teknik, Cilt 21, Sayı 244, Sayfa 30-33, 1988.
- [4] ERDİN, E., Ozon Tabakası Deliği ve Sera Etkisi, Mühendis ve Makine Dergisi, Cilt 31, Sayı 365, Sayfa 33-36, 1990.
- [5] KORUR, E., Ozon Tabakasını Kurtarabilecekmiyiz?, Bilim ve Teknik, Cilt 21, Sayı 244, Sayfa 26-29, 1988.
- [6] Dünya Enerji Konferansı Türk Milli Komitesi Yayını, 1991 Enerji Raporu, S.5,55, Ankara (1993).
- [7] ROSEN, J., Running on Methane, Mechanical Engineer İng., pp. 66-71, May 1990.
- [8] O'CONNOR, L., Clearing the Air with Natural Gas Engines, Mechanical Engineering, pp. 52-56, October 1993.
- [9] ALBAYRAK, K., YAHŞİ, O.S., ERALP, O.C., BAYKA, A.D., Otobüslerde Doğal Gaz Kullanımı, Doğal Gaz Dergisi, sayı 29, sayfa 122-131, Kasım-Aralık 1993.
- [10] YAHŞİ, O.S., ERALP, O.C., BAYKA, A.D., ALBAYRAK, K., Doğal Gazın Dizel Araçlarda Kullanımı, Doğal Gaz Dergisi, sayı 19, sayfa 32-39, Mart-Nisan 1992.
- [11] ERGENEMAN, M., SORUŞBAY, C., Doğal Gazın İçten Yanmalı Motorlarda Kullanımı, Doğal Gaz Dergisi, sayı 6, sayfa 17-22, Şubat 1990.
- [12] ÖZAKTAŞ, T., Doğal Gaz ve Benzin Motorları Egzoz Emisyonları, Doğal Gaz Dergisi, Sayı 28, sayfa 90-95, Eylül-Ekim 1993.
- [13] SORUŞTAY, C., ARSLAN, E., Hidrojen Yakıtlı İçten Yanmalı Motorlarda Yanma Performansı, Mühendis ve Makine Dergisi, cilt 29, sayı 339, sayfa 23-28, 1988.
- [14] ALİBAŞ, K., ÇOLAK, S., Doğal Gazın Tek Silindirli, İçten Yanmalı Bir Motorda Kullanılabilir Olanığının Güç, Döndürme Momenti ve Özgül Yakıt Tüketimi Yönünden Araştırması, Mühendis ve Makine Dergisi, cilt 35, Sayı 391, sayfa 30-35, 1992.

- [15] BAYHAN, M., Motorlu Taşıtlarda Yakıt Olarak Doğal Gazın Kullanılmasıyla Egzost Emisyonlarının Azaltılması, Mühendis ve Makine Dergisi, cilt 33, sayı 394, sayfa 34-39, 1992.
- [16] BAYHAN, M., Motorlu Taşıtlarda Benzin yerine Doğal Gaz, Mühendis ve Makine Dergisi, cilt 31, sayı 364, sayfa 9-14, 1990.
- [17] ÖZAKTAŞ, T., ARSLAN, E., ERGENEMAN, M., GÖKTAN, A., SORUŞ-BAY, C., Doğal Gaz Motorları ve Otobüslerde Doğal Gaz Kullanımı, Termodinamik Dergisi, sayfa 54-57, Haziran 1994.
- [18] Information TB Green Engines & Turn-key Conversions pp 5/6-8.
- [19] HELD, W., Doğal gaz tahrikli MAN otobüsleri, CNG Sempozyumu İstanbul, 1996.
- [20] LAPETZ, J., BEİTER, J., WOLTF, W., Proceedings of the 1995 SAE Alternative Fuels pp 23-32.
- [21] VALENTİ, M., Alternative Fuels: paving the Wayto Energy Independence, Mechanical Engineering, pp.42-46, December 1991.
- [22] FURUHAMA, S., State of the Art and Future Trends in Hydrogen Fuelled Engines, Int. J. Of Vehicle Design, Vol.4, No., pp.359-385, 1993.
- [23] ÖNCÜL, N., Geleceğin yakıtları, Bilim ve Teknik, Cilt 23, sayı 272, sayfa 6-10, 1990.
- [24] ARSLAN, E., SORUŞBAY, C., Hidrojenin Binek Otomobillerinde Kullanımı ve Depolama Yöntemleri, Endüstri Mühendisliği Dergisi İkinci Otomotiv ve Yan Sanayii Sempozyumu 1.Özel Sayısı, sayfa 231-235.
- [25] BORAT, O., BALCI, M., SÜRMEN, A., Yanma Bilgisi, Ankara, 1992.
- [26] CHALSMA, J.K., Filling up on Alternative Fuels, Machine Design, Vol.65, Num.1, pp.64-69, 1993.
- [27] ERGENEMAN, M., SORUŞBAY, C., Benzin Motorlu Taşıtların LPG Kullanımına Dönüşümü , Mühendis ve Makine, Sayı 441, Sayfa 25-30, 1998.
- [28] DURGUN, O., Motorda Petrol Yerine Kullanıla Bilecek Yakıtlar, Mühendis ve Makine Dergisi, Cilt 29, Sayı 36, Sayfa 25, 1988.
- [29] KNOWLES, D., Alternative Automative Fuels Reston Publishing Company , Virginia , 1988.

- [30] KARAOSMANOĞLU, F., Alkollü Benzinlerin Alternatif Motor Yakıtı Olarak Değerlendirilmesi, Sayfa 9-10, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Endüstitüsü, 1990.
- [31] KNOWLES, D., Alternate Automotive Fuels, Reston Publishing Company Inc., Virginia, 1984.
- [32] DURGUN, O., Motorda Petrol Yerine Kullanılabilecek Yakıtlar, Mühendis ve Makine Dergisi, Cilt 29, Sayı 36, Sayfa 26, 1988.
- [33] Reed, D., Methanol Fuel, Automotive Engineering, Vol. 97, Num. 6, pp.19, 1989.
- [34] THRING, R.H., Alternative Fuels, Automotive Engineering, Vol. 91, Num. 12, pp. 31-33, 1983.
- [35] THRING, R.H., Alternative Fuels For Spark Ignition Engines , Automotive Engineering , Vol. 92, Num. 1, Pp. 61-64, 1984.
- [36] HOSHINO, T., IWAI, N., Demonsration Of Prototype Near-Neat Methanol Vehicle Controlledfleet Test, Int. J. of Vehicle Design Vol. 12, No. 2, pp. 229-239, 1991
- [37] DURGUN, O., KIZILTAN, E.E., Motorlarda Etıl Alkol Karışımlarının Kullanılması , Endüstri Mühendisliği Dergisi İkinci Otomotiv ve Yan Sanayii Sempozyumu 1. Özel Sayısı , Sayfa 222-230.
- [38] Dünya Alternatif Kaynaklar Arıyor, İhlis Auto & Sport Dergisi, Sayfa 32-33, Haziran 1994.
- [39] HENHAM, A.W.E., JOHNS, R.A, NEWNHAM, S., Development of a Fuetolerant Dieselfor Alternative Fuel Int. J. of Vehicle Design, Vol. 12, No. 3, pp. 196-303, 1991.
- [40] ERGENEMAN, M., ERTUĞRUL, A., SORUŞBAY, C., SAFGÖNÜL, B., Şehir İçi Otobüslere Doğal Gaz Uygulanması.
- [41] İ.E.T.T Genel Müdürlüğü, Çift Yakıtlı Sisteme Dönüşümün Verileri, İstanbul, 1995.
- [42] BORAT, O., BALCI, M., SÜRMEN, A., İçten Yanmalı Motarlar, İstanbul, 1992.
- [43] BORAT, O., BALCI, M., SÜRMEN, A., Hava Kirlenmesi ve Kontrol Tekniği Bursa 1994.
- [44] TEKİN, M., ÇELİK, V., "The Effect Of Working Conditrans on Combustion and Engine Performance in a Disesel Engine ." Third Combustion Symposium, Bursa, 1993.
- [45] TEKİN, M., GÜMÜŞ, M., Püskürtme Avansı Değişiminin Motor Performansına Etkisinin İncelenmesi "Fifth Combustion Symposium." Bursa, 1998.

EKLER



TABLO Lambda 0.9 ve 1 için değişik yük ve devir kademelerindeki doğal gaz kullanım oranına bağlı yanma ürünlerinin hacimsel kesirleri

LAMBDA	YÜK	DEVİR	G.Y.O	Y _{CO2}	Y _{CO}	Y _{H2O}	Y _{H2}	Y _{O2}	Y _{N2}	Y _{SO2}	V _{tr}
0.9	35	1200	47	0.09279332	2.95547.10 ⁻²	0.167891	1.16507.10 ⁻²	0	0.6979593	1.50964.10 ⁻⁴	12.28267
		1500	46	0.09313209	2.96268.10 ⁻²	0.1672781	1.15942.10 ⁻²	0	0.6982148	1.54107.10 ⁻⁴	12.25957
		1800	50	0.09917855	2.93393.10 ⁻²	0.1697152	1.18198.10 ⁻²	0	0.6971985	1.41608.10 ⁻⁴	12.35195
		2100	54	0.09046126	2.90541.10 ⁻²	0.1721137	1.20441.10 ⁻²	0	0.6961975	1.29297.10 ⁻⁴	12.44432
	50	1200	55	0.09013363	2.89832.10 ⁻²	0.1727074	0.012	0	0.6959496	1.26248.10 ⁻⁴	12.4674
		1500	58	0.08915882	2.87712.10 ⁻²	0.1744743	1.22671.10 ⁻²	0	0.6952115	1.1717.10 ⁻⁴	12.55666
		1800	60	0.08851562	2.86306.10 ⁻²	0.1756407	1.23781.10 ⁻²	0	0.694724	1.11174.10 ⁻⁴	12.58282
		2100	65	0.08693054	2.82815.10 ⁻²	0.1785167	1.26539.10 ⁻²	0	0.693521	9.63791.10 ⁻⁵	12.6982
	100	1200	73	0.08446048	2.773.10 ⁻²	0.1830034	0.01309.10 ⁻²	0	0.6916417	7.3267.10 ⁻⁵	12.88273
		1500	73	0.08446048	2.773.10 ⁻²	0.1830034	0.01309.10 ⁻²	0	0.6916417	7.326.10 ⁻⁵	12.88273
		1800	75	0.08385534	2.7594.10 ⁻²	0.1841036	1.31994.10 ⁻²	0	0.6911805	6.75937.10 ⁻⁵	12.92885
		2100	78	0.08295665	2.73898.10 ⁻²	0.1857382	1.33615.10 ⁻²	0	0.6904947	5.9161.10 ⁻⁵	12.99802
1	35	1200	47	0.1027773	1.00284.10 ⁻²	0.1663159	4.93085.10 ⁻⁴	5.26075.10 ⁻³	0.7149855	1.3919.10 ⁻⁴	13.32167
		1500	46	0.1031338	1.00466.10 ⁻²	0.1656938	4.92242.10 ⁻⁴	5.26944.10 ⁻³	0.715222	1.42083.10 ⁻⁴	13.2971
		1800	50	0.1017169	9.97312.10 ⁻³	0.1681682	4.95584.10 ⁻⁴	5.23435.10 ⁻³	0.7142814	1.30577.10 ⁻⁴	13.39536
		2100	54	0.1003205	9.90116.10 ⁻³	0.1706058	4.9894.10 ⁻⁴	5.20005.10 ⁻³	0.7133544	1.19242.10 ⁻⁴	13.4936
	50	1200	55	0.09997469	9.88326.10 ⁻³	0.1712096	4.99777.10 ⁻⁴	5.19152.10 ⁻³	0.7131248	1.16435.10 ⁻⁴	13.51815
		1500	58	0.09894419	9.8306.10 ⁻³	0.1730075	5.02307.10 ⁻⁴	5.16647.10 ⁻³	0.7124408	1.08074.10 ⁻⁴	13.59182
		1800	60	0.09826427	9.7951.10 ⁻³	0.1741952	5.03974.10 ⁻⁴	5.14955.10 ⁻³	0.7119893	1.02551.10 ⁻⁴	13.64092
		2100	65	0.09658747	9.70614.10 ⁻³	0.177127	5.08106.10 ⁻⁴	5.10712.10 ⁻³	0.7108753	8.89184.10 ⁻⁵	13.76362
	100	1200	73	0.09396608	9.56783.10 ⁻³	0.1817085	5.14749.10 ⁻⁴	5.04129.10 ⁻³	0.7091341	6.76136.10 ⁻⁵	13.95988
		1500	73	0.09396608	9.56783.10 ⁻³	0.1817085	5.14749.10 ⁻⁴	5.04129.10 ⁻³	0.7091341	6.76136.10 ⁻⁵	13.95988
		1800	75	0.09332293	9.53335.10 ⁻³	0.1828335	5.16397.10 ⁻⁴	5.02487.10 ⁻³	0.7087066	6.23823.10 ⁻⁵	14.00893
		2100	78	0.09236788	9.48106.10 ⁻³	0.1845062	5.18839.10 ⁻⁴	4.99995.10 ⁻³	0.7080715	5.46048.10 ⁻⁵	14.08248

TABLO Lambda 1.2 ve 1.5 için değişik yük ve devir kademelerindeki doğal gaz kullanım oranına bağlı yanma ürünlerinin hacimsel kesirleri

LAMBDA	YÜK	DEVİR	G.Y.O	Y_{CO_2}	Y_{CO}	Y_{H_2O}	Y_{H_2}	Y_{O_2}	Y_{N_2}	Y_{SO_2}	$V_{ÜR}$
1.2	35	1200	47	$9.42023 \cdot 10^{-2}$	$1.46337 \cdot 10^{-3}$	0.1434376	$1.80504 \cdot 10^{-4}$	$3.30411 \cdot 10^{-2}$	0.7275571	$1.18041 \cdot 10^{-4}$	15.70845
		1500	46	$9.45112 \cdot 10^{-2}$	$1.46766 \cdot 10^{-3}$	0.1429034	$1.80362 \cdot 10^{-4}$	$3.30526 \cdot 10^{-3}$	0.7277643	$1.20489 \cdot 10^{-4}$	15.68023
		1800	50	$9.32824 \cdot 10^{-2}$	$1.45059 \cdot 10^{-3}$	0.1450286	$1.80931 \cdot 10^{-4}$	$3.30068 \cdot 10^{-3}$	0.7269401	$1.10753 \cdot 10^{-4}$	15.7931
		2100	54	$9.20713 \cdot 10^{-2}$	$1.43372 \cdot 10^{-3}$	0.1471231	$1.81495 \cdot 10^{-4}$	$3.29616 \cdot 10^{-3}$	0.7261278	$1.01158 \cdot 10^{-4}$	15.90595
	50	1200	55	$9.17713 \cdot 10^{-2}$	$1.42953 \cdot 10^{-3}$	0.147642	$1.81635 \cdot 10^{-4}$	$3.29504 \cdot 10^{-3}$	0.7259265	$9.87803 \cdot 10^{-5}$	15.93416
		1500	58	$9.08776 \cdot 10^{-2}$	$1.41704 \cdot 10^{-3}$	0.1491875	$1.8205 \cdot 10^{-4}$	$3.2917 \cdot 10^{-3}$	0.725327	$9.16997 \cdot 10^{-5}$	16.01877
		1800	60	$9.02872 \cdot 10^{-2}$	$1.40878 \cdot 10^{-3}$	0.1502087	$1.82328 \cdot 10^{-4}$	$3.2895 \cdot 10^{-3}$	0.7249309	$8.70214 \cdot 10^{-5}$	16.07518
		2100	65	$8.88294 \cdot 10^{-2}$	$1.38833 \cdot 10^{-3}$	0.1527301	$1.83009 \cdot 10^{-4}$	$3.28405 \cdot 10^{-3}$	0.723953	$7.54704 \cdot 10^{-5}$	16.21615
	100	1200	73	$8.65501 \cdot 10^{-2}$	$1.35623 \cdot 10^{-3}$	0.1566729	$1.84078 \cdot 10^{-4}$	$3.27553 \cdot 10^{-3}$	0.722424	$5.74079 \cdot 10^{-5}$	16.44161
		1500	73	$8.65501 \cdot 10^{-2}$	$1.35623 \cdot 10^{-3}$	0.1566729	$1.84078 \cdot 10^{-4}$	$3.27553 \cdot 10^{-3}$	0.722424	$5.74079 \cdot 10^{-5}$	16.44161
		1800	75	$8.59902 \cdot 10^{-2}$	$1.34832 \cdot 10^{-3}$	0.1576415	$1.84341 \cdot 10^{-4}$	$3.27344 \cdot 10^{-3}$	0.7220486	$5.29707 \cdot 10^{-5}$	16.49796
		2100	78	$8.51576 \cdot 10^{-2}$	$1.33653 \cdot 10^{-3}$	0.1590818	$1.84733 \cdot 10^{-4}$	$3.27032 \cdot 10^{-3}$	0.7214899	$4.6372 \cdot 10^{-5}$	16.58247
1.5	35	1200	47	$7.69866 \cdot 10^{-2}$	$6.01565 \cdot 10^{-4}$	0.1189849	$1.1548 \cdot 10^{-4}$	$6.56856 \cdot 10^{-3}$	0.7375302	$9.57356 \cdot 10^{-5}$	19.36841
		1500	46	$7.72346 \cdot 10^{-2}$	$6.03351 \cdot 10^{-4}$	0.1185458	$1.15432 \cdot 10^{-4}$	$6.5702 \cdot 10^{-3}$	0.7377011	$9.77151 \cdot 10^{-5}$	19.33467
		1800	50	$7.6248 \cdot 10^{-2}$	$5.96238 \cdot 10^{-4}$	0.1202927	$1.1562 \cdot 10^{-4}$	$6.56366 \cdot 10^{-3}$	0.7370211	$8.98392 \cdot 10^{-5}$	19.46961
		2100	54	$7.52752 \cdot 10^{-2}$	$5.8921 \cdot 10^{-4}$	0.1220152	$1.15805 \cdot 10^{-4}$	$6.55721 \cdot 10^{-3}$	0.7363505	$8.20732 \cdot 10^{-5}$	19.60453
	50	1200	55	$7.50342 \cdot 10^{-2}$	$5.87467 \cdot 10^{-4}$	0.122442	$1.1585 \cdot 10^{-4}$	$6.55561 \cdot 10^{-3}$	0.7361843	$8.01487 \cdot 10^{-5}$	19.63825
		1500	58	$7.4316 \cdot 10^{-2}$	$5.82267 \cdot 10^{-4}$	0.1237136	$1.1599 \cdot 10^{-4}$	$6.55084 \cdot 10^{-3}$	0.7356893	$7.44134 \cdot 10^{-5}$	19.73941
		1800	60	$7.38414 \cdot 10^{-2}$	$5.78827 \cdot 10^{-4}$	0.1245541	$1.16079 \cdot 10^{-4}$	$6.54769 \cdot 10^{-3}$	0.7353621	$7.06263 \cdot 10^{-5}$	19.80684
		2100	65	$7.26691 \cdot 10^{-2}$	$5.70315 \cdot 10^{-4}$	0.1266298	$1.16303 \cdot 10^{-4}$	$6.53991 \cdot 10^{-3}$	0.7341554	$6.12674 \cdot 10^{-5}$	19.97538
	100	1200	73	$7.08348 \cdot 10^{-2}$	$5.56957 \cdot 10^{-4}$	0.1298779	$1.16654 \cdot 10^{-4}$	$6.5277 \cdot 10^{-3}$	0.7332897	$4.66229 \cdot 10^{-5}$	20.24493
		1500	73	$7.08348 \cdot 10^{-2}$	$5.56957 \cdot 10^{-4}$	0.1298779	$1.16654 \cdot 10^{-4}$	$6.5277 \cdot 10^{-3}$	0.7332897	$4.66229 \cdot 10^{-5}$	20.24493
		1800	75	$7.0384 \cdot 10^{-2}$	$5.53666 \cdot 10^{-4}$	0.1306763	$1.16741 \cdot 10^{-4}$	$6.52475 \cdot 10^{-3}$	0.732979	$4.30236 \cdot 10^{-5}$	20.31229
		2100	78	$6.97134 \cdot 10^{-2}$	$5.48766 \cdot 10^{-4}$	0.1318637	$1.16869 \cdot 10^{-4}$	$6.5203 \cdot 10^{-3}$	0.7325166	$3.76701 \cdot 10^{-5}$	20.41333

```

100 REM ÇİFT YAKITLI SİSTEME DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ RABA MAN 2156 HM6UT
    MOTORUNUN YÜK VE DEVRE BAĞLI DOĞAL GAZ KULLANIM ORANININ
    VE YANMA ÜRÜNLERİNİN DEĞİŞİMİNİN HESAPLANMASI
110 DIM SY$(5), GY$(5), KY$(5), EA$(5), YSU$(7), GYB$(15), SY(5), GY(5), KY(5),
    EA(5), MA(5), GYO(3,5)
130 REM SIVI YAKITIN KİMYASAL FORMÜLÜ
140 FOR I=1 TO 5
150 READ SY$(I)
160 NEXT I
170 DATA Cs=, Hs=, Os=, Ns=, Ss=
180 REM GAZ YAKITIN KİMYASAL FORMÜLÜ
190 FOR I=1 TO 5
200 READ GY$(I)
210 NEXT I
220 DATA Cg=, Hg=, Og=, Ng=, Sg=
230 REM KARMA YAKITIN KİMYASAL FORMÜLÜ
240 FOR I=1 TO 5
250 READ KY$(I)
260 NEXT I
270 DATA Ck=, Hk=, Ok=, Nk=, Sk=
280 REM YANMA ÜRÜNLERİNİN KİMYASAL FORMÜLÜ
290 FOR I=1 TO 7
300 READ YSU$(I)
310 NEXT I
320 DATA CO2=, CO=, H2O=, H2=, O2, N2=, SO2=
330 REM YAKITIN ELEMENSEL ANALİZ SEMBOLÜ
340 FOR I=1 TO 5
350 READ EA$(I)
360 NEXT I
370 DATA c'=, h'=, o'=, n'=, s'=
380 REM GAZ YAKITININ BİLEŞENLERİNİN SEMBOLÜ

```

```

390 FOR I=1 TO 15
400 READ GYB$(I)
410 NEXT I
420 DATA CO=, H2=, CH4=, C2H6=, C3H8=, C4H10=, C5H10=, C5H12=, C6H6=,
      C2H4=, C3H6=, C4H8=, H2S=, CO2=, N2=
500 REM ELEMENTLERİN MOL AĞIRLIĞI
510 FOR I=1 TO 5
520 READ MA(I)
530 NEXT I
540 DATA 12.011, 1.008, 15.999, 14.008, 32.064
1000 PRINT "SIVI YAKITIN ELEMENSEL ANALİZ DEĞERLERİNİ GİRİNİZ"
1010 INPUT "c'=" , EA(1)
1020 INPUT "h'=" , EA(2)
1030 INPUT "o'=" , EA(3)
1040 INPUT "n'=" , EA(4)
1050 INPUT "s'=" , EA(5)
1060 REM SIVI YAKITIN MOL KÜTLESİ
1070 PRINT "SIVI YAKITIN MOL KÜTLESİNİ GİRİNİZ"
1080 INPUT "MAYS=" , MAYS
1500 PRINT "GAZ YAKITI BİLEŞENLERİNİN HACİMSEL KESİRLERİNİ GİRİNİZ"
1510 INPUT "CO=" , CO
1520 INPUT "H2=" , H2
1530 INPUT "CH4=" , CH4
1540 INPUT "C2H6=" , C2H6
1550 INPUT "C3H8=" , C3H8
1560 INPUT "C4H10=" , C4H10
1570 INPUT "C5H10=" , C5H10
1580 INPUT "C5H12=" , C5H12
1590 INPUT "C6H6=" , C6H6
1600 INPUT "C2H4=" , C2H4
1610 INPUT "C3H6=" , C3H6
1620 INPUT "C4H8=" , C4H8

```

```

1630 INPUT "H2S=" , H2S
1640 INPUT "CO2'=" , CO2
1650 INPUT "N2=" , N2
2000 REM DEĞİŞİK YÜK VE HIZ KADEMELERİNDE GAZ KULLANIM ORANLARI
2010 FOR Y=1 TO 3
2020 FOR N=1 TO 5
2030 READ GYO(Y,N)
2040 DATA 0,47,46,50,54,0,55,58,60,65,0,73,73,75,78
2050 NEXT N
2060 NEXT Y
2070 PRINT "MOTOR YÜKÜNÜ GİRİNİZ"
2080 INPUT "y=", Y
2090 PRINT "MOTOR DEVRİNİ GİRİNİZ"
2100 INPUT "n=", N
2500 REM YANMA REAKSİYONU VE DENGİ REAKSİYONLARINA AİT VERİLER
2510 READ PATM, TATM, BNEM, PDOYMA
2520 DATA 101.325, 293,0.60,2.339
2530 INPUT "PDENGİ=", PDENGİ
2540 INPUT "TDENGİ=", TDENGİ
2550 INPUT "LAMBDA=", LAMBDA
2560 P2=PDENGİ / 101.325
2570 TT=TDENGİ
3010 REM SIVI YAKITIN KAPALI FORMÜLÜNÜN HESABI
3020 FOR I=1 TO 5
3030 SY(I)=EA(I)*MAYS/MA(I)
3040 NEXT I
3500 REM GAZ YAKITIN KAPALI FORMÜLÜNÜN HESABI
3510 GY(1)=1*CO + 1*CH4 + 2*C2H6 + 3*C3H8 + 4*C4H10 + 5*C5H10 + 5*C5H12 +
        6*C6H6 + 2*C2H4 + 3*C3H6 + 4*C4H8 + 1*CO2
3520 GY(2)= 2*H2 + 4*CH4 + 6*C2H6 + 8*C3H8 + 10*C4H10 + 10*C5H10 + 12*C5H12
        + 6*C6H6 + 4*C2H4 + 6*C3H6 + 8*C4H8 + 2*H2S
3530 GY(3) = 1*CO + 2*CO2

```

3540 $GY(4) = 2 * N2$
 3550 $GY(5) = 1 * H2S$
 3560 REM GAZ YAKITIN MOL KÜTLESİ
 3570 $MAYG = 12.011 * GY(1) + 1.008 * GY(2) + 15.999 * GY(3) + 14.008 * GY(4) +$
 $32.064 * GY(5)$
 5000 REM DEĞİŞİK YÜK VE HIZ KADEMELERİNDE GAZ KULLANIM
 ORANLARININ HESABI
 5010 IF Y=0 THEN GOTO 6275
 5020 IF N<950 OR N>2100 THEN GOTO 6275
 5210 IF Y=35 AND N=950 THEN GOTO 5740
 5220 IF Y=35 AND N=1200 THEN GOTO 5750
 5230 IF Y=35 AND N=1500 THEN GOTO 5760
 5240 IF Y=35 AND N=1800 THEN GOTO 5770
 5250 IF Y=35 AND N=2100 THEN GOTO 5780
 5260 IF Y=50 AND N=950 THEN GOTO 5790
 5270 IF Y=50 AND N=1200 THEN GOTO 5800
 5280 IF Y=50 AND N=1500 THEN GOTO 5810
 5290 IF Y=50 AND N=1800 THEN GOTO 5820
 5300 IF Y=50 AND N=2100 THEN GOTO 5830
 5310 IF Y=100 AND N=950 THEN GOTO 5840
 5320 IF Y=100 AND N=1200 THEN GOTO 5850
 5330 IF Y=100 AND N=1500 THEN GOTO 5860
 5340 IF Y=100 AND N=1800 THEN GOTO 5870
 5350 IF Y=100 AND N=2100 THEN GOTO 5880
 5360 IF Y=35 AND 950<N AND N<1200 THEN GOTO 5890
 5370 IF Y=35 AND 1200<N AND N<1500 THEN GOTO 5900
 5380 IF Y=35 AND 1500<N AND N<1800 THEN GOTO 5910
 5390 IF Y=35 AND 1800<N AND N<2100 THEN GOTO 5920
 5400 IF Y=50 AND 950<N AND N<1200 THEN GOTO 5930
 5410 IF Y=50 AND 1200<N AND N<1500 THEN GOTO 5940
 5420 IF Y=50 AND 1500<N AND N<1800 THEN GOTO 5950
 5430 IF Y=50 AND 1800<N AND N<2100 THEN GOTO 5960

5440 IF Y=100 AND 950<N AND N<1200 THEN GOTO 5970
5450 IF Y=100 AND 1200<N AND N<1500 THEN GOTO 5980
5460 IF Y=100 AND 1500<N AND N<1800 THEN GOTO 5990
5470 IF Y=100 AND 1800<N AND N<2100 THEN GOTO 6000
5480 IF Y<35 AND N=950 THEN GOTO 6010
5490 IF Y<35 AND N=1200 THEN GOTO 6020
5500 IF Y<35 AND N=1500 THEN GOTO 6030
5510 IF Y<35 AND N=1800 THEN GOTO 6040
5520 IF Y<35 AND N=2100 THEN GOTO 6050
5530 IF Y<35 AND Y<50 AND N=950 THEN GOTO 6060
5540 IF Y<35 AND Y<50 AND N=1200 THEN GOTO 6070
5550 IF Y<35 AND Y<50 AND N=1500 THEN GOTO 6080
5560 IF Y<35 AND Y<50 AND N=1800 THEN GOTO 6090
5570 IF Y<35 AND Y<50 AND N=2100 THEN GOTO 6100
5580 IF Y<50 AND Y<100 AND N=950 THEN GOTO 6110
5590 IF Y<50 AND Y<100 AND N=1200 THEN GOTO 6120
5600 IF Y<50 AND Y<100 AND N=1500 THEN GOTO 6130
5610 IF Y<50 AND Y<100 AND N=1800 THEN GOTO 6140
5620 IF Y<50 AND Y<100 AND N=2100 THEN GOTO 6150
5630 IF Y<35 AND 950<N AND N<1200 THEN GOTO 6160
5640 IF Y<35 AND 1200<N AND N<1500 THEN GOTO 6170
5650 IF Y<35 AND 1500<N AND N<1800 THEN GOTO 6180
5660 IF Y<35 AND 1800<N AND N<2100 THEN GOTO 6190
5670 IF Y<35 AND Y<50 AND 950<N AND N<1200 THEN GOTO 6200
5680 IF Y<35 AND Y<50 AND 1200<N AND N<1500 THEN GOTO 6210
5690 IF Y<35 AND Y<50 AND 1500<N AND N<1800 THEN GOTO 6220
5700 IF Y<35 AND Y<50 AND 1800<N AND N<2100 THEN GOTO 6230
5710 IF Y<50 AND Y<100 AND 950<N AND N<1200 THEN GOTO 6240
5720 IF Y<50 AND Y<100 AND 1200<N AND N<1500 THEN GOTO 6250
5730 IF Y<50 AND Y<100 AND 1500<N AND N<1800 THEN GOTO 6260
5735 IF Y<50 AND Y<100 AND 1800<N AND N<2100 THEN GOTO 6270
5740 GYO=GYO(1,1); GOTO 6280

5750 GYO=GYO(1,2): GOTO 6280
5760 GYO=GYO(1,3): GOTO 6280
5770 GYO=GYO(1,4): GOTO 6280
5780 GYO=GYO(1,5): GOTO 6280
5790 GYO=GYO(2,1): GOTO 6280
5800 GYO=GYO(2,2): GOTO 6280
5810 GYO=GYO(2,3): GOTO 6280
5820 GYO=GYO(2,4): GOTO 6280
5830 GYO=GYO(2,5): GOTO 6280
5840 GYO=GYO(3,1): GOTO 6280
5850 GYO=GYO(3,2): GOTO 6280
5860 GYO=GYO(3,3): GOTO 6280
5870 GYO=GYO(3,4): GOTO 6280
5880 GYO=GYO(3,5): GOTO 6280
5890 $GYO=47*(N-950)/250$: GOTO 6280
5900 $GYO=47-(N-1200)/300$: GOTO 6280
5910 $GYO=46+4*(N-1500)/300$: GOTO 6280
5920 $GYO=50+4*(N-1800)/300$: GOTO 6280
5930 $GYO=55*(N-950)/250$: GOTO 6280
5940 $GYO=55+3*(N-1200)/300$: GOTO 6280
5950 $GYO=58+2*(N-1500)/300$: GOTO 6280
5960 $GYO=60+5*(N-1800)/300$: GOTO 6280
5970 $GYO=73*(N-950)/250$: GOTO 6280
5980 GYO=73 : GOTO 6280
5990 $GYO=73+2*(N-1500)/300$: GOTO 6280
6000 $GYO=75+3*(N-1800)/300$: GOTO 6280
6010 GYO=0 : GOTO 6280
6020 $GYO=47*Y/35$: GOTO 6280
6030 $GYO=46*Y/35$: GOTO 6280
6040 $GYO=50*Y/35$: GOTO 6280
6050 $GYO=54*Y/35$: GOTO 6280
6060 GYO=0 : GOTO 6280

```

6070 GYO=47+8*(Y-35)/15 : GOTO 6280
6080 GYO=46+12*(Y-35)/15 : GOTO 6280
6090 GYO=50+10*(Y-35)/15 : GOTO 6280
6100 GYO=54+11*(Y-35)/15 : GOTO 6280
6110 GYO=0 : GOTO 6280
6120 GYO=55+18*(Y-50)/50 : GOTO 6280
6130 GYO=58+15*(Y-50)/50 : GOTO 6280
6140 GYO=60+15*(Y-50)/50 : GOTO 6280
6150 GYO=65+13*(Y-50)/50 : GOTO 6280
6160 GYO=(N-950)*(47*Y/35)/250: GOTO 6280
6170 GYO=47*Y/35+(N-1200)*(-Y/35)/300: GOTO 6280
6180 GYO=46*Y/35+(N-1500)*(4*Y/35)/300: GOTO 6280
6190 GYO=50*Y/35+(N-1800)*(4*Y/35)/300: GOTO 6280
6200 GYO=(N-950)*(47+8*(Y-35)/15)/250: GOTO 6280
6210 GYO=47+8*(Y-35)/15+(N-1200)*(4*(Y-35)/15-1)/300:GOTO 6280
6220 GYO=46+12*(Y-35)/15+(N-1500)*(4-2*(Y-35)/15)/300:GOTO 6280
6230 GYO=50+10*(Y-35)/15+(N-1800)*(4*(Y-35)/15)/300:GOTO 6280
6240 GYO=(N-950)*(55*18(Y-50)/50)/250:GOTO 6280
6250 GYO=55+18*(Y-50)/50+(N-1200)*(3-3*(Y-50)/50)/300:GOTO 6280
6260 GYO=58+15*(Y-50)/50+(N-1500)*2 :GOTO 6280
6270 GYO=60+15*(Y-50)/50+(N-1800)*(5-2*(Y-50)/50)/300:GOTO 6280
6275 GYO=0
6280 GYO=GYO
6500 REM KARMA YAKITININ KAPALI FORMÜLÜNÜN HESABI
6510 IF GYO=0 THEN GOTO 6550
6520 FOR I=1 TO 5
6530 KY(I)=GY(I)+SY(I)*MAYG*(100-GYO)/(MAY*GYO)
6540 NEXT I :GOTO 7000
6550 FOR I=1 TO 5
6560 KY(I) = SY(I)
6570 NEXT I
6580 REM KARMA YAKITIN MOL KÜTLESİ

```

```

6590 MAYK= 12.011*KY(1) + 1.008*KY(2) + 15.999*KY(3) + 14.008*KY(4) +
      32.064*KY(5)
7000 REM YANMA HAVASI VE ÜRÜN KARAKTERİSTİKLERİNİN HESABI
7010 XR= 1/(1.608*(PATM/BNEM/PDOYMA-1))
7060 FOR I=1 TO 5
7070 KKY(I)=KY(I) / KY(1)
7090 NEXT I
7100 QMIN= KY(1)+ 0.25*KY(2) + KY(5) - 0.5*KY(3)
7110 SIGMA= QMIN/KY(I)
7120 ITA = 3.762*SIGMA
7130 TETA =7.656*XR*SIGMA
7160 KAPA=22.4*KY(I)/MAYK
7180 PSI=1+KKY(5) + 0.5*KKY(4) + SIGMA *(4.762*LAMBDA-1)
7500 REM HFK YA GÖRE DENGİ SEÇİMİ
7510 IF LAMBDA >=1 THEN GOTO 8500
8000 REM SU GAZI DENGESİNE GÖRE YANMA ÜRÜNLERİNİN HESABI
8010 KSG=10^(-8.2028+1.90791E-02*TT-1.76397E-05*TT^2 + 8.443868E-09*TT^3 -
      2.026E-12*TT^4 + 1.93013E-16TT^5)
8020 A= KSG-1
8030 B= KSG + 0.5*KKY(2) + LAMBDA*TETA-2*SIGMA*(1-LAMBDA)*(KSG-1)
8040 C=-8*SIGMA*(1-LAMBDA)*(0.5*KKY(2) + LAMBDA*TETA)
8050 DEDER=B^2-A*C
8060 IF DETER >=0 GOTO 8080
8070 PRINT SU GAZI DENKLEMİNİN DETERMİNANTİ NEGATİF ÇIKTI:GOTO 9270
8080 BETA2 = (-B + SQR(DETER))/A
8090 BETA1 = KKY(2)-BETA2
8100 ALFA2=2*SIGMA*(1-LAMBDA)-0.5*BETA2
8105 ALFA1=1-ALFA2
8110 REM VUrEY=(RUTUBETLİ EY ÜRÜNLERİNİN TOPLAM HACMİ)/KAPA
8120 VUREY=1+KKY(5)+0.5*(KKY(4)+KKY(2))+LAMBDA*(TETA+ITA)
8130 YU(1)=ALFA1/VUREY
8140 YU(2)=ALFA2/VUREY

```

```

8150 YU(3)=(0.5*BETA1 + LAMBDA*TETA)/VUREY
8160 YU(4)=0.5 *BETA2/VUREY
8170 YU(5)=0
8180 YU(6)=(0.5*KKY(4) + ITA*LAMBDA)/VUREY
8190 YU(7)=KKY(5)/VUREY
8200 GOTO 9000
8500 REM ISIL PARÇALANMAYA GÖRE YANMA ÜRÜNLERİNİN HESABI
8510 KH2O=10^(59.787-0.114581*TT + 1.0330065E-04*TT^2 - 4.910366E-08*TT^3 +
      1.1773E-11*TT^4-1.1208E-15TT^5)
8520 KCO2=10^(68.05-0.13391565*TT + 0.00012132033*TT^2 - 5.778299E-08*TT^3 +
      1.387067E-11*TT^4 - 1.32133E-15*TT^5)
8530 VUR=KAPA*(PSI + 0.5*KKY(2) + TETA * LAMDA)
8540 YO2 = KAPA * SIGMA * (LAMBDA-1)/VUR
8550 IF YO2>=0 GOTO 8565
8560 YO2=1E-10
8565 YO2P = YO2*P2
8570 KYO2P = SQR(YO2P)
8580 BETA2 = (KKY(2) + 2*(LAMBDA + TETA)) / (KH2O*KYO2P + 1)
8590 ALFA2=1/(KCO2*YO2P + 1)
8600 YO2SON=KAPA*(SIGMA*(LAMBDA-1) + 0.5*ALFA2 + 0.25*BETA2)/(VUR +
      KAPA*(0.5*ALFA2 + 0.25*BETA2))
8610 IF ABS((YO2SON-YO2)/YO2SON)<=0.001 THEN GOTO 8630
8620 YO2=YO2SON : GOTO 8565
8630 ALFA1=KKY(1) - ALFA2
8640 BETA1=KKY(2) - BETA2
8650 REM VUR=RUTUBETLİ KEY ÜRÜNLERİNİN TOPLAM HACMİ
8660 VUR=VUR+KAPA*(0.5*ALFA2 + 0.25*BETA2)
8670 YU(1)=ALFA1*KAPA/VUR
8680 YU(2)=ALFA2*KAPA/VUR
8690 YU(3)=(0.5*BETA1 + LAMBDA*TETA)*KAPA/VUR
8700 YU(4)=0.5*BETA2*KAPA/VUR
8710 YU(5)=(SIGMA*(LAMBDA-1) + 0.5*ALFA2 +0.25BETA2)*KAPA/VUR

```

```

8720 YU(6)=(0.5*KKY(4) + ITA*LAMBDA)*KAPA/VUR
8730 YU(7)=KKY(5)*KAPA/VUR
9000 REM ÇIKIŞ VERİLERİNİN YAZILMASI
9010 REM SIVI YAKITIN KAPALI FORMÜLÜ
9020 PRINT "SIVI YAKITIN KAPALI FORMÜLÜ"
9030 FOR I=1 TO 5
9040 PRINT SY$(I): SY(I):
9050 NEXT I : PRINT
9060 PRINT "GAZ YAKITIN KAPALI FORMÜLÜ"
9070 FOR I=1 TO 5
9080 PRINT GY$(I): GY(I):
9090 NEXT I : PRINT
9100 REM DOĞALGAZ KULLANIM ORANI
9110 PRINT "DOĞAL GAZ KULLANIM ORANI:"
9120 PRINT "      GYO=" GYO
9130 REM KARMA YAKITIN KAPALI FORMÜLÜ
9140 PRINT "KARMA YAKITIN KAPALI FORMÜLÜ"
9150 FOR I=1 TO 5
9160 PRINT KY$(I): KY(I):
9170 NEXT I : PRINT
9175 REM HAVA FAZLALIK KATSAYISI
9180 PRINT " HAVA FAZLALIK KATSAYISI"
9190 PRINT "      HFK=" LAMBDA
9195 REM DENGİ ŞARTLARI
9200 PRINT "DENGİ ŞARTLARI"
9210 PRINT "T="TDENGİ "K , P="PDENGİ " kpa"
9220 REM ÜRÜNLERİN MOL KESİRLERİ
9230 PRINT "ÜRÜNLERİN MOL KESİRLERİ:"
9240 FOR I=1 TO 7
9250 PRINT "      ": YSU$(I): YU(I):
9260 NEXT I
9270 END

```

ÖZGEÇMİŞ

1973 Yılında Mardin’de doğdu. İlk ve ortaokulu Bursa’da bitirdikten sonra 1990 yılında Bursa Çelebi Mehmet Lisesinden mezun oldu. Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesinden 1994 yılında Makine Mühendisi olarak mezun oldu. Bir süre İ.E.T.T. Genel Müdürlüğünde Makine Mühendisi olarak çalıştıktan sonra 1996 yılında Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesinde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. Halen aynı fakültenin Otomotiv Eğitimi Ana Bilim Dalında görevine devam etmektedir. Evli ve bir çocuk babasıdır.

