

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KADEMELİ DOLGULU BİR BENZİNLİ MOTORDA DOĞALGAZ
KULLANIMININ MOTOR PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ömer Faruk AKÇİL

Anabilim Dalı: Otomotiv Mühendisliği
Programı: Taşıt Tahrik ve Güç Sistemleri

Danışman : Prof. Dr. Cengiz ÖNER
İkinci Danışman : Arş. Gör. Dr. Müjdat FIRAT

EYLÜL-2018

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KADEMELİ DOLGULU BİR BENZİNLİ MOTORDA DOĞALGAZ KULLANIMININ
MOTOR PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ömer Faruk AKÇİL
(141136105)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 07 Ağustos 2018
Tezin Savunulduğu Tarih: 10 Eylül 2018

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Cengiz ÖNER (F.Ü) 

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Yasin VAROL (F.Ü) 

Doç. Dr. İbrahim CAN (C.Ü) 

EYLÜL-2018

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması kapsamında, kademeli dolgulu bir benzinli motorda doğalgaz yanması sayısal yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Motor performanslarının artırılması ve emisyonların düşürülmesi hedefiyle gerçekleştirilen kademeli dolgu kullanımında, alternatif bir yakıt olarak kullanımı artan doğalgaz kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçların buji ateşlemeli motorların geliştirilmesine katkı sağlamasını ve gelecek çalışmalara referans olmasını temenni ederim.

Tez çalışmamda yol göstericiliğini, anlayışını ve desteğini benden esirgemeyen ve bana ufuk katan danışman hocam Prof. Dr. Cengiz ÖNER'e, tez çalışmam boyunca birikimini esirgemeyen ve her konuda danışmanlığımı üstlenen ikinci danışmanım Arş. Gör. Dr. Müjdat FIRAT hocama, aynı şekilde tüm fedakârlığı ile her türlü desteğini sağlayan Arş. Gör. Mutlu OKÇU' ya ve her zaman maddi ve manevi destekleri ile yanımda olan çok değerli aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ömer Faruk AKÇİL

Elazığ - 2018

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	IV
SUMMARY.....	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ.....	VII
KISALTMALAR LİSTESİ	VIII
SEMBOLLER LİSTESİ	IX
1. GİRİŞ	1
1.1. Alternatif Yakıtlar	6
1.2. Doğalgaz ve Motorlarda Kullanımı	8
1.3. Doğalgazın Yanma Prosesi	10
1.4. Kademeli Dolgulu Benzinli Motorlar	12
2. MATERYAL VE METOT	22
2.1. Yönetici Denklemler.....	23
2.1.1. Türbülans Modeli.....	25
2.1.2. Kimyasal Kinetik Formülasyonu.....	26
2.2. Modelin Tanımı ve Çalışma Parametreleri	27
3. BULGULAR.....	35
3.1 Her Bir Kademede Püskürtülen Yakıt Miktarının Motor Performansı ve Emisyon Oluşumuna Etkisi.....	35
3.2 İkinci Püskürtme Zamanının Motor Performansı ve Emisyon Oluşumuna Etkisi	45
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	63
5. ÖNERİLER.....	65
KAYNAKLAR	66
ÖZGEÇMİŞ	70

ÖZET

Dünya nüfusunun artışına bağlı olarak giderek artan araç sayısı ve bu araçların büyük kısmının fosil kaynaklı yakıtlara bağlı olması çevre için ve dünyamızın geleceği için bir tehdit oluşturmaktadır. Bundan dolayı alternatif yakıtların kullanımı ve motor verimini artırmaya yönelik çalışmalar bilim insanlarının ilgisini çeken bir araştırma alanını oluşturmaktadır. Alternatif yakıtlar arasında doğalgazın bu tez çalışmasında seçilmesinin nedeni oktan sayısının yüksek olması, çevreci olması ve benzinli motorlarda herhangi bir modifikasyona gerek duyulmadan kullanılması gibi öne çıkan özellikleridir. Motor verimini artırmaya yönelik çalışmalarda ise yakıtın silindir içerisine gönderim şekli önemli bir parametredir. Yakıtın silindir içerisine kademeli şekilde püskürtülmesi ile yanma verimini iyileştirmek mümkündür.

Bu tez çalışması kapsamında kademeli dolgulu bir benzinli motorda doğalgaz kullanımı üç boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı olan ANSYS Forte 19'da incelenmiştir. Model olarak gerçeğe en yakın sonuç vermesi adına tam port modeli tasarlanmış, enjektörden püskürtülecek yakıt olarak ise doğalgazın büyük çoğunluğunu oluşturan CH₄ seçilmiştir. İnceleme iki aşamada yapılmış olup ilk aşamada her bir kademede püskürtülecek yakıtın miktarı, ikinci aşamada ise ikinci kademede püskürtülecek yakıtın zamanlaması incelenmiştir. Yapılan inceleme sonucunda ikinci kademede az miktarda yakıtın püskürtülmesi ve ikinci kademenin zamanlamasının geç olmasının motor performansına, yanma verimine ve emisyonlara olumlu bir etkisi olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kademeli Dalgulu Motorlar, CNG, Doğalgaz, ANSYS Forte, HAD, Yanma, Kirletici Emisyonlar

SUMMARY

Investigation of the effect on engine performance of using natural gas in a stratified charge gasoline engine

The increasing number of vehicles due to the increase in the world population and the fact that most of these vehicles are dependent on fossil fuels poses a threat to the environment and the future of our world. Therefore, the use of alternative fuels and efforts to improve engine efficiency constitute an area of research that is of interest to scientists. Among the alternative fuels, the selection of natural gas in this thesis is a high number of octane number, it is environment-friendly and it is used in petrol engines without any modification. In studies to improve engine efficiency, the shape of the fuel to the cylinder is an important parameter. It is possible to improve the combustion efficiency by spraying the fuel gradually into the cylinder.

Within the scope of this thesis study, the use of natural gas with stratified charged gasoline engine was investigated in ANSYS Forte 19, which 3D computational fluid dynamics software. As a model, a full port model has been designed to give the closest result, and CH₄ has been selected as the fuel to be sprayed from the injector, which constitutes the majority of natural gas. In the first part of the study, the amount of fuel to be sprayed at each stage was investigated. In the second part, the timing of the fuel to be sprayed in the second stage is examined. As a result of the investigation, it was seen that spraying a small amount of fuel in the second stage and delaying the timing of the second stage positively effect engine performance, combustion efficiency and emissions.

Keywords: Stratified Charge Engine, CNG, Natural Gas, ANSYS Forte, CFD, Combustion, Pollutant Emissions

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Pasif İkincil Odalı Bir Yanma Odasının Şematik Görünümü [30].	13
Şekil 1.2. Bir Benzinli Motorun Bölünmüş Yanma Odası [31].	14
Şekil 1.3. Ricardo Tarafından Geliştirilen Motorun Patent Çizimleri [34].	16
Şekil 1.4. Rusya Tarafından Geliştirilen Gaz-52 Motorunun Patent Çizimleri [36].	17
Şekil 1.5. IFP Kademeli Dolgu Teşkilatı [35].	18
Şekil 1.6. Honda Kademeli dolgu motoru [39].	19
Şekil 1.7. Schalamann Kademeli Dolgulu Motor [39].	20
Şekil 1.8. Texaco Kademeli Dolgulu Motorun Çalışma Prensibi [41].	20
Şekil 2.1. ANSYS Forte iş akışı [42].	23
Şekil 2.2. Modelin geometrik yapısı.	28
Şekil 2.3. Modelin ağ yapısı.	29
Şekil 2.4. Homojen ve kademeli dolgu şartları için belirlenen enjeksiyon zamanlaması.	34
Şekil 3.1. Silindir içi basıncın farklı kademelerde püskürtülen yakıt miktarıyla değişimi.	36
Şekil 3.2. Isı salınım oranının farklı kademelerde püskürtülen yakıt miktarıyla değişimi.	37
Şekil 3.3. Silindir içi maksimum sıcaklığın farklı kademelerde püskürtülen yakıt miktarıyla değişimi.	38
Şekil 3.4. CO ve CO ₂ 'nin farklı kademelerde püskürtülen yakıt miktarıyla değişimi.	39
Şekil 3.5. NO emisyonunun farklı kademelerde püskürtülen yakıt miktarıyla değişimi.	40
Şekil 3.6. Yanmamış hidrokarbon emisyonunun farklı kademelerde püskürtülen yakıt miktarıyla değişimi.	41
Şekil 3.7. OH kütle oranının farklı kademelerde püskürtülen yakıt miktarıyla değişimi.	42
Şekil 3.8. C ₂ H ₂ kütle oranının farklı kademelerde püskürtülen yakıt miktarıyla değişimi.	43
Şekil 3.9. Yanma veriminin farklı kademelerde püskürtülen yakıt miktarıyla değişimi.	44
Şekil 3.10. Silindir içi basıncın farklı püskürtme zamanlamalarına bağlı olarak değişimi.	45
Şekil 3.11. Isı salınım oranının farklı püskürtme zamanlamalarına bağlı olarak değişimi.	46
Şekil 3.12. Silindir içi maksimum sıcaklığın farklı püskürtme zamanlamalarına bağlı olarak değişimi.	47
Şekil 3.13. CO ve CO ₂ 'nin farklı püskürtme zamanlamalarına bağlı olarak değişimi.	48
Şekil 3.14. NO emisyonunun farklı püskürtme zamanlamalarına bağlı olarak değişimi.	49
Şekil 3.15. Yanmamış hidrokarbon emisyonunun farklı püskürtme zamanlamalarına bağlı olarak değişimi.	50
Şekil 3.16. OH kütle oranının farklı püskürtme zamanlamalarına bağlı olarak değişimi.	51
Şekil 3.17. C ₂ H ₂ kütle oranının farklı püskürtme zamanlamalarına bağlı olarak değişimi.	52
Şekil 3.18. Yanma veriminin farklı püskürtme zamanlamalarına bağlı olarak değişimi.	53
Şekil 3.19. Farklı dolgu şartlarında -30KA için sıcaklık dağılımları.	56
Şekil 3.20. Farklı dolgu şartlarında -20KA için sıcaklık dağılımları.	57
Şekil 3.21. Farklı dolgu şartlarında -10KA için sıcaklık dağılımları.	59
Şekil 3.22. Farklı dolgu şartlarında 0KA için sıcaklık dağılımları.	61
Şekil 3.23. Farklı dolgu şartlarında 10KA için sıcaklık dağılımları.	62

TABLÖLER LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Sayısal çalışmada kullanılan motorun teknik özellikleri	29
Tablo 2.2. CH ₄ 'ün termofiziksel ve termodinamik özellikleri.....	30
Tablo 2.3. CH ₄ enjeksiyon için teknik şartlar	31
Tablo 2.4. Sınır şartları	31
Tablo 2.5. Farklı yakıt oranları için çalışma parametreleri.....	32
Tablo 2.6. Farklı enjeksiyon zamanlamaları ve çalışma şartları.....	34



KISALTMALAR LİSTESİ

A.Ö.N.	: Alt Ölü Nokta
AFR	: Hava Yakıt Oranı, Air to Fuel Ratio
C₂H₆	: Etan'ın Moleküler Formülü
C₃H₈	: Propan'ın Moleküler Formülü
C₄H₁₀	: Bütan'ın Moleküler Formülü
C₅H₁₂	: Pentan'ın Moleküler Formülü
C₆H₁₄	: Hekzan'ın Moleküler Formülü
CH₄	: Metan'ın Moleküler Formülü
CNG	: Compressed Natural Gas (Sıkıştırılmış Doğalgaz)
CO	: Karbonmonoksit'in Moleküler Formülü
CO₂	: Karbondioksit'in Moleküler Formülü
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HD	: Homojen Dolgulu
EGR	: Egzoz Geri Dönüşümü, Exhaust Gas Recirculation
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
ICE	: İçten Yanmalı Motor, Internal Combustion Engine
KMA	: Krank Mili Açısı
KD	: Kademeli Dolgulu
NHR	: Ortaya Çıkan Isı, Net Heat Release
ÜÖN	: Üst Ölü Nokta
ÜÖNÖ	: Üst Ölü Noktadan Önce
PM	: Partikül Madde, Particulate Matter
TDC	: Üst Ölü Nokta, Top Dead Center
TG	: Tutuşma Gecikmesi
UHC	: Yanmamış Hidrokarbonlar, Unburned Hydrocarbons

SEMBOLLER LİSTESİ

ρ	: Yoğunluk
λ	: Hava fazlalık katsayısı
k	: Tür indeksini
K	: Türlerin toplam sayısı
u	: Akış hız vektörü
$\tilde{u}$	: Ortalama akış hız vektörü
$\bar{F}^s$	: Sprey sonucu oluşan birim hacim başına momentum kazanım oranı
$\bar{\sigma}$	: Viskoz gerilme tensörü
$\dot{Q}^c$	: Isı yayılımını
$\dot{Q}^s$	: Sprey etkileşimi
$\bar{I}$	: Özgül iç enerji
$\bar{\varepsilon}$	: Kinetik enerji yitim oranı
J	: Isı akısı
λ	: Isı iletim katsayısı
$\tilde{h}_k$	: Türlerin özgül entalpi
R_U	: Üniversal gaz
W_k	: İse türlerin moleküler ağırlığı
Γ	: Reynolds stres tensörü
v_T	: Türbülans kinematik viskozitesi
$\tilde{k}$	: Türbülans kinetik enerjisi
ϕ	: Türbülans akış terimi
v_T	: Türbülans termal iletkenlik
α_T	: Termal yayılma
q_i	: Reaksiyonun ilerleme oranı
h_f^0	: Türk oluşum ısısı
$\dot{Q}_c$	: Isı salınımı terimi

1. GİRİŞ

Dünya nüfusun artmasıyla enerji ihtiyacı da gün geçtikçe artmaktadır. Bu enerji ihtiyacının büyük çoğunluğunu ulaşım sektörü oluşturmaktadır. Nüfusun artmasına bağlı olarak trafikteki araç sayısı da artmaktadır. İçten yanmalı motora sahip olan araçlar fonksiyonlarını yerine getirebilmesi için ihtiyaç duyduğu enerjiyi fosil kaynaklı yakıtlardan almaktadır. Fosil kaynaklı yakıtlar tükenebilir enerji kaynakları sınıfına girdiğinden dolayı araçlarda alternatif yakıtların kullanımı ve motor verimini artırmaya yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Bunun yanı sıra egzozdan atılan gazların insan sağlığına ve ekolojik çevreye olan zararları ve bu alanda ülkelerin çeşitli yaptırımları motor teknolojisinin gelişmesinde önemli etkenlerdir. Otomobillerin kullanım süreleri göz önüne alındığında büyük bir kısmı şehir içi trafiğinde geçmektedir. Şehir içi hız sınırlamaları, trafiğe bağlı olarak dur kalk sürelerinin uzun olması yoğunlukla araçların kısmi yükte çalışmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı motor üreticileri kısmi yüklerde motorların daha az yakıt tüketmesini ve egzoz emisyonlarının bu yüklerde düşük seviyelerde olmasını istemektedirler.

İçten yanmalı motorlar benzin ve dizel ile çalışmaya uygun halde imal edilmesine rağmen çeşitli motor modifikasyonları ile birlikte LPG ve CNG gibi alternatif yakıtlarla çalışabilir hale gelmektedir. Alternatif yakıtların kullanıcılar tarafından tercih edilmesinin en büyük nedeni yakıt tüketiminin düşük olmasıdır. Ayrıca ülkelerin ekonomik nedenlerden dolayı petrole bağımlılıklarını azaltmayı istemesi ve buna bağlı olarak cari açıklarını düşürmeyi amaçlamaları nedeniyle alternatif yakıtların araştırılması ve geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Özellikle ülkemizde yakıt fiyatlarının yüksek olması, üretilen petrolün iç ihtiyacı karşılamaya yetersiz kalmasından dolayı büyük bir kısmını ithalat yoluyla temin etmesi düşünüldüğünde alternatif yakıtlar ülkemiz için ayrı bir öneme sahiptir. Ülkemizde benzinli araç kullanıcılarının büyük bir kısmı LPG dönüşüm sistemini tercih etmektedir. CNG ise henüz ülkemizde çok yaygın bir seviyeye ulaşmamıştır. Fakat gelecek vaat eden önemli bir alternatif yakıt kaynağıdır. CNG'nin yüksek oktan sayısına sahip olması, çevreci bir yakıt olması, temiz bir yanma sağlaması gibi önemli avantajları nedeniyle yanma karakteristiklerinin incelenmesi, emisyon değerleri ve motor performansına etkileri incelenmeye değer görülmüştür.

Benzinli motorlar, hava-yakıt oluşturma yöntemine göre karbüratörlü ve enjeksiyonlu, karışım yapısına göre ise homojen dolgulu ve kademeli dolgulu olarak ikiye ayrılır. Karbüratörlü motorlar, silindir içerisinde istenilen karışım elde edilemediğinden dolayı yerini enjeksiyonlu sistemlere bırakmıştır. Enjeksiyonlu sistemlerde yakıt emilen havanın içerisine püskürtülmektedir. Sistem tamamen elektronik kontrollü olup, yapısında genel olarak elektronik kontrol nitesi, sensörler, enjektörler, enjektörlerin bağı olduğı yakıt manifoldu, yakıt regülatörü, yakıt boruları ve elektrikli yakıt pompası bulunmaktadır. Sensörlerden gelen veriler elektronik kontrol ünitesinde işlenerek silindir içerisine istenilen oranda ve istenilen zamanda yakıt püskürtülmesi sağılanmaktadır. Bunun sonucunda enjeksiyonlu sistemler karbüratörlü sistemlere göre motor performansı daha yüksek, yakıt tüketimi ve egzoz emisyonları daha düşük seviyede olmaktadır.

Son dönemlerde literatürde motor performansını artırmak için yakıtlar ve karışım oluşumunun yanı sıra dolgu sistemi yapısıyla ilgilide pek çok araştırmaya rastlanmaktadır. Bu sistemler yapısal olarak homojen dolgu sistemi ve kademeli dolgu sistemi olmak üzere ikiye ayrılır. Homojen dolgu sisteminde yakıt hava ile emme manifoldunda karışarak silindir içerisine eşit bir şekilde yayılması amaçlanır. Günümüzde birçok benzinli motorda homojen dolgulu sistem kullanılmaktadır. Kademeli dolgulu sistemlerde ise buji bölgesinde stokiyoimetrik karışım, bujiden uzaklaşıkça silindirin diğerk bölgelerinde fakir karışım olması amaçlanır. Toplam hava fazlalık katsayısı fakir olan bölgededir. Bu sayede kademeli dolgulu motorlar aynı dizel motorlarındaki gibi karışımın kalitesi yk ayarına göre kısmen gaz kelebeğıne bağı olmaksızın karışımın içeriğı ile ayarlanabilir. Bunun sonucunda dolgu değışimi sırasında gaz kelebeğinden kaynaklanan verim kayıplarının önüne geçerek, motorun kısmi yüklerde daha verimli olması sağılanır. Tüm bu sebeplerden dolayı dolgu sistemleri ve alternatif yakıtlar bilim insanları tarafından araştırılmaya değerk bulunmuştur. Son yıllarda direk enjeksiyonlu benzinli motorlar, kademeli dolgulu motorlar ve bu motorlarda alternatif yakıt kullanımı üzerine birçok sayısal ve deneysel çalışma yapılmaya başlanmıştır. Bu çalışmalardan birisinde LPG ile çalışan benzinli bir motorda kademeli dolgu uygulanmasını Can [1] tarafından incelenmiştir. alışmasını deneysel ortamda yapıp, benzinli bir motoru alternatif yakıtlardan olan LPG ile çalışır hale getirdikten sonra motor silindir kapağı, supap ve supap yuvaları ile karışım rampasında gerekli modifikasyonları yaparak, silindir içerisine alınan karışımın iki kanaldan içeriye kademeli olarak alınması sağılanmıştır. Bu sayede havanın bir kısmını buji bölgesine, kalan kısmını silindirin içerisine göndermiştir.

Buji bölgesine giden hava yakıt karışımının zengin veya stokiyometrik, diğer bölgelere giden karışımın fakir olması sağlanarak motorun $\lambda=1,35$ civarında bir fakir karışımla performans düşüşü olmaksızın çalışması sağlanmıştır. Elde ettiği sonuçlara göre homojen dolgulu LPG'li motor ile kademeli dolgulu motorun hemen hemen aynı motor güç ve performanslarını vermesine karşın kademeli dolgulu motorun özgül yakıt tüketiminde %20'ye kadar düşüş olduğunu gözlemlemiştir. Ayrıca yüksek motor devirlerinde kademeli dolgulu motorun efektif veriminin %15 arttığını belirtmiştir.

Mehdiyev ve arkadaşları [2] yapmış oldukları çalışmada, kademeli dolgulu benzinli bir motorda iki aşamada yanma mekanizması geliştirmişlerdir. Çalışmalarını deneysel ortamda TOFAŞ firmasıyla ortaklaşa yürütmüş olup, 1.6 litrelik benzinli motorda çeşitli modernizasyonlar yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre çift döngülü yanma mekanizmasının motor performansını ve verimini artırıp, egzoz emisyonlarını önemli ölçüde düşürülmesini sağlamışlardır.

Zhao ve arkadaşları [3] yapmış oldukları çalışmada otomotiv ateşleme sistemlerini incelemişler ve kademeli dolgu hakkında çalışma yapmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada dört zamanlı dört silindir bir motorda emme supabında modifikasyona giderek silindir içerisine iki farklı yoldan karışım almayı başarmışlardır. Karışımlardan bir tanesinde sadece hava geçerken diğerinden hava/yakıt karışımı geçmektedir. Bu sayede silindir içerisinde zengin ve fakir karışım bölgeleri oluşturmayı başarmışlardır. Fakir karışımın olduğu bölgelere buji ekleyerek kısmi yüklerde de motorun fakir karışımla çalışması sağlanmıştır. Böylece yakıt tüketiminde gözle görülür düşüş sağlanmış ayrıca düşük oktanlı benzinle çalışmada vuruntu meyilinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Kurtlar ve arkadaşları [4] yapmış oldukları çalışmada benzinli motorlarda kısmi yüklerdeki yakıt tüketimini azaltmak için fakir karışimli kademeli dolgulu motoru incelemişlerdir. Çalışmalarında mevcut kademeli dolgulu motorları kıyaslamışlar, avantajlarını ve dezavantajlarını belirtmişlerdir. Sonuç olarak; Mitshubishi'nin direkt yanma odasına yakıt püskürterek yapmış olduğu kademeli dolgulu motorunda yakıt tüketiminin %35 oranında iyileşme olduğunu, çok supaplı kademeli dolgulu motorların kullanımı ile yakıt tüketiminin ise %5-13 oranında azalma meydana geleceğini belirtmişlerdir.

Zeng ve arkadaşları [5] kademeli dolgulu direk enjeksiyonlu buji ateşlemeli bir motorda silindir içi akış ve sprey etkileşimlerini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel

çalışmada tek silindirli dört zamanlı optik bir motor kullanılmış ve parçacık hızı görüntüleme tekniği (PIV) ile yüksek çözünürlüklü görüntüleme sağlanmıştır. Yakıt olarak E70 yakıtı kullanılıp ateşleme zamanı ve enjeksiyon detaylı olarak incelenmiştir. Silindir içerisine akışın doğru yönlendirilmesinin enjeksiyon çarpışmasını hızlandığı, kinetik enerjiyi artırdığı, buna bağlı olarak da yanmayı hızlandığı ve daha uygun şekilde tamamladığı görülmüştür. Yakıtın doğru yönlendirilmediği durumlarda özellikle yanma başlangıcında düşük akış enerjisi ve enjeksiyon etkileşimi gözlenmiştir.

Duan ve arkadaşları [6] direk enjeksiyonlu benzinli bir motorda yakıt olarak etanol-benzin karışımı (E10) durumunda tek püskürtme ve iki püskürtme stratejisinin termodinamik sürece ve motor performansına etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Tek püskürtme şartlarında üst ölü noktadan 300KMA önce başlayıp 18.5KMA süren bir enjeksiyon zamanlaması seçilmiştir. Daha sonra altı farklı enjeksiyon zamanlamasında birinci enjeksiyonun yeri değişmeksizin üst ölü noktaya daha yakın farklı enjeksiyon zamanlamaları ikinci enjeksiyon olarak seçilmiştir. Deneysel sistemde elektrikli bir dinamometre kullanılmış yakıt tüketimi ve yakıt sıcaklığı kontrol edilmiş ve elde edilen tüm veriler yanma analiz sistemine aktararak motor verilerine çevrilmiştir. Çalışma sonucunda silindir basıncı ve ısı salınımının tek ve ikili enjeksiyon stratejisinden etkilendiği görülmüştür. Ayrıca HC ve CO emisyonlarının ikili püskürtme durumunda azaldığı, fakat bu azalmanın ikinci püskürtmenin zamanına bağlı olduğu vurgulanmıştır.

Costa ve arkadaşları [7] kademeli dolgu direk enjeksiyonlu benzinli bir motorda yanma performansının ve emisyon oluşumunu deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmada optik bir motor ve yüksek görüntüleme teknikleri kullanarak silindir içerisinden deneysel veriler alınmıştır. Sayısal çalışmada ise 3 boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği kodu olan AVL Fire kullanılmıştır. Çalışma sonucunda yanma süreci ve ısı salınımları deneysel ve sayısal bulgular ile karşılaştırılmış ve ikinci enjeksiyonun zamanının yanma verimi ve emisyon oluşumlarına etkili olduğu gösterilmiştir.

Oh ve Bae [8] yaptıkları çalışmada enjeksiyon zamanının püskürtme ve yanma karakteristiklerine etkilerine direk enjeksiyonlu buji ateşlemeli bir motorda kademeli dolgu şartları altında incelemişlerdir. Çalışma deneysel olarak gerçekleştirilmiş ve deneysel yöntemde düzlemsel lazer kaynaklı floresan yöntemi kullanılmıştır. Bu şekilde yüksek görüntüleme teknikleri ile silindir içi sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmada iki farklı ortam basıncı ve üç farklı enjeksiyon basıncı kademeli dolgu şartları altında denenmiştir. Erken

enjeksiyon zamanlamasında parlak olmayan alev yapısı ve düşük yanma verimi gözlenirken, geç enjeksiyon zamanlamasında parlak alev yapıları görülmüştür. Bunun yanında geç enjeksiyon zamanlamalarında yerel olarak artan zengin karışım bölgelerinden dolayı is emisyonları ve tamamlanmamış yanma ürünlerinde artış görülmüştür. Ayrıca NO_x emisyonunun enjeksiyon zamanlamasına doğrudan bağlı olduğu gösterilmiştir.

Choi ve arkadaşları [9] yaptıkları çalışmada CNG kullanılan direk enjeksiyonlu bir motorda yakıt enjeksiyonu ve yanma sürecini modellemişlerdir. Araştırmada tek silindirli dört zamanlı bir benzinli motor kullanılmıştır. Çalışmanın deneysel kısmında düzlemsel lazer kaynaklı floresan yöntemi kullanılmış, sayısal modelleme ise KIVA 3V sayısal yazılımında gerçekleştirilmiştir. Farklı enjeksiyon basıncı ve farklı enjeksiyon zamanlamasının incelendiği araştırmada, enjeksiyon basıncının ortalama efektif basıncı ciddi oranda etkilemediği, enjeksiyon zamanlamasının ise önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Ayrıca enjeksiyon zamanlamasının karışımın homojenliğine, silindir içi basınca ve kısmen yakıt tüketimine etki ettiği gözlenmiştir.

Aljamali ve arkadaşları [10] yaptıkları çalışmada kademeli dolgulu bir motorda enjeksiyon zamanlamasının motor performansı ve emisyonlar üzerine etkisini incelemişlerdir. Deneysel olarak yürütülen çalışmada yakıt olarak CNG kullanılmışlardır. Enjeksiyon sonunun referans alındığı çalışmada dört farklı enjeksiyon zamanlaması (120KMA, 180KMA, 300KMA, 360KMA ÜÖNÖ) kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar tork, özgül yakıt tüketimi, ortalama efektif basınç, CO, CO₂, NO ve HC başta olmak üzere grafikler halinde sunulmuştur. Çalışmada en yüksek güç, tork, ortalama efektif basınç ve en düşük özgül yakıt tüketimi 120KMA enjeksiyon zamanlamasında elde edilmiştir. Ayrıca en düşük NO ve HC emisyonları 120KMA enjeksiyon zamanlamasında elde edilirken, CO₂ emisyonu devir sayısına bağlı olarak artış göstermiştir.

Yakıt olarak CNG kullanılan bir motorda, CNG'nin direk enjeksiyonu ve port enjeksiyonun volümetrik verim ve yanma karakteristiklerine etkileri Song ve arkadaşları [11] tarafından araştırılmıştır. Çalışma deneysel olarak gerçekleştirilip, giriş şartlarının detaylandırılması için bir boyutlu simülasyon kodu olan AMESim kullanılmıştır. Çalışmada üst ölü noktadan önce 120KMA, 210KMA, 270KMA ve 330KMA olmak üzere dört farklı enjeksiyon zamanlaması çalışılmıştır. Araştırmada elde edilen sonuçlara göre erken yakıt enjeksiyonu durumunda direk ve port enjeksiyonun volümetrik verimi etkilemediği görülmüştür. Geciken enjeksiyon zamanlamalarında ise özellikle direk enjeksiyon kullanımı

durumunda volümetrik verimin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca geciken enjeksiyon zamanlamalarında artan volümetrik verim ve yanma hızına bağlı olarak en iyi tork değerleri elde edilmiştir.

Sankesh ve arkadaşları [12] doğalgazın porttan enjekte edilmesi durumunda volümetrik verimin ve torkun düşmesi problemini göz önünde bulundurarak direk enjeksiyon durumunu ve bu enjeksiyonun zamanlamasını araştırmışlardır. Çalışmada tek silindirli dört stroklu benzinli bir motor kullanılmış ve yakıt olarak doğalgaz seçilmiştir. Çalışmada farklı enjeksiyon basınçları kullanılırken enjeksiyon zamanlaması erken ve geç olmak üzere iki ana kısımda incelenmiştir. Araştırmada emme supabı kapanmadan ve kapandıktan sonra yapılan enjeksiyonun yanma oranını önemli ölçüde etkilediği gösterilmiştir. Ayrıca geciktirilmiş enjeksiyon zamanlamasının volümetrik verimi arttırdığı vurgulanmıştır.

Liu ve Dumitrescu [13] yaptıkları çalışmada buji ateşlemeli bir motorda doğalgaz kullanımını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada tek silindirli dört zamanlı benzinli bir motor kullanılmış ve sayısal çalışma 3 boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği kodu olan ANSYS Forte aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve sayısal çalışma farklı ateşleme zamanlarında, farklı eşdeğerlik oranlarında ve farklı motor devirlerinde yürütülmüştür. Çalışmada farklı gaz yüzdelere sahip beş farklı gaz kompozisyonu yakıt olarak kullanılmıştır. Araştırma sonunda düşük metan oranlarının basıncı artırdığı görülmüştür. Ayrıca yüksek metan oranlarının düşük NO_x emisyonu sağladığı ama yanmamış HC emisyonları artırdığı gösterilmiştir.

1.1. Alternatif Yakıtlar

21. yüzyılda giderek artan araç sayısında düşünüldüğünde, yeni petrol yatakları bulunmadığı takdirde ham petrol ve petrol ürünlerini bulmanın zorlaşacağı ve pahalılaşacağı düşünülmektedir. Motorların yakıt ekonomisinin geçmişten bu yana büyük ölçüde iyileşmiş olması ve muhtemelen iyileşmeye devam edecek olmasına rağmen, yapılan araştırmalar gelecek on yıllarda büyük bir yakıt talebinin olacağını göstermektedir. Bu nedenle benzinin az bulunan pahalı bir yakıt olması muhtemeldir. Gelecek yıllar içerisinde alternatif yakıtların bulunabilirliği ve kullanımının daha yaygın hale gelmesi beklenmektedir.

Benzin ve dizel yakıtı dışında içten yanmalı motorlarda alternatif yakıtlar gelecek için umut vericidir. Günümüzde alternatif yakıtlar çeşitli şekillerde taşıtlar haricinde

kullanılan içten yanmalı motorlarda da aktif olarak kullanılmaktadır. Örneğin doğalgaz boru hatları üzerindeki birçok pompalama istasyonunda pompaları çalıştırmak için kullanılan motorlarda yakıt olarak, boru hattından geçen doğalgaz kullanılır. Bu, aksi durumda ortaya çıkacak olan ve çoğu ıssız alanlarda kurulu olan istasyonlara yakıt taşıma problemini de çözmektedir. Bazı büyük strok hacimli motorlar özellikle bu istasyonlar için geliştirilmiştir. Bu motorlar V-tip motora benzer şekilde, aynı motor bloğu içerisinde, aynı krank miline bağlı bir sıra motor silindiri ve bir sıra kompresör silindiri içermektedir. Bunun yanı sıra çift yakıtlı bazı dizel motorları piyasaya çıkmaya başlamıştır. Bu motorlar yakıt olarak metanol ya da doğalgaz ve bu yakıtları tutuşturmak amacıyla az miktarda püskürtülen dizel yakıtı kullanırlar.

İçten yanmalı motorlar için alternatif yakıtların geliştirilmesine yönelten bir sebep de benzinli motorların emisyon problemleridir. Diğer hava kirletici kaynaklarla birlikte, çok büyük miktardaki içten yanmalı motora sahip taşıtlar dünyanın hava kirliliği problemin ana kaynaklarından birini oluşturmaktadır. Otomobil motorlarından salınan egzoz emisyonunun azaltılması konusunda çok önemli gelişmeler elde edilmiştir. Eğer belli bir zaman periyodu içerisinde emisyonlarda %30 azalma ve yine bu süreçte otomobil sayısında da %30 artış gerçekleşmiş ise bu durumda net bir kazanç söz konusu değildir. Doğrusu, problemin görünür olduğu 1950'lerden bu yana otomobillerin egzoz emisyonlarında gerçekleşen net iyileşme %95'in üzerindedir [14]. Bununla birlikte, sürekli artan otomobil sayısı nedeniyle ilave iyileşmeler sağlanması gerekmektedir.

Başta Amerika Birleşik Devletleri ve diğer sanayileşmiş ülkelerde alternatif yakıtlar geliştirilmesinin emisyonlar haricinde bir diğer nedeni ise büyük petrol sahalarını kontrol etmekte olan diğer ülkelere büyük miktarlarda ham petrol ithal etmek zorunda kalınmasıdır. Son yıllarda, Amerika Birleşik Devletleri'nin dış ticaret açığının yaklaşık üçte birlik kadar bir kısmı ham petrol satın alımlarından kaynaklanmaktadır [14]. Ülkemizde de olduğu gibi petrolde dışa bağımlı ülkelerin dış ticaret dengesini sağlaması açısından alternatif yakıtlar önemli bir etkidir.

Hemen hemen bütün alternatif yakıt testlerinde kullanılan motorlar, orijinal olarak benzinle çalışacak şekilde tasarlanmış motorlar olup, daha sonra alternatif yakıtlarla çalışacak şekilde modifiye edilmiş motorlar olduğunu unutmamak gerekir. Bu yüzden, modifiye edilmiş motorlar test edildikleri alternatif yakıtlar için optimum tasarıma sahip değildirler. Ancak, bu motorlardan maksimum performans ve verim elde edilmesi uzun yıllar

sürecek Ar-Ge çalışmaları sonunda mümkün olacaktır. Bununla birlikte, alternatif yakıtların çok sayıda motor için uygunluğu kabul edilmeden bu Ar-Ge çalışmalarını savunmak zordur.

Günümüzde alternatif yakıtların çoğu pahalıdır. Bunun temel nedeni genellikle kullanılan miktar sebebiyle alakalıdır. Bu yakıtların birçoğu benzinle aynı kullanım miktarına ulaştığında daha ucuz olacaklardır. Bu durumda üretim, dağıtım ve pazarlama maliyetlerinin tamamı daha düşük olacaktır [14].

Alternatif yakıtlar ile ilgili bir diğer problem ise yakıtın halka arz edildiği yakıt istasyonlarının eksikliğidir. İnsanlar, otomobilleri için yakıt satın alabilecekleri geniş bir yakıt istasyonu ağı mevcut olmadıkça alternatif yakıtlarla çalışan otomobilleri satın almada isteksiz davranacaktır. Diğer yandan kârlılığı sağlayacak yeterli sayıda otomobil mevcut oluncaya kadar alternatif yakıt istasyonunun inşaa edilmesini savunmakta zordur. Bazı şehirlerde, propan, doğalgaz ve metanol gibi bazı alternatif yakıtlar için birkaç yakıt istasyonu mevcuttur. Bu istasyonların yayılıp çoğalması zaman isteyen bir süreçtir. Sonuç olarak bir ana yakıttan diğerine geçiş yavaş, maliyetli ve sancılı bir işlemdir.

1.2. Doğalgaz ve Motorlarda Kullanımı

Doğalgaz, esas olarak metan (%60-98) ve az miktarda diğer hidrokarbon bileşenlerinden oluşan bir gaz karışımıdır. Doğalgaz bu ana bileşenlere ilave olarak değişik miktarlarda N_2 , CO_2 , He ve eser miktarda diğer gazları içerir. Kükürt içeriği ise çok düşüktür çok büyük miktarlar aralığında değişebilir. Doğalgaz 160-250 bar basınçta sıkıştırılmış CNG olarak ya da 70-210 kPa basınçlarda ve -160 °C civarında sıvı doğalgaz halinde depolanır. Doğalgaz yakıt olarak motorda tek noktadan püskürtme sistemi ile en verimli şekilde kullanılabilir. Bu yöntem, doğalgaz için gerekli olan daha uzun karışım zamanını sağlamaktadır [15,16,17].

Kamyon ve stasyonery uygulamalarda kullanmak amacıyla doğalgaz ve dizel yakıtları ile çalışan çift yakıtlı dizel motorlar geliştirilmektedir. Bu motorlar, ana yakıt olarak düşük kükürtlü doğalgaz (bazen saf metan) ve tutuşturma amaçlı olarak da az miktarda yüksek kaliteli dizel yakıtı kullanılmaktadır. Bu uygulama ekonomik sebepler (doğalgaz birim enerji fiyatı açısından dizel yakıtı göre daha ucuz olması) ve çevresel kaygılardan dolayı yapılmaktadır. Doğalgaz dizel yakıtından daha düşük yanma sıcaklıklarına sahiptir ve geç püskürtme yoluyla motor içi sıcaklık daha da düşürülebilir. Bu ise NO_x emisyonlarını büyük ölçüde azaltır. Ayrıca, yakıttaki daha düşük karbon içeriği nedeni ile daha az CO_2

emisyolları ve çok düşük miktarlarda katı partikül madde emisyonları açığa çıkar. Bu tip çift yakıtlı motorlarda, yakıtların her ikisini eş zamanlı olarak püskürten enjektörler kullanılır. Doğalgaz motora yaklaşık olarak sonik hızlarda püskürtölür. Bu ise yüksek türbölansa ve bunun sonucunda yüksek alev hızlarına neden olur. Deneysel çalışmalar, çift yakıt kullanımı durumundaki tutuşma gecikmesi süresinin yaklaşık olarak yalnızca dizel yakıt kullanımı durumundaki tutuşma gecikmesi süresi ile aynı yada biraz daha uzun olduğunu göstermektedir [18]. Bu tip motorlarda yüksek türbölansın sonucunda alev hızları da yüksektir.

Yakıt olarak doğalgaz/metan kullanımının özgün bir uygulama alanı çöp gazı motorlarıdır. Bu motorlar, elektrik jeneratörlerinin tahrikinde kullanılan, yakıtlarını çöplerden çıkan gazlardan sağlayan çok büyük stasyonel motorlardır. 2000 yılında İngiltere’de üretilen elektrik enerjisinin yüzde ikisi çöp sahalarındaki stasyonel motorlarla üretilen elektrikten sağlanmışır [19]. Çöplerden üretilen gazlar yakıt olarak çok kirli ve değişken kaliteli gazlardır. Bu gazlar genellikle %45-65 arasında metan gazı içermektedir. Metan gazına ilave olarak bu gazların içerisinde; silisyum, klor, flor, katı partiküller vb. maddeler de bulunur. Kirletici olan bu maddelerin yoğunlaşmasını önlemek amacıyla iyi bir filtreleme işlemi gerekmektedir. Pistonlar ve supaplar gibi motor parçaları yakıtın korozi etkisi nedeniyle özel malzemelerden imal edilir. Yakıtın asitlik derecesi ve yüksek çalışma sıcaklıkları nedeniyle bu motorlarda özel yağlama yağlarının kullanılması gerekmektedir.

Doğalgazın yakıt olarak motorlarda kullanılmasının başlıca avantajları şunlardır:

- Yüksek oktan sayısı (120) doğalgazı iyi bir benzin motoru yakıtı yapmaktadır. Bu yüksek oktan sayısının bir nedeni yüksek alev hızıdır. Bu nedenle, doğalgaz ile çalışan motorlarda yüksek sıkıştırma oranları kullanılabilir.
- Diğer yakıtlara göre düşük emisyonlara sahiptir.
- Ülkemizin dünyanın en büyük doğalgaz kaynaklarının çoğuna boru hatları ile bağlı olmasından dolayı arz güvenliği fazla olan bir yakıttır.

Dezavantajları:

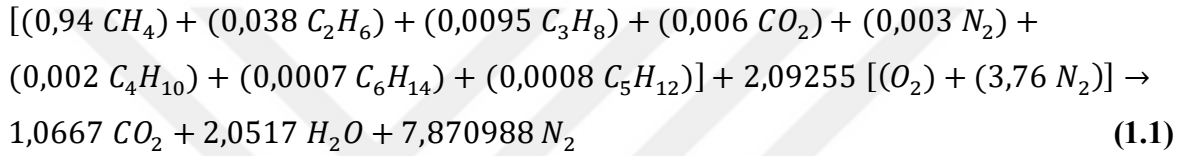
- Düşük enerji içeriği nedeniyle düşük motor performansına neden olur.
- Gaz halinde bir yakıt olduğundan düşük volümetrik verime sahiptir.
- Yüksek basınçlı yakıt deposuna ihtiyacı vardır. Buda bazı güvenlik kaygılarını ortaya çıkartmaktadır. Ayrıca yüksek depolama miktarı için daha büyük tanka

ihtiyaç duyulduğundan binek taşıtlarda kullanılan tankların küçük olmasından dolayı seyir mesafesi kısadır.

- Değişken yakıt özelliklerine sahip olması.
- Yakıt ikmalinin yavaş gerçekleşmesi.

1.3. Doğalgazın Yanma Prosesi

Havanın; 1 mol O_2 ile 3,76 mol N_2 'nin bileşiminden oluştuğunun kabul edilirse; modellemesi yapılan doğalgazın karışımındaki bileşen değerlerine istinaden; teorik tam yanma denklemi, denklem 1.1'de verilmiştir [20].



Tam yanma için gerekli olan teorik havanın mol miktarı, denklem 1.2'te verilmiştir.

$$2,0925 O_2 + 7,8679 N_2 = 9,9604 kmol_{Hava} \quad (1.2)$$

Teorik tam yanma için, Hava-Yakıt Molar oranı, denklem 1.3'de verilmiştir.

$$AFR_{Teorik} = \frac{n_{Hava}}{n_{Yakıt}} = \frac{9,9604 kmol}{1 kmol} = 9,9604 : 1 \quad (1.3)$$

Modellemeye göre doğalgazın molar kütlesi, denklem 1.4'de verilmiştir.

$$m_{Doğalgaz} = 17,2244 kg/kmol \quad (1.4)$$

Havanın molar kütlesi, denklem 1.5'de hesaplanmıştır.

$$m_{hava} = \frac{(n_{O_2} * m_{O_2}) + 3,76(n_{N_2} * m_{N_2})}{n_{O_2} + 3,76(n_{N_2})} = \frac{(2 * 15,9994) + 3,76(2 * 14,0067)}{4,76} = 28,8506 kg/kmol \quad (1.5)$$

Reaksiyona göre tam yanma için gereken doğalgaz kütlesi, denklem 1.6'da hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned}
m_{r,Doğal\ Gaz} &= n_{Doğalgaz} * m_{Doğalgaz} = 1[kmol] * 17,2244 \left[\frac{kg}{kmol} \right] \\
&= 17,2244 [kg]
\end{aligned}
\tag{1.6}$$

Reaksiyona göre tam yanma için gereken hava kütlesi, denklem 1.7’de hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned}
m_{r,Hava} &= n_{hava} * m_{hava} = 9,9604 [kmol] * 28,8506 \left[\frac{kg}{kmol} \right] \\
&= 287,363 [kg]
\end{aligned}
\tag{1.7}$$

Reaksiyona göre modellemesi yapılan doğalgazın tam yanması için, teorik hava/doğalgaz kütleli oranı; denklem 1.8’de verilmiştir.

$$AFR_{Teorik} = \frac{m_{r,Hava}}{m_{r,Doğalgaz}} = \frac{287,363 [kg]}{17,2244 [kg]} = 16,6834:1
\tag{1.8}$$

Modellemesi yapılan doğalgazın tam yanma denklemine göre teorik hava/yakıt oranı 16,68 bulunmuştur. Bu değer benzinin tam yanması için gereken teorik hava/yakıt oranı ile karşılaştırıldığında; doğalgazın tam yanması için benzine göre daha fazla havaya ihtiyaç duyduğu görülmektedir.

Doğalgazın en önemli özellikleri arasında yüksek ısı değere sahip olmasıdır. Isıl değerinin yüksek olması motorlarda ısı verimini artırıcı ve özgül yakıt tüketimini azaltıcı etki yapar [21].

Doğalgazın diğer bir özelliği yüksek oktan sayısına sahip olmasıdır. (yaklaşık 120). Yüksek oktan sayısı vuruntuya karşı direnci artırdığı için daha yüksek sıkıştırma oranına sahip motorlarda kullanılmasına olanak verir [22]. Yüksek sıkıştırma oranına sahip motorlarda kullanılan doğalgaz vuruğu oluşturmada motor performansını artırmaktadır. En önemli vuruğu engelleyen özelliği de yüksek kendi kendine ateşleme sıcaklığıdır [23]. Kendi kendine tutuşma sıcaklığının yüksek olması sıkıştırma oranının artırılmasını sağladığından diğer gaz yakıtlara göre avantaj sağlar [24]. Ayrıca bu özelliklerden dolayı motorlara aşırı doldurmaya imkân sağlamaktadır.

Yanma sonucu oluşan emisyonlar açısından da doğalgaz, benzin ve motorine göre belirgin bir üstünlük gösterir [25]. Ayrıca içeriğinde kükürt gibi katkı maddeleri

olmadığından ekolojik dengeyi tehdit eden ve egzoz sistemine zarar veren asit bileşenleri oluşmamakta dolayısıyla bakım maliyetlerini önemli oranda azaltmaktadır [26].

Doğalgaz dizel motorlarda iki şekilde kullanılmaktadır. Birincisi, motorun sıkıştırma oranının düşürülmesi için pistonlar modifiye edilir. Daha sonra doğalgaz enjektörle silindir içerisine veya emme manifolduna verilir. Ayrıca motora ateşleme sistemi ilave edilerek dizel motorlarda doğalgaz kullanılmaktadır. Diğer yöntem ise doğalgaz manifold üzerinden hava içerisine veya enjektörle direk silindirlere verilerek motorin ile birlikte yakılmaktadır. Bu yöntemin avantajı gerektiğinde yalnızca motorin kullanılabilmektedir.

Doğalgaz dizel motorlarda kullanılabildiği gibi buji ateşlemeli motorlarda da yaygın olarak kullanılır. Fakat alev hızının düşük olması ve fakir karışımında yanma kabiliyetinin iyi olmaması buji ateşlemeli motorlar için önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır. Bu olumsuz özelliklerden dolayı özellikle yüksek hava yakıt oranlarında motor çıkış gücünü azaltır ve özgül yakıt tüketimini artırır. Bu sebepten CNGstokiyometrik şartlarda daha verimlidir [27].

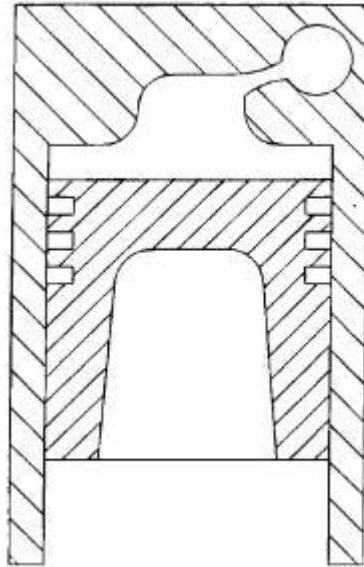
1.4. Kademeli Dolgulu Benzinli Motorlar

Geleneksel dolgulu ve homojen dolgulu motorlarda, sıkıştırma oranının fakir karışımlar için düşük kalmasından dolayı yakıt tüketimi yüksektir. Dizel motorlarında sıkıştırma oranı yüksek olduğundan çok fakir karışımlarda bile çalışmaktadır. Benzinli motorlar için bu problemin en önemli çözüm yöntemi, motorun fakir karışımlarda bile çalışmasına imkân tanıyan kademeli dolgu (Stratified Charge) prensibidir [28]. 1922 yılında ilk defa kademeli dolgu prensibi Ricardo tarafından uygulanmıştır [29]. Kademeli dolgulu motorlarda amaç buji etrafında zengin veya stokiyometrik, yanma odasının diğer bölgelerinde fakir karışım oluşturmaktır. Bu sayede motor içerisine alınan yakıtın önemli bir kısmı yakılabildiğinden verim artışı meydana gelmektedir. Yanma odasındaki toplam hava fazlalık katsayısı fakir bölgededir. Dolayısı ile silindir içerisindeki sıcaklıkta düşecek, buna bağlı olarak özgül ısıların ve transferin düşeceği, kimyasal parçalanmaların meydana gelmediği gözlemlenmiştir. İlave olarak yük ayarı için gerekli gaz kelebeği açıklığı artacağından pompalama kayıpları da azalmaktadır [1]. Böylece dizel motorlarında olduğu gibi kademeli dolgulu motorlarda da yük ayarı gaz kelebeğine bağlı olmaksızın karışımın oranıyla da ayarlanabilmektedir.

Günümüzde bazı kademeli dolgulu motorlar ana oda ve ondan daha küçük bölünmüş ikincil odaya sahiptir. İkincil odanın hacmi, toplam ölü hacmin yaklaşık olarak %20'si

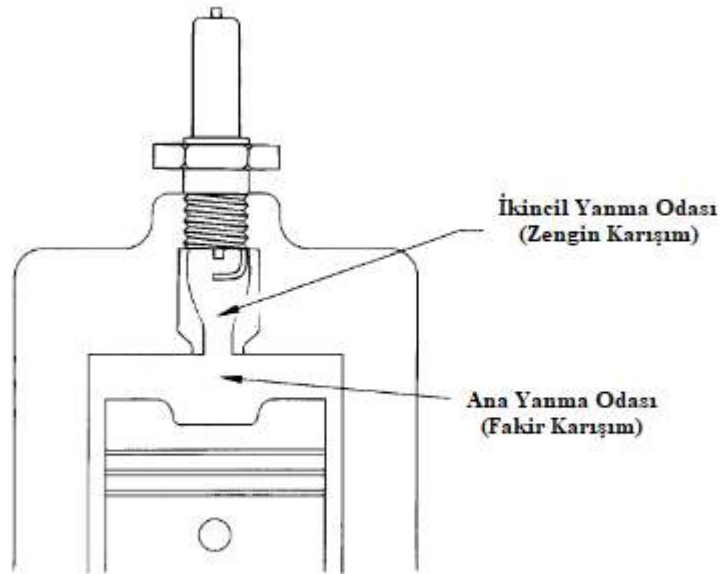
kadardır. İkincil yanma odası farklı metotlarda farklı amaçlar için tasarlanır. Bazı motorlarda ikincil oda çok yüksek girdap elde etmek için tasarlanır. Odalar arasındaki kanal, emme zamanında ana odaya alınan hava-yakıt karışımını, bujinin bulunduğu ikincil odaya geçerken yüksek girdap oluşturacak şekilde tasarlanır. Bu, girdap odasında tutuşmanın iyi bir şekilde gerçekleşmesine katkı sağlar. Hava-yakıt karışımı ikincil odada yandığında kanalda geriye doğru genişleyerek ana yanma odasında ikincil bir girdap oluşturur ve oradaki gaz karışımı için jet tutuşturucusu ya da meşale tutuşturucusu gibi davranır. Bu tip girdap oluşturan ikincil odalar, ana odadaki ana girdap oluşturma ihtiyacını ortadan kaldırır. Emme manifoldu ve supapları daha yumuşak ve düzgün bir akış sağlayacak şekilde tasarlanabilir ve böylece daha yüksek volümetrik verim elde edilir [30].

Diğer bir bölünmüş yanma odalı motor, Şekil 1.1’de şematik olarak gösterilmiştir. Bu motorlarda ana yanma odasının yanında esasen hiçbir emme, ateşleme ya da özel girdap içermeyen küçük bir pasif oda bulunur. Yanma, ana odada meydana geldiğinde yüksek basınçlı gazlar çok küçük boyutlu kanalın içinden ikincil odaya doğru akmaya zorlanır. Ana odadaki basınç, güç zamanı esnasında düştüğünde ikincil odadaki bu yüksek basınçlı gazlar yavaşça ana odanın içine doğru geri akar ve piston yüzeyine etkiyen basıncı hafifçe artırarak daha fazla iş üretir. Tasarıma bağlı olarak tersine akan bu gazlar yanabilir, karışım içerebilir ve yanma süresini artırabilir.



Şekil 1.1. Pasif İkincil Odalı Bir Yanma Odasının Şematik Görünümü [30].

Kademeli dolgulu motorlarda yanma odası boyunca homojen bir hava-yakıt karışımı bulunmaz. Buji etrafında zengin bir karışım ve bujiden uzakta ise fakir karışım bulunur. Buji etrafındaki zengin karışım yanmanın iyi bir şekilde başlamasını ve erken yayılmasını sağlar. Yanma odasının geri kalan kısmındaki fakir karışım ise iyi bir yakıt ekonomisi sağlar. Yanma odasının büyük bir kısmını kaplayan hava-yakıt karışımı buji tarafından ateşlenemeyecek kadar çok fakirdir. Bununla birlikte bu karışım, buji civarındaki az miktarda zengin karışım tarafından ateşlendiğinde ise kararlı bir şekilde yanar. Çift odalı kademeli dolgulu motorlarda bujinin yerleştirildiği küçük ikincil odada zengin, ana odada ise fakir karışım bulunur (Şekil 1.2). Motor gücünün büyük bir kısmı fakir karışım kullanan büyük ana yanma odasında üretilir. Fakir karışıma sahip bu tarz motorlarda yüksek girdap ve sıkıştırma, buji etrafındaki zengin karışım ve normal elektrot boşluklarından daha büyük, çok yüksek voltajlı buji, yanmanın iyi bir şekilde başlamasına katkı sağlar. Fakir karışımlar, normal şartlar altında potansiyel vuruntu problemleri oluşturabilecek düşük alev hızlarına sahiptir. Bununla birlikte fakir karışımlar aşırı reaktif olmayan gazların neden olduğu daha düşük yanma sıcaklıklarına sahiptir ve bu vuruntu ihtimalini azaltmaktadır. Bazı modern yanma teknolojilerinde, fakir yanmalı motorlarda çok fazla miktarda EGR kullanılmaktadır. Böylece gerçek hava-yakıt bileşimi stokiyometrik değere yakındır ve bu zararlı emisyonları minimumda tutmaya yardım eder.



Şekil 1.2. Bir Benzinli Motorun Bölünmüş Yanma Odası [31].

Kademeli dolgulu motorların tasarımları çeşitli şekillerde olabilir. Bazı kademeli dolgulu motorlarda her bir silindirde ana ve ikincil odalarda birer emme supabı bulunur. Bu motorlar, ikincil odada zengin bir karışım olacak şekilde farklı hava-yakıt oranları sağlar (Şekil 1.2). Bu yaklaşımın özel uygulaması, bir emme supabının yakıt olmaksızın yalnızca hava sağlamasıdır. Bir başka kademeli dolgulu motorlarda ise, düşük motor devirlerinde silindir başına yalnız tek bir emme supabı ve yüksek motor devirlerinde ise farklı hava-yakıt oranları sağlayan iki emme supabı bulunur. Bazı motorlarda ise yanma odasında kademeli dolgu oluşturmak amacıyla, emme supapları ve silindir içi yakıt enjektörünü birlikte kullanılır. Bazı kademeli dolgulu motorlarda ise bölünmüş yanma odası bulunmaz, yalnızca tek bir yanma odası bulunur [32]. Ayrıca yanma odası ve supap tasarımı kadar, farklı dönme karakteristikleri oluşturmak amacıyla piston üst yüzeyinin tasarımı da çok önemlidir.

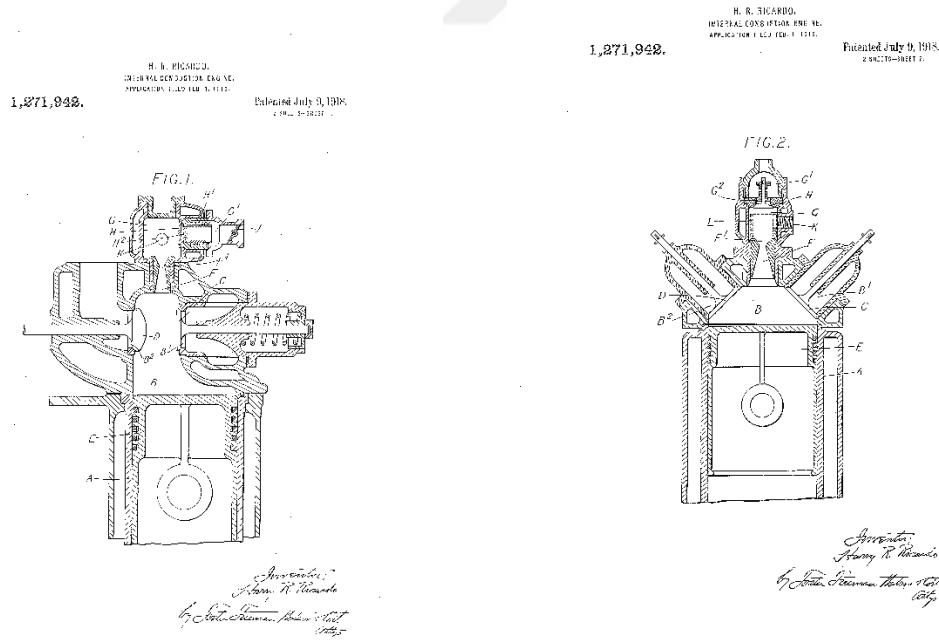
Kademeli dolgulu motorların bir türü de çift yakıtlı motorlardır. Bu motorlarda aynı anda iki çeşit yakıt kullanılır. Bu yakıtlardan bir tanesi genellikle daha ucuz, diğeri ise tutuşmayı sağlamak amacıyla kullanılan az miktardaki daha kaliteli yakıttır. Bu motorlar bölünmüş yanma odalı ya da normal açık yanma odalı şeklinde tasarımı olabilir. Silindirlere giren yakıtın çoklu emme supapları, yakıt enjektörleri ve/veya emme akışının uygun şekillendirilmesiyle değişik hava/yakıt oranları elde edilir. Doğalgaz, çift yakıtlı motorlarda genelde ana yakıt olarak kullanılır. Bu, özellikle doğalgazın diğer yakıtlardan daha çok bulunduğu gelişmemiş 3. Dünya ülkeleri için geçerlidir [32].

Çeşitli otomobil üreticileri kademeli dolgulu motorlar üzerinde çalışmalar yapmasına karşın klasik motorlar gibi seri üretimi henüz yaygınlaşmamıştır. Bunun sebebi değişken yük durumlarında buji etrafında kolaylıkla tutuşabilen zengin karışımı oluşturmamak ve fakir karışımı istenilen şekilde yakmayı başaramadıklarıdır. Bu sorunların üstesinden gelebilmek için yapılmış çalışmaların sonucunda önerilen motorları hava-yakıt karışım oluşturmaları ve yanmasına göre iki sınıfa ayırmak mümkündür [28].

- a) Klasik benzin motorlarında olduğu gibi hava-yakıt karışımı silindir dışında (emme manifoldunda) oluşan ve yanma prosesi iki aşamada gerçekleşen alev hüzmesiyle ateşlemeli kademeli dolgulu motorlar. (Pre-chamber Torch (or Jet) Ignition Stratified Charge Engine)
- b) Dizel motorlarında olduğu gibi hava-yakıt karışımı silindir içerisinde oluşan, direkt yanma odasına benzin püskürtülen motorlar. (Direct Injection SI Engine – GDI)

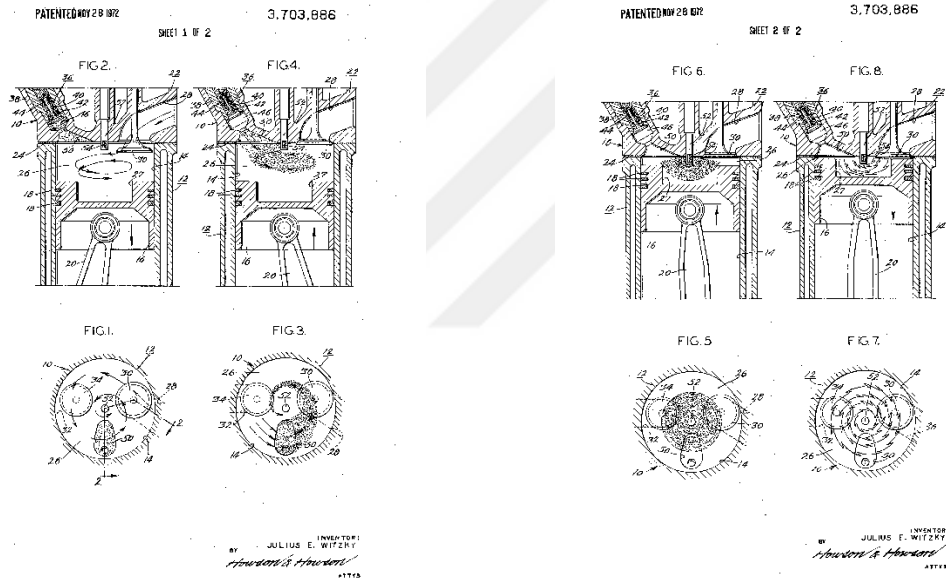
Birinci grupta belirtilen hava-yakıt karışımı silindir dışında oluşan kademeli dolgulu benzinli motorun ilk örneği 1922 yılında yapılan Ricardo motorudur (Şekil 1.3). Ardından tasarlanan GAZ-52 motoru, IFP Kademeli Dalgulu Motor ve Honda tarafından tasarlanan CVCC (Compound Vortex Controlled Combustion) Kademeli Dalgulu Motor bu kategoriye dâhil olan motorlar arasındadır.

Ricardo tasarladığı motorda ana yanma odası ve silindir kafasında küçük bir yanma odası yapmıştır. Emme esnasında otomatik olarak açılan emme supabından küçük yanma odasına zengin karışım, ana yanma odasına ise toplam karışımın yaklaşık %20 si kadarına tekabül eden sadece havayı göndermiştir. Küçük yanma odasına yerleştirilen buji sayesinde ateşlenen zengin karışımın etkisiyle ana yanma odasına doğru basınçlı bir akış meydana gelir ve ana yanma odasındaki hava ile buluşarak türbülanslı bir yanma meydana gelmesi sağlanır. Ricardo değişken yük durumlarına göre motorun güç ayarının yapılabilmesi için içeriye giren karışımın miktarını veya sadece yakıt miktarının değiştirilmesi gerektiğini belirtmiştir [33].



Şekil 1.3. Ricardo Tarafından Geliştirilen Motorun Patent Çizimleri [34].

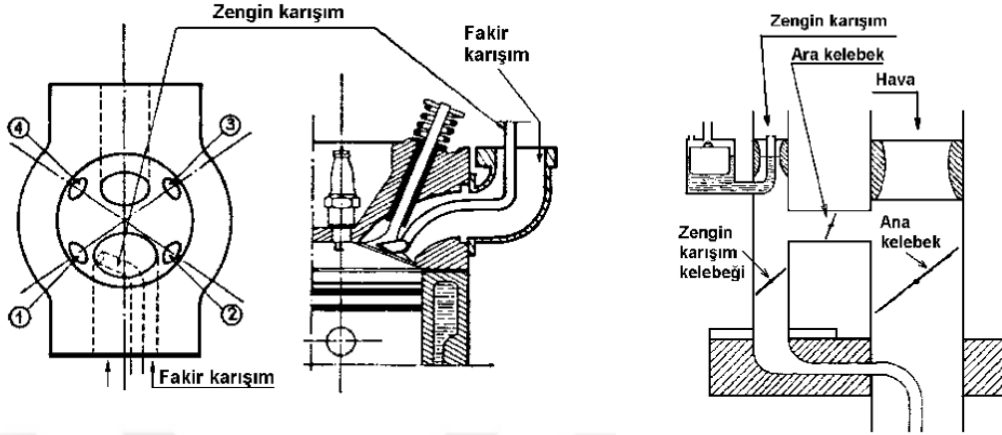
Ricardo kademeli dolgulu motorundan sonra ikinci uygulama 1954 yılında Sovyet Gorki firması tarafından geliştirilen GAZ-52 motorudur (Şekil 1.4). Bu motor Ricardo motorunun daha modernleşmiş versiyonudur. İki ayrı karbürasyon sistemi kullanılmış olup, Ricardo motorunda olduğu gibi ön yanma odası tasarlanmıştır. Ana yanma odasına bir karbüratörde hazırlanan fakir karışım gönderilirken, diğer karbüratörden ise tasarlanan ön yanma odasına zengin karışım gönderilmektedir. Ana yanma odasında, toplam karışımın büyük bir kısmını teşkil eden fakir karışım olduğundan dolayı karışımın geneli fakirdir. Ön yanma odasında oluşan zengin karışım buji ile ateşlenerek ana yanma odasındaki fakir karışımın yanmasını sağlar. Bu sayede aynı strok hacmine sahip motora göre termik verim arttığından dolayı yaklaşık olarak %12 moment ve güç artışı sağlanmış olur [35].



Şekil 1.4. Rusya Tarafından Geliştirilen Gaz-52 Motorunun Patent Çizimleri [36].

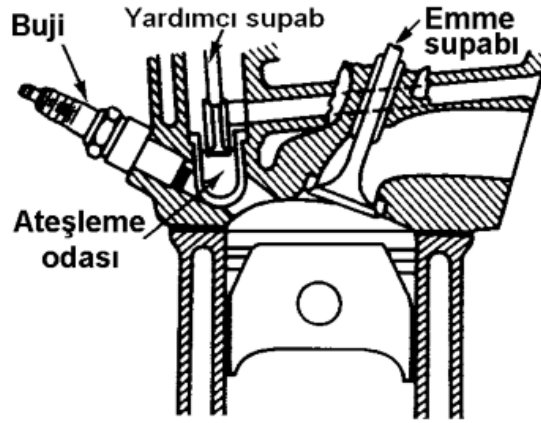
IFP (INSTITUT FRANCAIS DE PETROL) firması Renault motoruna 1961 yılında kademeli dolgu sistemini uygulamıştır. Emme kanalının ortasına bir boru ekleyerek zengin karışımı boru vasıtasıyla buji bölgesine yönlendirmişlerdir. Emme kanalından ise fakir karışım silindir içerisine sevk edilmiştir. Araştırmacılara göre en uygun buji yeri Şekil 1.5'de belirtilen 1 nolu bölgenin olduğunu tespit etmişlerdir. IFP sisteminde karışımın oranının ayarlanması, zengin karışım borusu ile fakir karışım kanalının arasına eklenen ara kelebek vasıtasıyla yapılmaktadır. Değişken yük durumlarına göre uygun karışımın elde edilmesi kelebek sisteminin uyumlu bir şekilde çalışmasıyla sağlanmaktadır. Yarım yük ve tam yük

konumları arasındaki değerlerde, ara kelebek, zengin karışımı fakir karışım dolgu kanalına uygun bir şekilde sevkini gerçekleştirmektedir [37].



Şekil 1.5. IFP Kademeli Dolgu Teşkilatı [35].

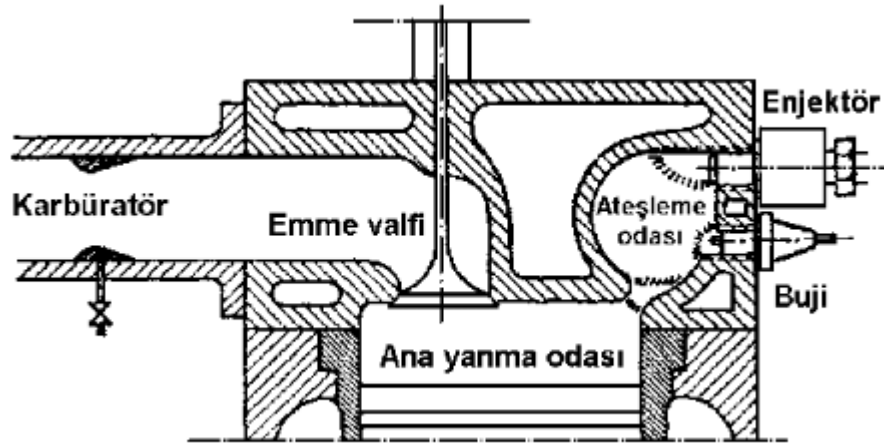
Japon Honda firması, 1950 yılında yapılan Sovyet Nilov motorunu geliştirerek ateşleme odasını ve ana yanma odasını ayırarak kademeli dolgu sistemine sahip bir motor geliştirmişlerdir (Şekil 1.6). Geliştiren bu motorda iki boğazlı karbüratör sistemi mevcuttur. Karbüratörde hazırlanan fakir karışım ana yanma odasına emme supabı vasıtasıyla sevk edilir. Buji bölgesine yani ateşleme odasına ise üçüncü bir supap vasıtasıyla zengin karışım gönderilir. Bu üçüncü supap emme supabı ile aynı anda açılıp kapanma özelliğine sahiptir. Ateşleme odasındaki zengin karışım buji tarafından ateşlendikten sonra ana yanma odasına doğru vorteksli bir akış sağlanmış olur. Böylece zengin karışım ile fakir karışımın hızla karışması sağlanmış olur. CVCC (Compound Vortex Controlled Combustion) kontrollü bir vorteks akışın sağlandığını tanımlamaktadır [38].



Şekil 1.6. Honda Kademeli dolgu motoru [39].

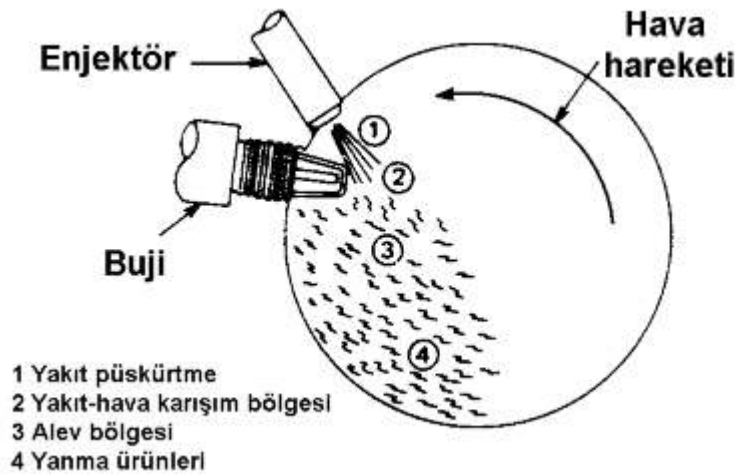
İkinci grupta belirtilen hava-yakıt karışımı silindir içerisinde oluşan, direk silindir içerisine yakıt püskürtmeyle kademeli dolgu oluşturan motorlar, araştırmacılar tarafından daha gerçekçi bir yöntem olduğu öne sürülmektedir. Bunun sebebi, karbüratörlü sistemlerde değişken yük durumuna göre hazırlanan farklı karışımların silindir içerisinde istenilen bölgelerde yanmasının belirsizliğidir. Çünkü emme stroku ve sıkıştırma stroku boyunca meydana gelen istemsiz türbülanslar karışımın kademelendirilmesini olumsuz bir şekilde etkilemektedir. Püskürtme sistemi ile kademelendirmede ise emme stroku boyunca fakir karışım ilk olarak silindire alınır. Zengin karışım ise sıkıştırma periyodunun yüke göre uygun bir zamanında silindir içerisinde alınarak karışımın ateşlenmesi sağlanmış olur. Yüke göre karışımındaki yakıt miktarı püskürtme zamanındaki yakıt miktarıyla kolaylıkla ayarlanabilmektedir. Bu tarz motorların ilk örneklerini 1954 yılında yapılan Schlamann kademeli dolgulu motor ve 1976 yılında yapılan Texaco (TCCS) direkt püskürtmeli kademeli dolgulu motorda görmekteyiz.

Schalamann kademeli dolgulu motorda karbüratörde hazırlanan fakir karışım emme strokunda silindir içerisine alınır (Şekil 1.7). Ateşleme odasına yerleştirilen enjektör vasıtasıyla zengin karışım ateşleme odasında sıkıştırma zamanında oluşturulur. Zengin karışımın yanmaya başlamasıyla ana yanma odasına doğru giden alevler fakir karışımında tutuşmasını sağlar. Bu motorda yapılan çalışmalar, aynı strok hacmine sahip karbüratörlü motorlara göre güç ve özgül yakıt tüketiminde iyileşme olduğu gözlemlenmiştir [40].



Şekil 1.7. Schalamann Kademeli Dolgulu Motor [39].

TCCS (Texaco Controlled Combustion System) direk püskürtmeli kademeli dolgulu motorda ise emme havasına dönme hareketi kazandırılarak kademeli sistem oluşturulmuştur (Şekil 1.8). Hava hareketi için, direk püskürtmeli dizel motorlarında olduğu gibi pistonun üst yüzeyine kavisli bir oyuk açılmıştır. Püskürtme işlemi emme strokunun sonuna doğru başlar. İlk püskürtülen buji tarafından yakılarak ilk alev oluşturulur. İlk alev oluşmasından sonra püskürtme işlemi yaklaşık havanın silindir içerisinde bir tam tur atma süresi kadar devam eder. Karışım oranında stokiyometrik oran korunacak şekilde yakıt püskürtme işlemi gerçekleşir. Düşük yük durumlarında karışım fakirleştirilir. Rölanti durumunda ise karışım oranı 1/100 seviyesine kadar düşürülerek önemli bir yakıt tasarrufu sağlanmış olur [41].



Şekil 1.8. Texaco Kademeli Dolgulu Motorun Çalışma Prensibi [41].

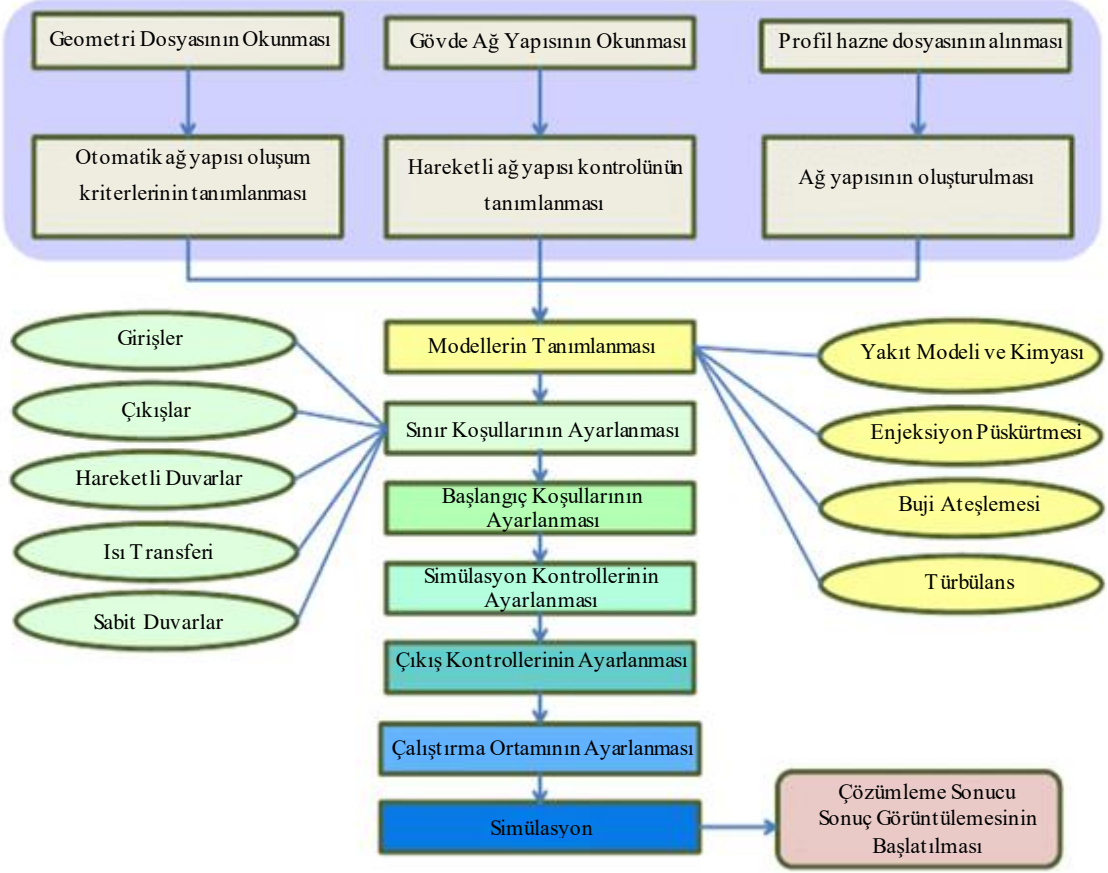
Özet olarak emme kanalına yakıt püskürtmeli (birinci tip) motorlarda yapılan çalışmalar sonucunda $\lambda=1.5$ seviyesine kadar düzgün çalışma elde edilmiştir. Tam yükte ise stokiyometrik karışım ve iki emme supabına sahip standart otto motorlarındaki özgül yakıt tüketimi elde edilmektedir. Yakıt tüketiminde ise çalışma koşullarına göre % 5-13'lük iyileşme sağlandığı görülmüştür [1]. Hava fazlalık katsayısını $\lambda=2.5$ seviyelerine kadar artırmak ancak ikinci tip olarak bahsedilen direk püskürtmeli kademeli dolgulu motorlarla sağlanabilmektedir. Bunun nedeni, buji etrafında zengin, bujiden uzaklaştıkça fakir karışımı en iyi şekilde bu motor tipinde elde edilebilmektedir. Hava fazlalık katsayısının bu denli yükseltme mümkün olduğundan dolayı, kısmi yüklerde otto motorlarında elde edilen verimi bu motorlarda da elde etmek mümkündür.



2. MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışması kapsamında kademeli dolgu benzinli bir motorda doğalgaz kullanımının sayısal olarak araştırılması amaçlanmıştır. İncelenen literatür ve araştırılan kaynaklar ışığında benzinli motorlarda kademeli dolgu uygulamalarının çeşitli yöntemlerle yapıldığı görülmüştür. Bu çalışma kapsamında ise direk enjeksiyonlu benzinli bir motorda, farklı zamanlarda yapılan iki enjeksiyon ile kademeli dolgu şartları sağlanmıştır. Sayısal olarak gerçekleştirilen çalışmada motor performansı ve kirlenici emisyon oluşumlarının analiz edilmesi hedeflenmiştir. Sayısal çalışmaların gerçekleştirilmesi için 3 boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı olan ANSYS Forte 19 kullanılmıştır. ANSYS Forte içten yanmalı motorlarda yanma analizlerinin gerçekleştirilmesi için, gaz dinamiği, yakıt püskürtme modelleri ve detaylı kimyasal kinetik mekanizmalarla birleştirilmiş bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımıdır. İçten yanmalı motor analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için öncelikle 3 boyutlu motor modeli bir çizim programı yardımıyla çizilerek yazılıma yüklenir. Daha sonra otomatik ağ yapısı kullanılarak katı model için ağ yapısı oluşturulur. Daha sonra oluşturulan motor modeli için gerekli alt modeller ve sınır şartları belirlenir. Alt modeller belirlenirken motor tipi (benzinli, dizel), enjektör tipi ve özellikleri, püskürtme zamanlaması, buji tipi ve zamanlaması, kullanılacak türbülans modelleri, yakıt tipi, belirlenen yakıt için kullanılacak kimyasal kinetik mekanizmalar ve yakıt modelleri detaylı olarak tanımlanır. Bu tanımlamalardan sonra giriş havası sıcaklıkları ve basıncı, motor cidar sıcaklıkları ve motor hareket tanımları yapılarak sınır şartları belirlenmiş olur. Daha sonrasında analiz kontrol ve çıkış parametreleri belirlenerek simülasyonlar gerçekleştirilir. ANSYS Forte için genel iş akış şeması Şekil 2.1’de görülmektedir.

Simulate



Şekil 2.1. ANSYS Forte iş akışı [42].

2.1. Yönetici Denklemler

İçten yanmalı motorlarda, yanma öncesindeki hava yakıt karışımı ve yanma sonrasındaki yanma sonu ürünleri çalışma akışkanı olarak kabul edilir. Bu akışkanların analiz edilebilmesi ve buna bağlı yanma probleminin çözülebilmesi bazı alt denklemlere ve modellere bağlıdır. ANSYS Forte temel akışkanlar dinamiği çözümlerini yapabilmek için Navier-Stokes denklemlerini kullanır. Bunun yanında kütle yayılımı için Fick's kanunlarını kullanır. Isı yayılımı için ise Fourier's kanunlarından faydalanır. Analizlerin yapılabilmesi için kullanılan yönetici denklemlerde bazıları aşağıda görülmektedir [43].

Tür korunum denklemi;

$$\frac{\partial \bar{\rho}_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho}_k \tilde{u}) = \nabla \cdot [\bar{\rho} D \nabla \bar{y}_k] + \nabla \cdot \phi \quad (k = 1, \dots, K) , \quad (2.1)$$

Denklemden ifade edilen Fick's kanunun kullanılması sonucunda meydana gelen kaynak terimlerden ρ yoğunluğu, k tür indeksini, K türlerin toplam sayısını ifade etmektedir.

Süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial \bar{\rho}_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{u}) = \dot{\rho}^s \quad (2.2)$$

Momentumun korunumu denklemi;

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{u}) = -\nabla \cdot \bar{p} + \nabla \cdot \bar{\sigma} - \frac{2}{3} \bar{\rho} \tilde{k} I + \bar{F}^s + \bar{\rho} \bar{g}, \quad (2.3)$$

Denklemden ifade edilen $\bar{\sigma}$ viskoz gerilme tensörü denklem (2.4) ile hesaplanır.

$$\bar{\sigma} = \bar{\rho} \nu \left[\nabla \tilde{u} + (\nabla \tilde{u})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \tilde{u}) I \right] \quad (2.4)$$

Enerjinin korunumu denklemi;

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{I}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{I}) = -\bar{\rho} \nabla \cdot \tilde{U} - \nabla \cdot \tilde{J} - \nabla \cdot \tilde{H} + \bar{\rho} \tilde{\epsilon} + \dot{\tilde{Q}}^c + \dot{\tilde{Q}}^s \quad (2.5)$$

Enerjinin korunum denklemine göre $\dot{\tilde{Q}}^c$ ısı yayılımını, $\dot{\tilde{Q}}^s$ sprey etkileşimini, $\tilde{I}$ özgül iç enerjiyi, $\tilde{J}$ ısı akısını ifade etmektedir. Isı iletimi ve entalpi difüzyonu sonucu meydana gelen ısı akışı denklem (2.6) ile hesaplanır.

$$\tilde{J} = -\lambda \nabla \tilde{T} - \bar{\rho} D_T \sum_k \tilde{h}_k \nabla \left(\frac{\bar{p}_k}{\bar{p}} \right), \quad (2.6)$$

Denklemden belirtilen λ ısı iletim katsayısı, $\tilde{T}$ akış sıcaklığı, $\tilde{h}_k$ ise türlerin özgül entalpi ifadelerine karşılık gelmektedir.

Gaz karışım hal denklemi;

$$\bar{p} = R_U \bar{T} \sum_k \left(\frac{\bar{\rho}_k}{W_k} \right) \quad (2.7)$$

Gaz fazı karışımlar için gaz karışım hal denklemi ideal gaz kanuna bağlı kalınarak türetilmiştir. Denklemden R_U üniversal gaz sabiti olarak tanımlanırken W_k ise türlerin moleküler ağırlığını ifadesi anlamına gelmektedir.

2.1.1. Türbülans Modeli

İçten yanmalı motorlarda silindir içi hava akışının ve hava yakıt etkileşimin incelenmesi oldukça önemli bir türbülanslı akış problemidir. Problemin doğru çözülebilmesi için kullanılacak türbülans modelleri ve probleme uygun türbülans modeli seçimi önem arz etmektedir. Bu çalışma kapsamında türbülanslı akışın modellenmesi için ANSYS Forte tabanında da mevcut olan RNG k-epsilon türbülans modeli kullanılmıştır [43]. İçten yanmalı motorların analizinde daha doğru sonuçlar verdiği için bu model tercih edilmiştir. RNG k-epsilon modelin standart k-epsilon modele göre daha küçük ölçekli hareketleri hesaba kattığı göz önünde bulundurulduğunda daha hassas sonuçlar vermesi beklenmektedir. RNG k-epsilon model için gerekli denklemler aşağıda verilmiştir.

$$\Gamma = -\bar{\rho} v_t \left[\nabla \tilde{u} + (\nabla \tilde{U})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \tilde{u}) I \right] + \frac{2}{3} \bar{\rho} \tilde{k} I \quad (2.8)$$

$$\tilde{k} = \frac{1}{2\bar{\rho}} \text{trace}(\Gamma) = \frac{1}{2} \overline{u'' u''} \quad (2.9)$$

$$v_T = C_\mu \frac{\tilde{k}^2}{\tilde{\varepsilon}}, \quad (2.10)$$

$$\phi = \bar{\rho} D_T \nabla \bar{y}_k \quad (2.11)$$

$$H = -\lambda_T \nabla T - \bar{\rho} D_T \sum_k \tilde{h}_k \nabla \bar{y}_k \quad (2.12)$$

$$D_T = \frac{v_T}{Sc_T} \quad (2.13)$$

$$\alpha_T = \frac{v_T}{Pr_T} \quad (2.14)$$

RNG model için k ve ε denklemleri 2.15 ve 2.16'da verilmiştir.

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{k}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{k}) = -\frac{2}{3} \bar{\rho} \tilde{k} \nabla \cdot \tilde{u} + (\bar{\sigma} - \Gamma) : \nabla \tilde{u} + \nabla \cdot \left[\frac{\mu + \mu_T}{Pr_k} \nabla \tilde{k} \right] - \bar{\rho} \tilde{\varepsilon} + \dot{W}^S, \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{\varepsilon}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{u} \tilde{\varepsilon}) = & -\left(\frac{2}{3} C_{\varepsilon 1} - C_{\varepsilon 3} \right) \bar{\rho} \tilde{\varepsilon} \nabla \cdot \tilde{u} + \nabla \cdot \left[\frac{(v + v_T)}{Pr_\varepsilon} \nabla \tilde{\varepsilon} \right] \\ & + \frac{\tilde{\varepsilon}}{\tilde{k}} \left[C_{\varepsilon 1} (\bar{\sigma} - \Gamma) : \nabla \tilde{u} - C_{\varepsilon 2} \bar{\rho} \tilde{\varepsilon} + C_S \dot{W}^S \right] - \bar{\rho} R \end{aligned} \quad (2.16)$$

Eşitlikte bulunan Pr_k , Pr_ε , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$ ve $C_{\varepsilon 3}$ model sabitleridir. Son terimde bulunan R aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$R = \frac{C_\mu(\eta)^3(1 - \eta/\eta_0)}{1 + (\beta\eta^3)} \frac{\tilde{\varepsilon}^2}{\tilde{k}}, \quad (2.17)$$

$$\eta = S \frac{\tilde{k}}{\tilde{\varepsilon}}, \quad (2.18)$$

$$S = (2\bar{S} : \bar{S})^{1/2} \quad (2.19)$$

$$\bar{S} = \frac{1}{2} (\nabla \tilde{u} + \nabla \tilde{u}^T). \quad (2.20)$$

Yukarıdaki denklemlerde kullanılan sabitler RNG k-epsilon model için aşağıdaki şekilde belirlenmiştir.[43]

	C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 3}$	$1/Pr_k$	$1/Pr_\varepsilon$	η_0	β
RNG k-ε	0.0845	1.42	1.68	1.44	1.39	1.39	4.38	0.012

2.1.2. Kimyasal Kinetik Formülasyonu

İçten yanmalı motor simülasyonlarında yanma olayının analizi ve tam çözümü için kimyasal reaksiyonların doğru çözülmesi gerekir. Kimyasal reaksiyonlar kimyasal kinetik mekanizmalar olarak tarif edilir. Bu tarifi gerçekleştirmek için yakıtın kimyasal özellikleri, termofiziksel özellikleri ve termodinamik özellikleri ihtiyaç duyulur. Elde edilen veriler kimyasal kinetik mekanizma ile birleştirilerek ilgili tür konsantrasyonlarında değişiklik

yaratan reaksiyon oranları tanımlanır. Kimyasal kinetik mekanizmalarda reaksiyonlardaki kimyasal türler aşağıdaki denklemler ile hesaplanır.

$$\sum_{k=1}^K v'_{ki} X_k \Leftrightarrow \sum_{k=1}^K v''_{ki} X_k (i = 1, \dots, I). \quad (2.21)$$

k. türün i. reaksiyonda üretilme oranı;

$$\dot{\omega}_{ki} = (v''_{ki} - v'_{ki}) q_i (k = 1, \dots, K) \quad (2.22)$$

Tüm reaksiyonların üretilme oranına göre tür sürekliliği denklemindeki kimyasal kaynak terimi elde edilir.

$$\dot{\rho}_k^C = W_k \sum_{i=1}^I \dot{\omega}_{ki} \quad (2.23)$$

Ayrıca enerji denklemindeki kimyasal ısı salınımı denklemini aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$Q_c = \sum_{k=1}^I Q_i q_i = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K (v''_{ki} - v'_{ki}) (\Delta h_f^0)_k q_i, \quad (2.24)$$

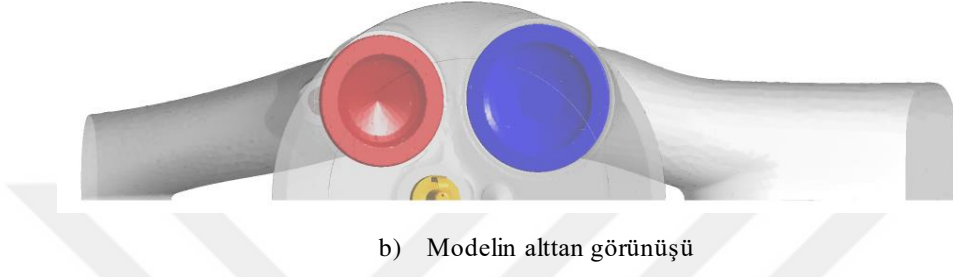
$$Q_i = \sum_{k=1}^K (v''_{ki} - v'_{ki}) (\Delta h_f^0)_k, \quad (2.25)$$

2.2. Modelin Tanımı ve Çalışma Parametreleri

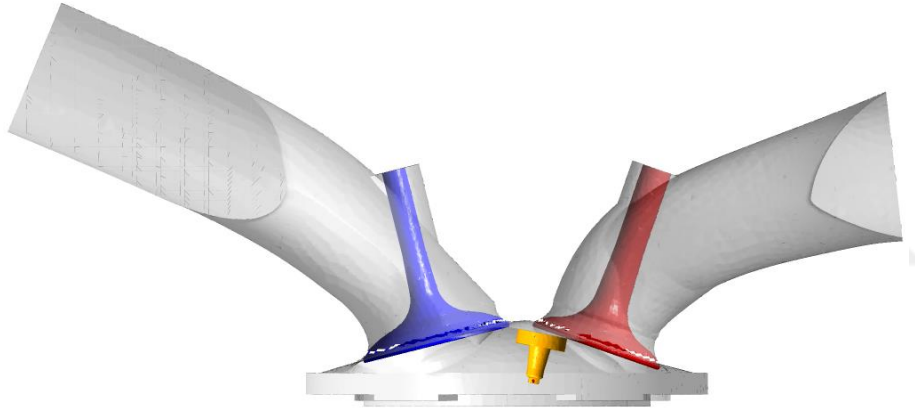
Bu tez çalışması kapsamında kademeli dolgulu benzinli bir motorda doğalgaz kullanımının 3 boyutlu sayısal analizi amaçlanmıştır. Çalışmada öncelikle ilgili motor modelinin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu tasarım emme manifoldu, egzoz manifoldu, silindir kapağı, enjektör, buji ve yanma odasını kapsayacak şekilde simetri model olarak oluşturulmuştur. Çizim modeli üzerinden 302543 eleman sayısı ile ağ yapısı oluşturulmuştur. Modelin görünüşü Şekil 2.2'de ve modelin ağ yapısı Şekil 2.3'de gösterilmiştir.



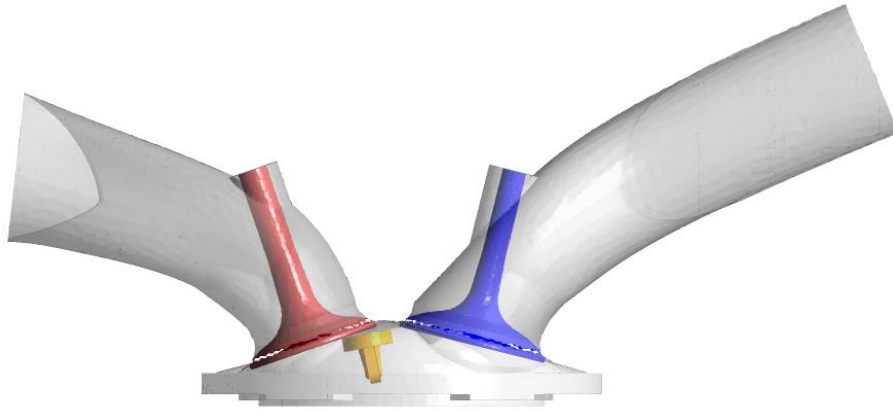
a) Modelin üstten görünüşü



b) Modelin alttan görünüşü

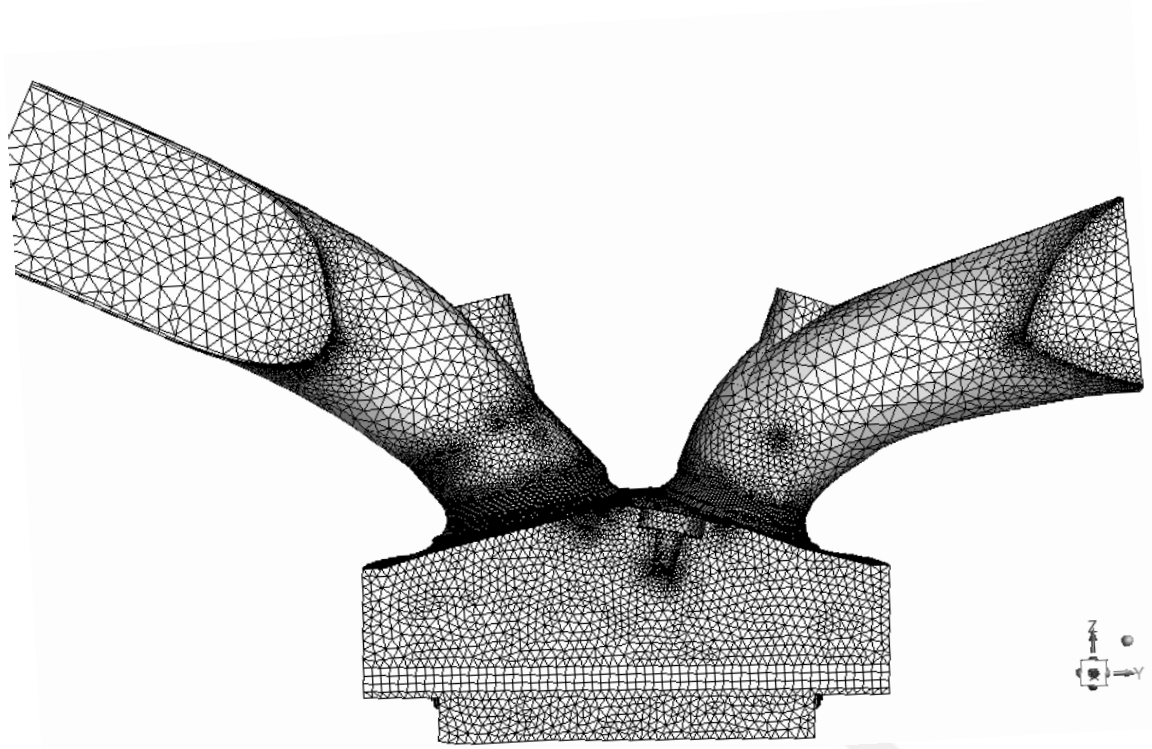


c) Modelin önden görünüşü



d) Modelin arkadan görünüşü

Şekil 2.2. Modelin geometrik yapısı



Şekil 2.3. Modelin ağ yapısı

Çalışmada tek silindirli dört zamanlı benzinli bir motor referans alınmış ve kademeli dolgu şartları bu motor üzerinde uygulanmıştır. Motora ait teknik özellikler Tablo 2.1’de görülmektedir.

Tablo 2.1. Sayısal çalışmada kullanılan motorun teknik özellikleri	
Silindir çapı	84mm
Strok	103mm
Sıkıştırma oranı	11.67
Biyel kolu uzunluğu	144.3
Silindir sayısı	1
Çevrim türü ve zamanı	Otto çevrimi, 4 zamanlı
Motor devri	3000

Bu tez çalışması kapsamında temel hedef kademeli dolgulu benzinli bir motorda doğalgaz kullanımının sağlanmasıdır. Bu amaçla benzinli motorlarda doğalgaz kullanımı

araştırılmış ve doğalgazın tüm bileşenleri incelenmiştir. Bu inceleme neticesinde doğalgazın metan, etan, propan, bütan, CO₂ ve nitrojenden oluştuğu görülmüştür. Bu bileşenlerden yaklaşık %90-%98'lik kısmını metanın oluşturdu incelenen literatür ışığında belirlenmiştir. Bu doğrultuda çalışmada kullanılacak olan doğalgaz için CH₄ kabulü yapılmıştır. Bu şekilde diğer bileşenler sayısal çalışmalar için ihmal edilmiştir. Çalışmada kullanılan CH₄'ün termodinamik ve termodinamik özellikleri Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. CH ₄ 'ün termodinamik ve termodinamik özellikleri	
Yoğunluk	0.668 kg/m ³ (20 °C, 1 atm)
Araştırma Oktan Sayısı	120
Motor Oktan Sayısı	101
Kaynama Noktası	111.5 K
Alt Isıl Değer	50.009 MJ/kg
Kimyasal Abstraktlar Servisi® Kayıt Numarası	74-82-8
Molekül Kütlesi	16.042 g/mol

Çalışmada kullanılacak motor özellikleri ve yakıt belirlendikten sonra çalışma parametreleri oluşturulmuştur. Öncelikle yanmanın doğru sağlanabilmesi için ANSYS Forte tabanında bulunan doğalgaz mekanizması seçilmiştir. Bu mekanizma yaklaşık 4000 türden indirgenmiş bir kimyasal kinetik mekanizma olup farklı eşdeğerlik oranı (0.4-2), basınç (1-100 bar), sıcaklık (1200 K ve daha fazlası) ve EGR oranı (0 - %20) için geçerliliği doğrulanmıştır. Kullanılan mekanizma 39 tür ve 268 tür reaksiyonu içermekte ve doğalgaz bileşenleri için yanma olayını çözmektedir. Bu mekanizma belirlendikten sonra kullanılan yakıt için bu tez çalışması kapsamında kaynak dosyalar oluşturulmuştur. Bu kaynak dosyalarda yakıtın kimyasal, termodinamik, termodinamik ve transport verileri bulunmaktadır. Bu verilerle kimyasal kinetik mekanizmanın birlikte çalıştırılması durumunda en doğru yanma çözümü elde edilmeye çalışılmıştır. Diğer alt modeller ise, yanma için G-equation model, türbülans için RNG k-epsilon model ve enjektör için hollow cone enjektör seçilmiştir. Çalışmanın doğru yürütülebilmesi için özellikle enjeksiyon şartları oldukça önemlidir. Kullanılan enjektör tipi enjeksiyon basıncının tanımlanmasına ve farklı enjeksiyon parametrelerine (nozül sayısı, püskürtme açısı, konik açı vs) müsaade etmektedir. Kullanılan enjeksiyon parametreleri Tablo 2.3'de verilmiştir.

Tablo 2.3. CH₄ enjeksiyon için teknik şartlar

Enjeksiyon Basıncı	0.3Mpa
Enjeksiyon Süresi	50KA
Enjektör Tipi	Hollow enjektör
Nozul Çapı	120micron
Nozul Sayısı	1
Enjekte Edilen Gaz	CH ₄

Temel alt modeller belirlendikten sonra uygun çalışma şartlarının sağlanabilmesi için bazı sınır şartlarının tanımlanması gerekmektedir. Bu sınır şartları ortam sıcaklığı ve basıncı başta olmak üzere motor sıcaklıklarını içermektedir. Soğuk çalışma şartlarından uzak olmak ve stabil şartlarda sayısal çalışma yürütebilmek için bu sınır şartlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu tez çalışması kapsamında kullanılan motor için belirlenen sınır şartları Tablo 2.4’de görülmektedir.

Tablo 2.4. Sınır şartları

Ortam sıcaklığı	313K
Ortam basıncı	80000Pa
Piston sıcaklığı	550K
Emme supabı sıcaklığı	400K
Egzoz supabı sıcaklığı	877K
Emme manifoldu sıcaklığı	313K
Egzoz manifoldu sıcaklığı	485K
Silindir tepe sıcaklığı	523K
Cidar sıcaklığı	500K
Buji sıcaklığı	485K

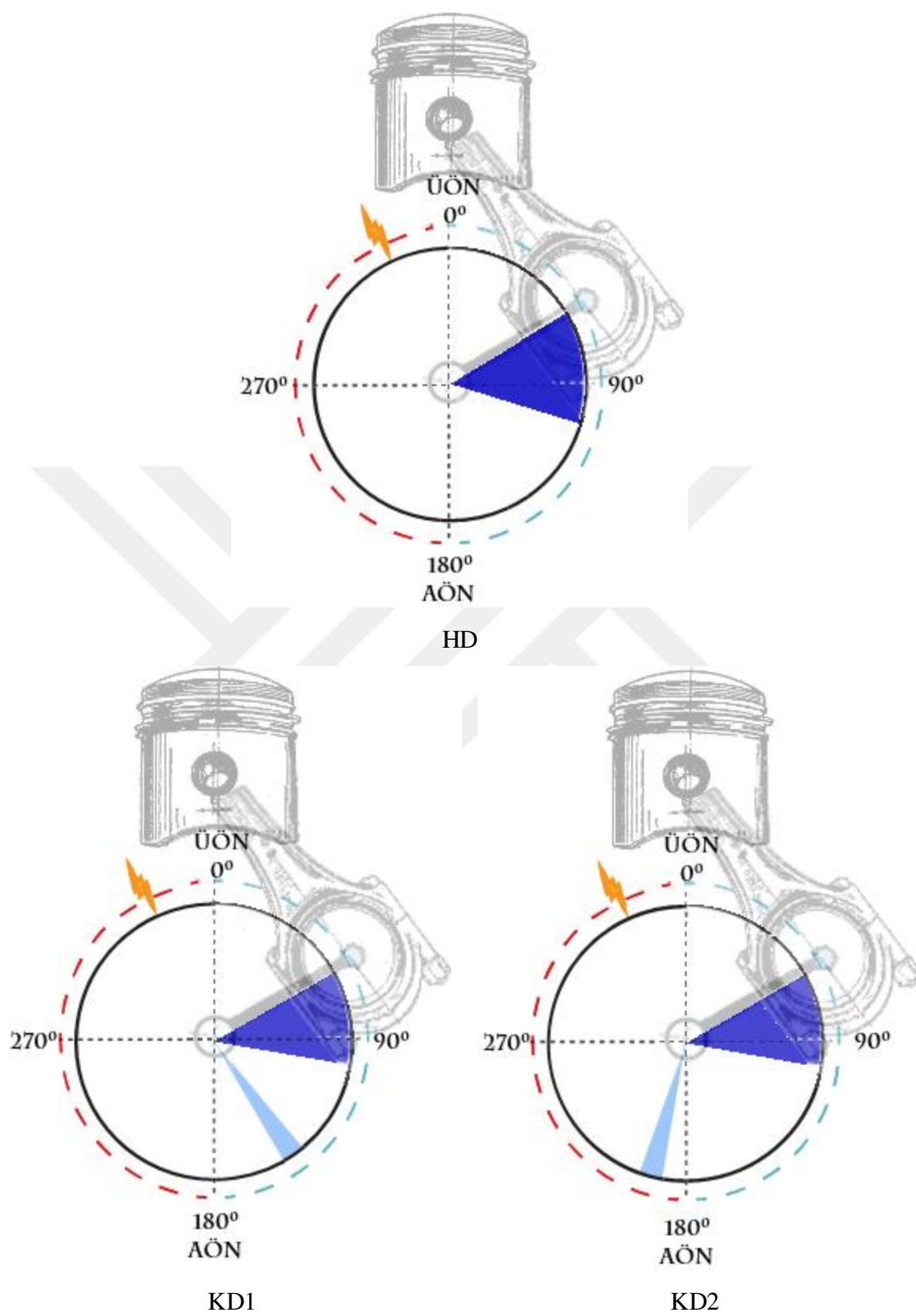
Tüm alt modeller ve sınır şartları belirlendikten sonra öncelikle belirlenen motor şartlarında CH₄’ün yakıt olarak kullanıldığı fakir karışımlı homojen dolgulu bir durum için çalışma başlatılmıştır. Tek püskürtmenin uygulandığı direk enjeksiyonlu bu çalışma şartı kademeli dolgu şartları için referans çalışma olarak kabul edilmiştir. Daha sonra kademeli dolgu şartlarının sağlanabilmesi için yakıt enjeksiyonu iki farklı enjeksiyon zamanlamasına ayrılmıştır. Bu durumda yakıtın bir bölümü birinci enjeksiyonda silindir içerisine enjekte edilmiş ve hava yakıt karışımı sağlanmıştır. Sağlanan bu karışım oldukça fakir karışım şartlarından ibarettir. Daha sonra ikinci enjeksiyonda buji bölgesine tekrar yakıt gönderilmiş ve özellikle buji bölgesinde kısmen zengin bir karışım sağlanmıştır. Uygulanan bu yöntemle

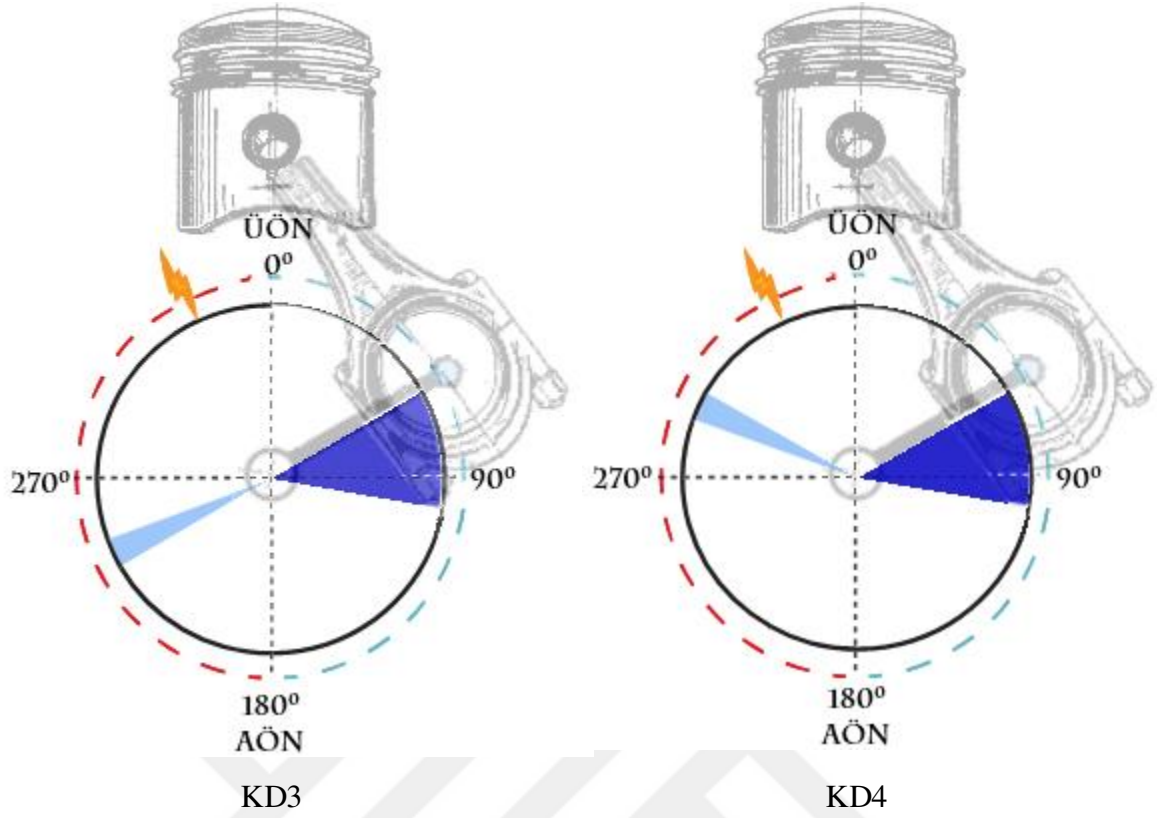
kademeli dolgu şartları sağlanmış olup buji bölgesinde zengin ama genel olarak fakir karışım bölgesinde bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasının birinci bölümünde oluşturulan iki kademeli püskürtme şartları için öncelikle her bir püskürtmede püskürtülecek yakıt miktarı üzerine bir çalışma yürütülmüştür. Bu durumda birinci ve ikinci püskürtme için farklı oranlarda yakıt enjekte edilerek çalışmalar tekrarlanmıştır. Bu aşama için kullanılan yakıt oranları ve çalışma parametreleri Tablo 2.5’de görülmektedir.

Tablo 2.5. Farklı yakıt oranları için çalışma parametreleri								
Yakıt oranı	Birinci enjeksiyon			İkinci enjeksiyon			Buji zamanı	Lambda (λ)
	Zamanı	Süresi	Oranı	Zamanı	Süresi	Oranı		
% 85-% 15	300KMA ÜÖNÖ	40KMA	%85	120KMA ÜÖNÖ	10KMA	%15	35KMA ÜÖNÖ	1.4310
% 70-% 30	300KMA ÜÖNÖ	35KMA	%70	120KMA ÜÖNÖ	15KMA	%30	35KMA ÜÖNÖ	1.4026
% 50-% 50	300KMA ÜÖNÖ	25KMA	%50	120KMA ÜÖNÖ	25KMA	%50	35KMA ÜÖNÖ	1.3982
% 30-% 70	300KMA ÜÖNÖ	15KMA	%30	120KMA ÜÖNÖ	35KMA	%70	35KMA ÜÖNÖ	1.4532

Tez çalışmasının ikinci kısmında ise kademeli dolgu şartlarının daha net anlaşılabilmesi ve enjeksiyon zamanlamasının optimizasyonu için birinci enjeksiyon zamanı sabit tutulmak üzere ikinci enjeksiyon zamanlaması bu tez çalışması kapsamında değiştirilmiştir. Homojen ve kademeli dolgu şartları için belirlenen enjeksiyon zamanlaması ve çalışma şartları Şekil 2.4 ve Tablo 2.6’de görülmektedir.





Şekil 2.4. Homojen ve kademeli dolgu şartları için belirlenen enjeksiyon zamanlaması

Tablo 2.6. Farklı enjeksiyon zamanlamaları ve çalışma şartları

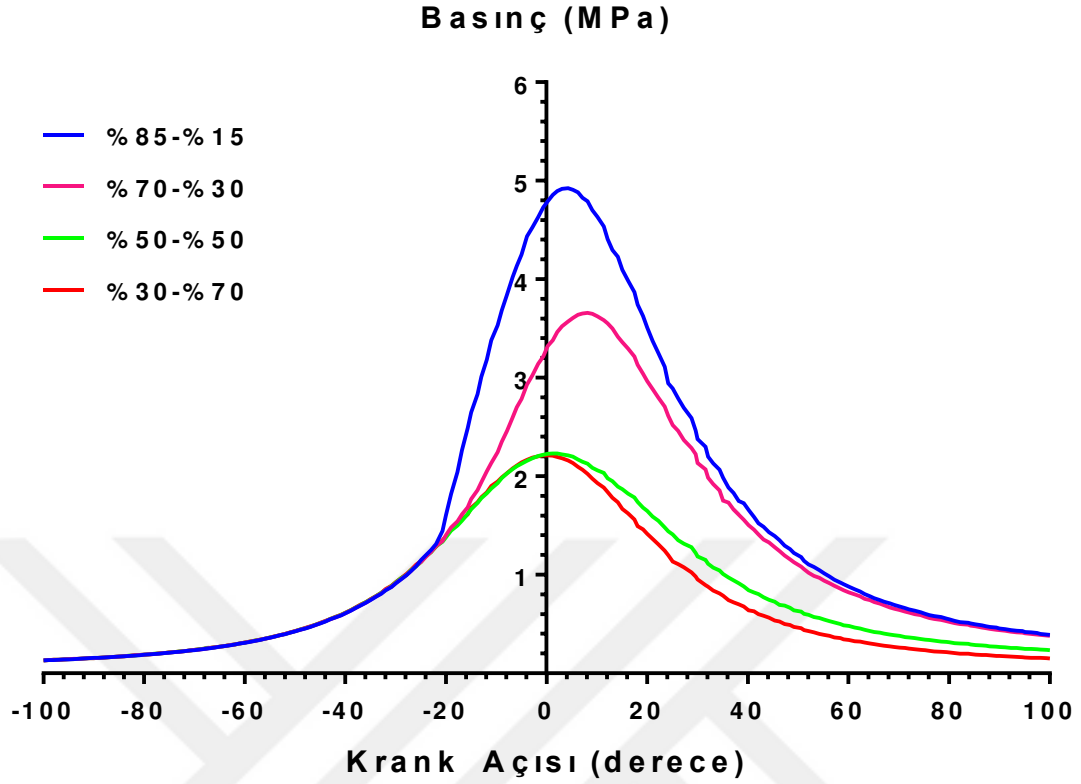
Enjeksiyon Tipi	Birinci enjeksiyon			İkinci enjeksiyon			Buji zamanı	Lambda (λ)
	Zamanı	Süresi	Oranı	Zamanı	Süresi	Oranı		
HD	300KMA ÜÖNÖ	40KMA	%100	---	---	---	35KMA ÜÖNÖ	1.4151
KD1	300KMA ÜÖNÖ	40KMA	%85	220KMA ÜÖNÖ	10KMA	%15	35KMA ÜÖNÖ	1.4211
KD2	300KMA ÜÖNÖ	40KMA	%85	170KMA ÜÖNÖ	10KMA	%15	35KMA ÜÖNÖ	1.4184
KD3	300KMA ÜÖNÖ	40KMA	%85	120KMA ÜÖNÖ	10KMA	%15	35KMA ÜÖNÖ	1.4310
KD4	300KMA ÜÖNÖ	40KMA	%85	70KMA ÜÖNÖ	10KMA	%15	35KMA ÜÖNÖ	1.4423

3. BULGULAR

Bu tez çalışması kapsamında iki aşamada kademeli dolgulu motor şartları için analizler yapılmıştır. Birinci aşamada her bir kademede püskürtülen yakıt miktarının kademeli dolgulu motor şartlarına, motor performansına ve emisyon oluşumuna etkisi araştırılmıştır. İkinci bölümde ise, birinci bölümde belirlenen en ideal yakıt oranına göre ikinci püskürtmenin yapılacağı krank açısı araştırılmıştır. Bu şartlar altında doğalgazın yakıt olarak kullanıldığı kademeli dolgulu direk enjeksiyonlu bir benzinli motorun analizi gerçekleştirilmiştir.

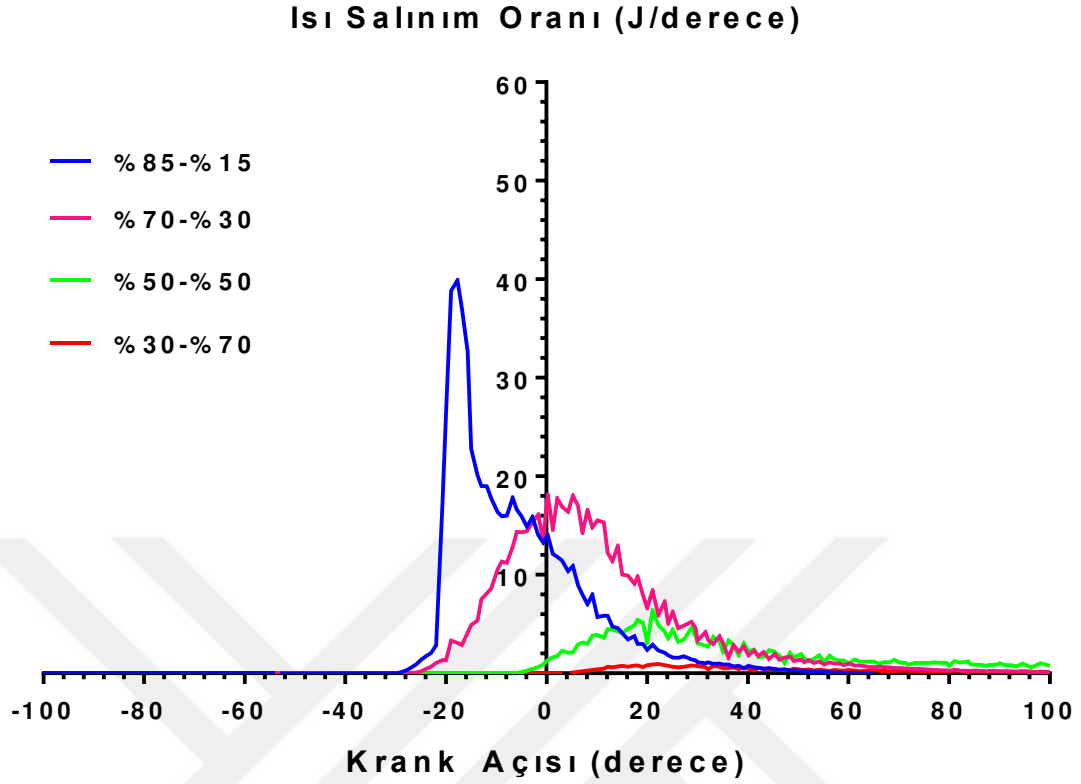
3.1 Her Bir Kademede Püskürtülen Yakıt Miktarının Motor Performansı ve Emisyon Oluşumuna Etkisi

Tez çalışmasının bu bölümünde kademeli dolgu şartlarını sağlamak için iki aşamada püskürtülen yakıtın her bir aşamada püskürtülme oranları araştırılmıştır. Bilindiği üzere kademeli dolgulu motorlarda genel olarak fakir karışım tercih edilmekle birlikte, buji bölgesinde stokiyometrik veya zengin karışım olması amaçlanır. Bu amaç doğrultusunda birinci püskürtmenin ÜÖN'dan önce 300KMA'da yapıldığı, ikinci püskürtmenin ise ÜÖN'dan önce 120KMA'da yapıldığı durum için çalışma şartları belirlenmiştir. Belirlenen püskürtme açılarında püskürtülecek yakıt miktarının motor performansı ve emisyon oluşumuna etkili olacağı düşünülmüştür. Bu amaçla bir çevrimde püskürtülecek olan yakıt miktarının birinci püskürtmede sırası ile %30,%50, %70 ve %85 oranlarında motora gönderilmesi, ikinci püskürtmede sırası ile %70, %50, %30 ve %15 oranlarında motora gönderilmesi sağlanmıştır. Bu şekilde tüm püskürtme durumlarında silindir içerisinde genel olarak fakir karışım sağlanırken buji bölgesinde yaklaşık stokiyometrik veya zengin karışım şartları oluşturulmuştur. Bu analizler neticesinde her bir kademede gönderilecek yakıt miktarının motor performansı ve emisyon oluşumuna etkileri grafiklerle sunulmuştur.



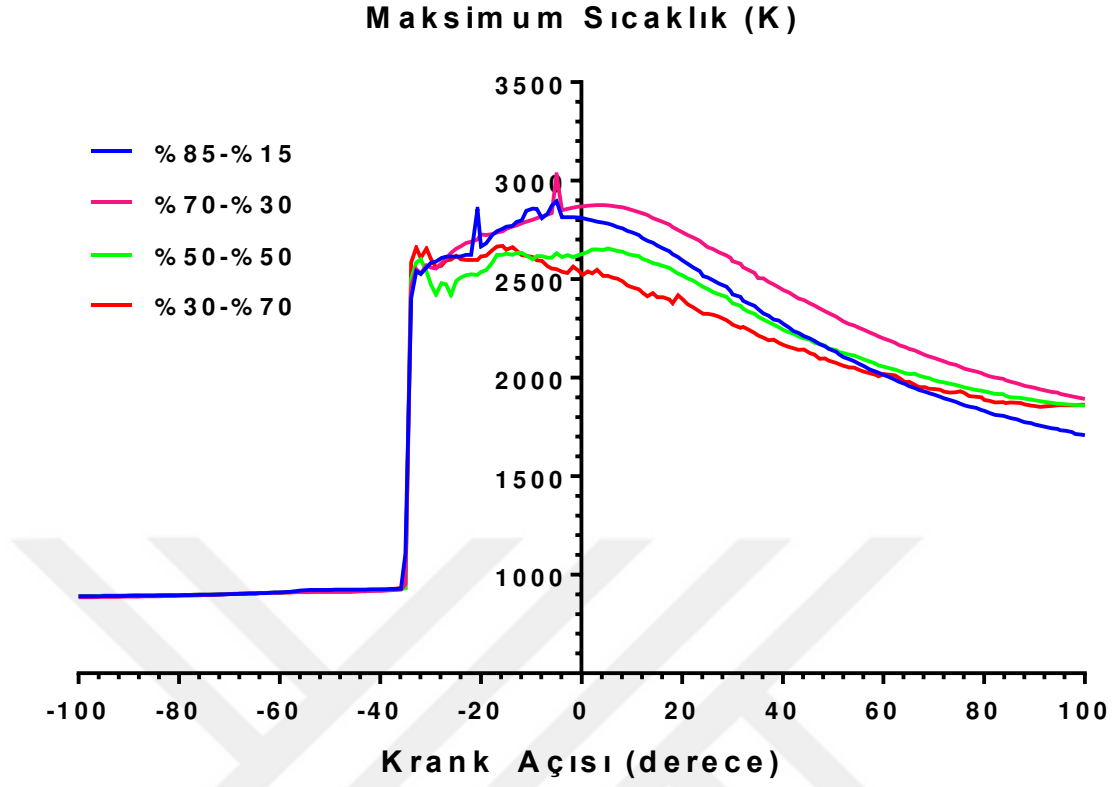
Şekil 3.1. Silindir içi basıncın farklı kademelerde püskürtülen yakıt miktarıyla değişimi

Şekilde 3.1’de her bir kademede püskürtülen yakıt miktarının silindir içi basıncı etkisi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yakıtın büyük oranının birinci püskürtmede (emme zamanı sonuna doğru), daha az miktarının ikinci püskürtmede gönderildiği durumlarda (%85-%15, %70-%30) daha yüksek silindir içi basınçlar elde edilmiştir. İkinci püskürtmede daha az yakıt gönderilmesi durumunda buji bölgesinde yaklaşık stokiometrik karışım sağlanmış ve bu durum silindir içi basıncı olumlu şekilde etkilemiştir. Birinci püskürtmede daha az yakıtın püskürtüldüğü, ikinci püskürtmede yakıtın %50’si veya daha fazlasının püskürtüldüğü durumlarda ise silindir içi basıncın ciddi oranda düştüğü gözlenmiştir. Bu durumda %85-%15 yakıt oranının en iyi silindir içi basınç değerlerini sağladığı görülmektedir. Ayrıca grafikte görülen önemli bir diğer nokta maksimum basınç değerinin meydana geldiği krank açısıdır. Şekilde görüldüğü gibi ikinci püskürtmede az yakıt püskürtülen durumlarda maksimum basınç değerleri istenildiği gibi ÜÖN’den hemen sonra elde edilirken, diğer durumlarda ÜÖN’da veya ÜÖN’den önce elde edilmiştir. Bu durumun motor performansına olumsuz etkileyeceği görülmektedir.



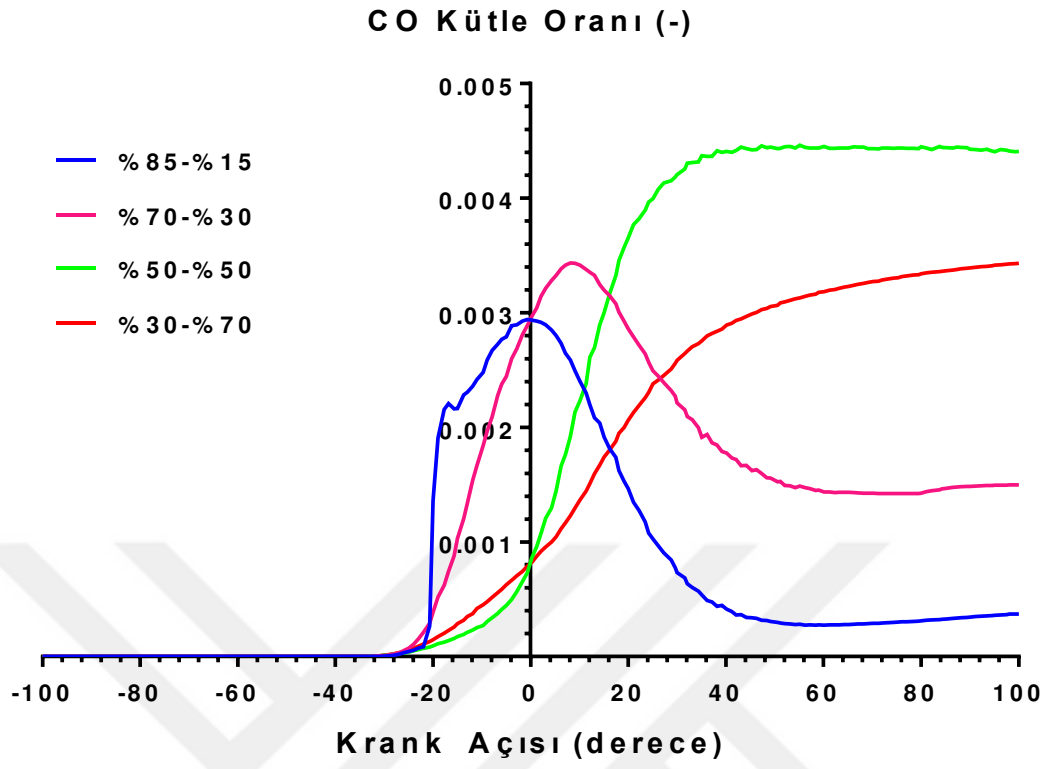
Şekil 3.2. Isı salınım oranının farklı kademelerde püskürtülen yakıt miktarıyla değişimi

Şekil 3.2’de her bir kademede püskürtülen yakıt miktarının ısı salınım oranına etkisi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yakıtın büyük oranının birinci püskürtmede (emme zamanı sonuna doğru), daha az miktarının ikinci püskürtmede gönderildiği durumlarda (%85-%15, %70-%30) daha yüksek ısı salınım oranı elde edilmiştir. Birinci püskürtmede daha az yakıtın püskürtüldüğü, ikinci püskürtmede yakıtın %50’si veya daha fazlasının püskürtüldüğü durumlarda ise ısı salınım oranının ciddi oranda düştüğü gözlenmiştir. Özellikle %30-%70 yakıt oranı durumunda ısı salınımlarının ÜÖN’den çok sonra ve çok düşük oranda meydana geldiği gözlenmiştir. Bu durum silindir içi basınç grafiğini doğrulamakla birlikte, ikinci püskürtmede yüksek oranda yakıt gönderilmesi durumunda yanmanın kötüleşeceğini göstermektedir.

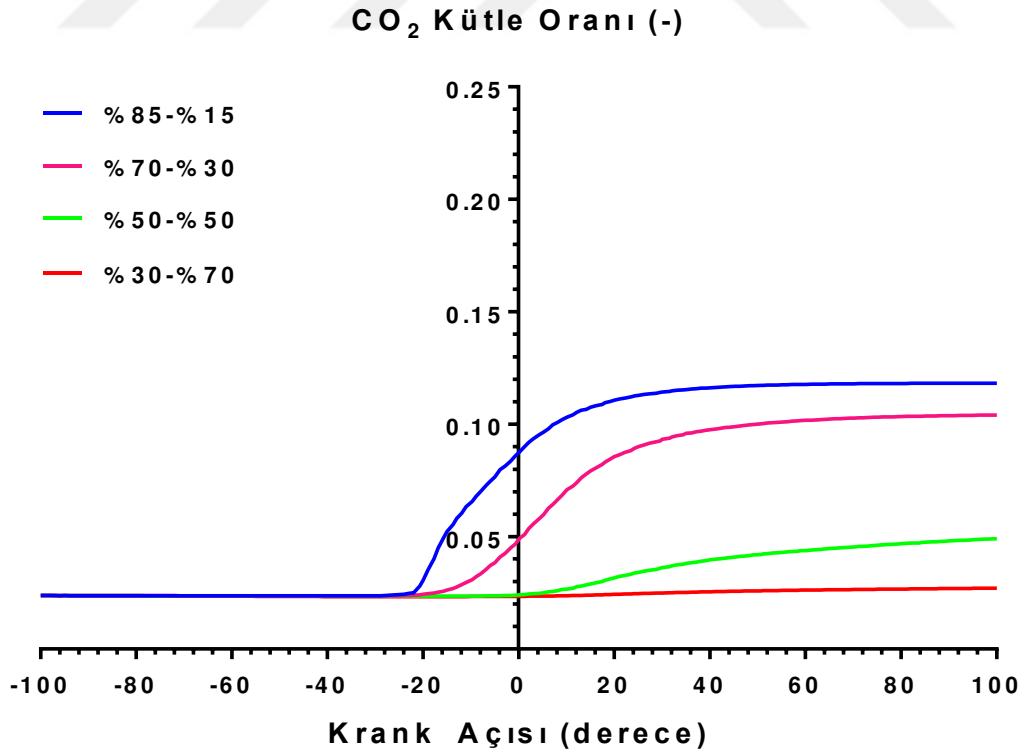


Şekil 3.3. Silindir içi maksimum sıcaklığın farklı kademelerde püskürtülen yakıt miktarıyla değişimi

Şekil 3.3’de her bir kademede püskürtülen yakıt miktarının silindir içi maksimum sıcaklıklara etkisi görülmektedir. Buji kıvılcımı ve buji enerjisi etkisiyle silindir içerisinde meydana gelen yanma ile birlikte benzer sıcaklıklarda yanma sağlanmıştır. Tüm püskürtme oranları için benzer sıcaklık değerleri elde edilmekle birlikte ikinci kademede daha az yakıt gönderilen durumlarda kısmen daha yüksek silindir içi sıcaklıkları elde edilmiştir. İkinci püskürtmede daha fazla yakıt gönderilen durumlarda maksimum sıcaklık değerlerinin ÜÖN’den çok önce meydana geldiği ve hızlıca düşüş gösterdiği görülmektedir.



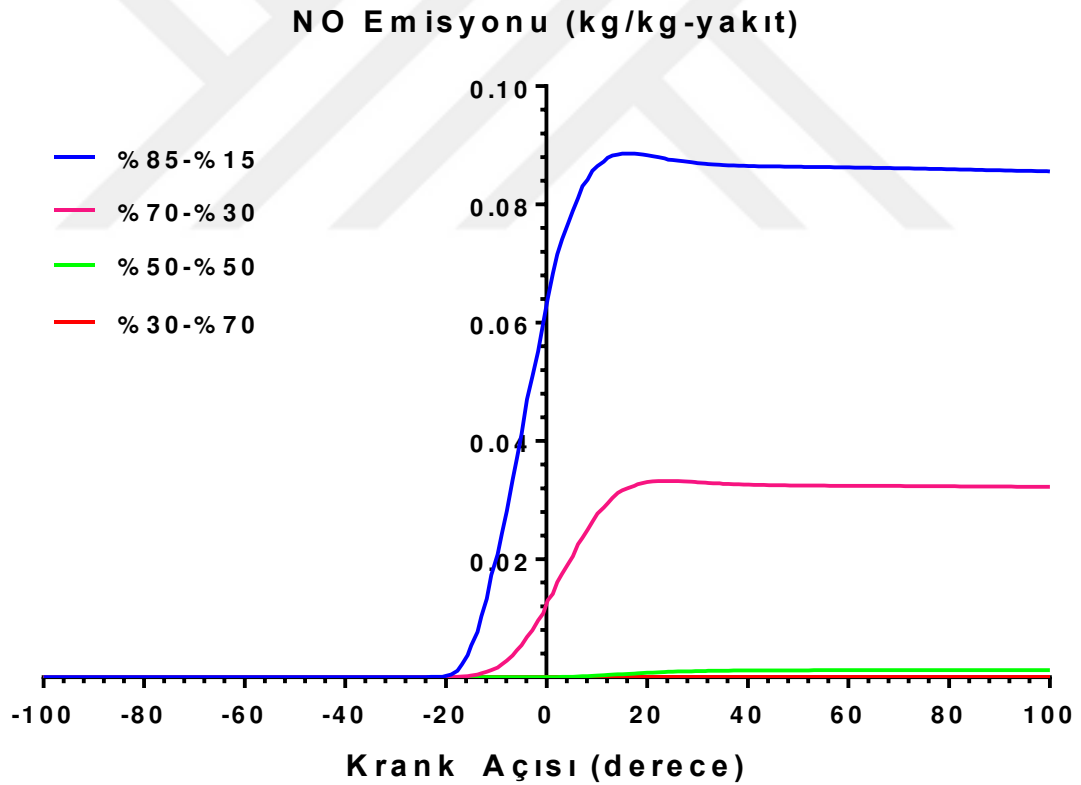
a)



b)

Şekil 3.4. CO ve CO₂'nin farklı kademelerde püskürtülen yakıt miktarıyla değişimi

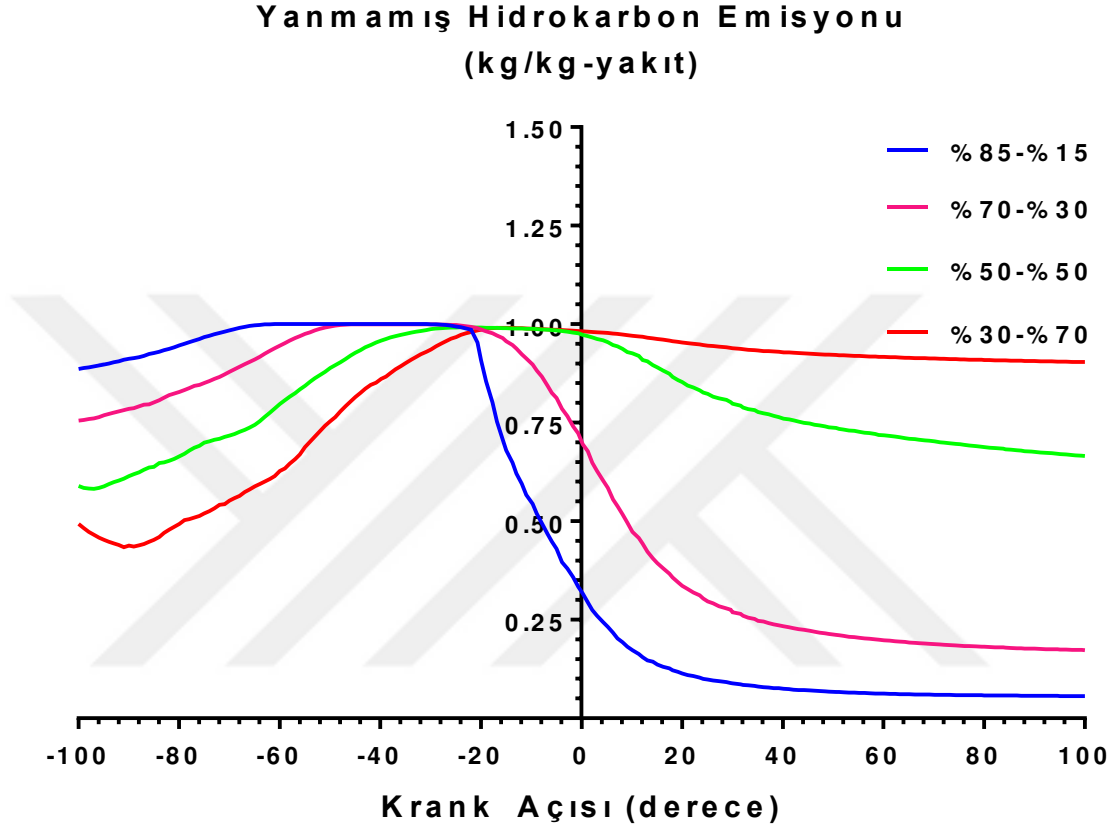
Şekil 3.4’de CO ve CO₂ emisyonlarının her bir kademede püskürtülen yakıt miktarına göre değişimi görülmektedir. Şekil 3.4 (a)’da görülen CO emisyonları, ikinci püskürtmede daha az yakıt püskürtülen durumlar (%85-%15, %70-%30) için yanmanın başlamasıyla beraber yükselmiş ve ilerleyen krank açılarında düşüş göstermiştir. Bu durumlar için elde edilen değerlerin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Fakat ikinci püskürtmede daha fazla yakıt püskürtülen durumlarda CO emisyonun ÜÖN’den çok sonra yükseldiği görülmektedir. Bu yükseliş yanmanın beklenilenden daha geç bir krank açısında ve oldukça kötü olduğunu göstermektedir. Grafikte görüldüğü gibi en düşük CO değerleri %85-%15 yakıt oranında elde edilmiştir. CO₂ emisyonları ise ikinci püskürtmede daha az yakıt püskürtülen durumlarda kısmen daha yüksek meydana gelmiştir. Düşen CO emisyonlarına bağlı olarak elde edilen bu sonuç daha iyi bir yanma göstergesidir (Şekil 3.4 (b)).



Şekil 3.5. NO emisyonunun farklı kademelerde püskürtülen yakıt miktarıyla değişimi

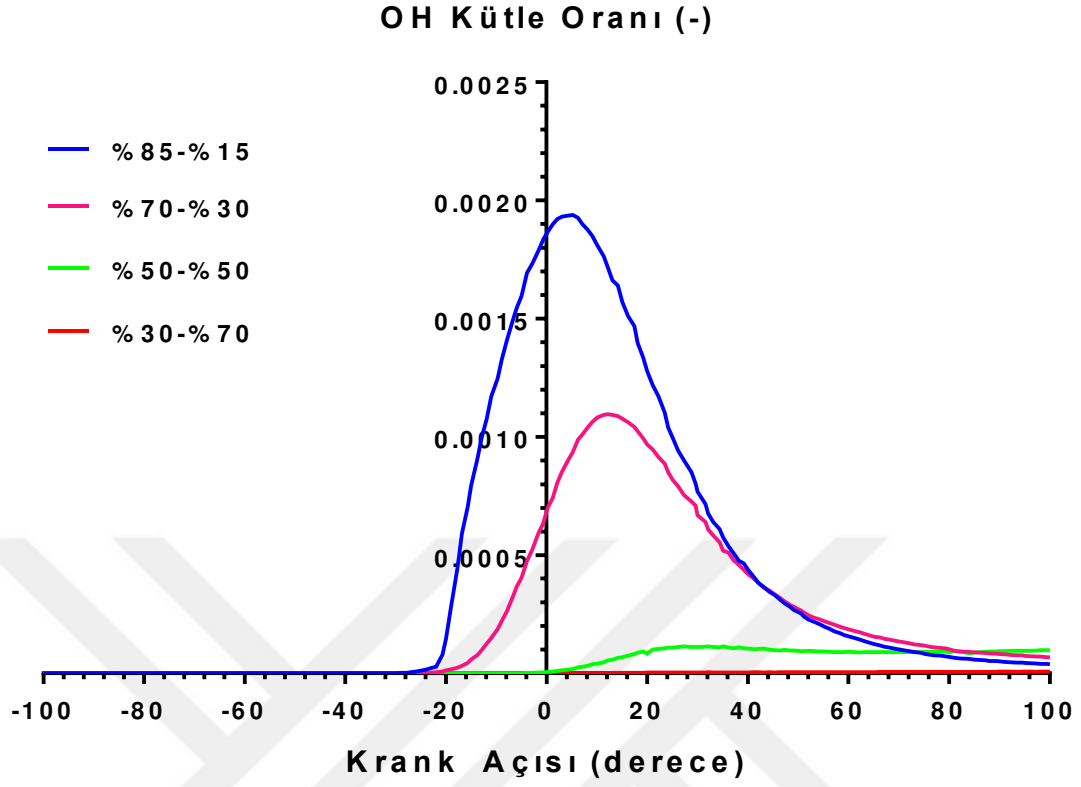
Şekil 3.5’de her bir kademede püskürtülen yakıt oranına bağlı olarak silindir içi NO emisyonları görülmektedir. Bilindiği üzere NO oluşumu silindir içi sıcaklığın bir fonksiyonudur. İkinci püskürtmede daha az yakıt püskürtülen durumlarda NO emisyonunun

yüksek çıktığı görülmektedir. Bu durum silindir içi sıcaklık değişimleri ile uyumaktadır (Şekil 3.3). İkinci püskürtmede daha fazla yakıt püskürtülen durumlarda yanma sırasında daha düşük sıcaklıklar görüldüğünden NO oluşumu için gerekli reaksiyon ısısı sağlanamamış ve bu durumlar için NO emisyon oluşumu oldukça düşük kalmıştır.



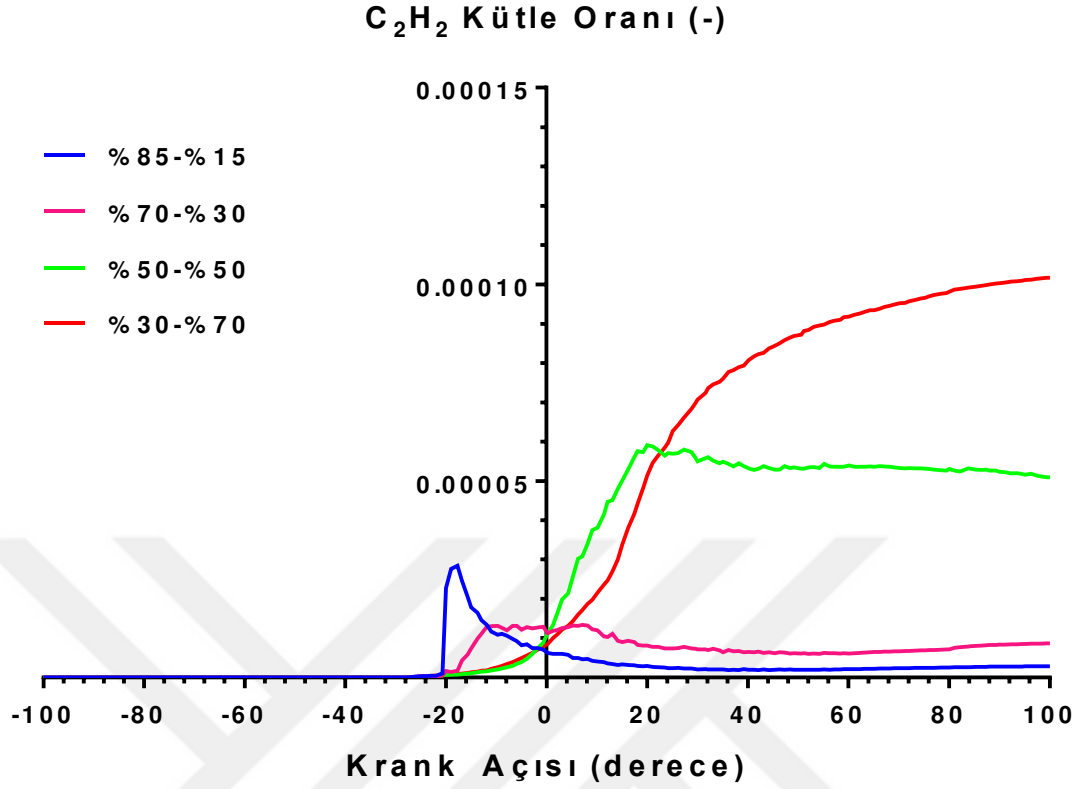
Şekil 3.6. Yanmamış hidrokarbon emisyonunun farklı kademelerde püskürtülen yakıt miktarıyla değişimi

Her bir kademede püskürtülen yakıt oranına göre silindir içi yanmamış hidrokarbon emisyonu Şekil 3.6'da görülmektedir. Yanmamış hidrokarbon oluşumu içten yanmalı motorlar için istenmeyen bir emisyon türü olmakla birlikte, yakıt tüketimini ve yakıt tüketimi başına elde edilen gücü doğrudan etkilemektedir. Düşük hidrokarbon emisyonu yanma veriminin yüksek olduğunu göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi ikinci kademede daha az yakıt püskürtülen durumlarda yanmamış hidrokarbon emisyonu oldukça düşmektedir. Fakat ikinci kademede daha fazla yakıt gönderilen durumlarda yanmamış hidrokarbon emisyonu oldukça yüksek çıkmış, yani motora gönderilen yakıt çok az oranında yanmıştır.



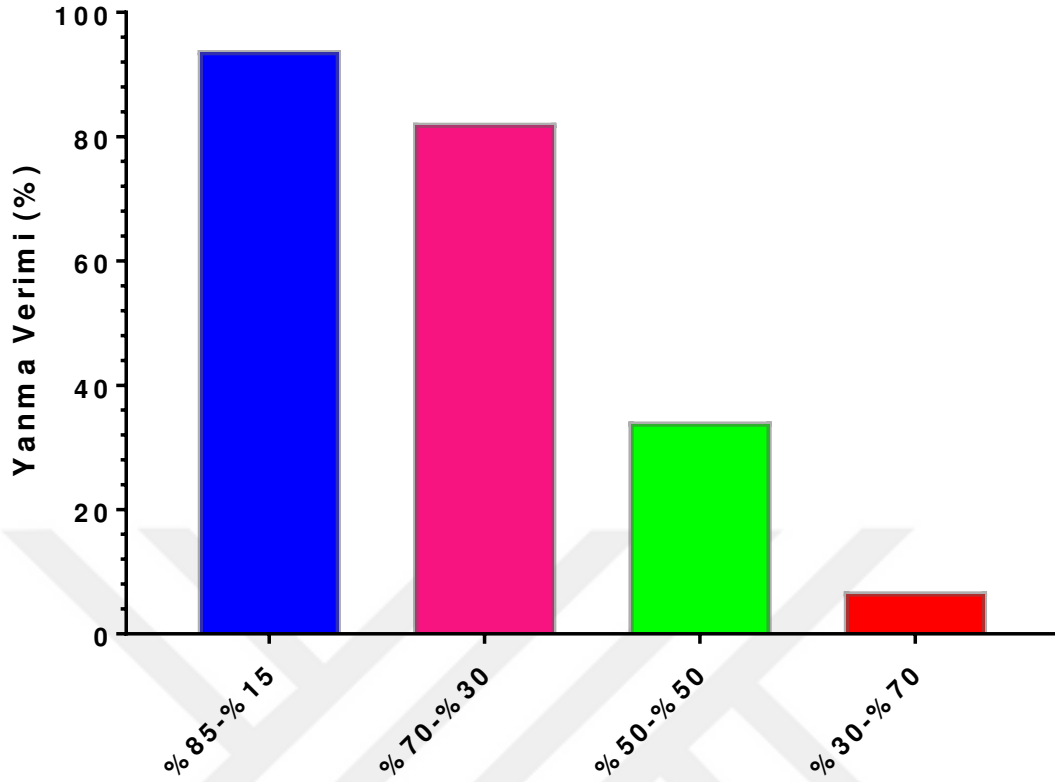
Şekil 3.7. OH kütle oranının farklı kademelerde püskürtülen yakıt miktarıyla değişimi

İçten yanmalı motorlarda yanmanın başlaması ve sürecini takip etmek için silindir içi OH oluşumu izlenebilir. Bu amaçla Şekil 3.7’de her bir kademede püskürtülen yakıt oranına bağlı olarak silindir içi OH oluşumu görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi ikinci kademede daha az yakıt püskürtülen durumlarda OH oluşumu yani yanma    N’den hemen önce başlayıp    N’den hemen sonra maksimum değerine ulaşmıştır. Fakat ikinci püskürtmede daha az yakıt gönderilen durumlarda OH oluşumu    N’den çok sonra başlamıştır. Bu durum ikinci püskürtmede daha fazla yakıt gönderilen durumlarda yanmanın meydana geldiği krank açısının ve yanma veriminin uygun olmadığını göstermektedir.



Şekil 3.8. C₂H₂ kütle oranının farklı kademelerde püskürtülen yakıt miktarıyla değişimi

İçten yanmalı motorlarda kullanılan bazı kimyasal kinetik mekanizmalar için is (soot) emisyonu doğrudan hesaplanamaz. Bu durumda Ansys FORTE is emisyonu takibi için öncü bir ürün olan C₂H₂'nin takibini önermektedir. Şekil 3.8'de her bir püskürtmede püskürtülen yakıt oranına göre C₂H₂ değişimi görülmektedir. Yanmanın daha iyi gerçekleştiği ve ikinci püskürtmede daha az yakıt gönderilen durumlarda C₂H₂ oluşumunun oldukça düşük olduğu görülmektedir. Fakat ikinci püskürtmede daha fazla yakıt gönderilen durumlarda, oksijen molekülleri ile buluşamayan yakıt parçacıkları C₂H₂'nin yükselmesine sebep olmuştur.

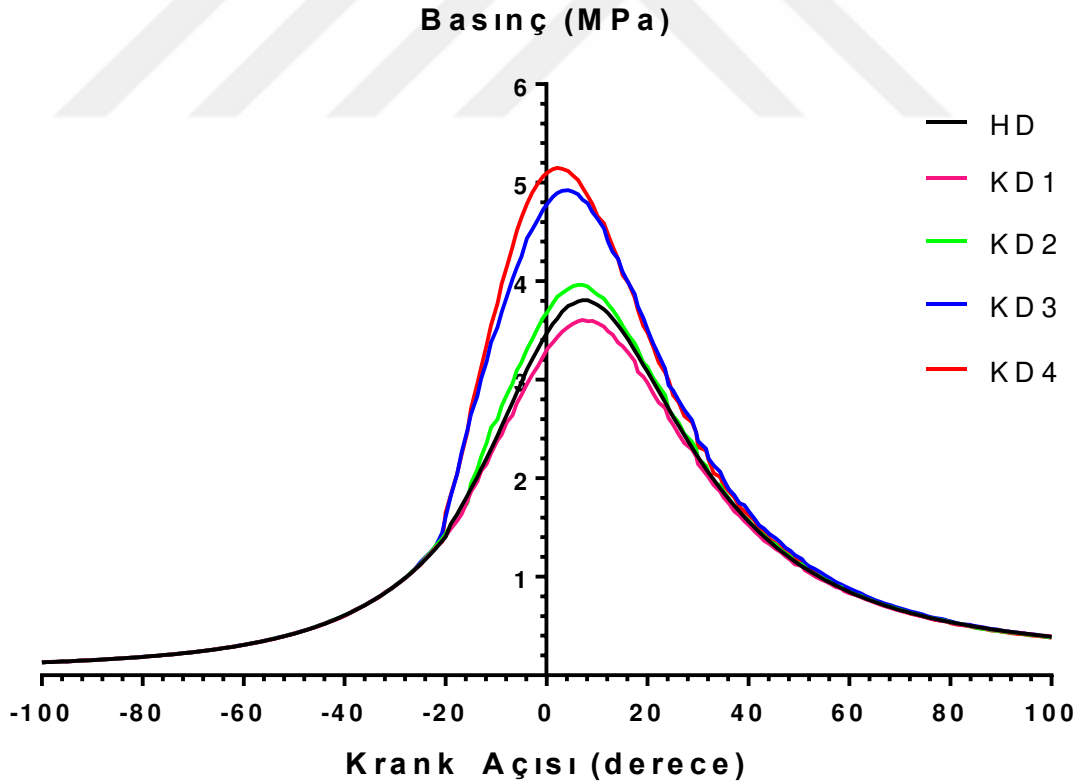


Şekil 3.9. Yanma veriminin farklı kademelerde püskürtülen yakıt miktarıyla değişimi

Her bir kademede püskürtülen yakıt miktarına bağlı olarak yapılan tüm analizlerden sonra belirlenen çalışma şartları içi yanma verimleri hesaplanmıştır (Şekil 3.9). Daha önce elde edilen tüm grafiklere uygun olarak ikinci püskürtmede daha az yakıt püskürtülen durumlarda yanma veriminin diğer durumlara göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Çalışmanın yürütüldüğü %85-%15, %70-%30, %50-%50 ve %30-%70 yakıt oranları için sırası ile %93.9, %82.3, %34.2 ve %6.9 yanma verimleri elde edilmiştir.

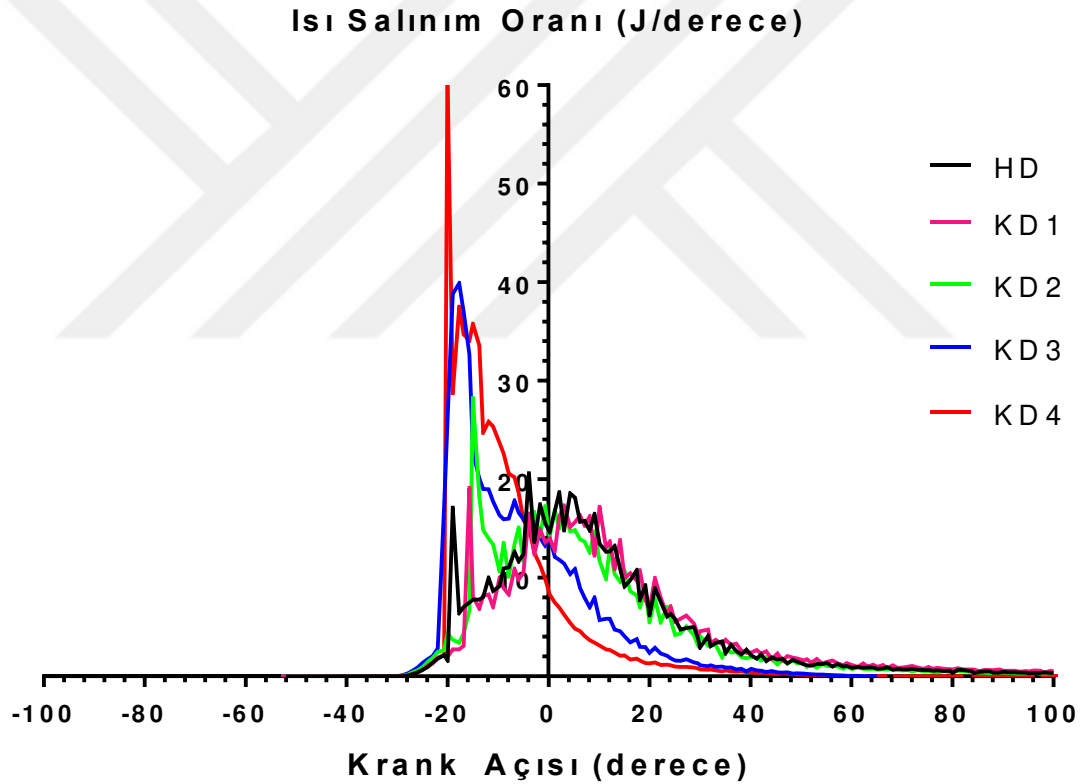
3.2 İkinci Püskürtme Zamanının Motor Performansı ve Emisyon Oluşumuna Etkisi

Bir önceki bölümde her bir püskürtmede motora gönderilecek yakıt miktarının motor performansı ve emisyon oluşumlarına etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, incelenen oranlar arasında %85-%15 yakıt oranının en iyi motor performansı, yanma verimi ve emisyon oluşumu sağladığı görülmüştür. Bu yakıt oranı sabit tutularak bu bölümde ikinci püskürtmenin zamanı incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında birinci püskürtme emme zamanının sonuna doğru ÜÖN'dan 300KMA önce yapılmaktadır. İkinci püskürtmenin açısı ise bu bölümde gerçekleştirilen çalışma ile belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla ÜÖN'dan 220KMA (KD1), 170KMA (KD2), 120KMA (KD3) ve 70KMA (KD4) önce ikinci püskürtmeler yapılarak motor performansı ve emisyon oluşumları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar tek püskürtme yapılan homojen dolgulu (HD) fakir karışimli çalışma şartıyla kıyaslanmıştır.



Şekil 3.10. Silindir içi basıncın farklı püskürtme zamanlamalarına bağlı olarak değişimi

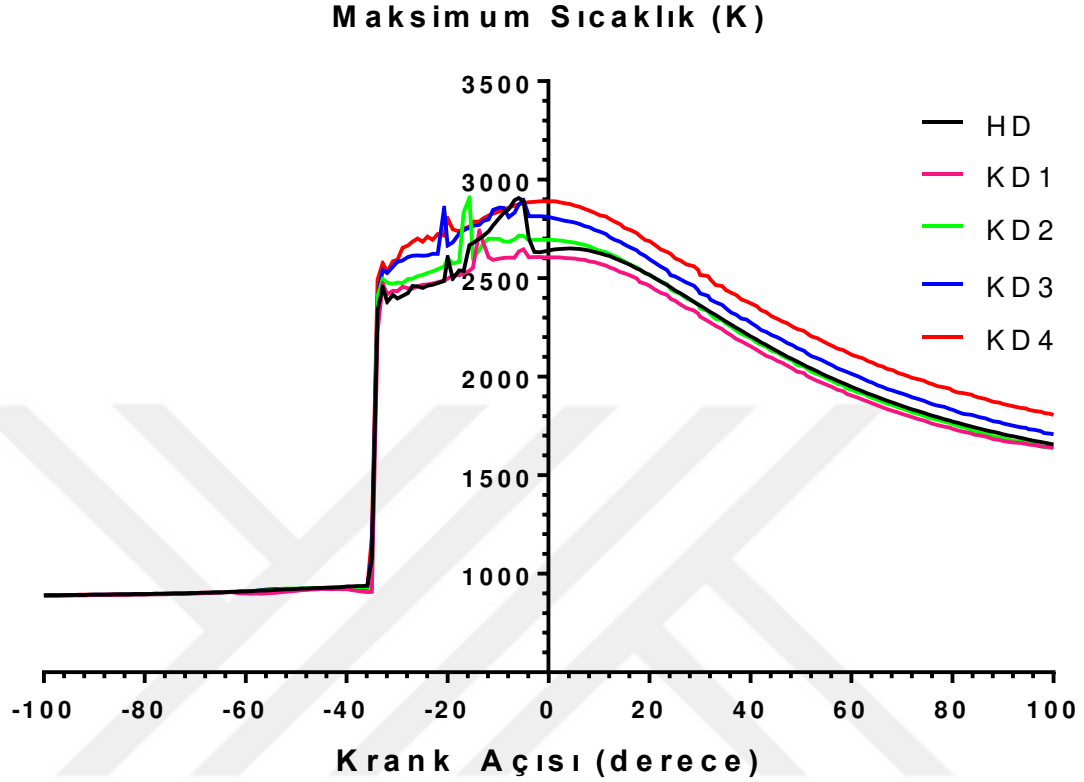
Şekil 3.10’da farklı püskürtme zamanlamasına bağlı olarak silindir içi basınç değişimleri görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi geç enjeksiyon durumlarında (KD3 ve KD4) silindir içi basınç daha yüksek değerlere ulaşmıştır. Erken enjeksiyon durumlarında ise (KD1 ve KD2) silindir içi basınçların homojen dolgulu (HD) duruma daha yakın olduğu görülmektedir. Ayrıca erken enjeksiyon şartlarında silindir içi maksimum basıncın kısmen daha ileri krank açılarında meydana geldiği görülmektedir. Elde edilen bu grafikten geç enjeksiyon durumlarında kademeli dolgulu şartların daha doğru olarak sağlandığı ve motor performansının yükseldiği görülmektedir. Elde edilen sonuç ikinci püskürtme zamanının silindir içi basınç değerleri üzerine oldukça etkili olduğu göstermektedir.



Şekil3.11. Isı salınım oranının farklı püskürtme zamanlamalarına bağlı olarak değişimi

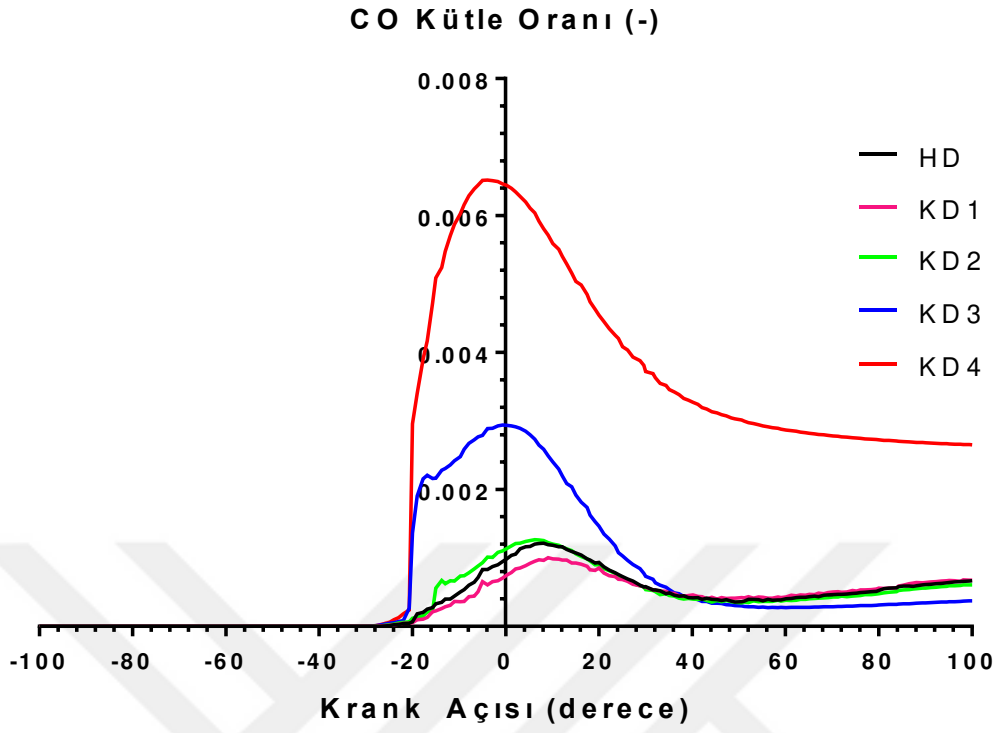
Isı salınım oranının farklı püskürtme zamanlarına bağlı olarak değişimi Şekil 3.11’de görülmektedir. Isı salınım oranı silindir içi basıncın da bir fonksiyonu olup yanma kalitesi adına önemli bir göstergedir. Geç enjeksiyon durumlarında ısı salınımının buji ateşlemesinden sonra hızlıca yükseldiği ve büyük bölümünün ÜÖN’den hemen önce tamamlandığı görülmektedir. Erken enjeksiyon zamanlamalarında ve homojen dolgulu

durumda ise ısı salınımının buji ateşlemesinden sonra kısmen daha yavaş yükseliş ÜÖN yakınlarında maksimum değerlere ulaştığı görülmektedir.

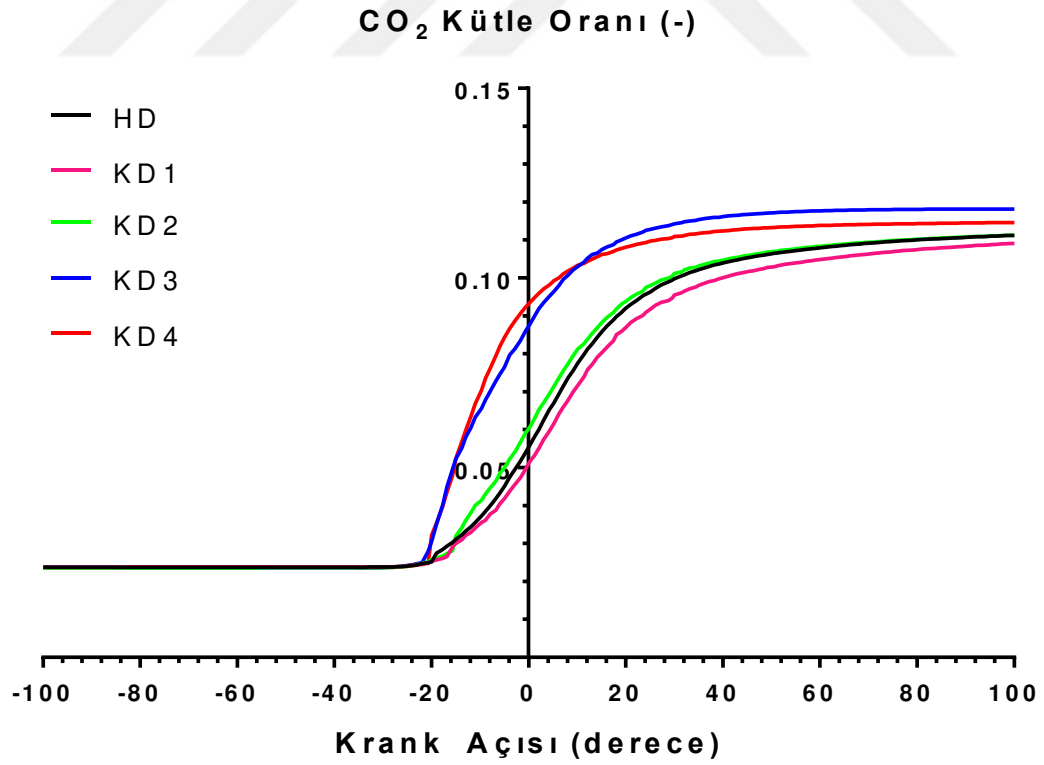


Şekil 3.12. Silindir içi maksimum sıcaklığın farklı püskürtme zamanlamalarına bağlı olarak değişimi

Şekil 3.12’de farklı püskürtme zamanlarının maksimum sıcaklıklara etkisi görülmektedir. Buji kıvılcımı ve buji enerjisi etkisiyle silindir içerisinde meydana gelen yanma ile birlikte benzer sıcaklıklarda yanma sağlanmıştır. Buji ateşlemesiyle birlikte tüm durumlar için silindir içi sıcaklıklar hızlıca yükselmiştir. Daha sonra ÜÖN’ya kadar sıcaklık eğrileri osilasyonlar yaparak ilerlemiştir. Bu bölge yanmanın başlayıp alev cephesinin genişlediği bölgedir. Tüm püskürtme zamanları için benzer sıcaklık değerleri elde edilmekle birlikte geç enjeksiyon zamanlarında kısmen daha yüksek silindir içi sıcaklıkları elde edilmiştir. Erken enjeksiyon zamanlamalarında ve homojen dolgulu durumda kısmen daha düşük sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Erken enjeksiyon zamanlamalarında (KD1 ve KD2) maksimum sıcaklık değerlerinin ÜÖN’den çok önce meydana geldiği ve hızlıca düşüş gösterdiği görülmektedir.



a)

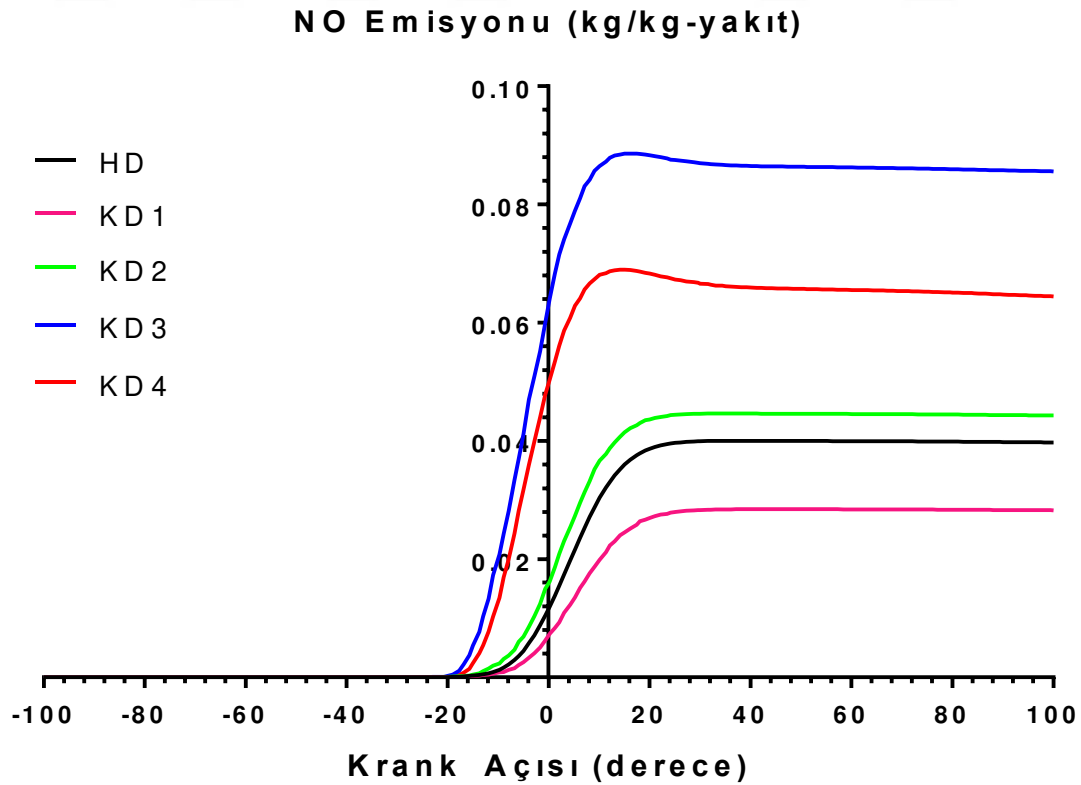


b)

Şekil 3.13. CO ve CO₂'nin farklı püskürtme zamanlamalarına bağlı olarak değişimi

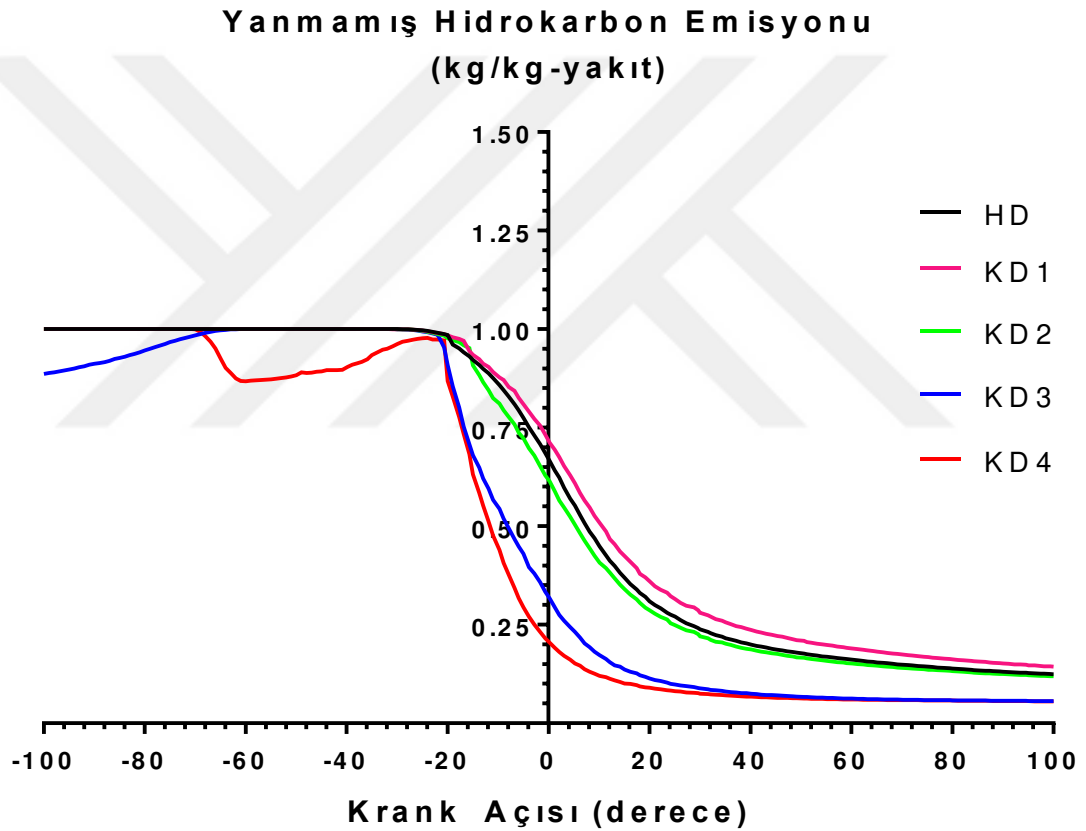
Şekil 3.13’de CO ve CO₂ emisyonlarının her bir kademede farklı püskürtme zamanlarına göre değişimi görülmektedir. Şekil 3.13 (a)’da görülen CO emisyonları, tüm püskürtme zamanlarında yanmanın başlamasıyla beraber yükselmiş ve ilerleyen krank açılarında düşüş göstermiştir. Bu durumlar için elde edilen değerlerin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi geç enjeksiyon zamanlamalarında CO emisyonu ÜÖN yakınlarda oldukça yükselmiştir. Fakat yanmanın devam etmesiyle beraber özellikle KD3 şartları en düşük CO emisyonuna ulaşmıştır.

KD4 şartlarında ise oldukça geç enjeksiyon yapılmasından ve yüksek motor devrinden dolayı CO emisyonları kısmen yüksek kalmıştır. Erken enjeksiyon zamanlamalarında ve homojen dolgulu durumda genel olarak düşük CO emisyonu gözlenmiştir. CO₂ emisyonları ise geç enjeksiyon zamanlamalarında kısmen daha yüksek meydana gelmiştir. Düşen CO emisyonlarına bağlı olarak elde edilen bu sonuç daha iyi bir yanma göstergesidir (Şekil 3.13 (b)).



Şekil 3.14. NO emisyonunun farklı püskürtme zamanlamalarına bağlı olarak değişimi

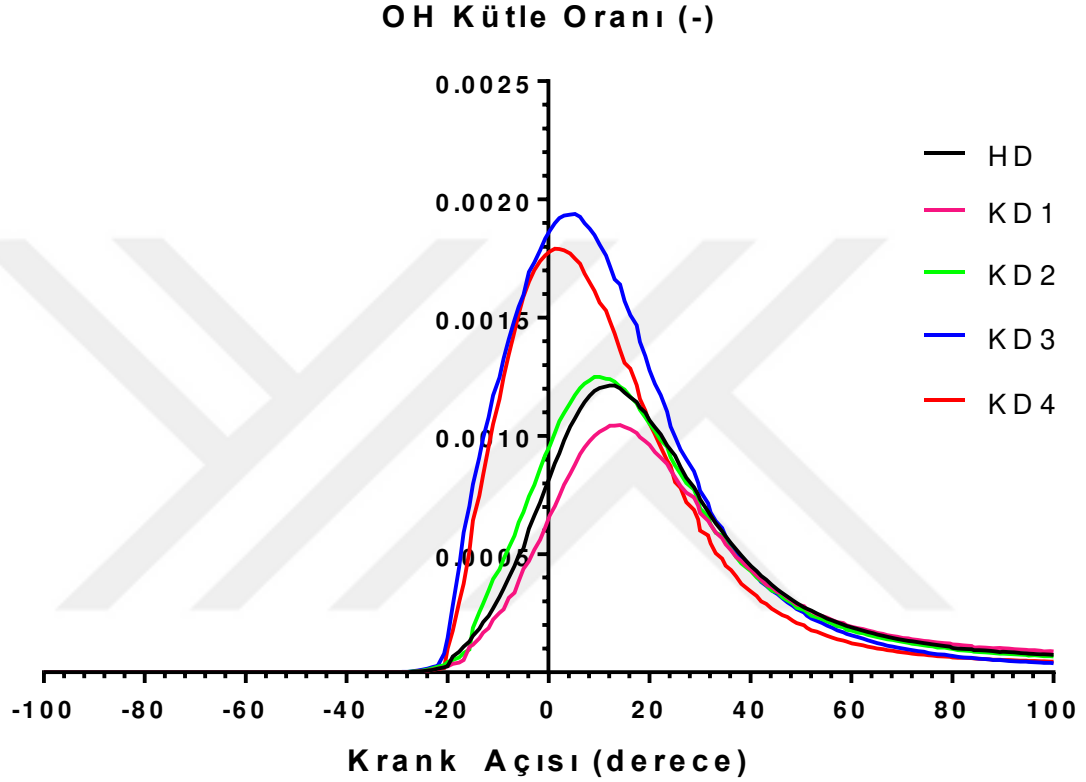
Şekil 3.14’de farklı püskürtme zamanlamalarına bağlı olarak silindir içi NO emisyonları görülmektedir. Bilindiği üzere NO oluşumu silindir içi sıcaklığın bir fonksiyonudur. Geç enjeksiyon durumlarında NO emisyonunun yüksek çıktığı görülmektedir. Bu durum silindir içi sıcaklık değişimleri ile uyusmaktadır (Şekil 3.12). Erken enjeksiyon zamanlamalarında yanma sırasında daha düşük sıcaklıklar görüldüğünden NO oluşumu için gerekli reaksiyon ısı sağlanamamış ve bu durumlar için NO emisyon oluşumu oldukça düşük kalmıştır.



Şekil 3.15. Yanmamış hidrokarbon emisyonunun farklı püskürtme zamanlamalarına bağlı olarak değişimi

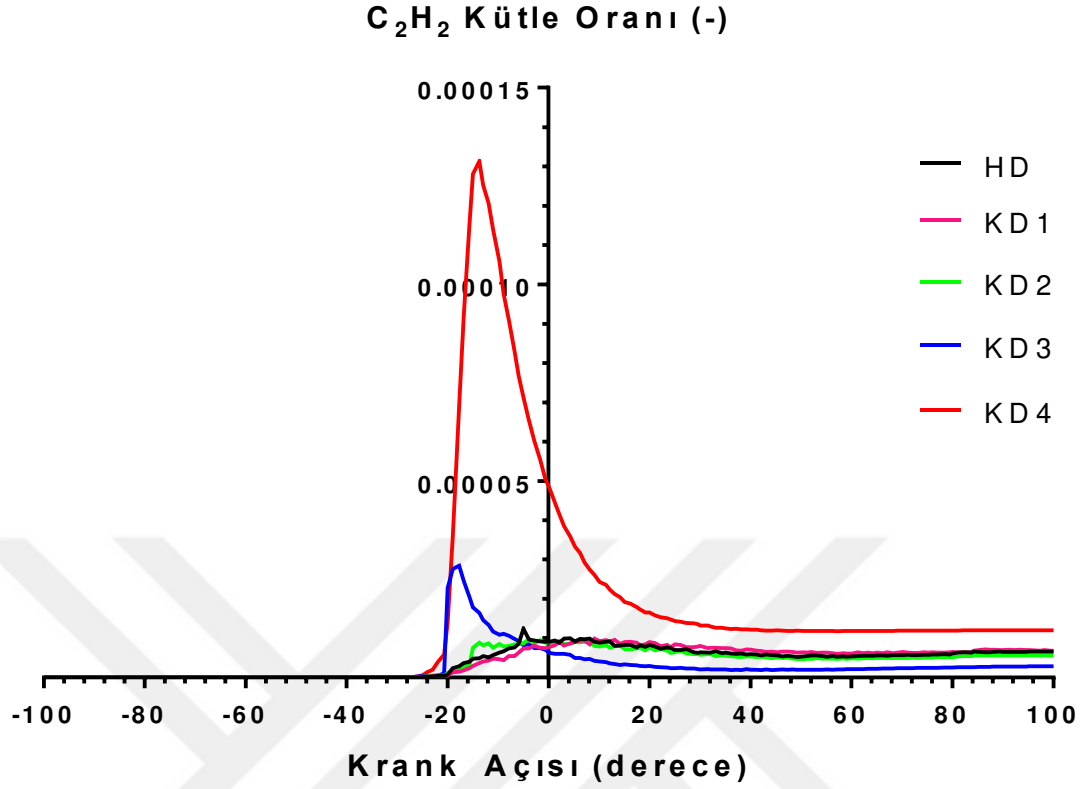
Farklı püskürtme zamanlamalarına göre silindir içi yanmamış hidrokarbon emisyonu Şekil 3.15’de görülmektedir. Yanmamış hidrokarbon oluşumu içten yanmalı motorlar için istenmeyen bir emisyon türü olmakla birlikte, yakıt tüketimini ve yakıt tüketimi başına elde edilen gücü doğrudan etkilemektedir. Düşük hidrokarbon emisyonu yanma veriminin yüksek olduğunu göstermektedir.

Şekilde görüldüğü üzere geç enjeksiyon durumlarında yanmamış hidrokarbon emisyonları çok hızlı bir şekilde düşüş gösterirken, erken enjeksiyon zamanlamaları ve homojen durumunda daha yavaş düşmektedir. Bu durum yanma hızını ve yanma verimini göstermesi adına önemli bir sonuçtur. Genel olarak tüm püskürtme durumlarında birbirine yakın yanmamış hidrokarbon emisyonları elde edilmiştir.



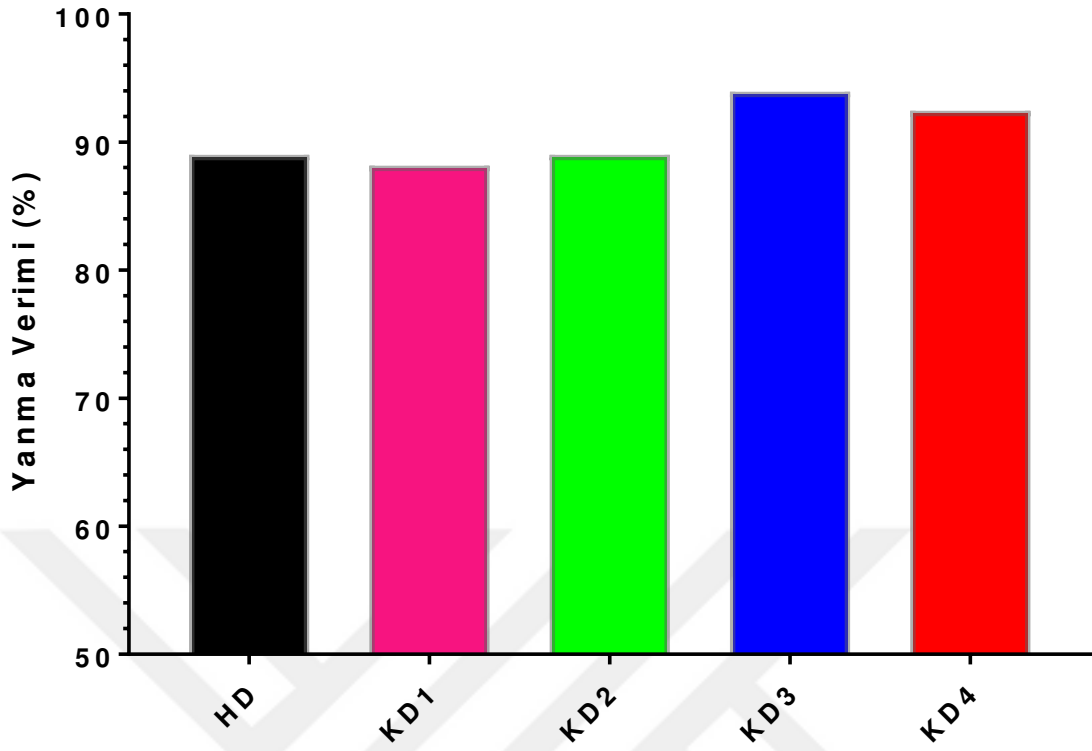
Şekil 3.16. OH kütle oranının farklı püskürtme zamanlamalarına bağlı olarak değişimi

İçten yanmalı motorlarda yanmanın başlaması ve sürecini takip etmek için silindir içi OH oluşumu izlenebilir. Bu amaçla Şekil 3.16'da farklı püskürtme zamanlamalarına bağlı olarak silindir içi OH oluşumu görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi tüm püskürtme zamanlamalarında OH oluşumunun başlaması ve bitmesi benzer krank açlarına denk gelmektedir. Fakat geç enjeksiyon durumlarında OH oluşum hızı diğer durumlara göre daha yüksektir. Bu durum yanma hızının daha yüksek olduğu şeklinde yorumlanmaktadır.



Şekil 3.17. C₂H₂ kütle oranının farklı püskürtme zamanlamalarına bağlı olarak değişimi

İçten yanmalı motorlarda kullanılan bazı kimyasal kinetik mekanizmalar için is (soot) emisyonu doğrudan hesaplanamaz. Bu durumda Ansys FORTE is emisyonu takibi için öncü bir ürün olan C₂H₂'nin takibini önermektedir. Şekil 3.17'de farklı püskürtme zamanlamalarına göre C₂H₂ değişimi görülmektedir. Tüm durumlarda benzer C₂H₂ oluşumu görülmekle birlikte en düşük oluşum KD3 durumunda meydana gelmektedir. KD4 durumunda ise oldukça hızlı yükselen ve çok yüksek değerlere ulaşan C₂H₂ sonucu elde edilmiştir. Bu durumun ikinci enjeksiyonun oldukça geç yapılmasına ve motor devrinin yüksek olmasına bağlı olarak yakıt parçacıklarının oksijen molekülleri ile yeteri kadar buluşamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

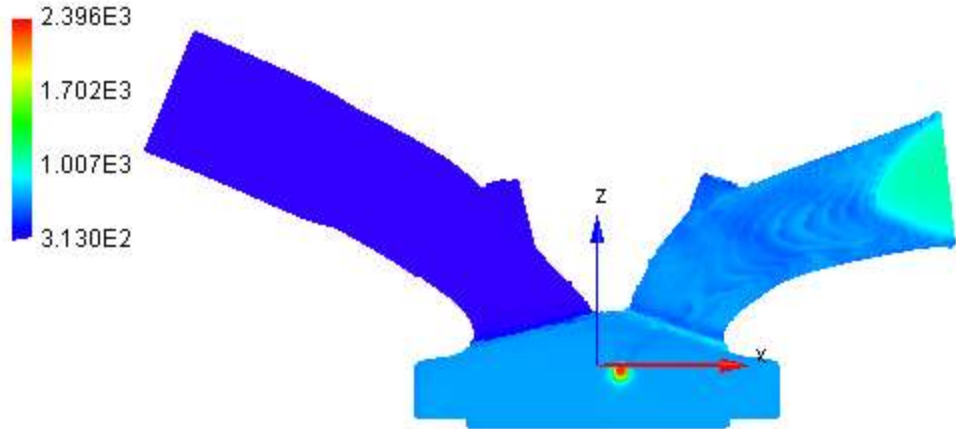


Şekil 3.18. Yanma veriminin farklı püskürtme zamanlamalarına bağlı olarak değişimi

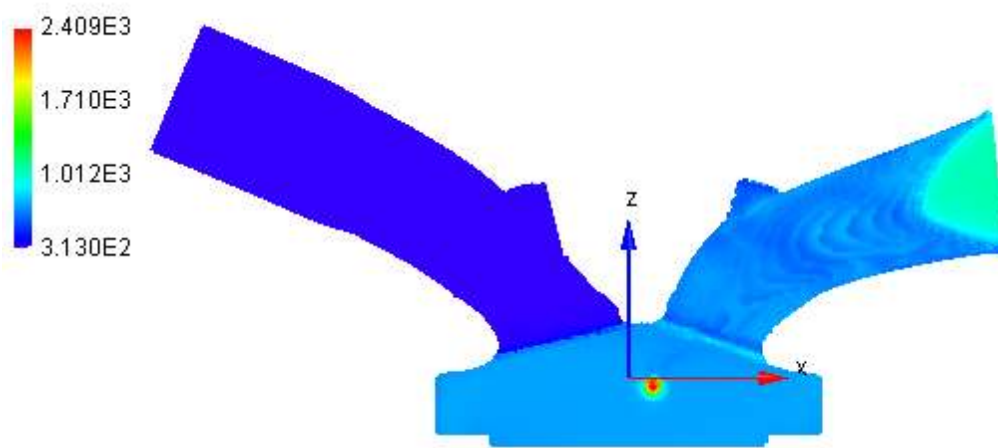
Farklı püskürtme zamanlamalarına bağlı olarak yapılan tüm analizlerden sonra belirlenen çalışma şartları içi yanma verimleri hesaplanmıştır (Şekil 3.18). Daha önce elde edilen tüm grafiklere uygun olarak KD3 durumunda yanma veriminin diğer durumlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Çalışmanın yürütüldüğü HD, KD1, KD2, KD3 ve KD4 kademeli dolgu şartları için sırası ile %89, %88.2, %89, %93.9 ve %92.4 yanma verimleri elde edilmiştir.

Farklı püskürtme zamanlamalarının silindir içi sıcaklıklara etkisi grafiksel olarak elde edildikten sonra, silindir içi sıcaklık değişimlerinin daha doğru anlaşılması için gerçek model üzerinden görseller elde edilmiştir. Şekil 3.19-3.23'de silindir içi sıcaklık görselleri farklı püskürtme zamanlamalarına bağlı olarak ve farklı krank açılarında sunulmuştur. Şekil 3.19'da görülen durum buji ateşlemesinden 5KMA sonraya ve ÜÖN'dan 30KMA önceye denk gelmiştir. Görsellerde anlaşılacağı gibi buji alevi buji bölgesinde açıkça görülmekte olup genel olarak silindir içi sıcaklık dağılımları tüm durumlar için benzerdir. KD4 şartları için ikinci enjeksiyonun oldukça geç yapılmasından dolayı enjektör bölgesinde soğuk akış bölgesi görülmektedir. Bu bölge ikinci püskürtmede gönderilen yakıtın sıcaklığına bağlı

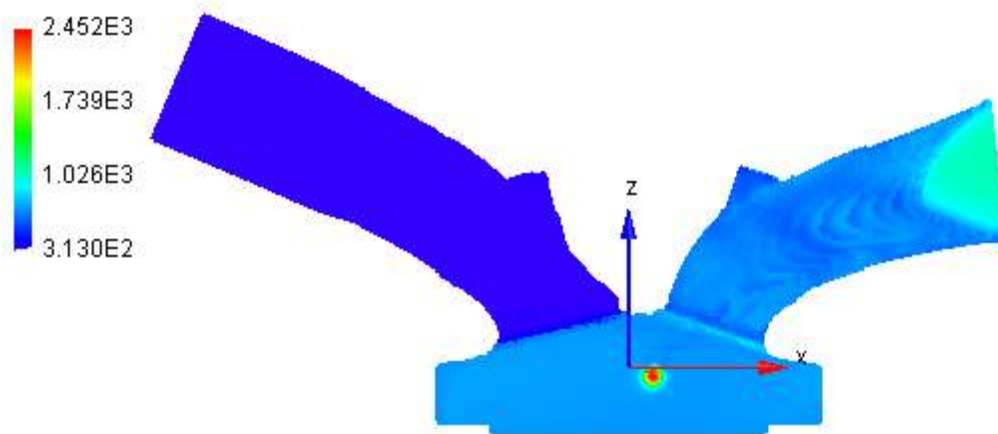
olarak oluşmuştur. Şekil 3.20’de buji etkisiyle başlayan alev cephesi hızla genişlemekte ve yanma odası içerisinde yayılmaktadır. KD3 şartlarında alev cephesinin egzoz supabı bölgesine doğru genişlediği, KD4 şartlarında ise ikinci enjeksiyondan dolayı alev sıcaklıklarında düşme olduğu gözlenmektedir. Şekil 3.21’de tüm durumlar için alev cephesinin daha fazla yayıldığı görülmektedir. Homojen dolgulu durum ve erken enjeksiyon durumlarında alev cephesi silindir merkezinde ilerlerken, geç enjeksiyon şartlarında alev cephesinin silindir cidarlarına doğru daha fazla ilerlediği görülmektedir. Şekil 3.22’de pistonun ÜÖN’ya ulaşmasıyla tüm durumlar için alev cephesinin daha yaygın hale geldiği görülmektedir. Şekil 3.23’de ise piston ÜÖN’yu geçmesiyle birlikte özellikle erken enjeksiyon şartlarında alev cephesinin büyüdüğü ve yaygınlaştığı görülmektedir. Geç enjeksiyon şartlarında ise daha üniform alev yayılımları görülmektedir. Özellikle KD4 şartlarında hemen hemen tüm krank açılarında görülen daha soğuk enjeksiyon bölgesi daha önceki grafiklerde sunulan yüksek CO ve is emisyonlarının sebebi olarak görülmektedir.



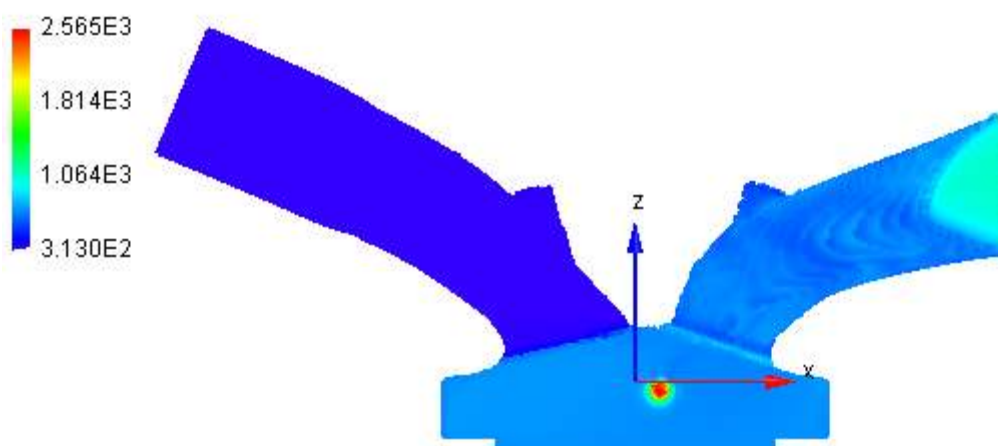
HD



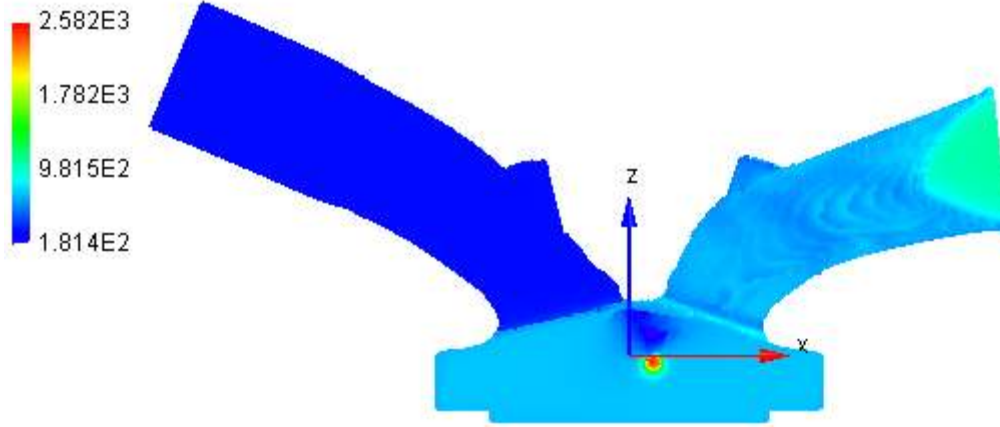
KD1



KD2

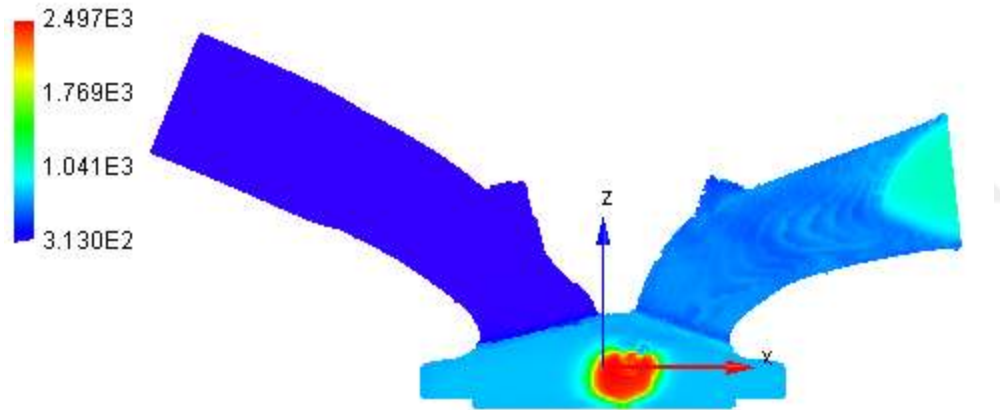


KD3

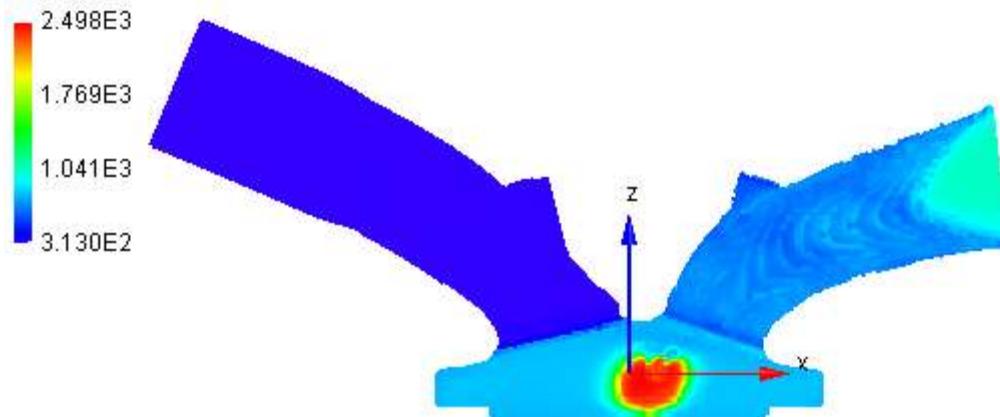


KD4

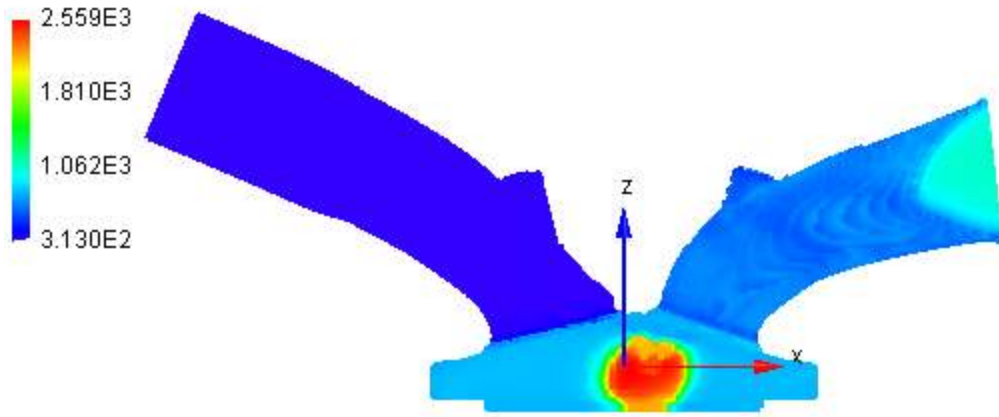
Şekil 3.19. Farklı dolgu şartlarında -30KMA için sıcaklık dağılımları



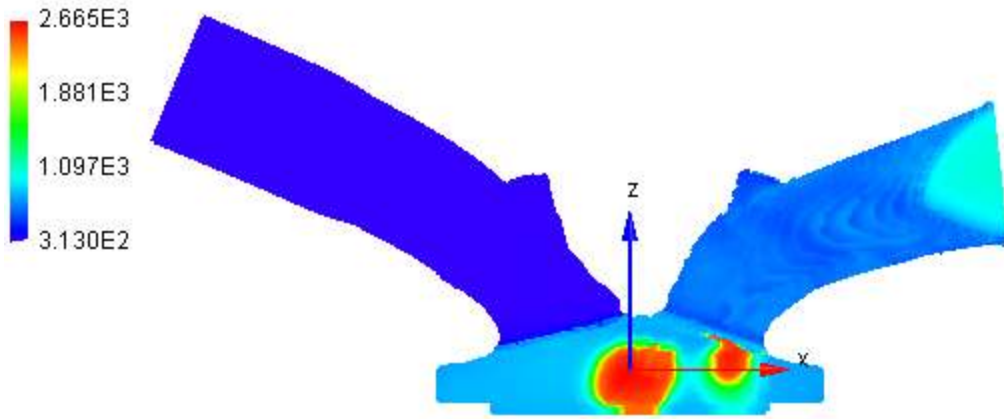
HD



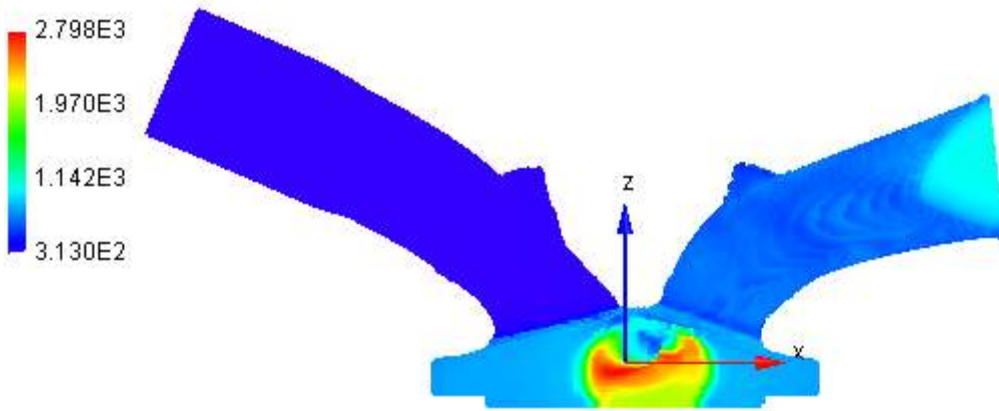
KD1



KD2

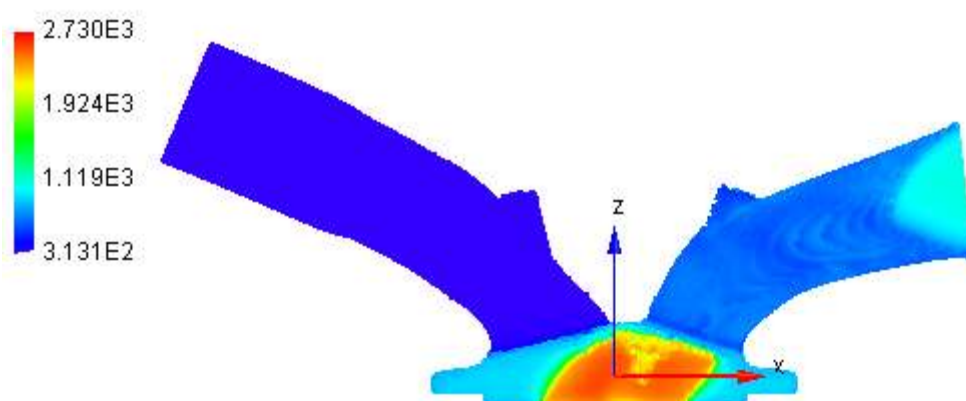


KD3

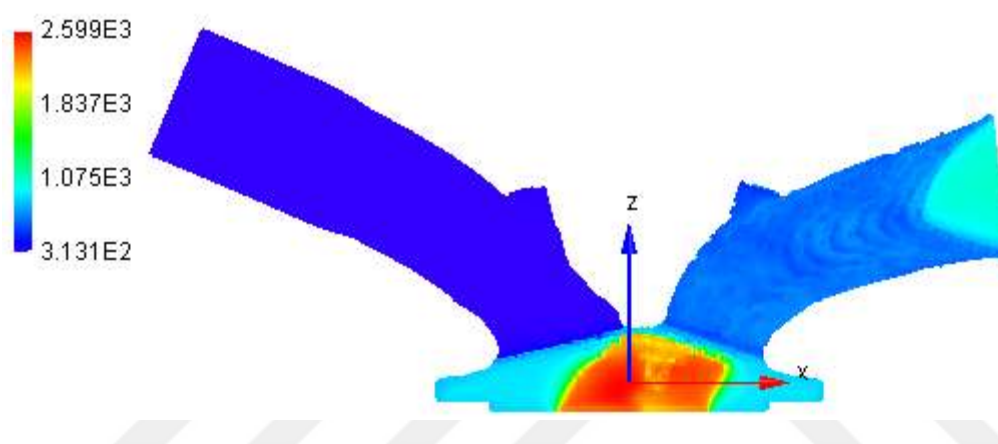


KD4

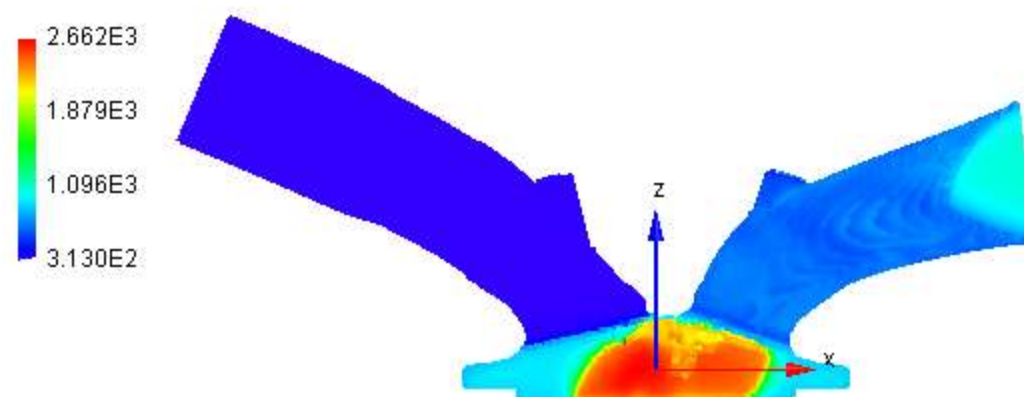
Şekil 3.20. Farklı dolgu şartlarında -20KMA için sıcaklık dağılımları



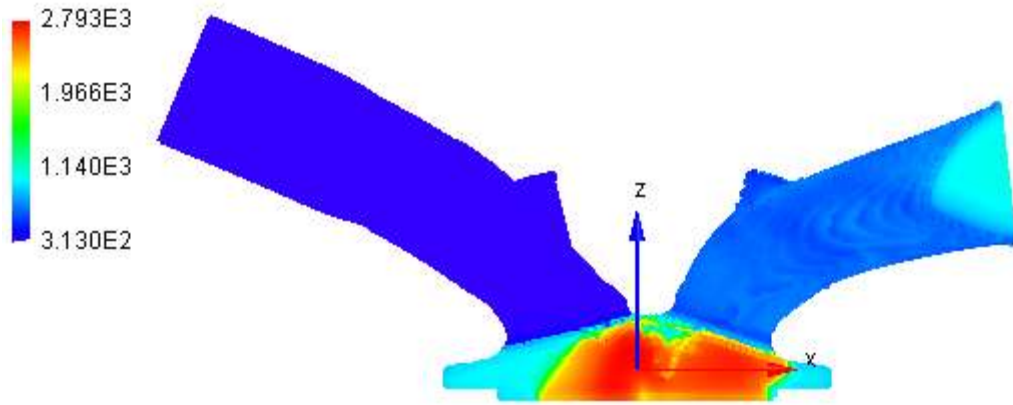
HD



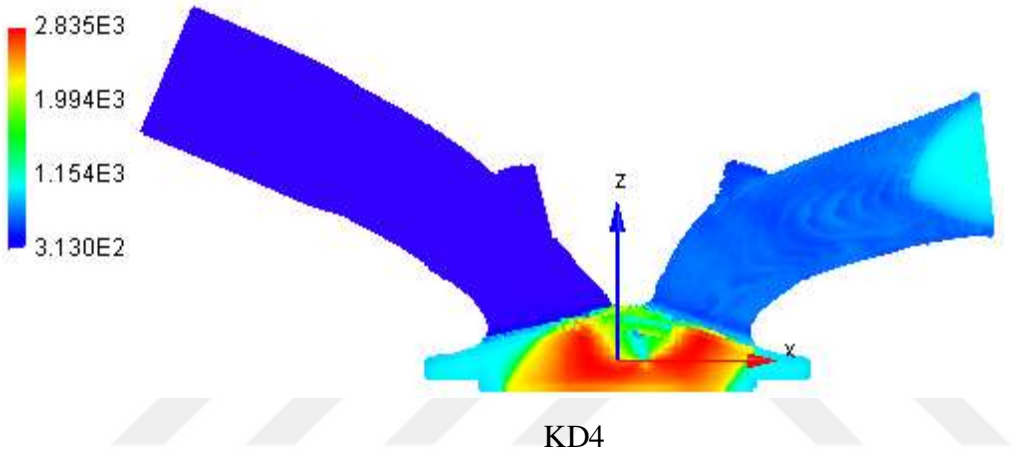
KD1



KD2

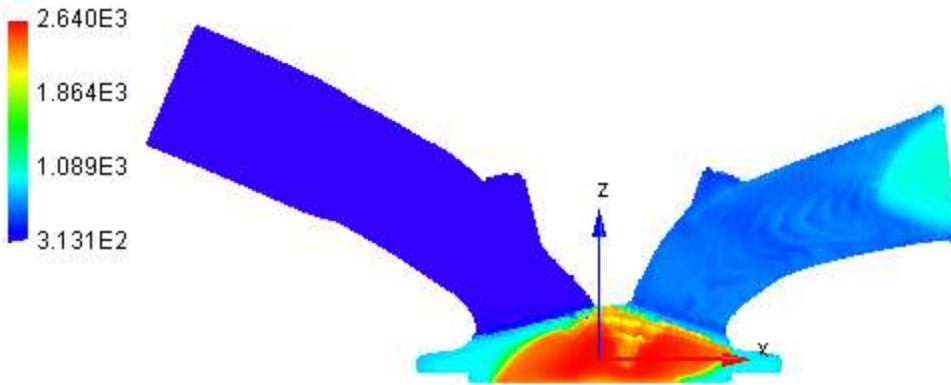


KD3

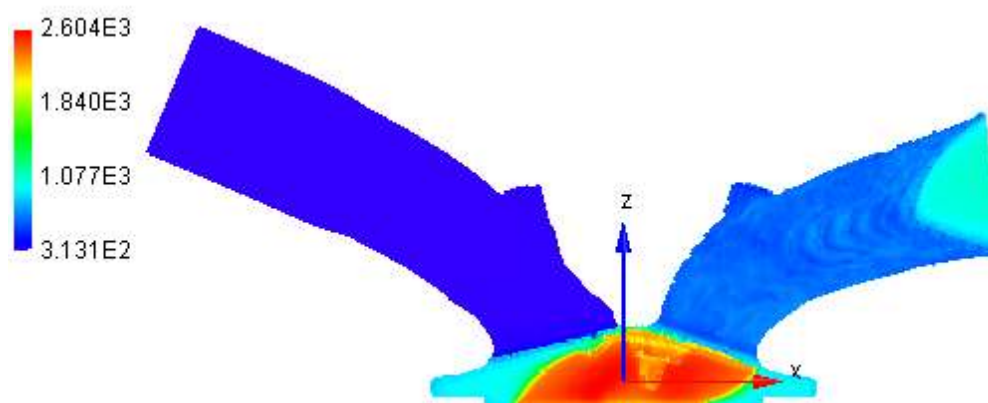


KD4

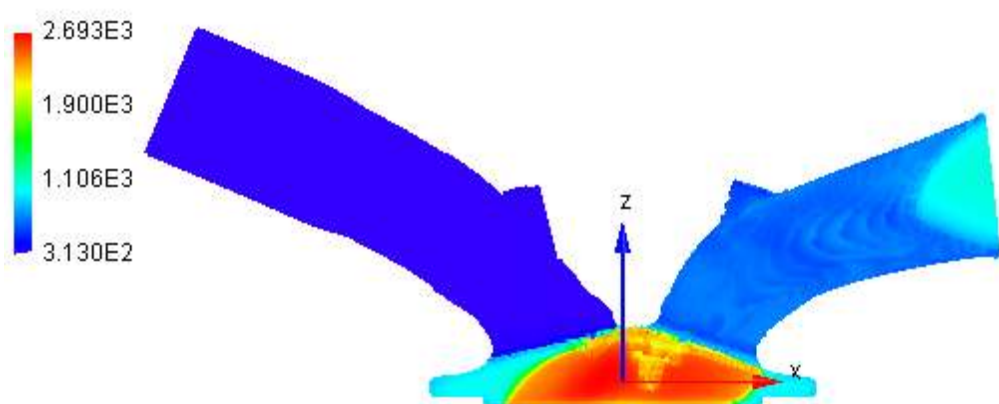
Şekil 3.21. Farklı dolgu şartlarında -10KMA için sıcaklık dağılımları



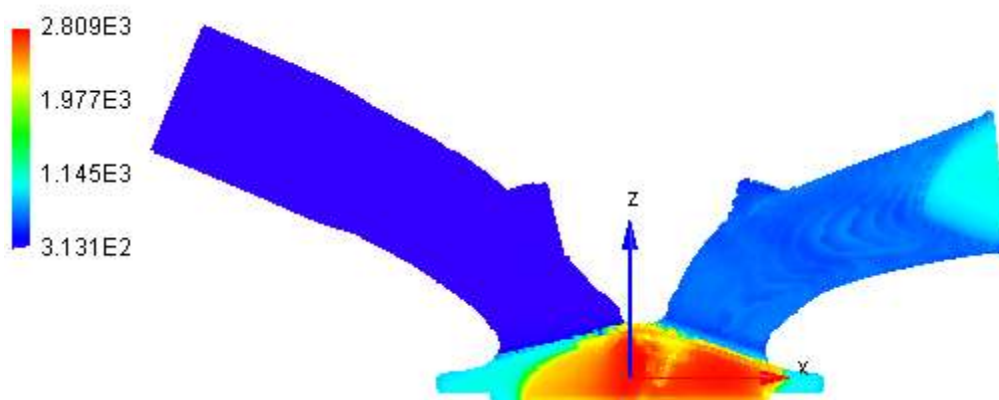
HD



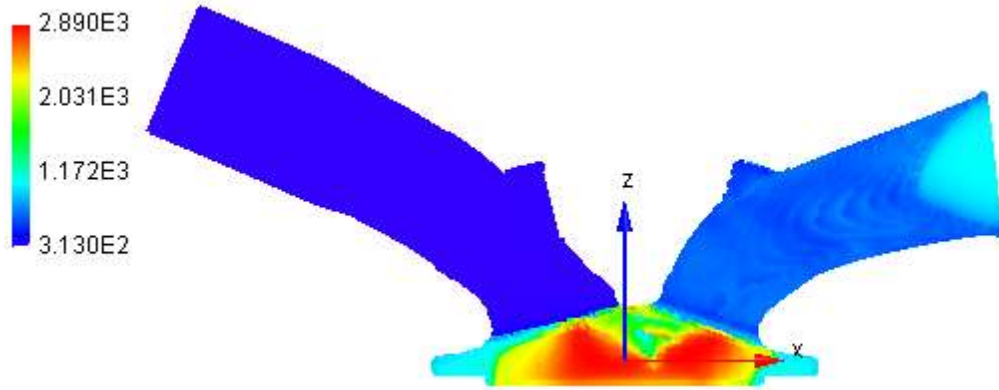
KD1



KD2

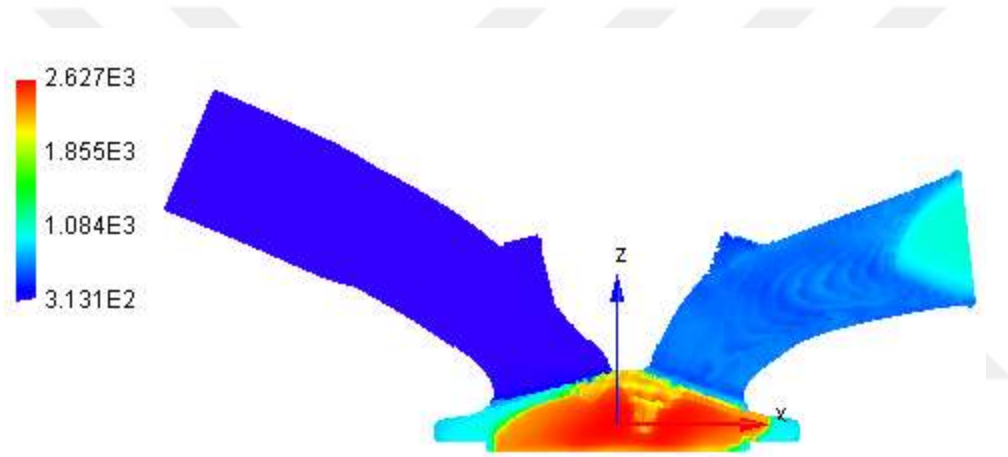


KD3

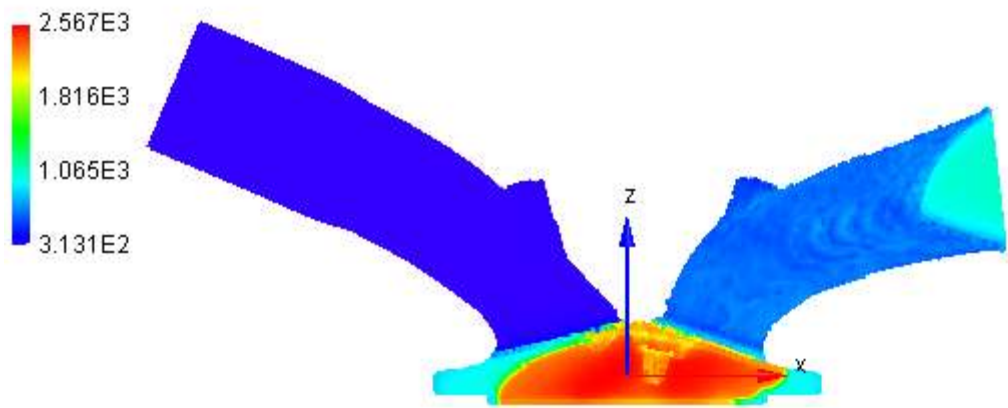


KD4

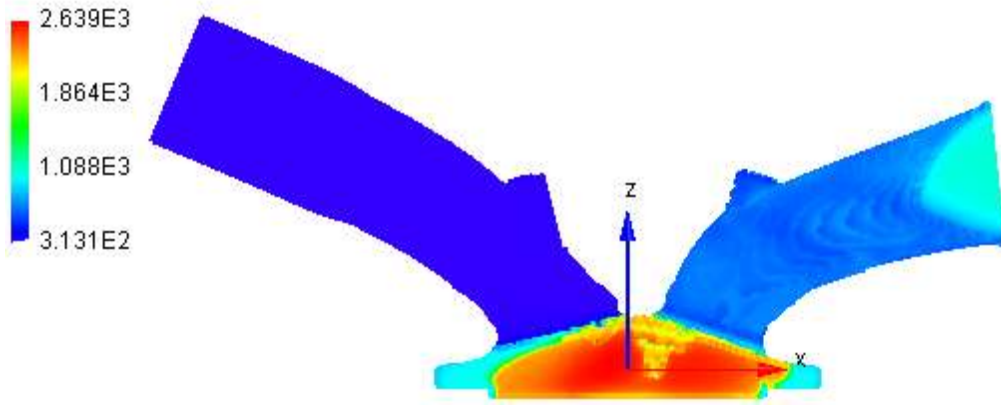
Şekil 3.22. Farklı dolgu şartlarında OKMA için sıcaklık dağılımları



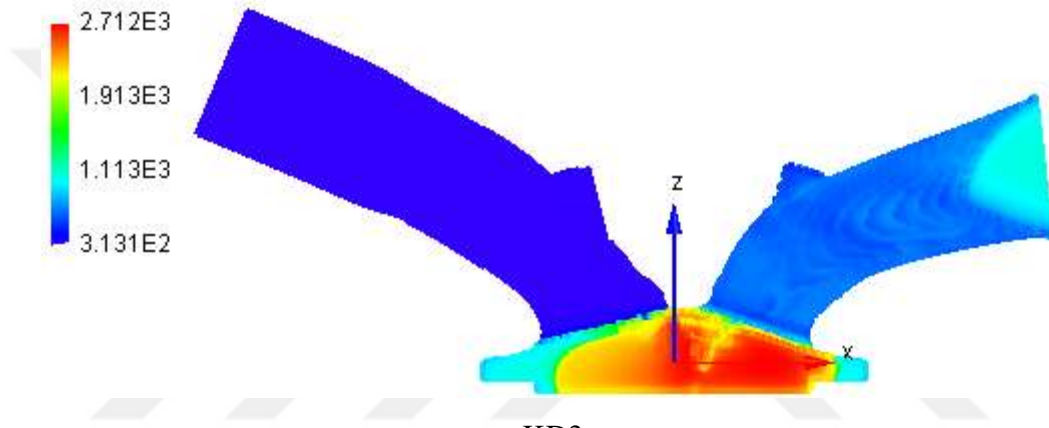
HD



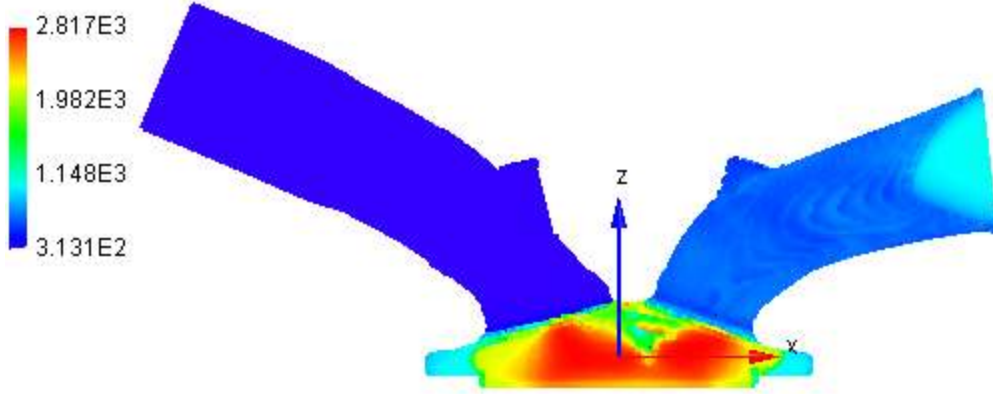
KD1



KD2



KD3



KD4

Şekil 3.23. Farklı dolgu şartlarında 10KMA için sıcaklık dağılımları

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışması kapsamında iki aşamalı sayısal bir çalışma yürütülerek doğalgazın yakıt olarak kullanıldığı kademeli dolgulu direk enjeksiyonlu benzinli bir motorun analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın birinci bölümünde kademeli dolgu şartları için her bir kademede püskürtülecek yakıt oranı belirlenmiştir. Belirlenen en iyi oran kullanılarak çalışmanın ikinci bölümü gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde ise kademeli dolgu şartlarını sağlamak için yapılan ikinci enjeksiyonun zamanlaması belirlenmiştir. Çalışmalar ANSYS Forte yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Her bir kademede püskürtülen yakıt için;

- Birinci kademede yakıtın büyük oranının, ikinci kademede daha azının gönderilmesi durumlarında daha yüksek silindir içi basınçlar, ısı salınım oranları ve silindir içi maksimum sıcaklıklar elde edilmiştir. Bu çalışma için %85-%15 oranlı püskürtme şartlarında en yüksek silindir içi basınç ve ısı salınım oranları elde edilmiştir.
- İkinci püskürtmede daha az yakıtın gönderildiği durumlarda CO emisyon eğrilerinin daha uygun olduğu ve en düşük CO değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Bununla birlikte en yüksek CO₂ emisyonlarında yine ikinci püskürtmede daha az yakıtın gönderildiği durumlarda elde edilmiştir.
- Silindir içi sıcaklıklara bağlı olarak en yüksek NO değerleri ikinci püskürtmede daha az yakıtın gönderildiği durumlarda elde edilmiştir.
- Çalışmanın yürütüldüğü %85-%15, %70-%30, %50-%50 ve %30-%70 yakıt oranları için sırası ile %93.9, %82.3, %34.2 ve %6.9 yanma verimleri elde edilmiştir. Buna bağlı olarak ikinci püskürtmede daha fazla yakıt gönderilen durumlarda yanmamış hidrokarbon emisyonu ve is emisyonunun öncüsü olan C₂H₂ oluşumu oldukça yüksek değerlerde elde edilmiştir.

Farklı püskürtme zamanlamaları için;

- Geç enjeksiyon durumlarında (KD3-KD4) silindir içi basıncı, ısı salınım oranlarının ve silindir içi maksimum sıcaklıklarının daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar için KD4 şartlarının daha yüksek değerler verdiği görülmüştür.
- Geç enjeksiyon zamanlamalarında CO emisyonu ÜÖN yakınlığında oldukça yükselmiştir. Fakat yanmanın devam etmesiyle beraber özellikle KD3 şartları en düşük CO emisyonuna ulaşmıştır. KD4 şartlarında ise oldukça geç enjeksiyon yapılmasından ve yüksek motor devrinden dolayı CO emisyonları kısmen yüksek kalmıştır. CO₂ emisyonları ise geç enjeksiyon zamanlamalarında kısmen daha yüksek meydana gelmiştir.
- Silindir içi sıcaklıklara bağlı olarak geç enjeksiyon zamanlamalarında daha yüksek NO emisyonları elde edilmiştir.
- Geç enjeksiyon zamanlamalarında yanmanın daha önce başladığı OH eğrilerinden anlaşılmaktadır.
- Çalışmanın yürütüldüğü HD, KD1, KD2, KD3 ve KD4 kademeli dolgu şartları için sırası ile %89, %88.2, %89, %93.9 ve %92.4 yanma verimleri elde edilmiştir. Buna bağlı olarak erken enjeksiyon zamanlamalarında yanmamış hidrokarbon emisyonu daha yüksektir.
- KD4 şartları genel olarak daha iyi sonuçlar vermekte birlikte, oldukça geç yapılan ikinci enjeksiyon ve yüksek motor devrinden dolayı kısalan karışım süresi nedeniyle KD3 şartlarına göre daha yüksek is ve kısmen daha düşük yanma verimi sağlamaktadır.

5. ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında yürütülen çalışma ile doğalgazın yakıt olarak kullanıldığı kademeli dolgulu direk enjeksiyonlu bir motorda yakıt püskürtme oranları ve püskürtme zamanlamasının motor performansı ve emisyon oluşumları üzerine etkileri incelenmiştir. Gerçekleştirilen çalışma iki aşamada yürütülmüş ve birinci aşamada elde edilen sonuçlar ikinci aşamaya uygulanmıştır. Yürütülen çalışmada kullanılan parametrelerin kademeli dolgulu motorlara etkisi çeşitli sonuçlarla sunulmuştur. Gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde elde edilen veriler ışığında gelecek çalışmalar için aşağıdaki öneriler yapılmıştır.

- Yapılan çalışmalar deneysel olarak da yapılarak elde edilen sonuçlar sayısal sonuçlar ile karşılaştırılabilir.
- Farklı sayıda tür ve reaksiyon içeren kimyasal kinetik mekanizmalar kullanılarak sonuçlar kıyaslanabilir.
- Farklı motor devirleri ve enjeksiyon parametreleri için sonuçlar tekrarlanarak motor hızının sonuçlar üzerine etkileri gösterilebilir.
- Daha fazla sayıda yakıt oranı ve püskürtme zamanı araştırılarak kademeli dolgulu motorlar için bir optimizasyon çalışması gerçekleştirilebilir.
- Farklı sayısal kodlar kullanılarak çalışma tekrarlanabilir.
- Farklı yakıtların kademeli dolgulu motorlarda kullanılması üzerine bir çalışma yürütülerek her bir yakıtın yeni püskürtme parametreleri belirlenebilir.

Sonuç olarak elde edilen bulgular ve tartışılan sonuçlar ışığında direk enjeksiyonlu benzinli motorların geliştirilmesi ve doğalgazın yakıt olarak kullanılmasının motor teknolojileri adına umut verici olduğu görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Can, İ.**, 2009. LPG İle Çalışan Benzinli Bir Motora Kademeli Dolgu Yapılmasının Performans Üzerindeki Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, *Doktora Tezi*, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [2] **Mehdiyev, R., Baykara, D., Arslan, H., GÜDÜ, T.**, 2004. İki Aşamada Yanma Mekanizması ile Çalışan Kademeli Dolgulu Benzin Motorun Geliştirilmesi, 21-23.
- [3] **Zhao F., Lai M.C. and Harrington D. L.**, 1999. “Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines”, *Progress Energy of Combustion Science*, **25**, 437-562.
- [4] **Kutlar, O., A., Arslan, H., Çalık, A., T.**, 2000. Benzin (Otto) Motorunda Kısmi Yükte Yakıt Tüketimini Azaltmaya Yönelik Bir Yöntem: Fakir Karışımlı Kademeli Dolgulu Motor, *Mühendis Makine*, **483**, 46-51.
- [5] **Zeng W., Sjöberg M., Reuss D. L.**, 2015. Combined effects of flow/spray interactions and EGR on combustion variability for a stratified DISI engine, *Proceedings of the Combustion Institute*, **35**, Issue 3, 2907-2914.
- [6] **Duan X., Liu J., Tan Y., Luo B., Guo G., Wu Z., Liu W., Li Y.**, 2018. Influence of single injection and two-stagnation injection strategy on thermodynamic process and performance of a turbocharged direct-injection spark-ignition engine fuelled with ethanol and gasoline blend, *Applied Energy*, **228**, 942–953.
- [7] **Costa M., Sorge U., Merola S., Irimescu A., La Villetta M., Rocco V.**, 2016. Split injection in a homogeneous stratified gasoline direct injection engine for high combustion efficiency and low pollutants emission, *Energy*, **117**, 405-415.
- [8] **Oh H., Bae C.**, 2013. Effects of the injection timing on spray and combustion characteristics in a pray-guided DISI engine under lean-stratified operation, *Fuel*, **107**, 225–235.

- [9] **Choi M., Song J., Park S.**, 2016. Modeling of the fuel injection and combustion process in a CNG direct injection engine, *Fuel*, **179**, 168–178.
- [10] **Aljamali S., Abdullah S., Wan Mahmood W. M. F., Ali Y.**, 2016. Effect of fuel injection timings on performance and emissions of stratified combustion CNGDI engine, *Applied Thermal Engineering*, **109**, 619–629.
- [11] **Song J., Choi M., Park S.**, 2017. Comparisons of the volumetric efficiency and combustion characteristics between CNG-DI and CNG-PFI engines, *Applied Thermal Engineering*, **121**, 595–603.
- [12] **Sankesh D., Edsell J., Mazlan S., Lappas P.**, 2017. Comparative study between early and late injection in a natural-gas fuelled spark-ignited direct-injection engine, *Energy Procedia*, **110**, 275–280.
- [13] **Liu J., Dumitrescu C. E.**, 2018. 3D CFD simulation of a CI engine converted to SI natural gas operation using the G-equation, *Fuel*, **232**, 833–844.
- [14] **Pulkrabek W. W.**, 2004. Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine, *Prentice Hall*, 150-151.
- [15] **Birch, S.**, 1994. NGVs in the U.K., Automotive Engineering, *SAE International*, **102**, 26-27.
- [16] **O'Connor, L.**, 1993. Clearing the Air with Natural Gas Engines, Mechanical Engineering, *ASME*, **115**, 53-56.
- [17] **Reed D.**, 1995. Compressed Natural Gas Vehicles, Automotive Engineering, *SAE International*, **33**, 4-6.
- [18] Natural Gas Fueling of Diesel Engines, 1996. Automotive Engineering International, *SAE International*, **104**, 88-90.
- [19] United States Environmental Protection Agency, EPA Approves Clean Diesel Measure, 2001. Automotive Engineering International *SAE International*, **109**, 240.

- [20] **Şenocak, N.**, 2017. Homojen Dolgulu Bir Benzinli Motorda Doğalgaz Kullanımının Motor Performansına Etkisinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [21] **Poompipatpong, C., Cheenkachorn, K.**, 2011. A modified diesel engine for natural gas operation, performance and emission tests. *Energy*, **36**, 6862-6866.
- [22] **Zeng, K., Huang, Z., Liu, B., Liu, L., Jiang, D., Ren, Y., Wang, J.**, 2006. Combustion characteristics of a direct-injection natural gas engine under various fuel injection timings. *Applied Thermal Engineering*, **26**, 806-813.
- [23] **Nwafor, O.M.I.**, 2007. Effect of advanced injection timing on emission characteristics of diesel engine running on natural gas, *Renewable Energy*, **32**, 2361-2368.
- [24] **Papagiannakis, R.G., Rakopoulos, C.D., Hountalas, D.T., Rakopoulos, D.C.**, 2010. Emission characteristics of high speed, dual fuel, compression ignition engine operating in a wide range of natural gas/diesel fuel proportions, *7th International Symposium on Alcohol Fuels*, **89**, 1397-1406.
- [25] **McTaggart-Cowan, G.P., Rogak, S.N., Munshi, S.R., Hill, P.G., Bushe, W.K.**, 2010. The influence of fuel composition on a heavy-duty, natural-gas directinjection engine. *Fuel*, **89**, 752-759.
- [26] **Tangöz, S.**, 2015. Farklı Sıkıştırma Oranlarındaki Buj Atelemeli Bir Motorda Doğalgaz Ve Doğalgaz – Hidrojen Karışımlarının Yakıt Olarak Kullanılmasının Araştırılması, *Doktora Tezi*, E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- [27] **Huang, Z., Wang, J., Liu, B., Zeng, K., Yu, J., Jiang, D.**, 2007. Combustion characteristics of a direct-injection engine fueled with natural gas±hydrogen blends under different ignition timings. *Fuel*, **86**, 381-387.
- [28] **Mehdiyev R., Bayka D., Arslan H., GÜDÜ T.**, 2005. Düşük Emisyonlu Ve Yüksek Verimli Yeni Bir Kademeli Dolgulu Benzin Motoru, *Mühendis ve Makine*, **46**, 549.
- [29] **Ricardo, H.R.**, 1922. Recent Work on Internal Combustion Engine, *SAE Jurnal*, **10**, 305-36.

- [30] **Pulkrabek, W. W.**, 2004, Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine, Prentice Hall , 244.
- [31] **Hoffman, H.**, 1971. Development Work on the Mercedes-Benz Commercial Diesel Engine, Model Series 400, *SAE* ,**710558**.
- [32] **Pulkrabek, W. W.**, 2004. Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine, Prentice Hall , 245.
- [33] **Zavier, C. C.** 1991 Charge Stratification For An Internal Combustion Engine, Christian Chandrakumar Xavier, University of Canterbury, Master Thesis.
- [34] patents.google.com/patent/US1271942 Ricardo Motor Patent Çizimleri, 28 Nisan 2018.
- [35] **Yılmaz, O.**, İçten Yanmalı Motorlar Ders Notları, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [36] patents.google.com/patent/US3703886A Gaz-52 Motor Patent Bilgisi, 28 Nisan 2018.
- [37] **Evans, R. L.**, 1987. Automotive Engine Alternatives, *Springer US*, **51**.
- [38] **Abernathy, W. J., Ronan L.**, 1980, Honda Motor Company's Cvcc Engine.
- .
- [39] <http://what-when-how.com/automobile/some-stratified-charged-engines-automobile> Stratified Charged Engines, 4 Temmuz 2018.
- [40] http://www.yildiz.edu.tr/~yavas/Kad_Dolgu_Direkt_benzin_puskurtme.pdf Kademeli Dolgulu Motorlar, 27 Şubat 2018.
- [41] **Alperstein M., Schafer G.H., F.J. Villforth I.**, 1974. Texaco's Stratified Charge Engine - Multifuel Efficient, Clean, and Practical, Book, January.
- [42] ANSYS Forte User's Guide.
- [43] ANSYS Forte Theory Manuel.

ÖZGEÇMİŞ

Ömer Faruk AKÇİL

KİŞİSEL BİLGİLER	
ADRES :	İstiklal Mah. Zafer Sok. No:19 Merkez/Kütahya
TELEFON :	+90 (544) 644 91 61
EPOSTA :	omerfarukakcil@gmail.com
DOĞUM YERİ/TARİHİ:	04/09/1991
MEDENİ HALİ:	Bekar
EĞİTİM BİLGİLERİ	
LİSANSÜSTÜ :	2018, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Taşıt Tahrik ve Güç Sistemleri ABD, Elazığ
LİSANS :	2014, Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği, Elazığ
LİSE :	2010, Ali Güral Anadolu Lisesi, Kütahya
İŞ DENEYİMİ	
2014 – 2016	Tübitak 1003 113M090 Nolu Proje Araştırmacı
2017 – 2018	Artange Mühendislik, Elazığ ARGE Mühendisi
BİLDİĞİ YABANCI DİLLER	
	İngilizce
ARAŞTIRMA DENEYİMİ	
✓ . Bilgisayar Programları (Ansys Forte, Ansys FLuent, Avl Boost, Siemens Amesim)	
✓ . Programlama Dilleri (Matlab, Fortran)	
İLGİLENDİĞİ DİĞER BİLİMLER	
✓ Yazılım	