**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# BUJİ ATEŞLEMELİ MOTORLARDA TÜRBÜLANSLI YANMA MEKANİZMASI KULLANILARAK AZOT OKSİT EMİSYONLARININ BELİRLENMESİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Müh. Feridun ÇOĞALAN**

**Anabilim Dalı: MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Programı: OTOMOTİV**

**MAYIS 2003**

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# BUJİ ATEŞLEMELİ MOTORLARDA TÜRBÜLANSLI YANMA MEKANİZMASI KULLANILARAK AZOT OKSİT EMİSYONLARININ BELİRLENMESİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**
**Müh. Feridun ÇOĞALAN**
**(503011205)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 5 Mayıs 2003**
**Tezin Savunulduğu Tarih: 29 Mayıs 2003**

| | |
|---|---|
| **Tez Danışmanları:** | **Prof. Dr. Cem SORUŞBAY** |
| | **Prof. Dr. Rafig MEHDİYEV** |
| **Diğer Jüri Üyeleri:** | **Prof. Dr. Metin ERGENEMAN (İ.T.Ü. Otm.)** |
| | **Doç. Dr. Oğuz Salim SÖĞÜT (İ.T.Ü. Gemi İnş.)** |
| | **Prof. Dr. Orhan DENİZ (Y.T.Ü.)** |

**MAYIS 2003**

## ÖNSÖZ

Bu tez, buji ateşlemeli motorlarda yeterli hassasiyetle indike ve efektif parametreleri tahmin edebilen bir matematiksel modelin, azot oksit konsantrasyonunu da hesaplaması amacıyla yapılmış bir çalışmanın ürünüdür.

Söz konusu matematiksel model, bir bilgisayar programlama dili olan Fortran'da yazılmış olup, Rusya Bilimler Akademisi Kimyasal Fizik Enstitüsünde ortaya konulmuş olan türbülanslı yanma mekanizmasını temel almaktadır. Gerçekte üç boyutlu incelenmesi gereken problemin tek boyutlu olarak incelenmesine olanak sağlayan bu mekanizma ile bilgisayar zamanından tasarruf etmek mümkün olmaktadır.

Mevcut olan bu modele, azot oksit oluşumunun açıklanmasında kullanılan üç basamaklı genişletilmiş Zeldovich mekanizması eklenerek, programın gerçek azot oksit konsantrasyonlarını hesaplaması sağlanmıştır.

Bu çalışmada büyük emekleri olan Prof. Dr. Cem Soruşbay'a ve Prof. Dr. Rafig Mehdiyev'e teşekkür ederim.

Mayıs 2003 Feridun Çoğalan

**İÇİNDEKİLER**


**KISALTMALAR** **v**
**TABLO LİSTESİ** **vi**
**ŞEKİL LİSTESİ** **vii**
**SEMBOL LİSTESİ** **ix**
**ÖZET** **xi**
**SUMMARY** **xii**

**1. GİRİŞ** **1**
1.1. Çalışmanın Amacı ve Önemi 1

**2. BUJİ ATEŞLEMELİ MOTORLARDA AZOT OKSİT EMİSYONLARININ MODELLENMESİ** **2**
2.1. Matematiksel Modelleme 2
2.1.1. Buji Ateşlemeli Motorlarda Matematiksel Modelleme 2
2.2. Azot Oksit Emisyonları 4
2.2.1. Azot Oksit Emisyonları ve Zararları 4
2.2.2. Buji Ateşlemeli Motorlarda Azot Oksit Oluşumu 5
2.2.3. Azot Oksit Oluşum Mekanizması 7
2.2.4. Önleme ve Azaltma Amaçlı Tedbirler 10
2.3. Matematiksel Modelleme ile Azot Oksit Emisyonlarının Belirlenmesi 13

**3. BU ÇALIŞMADA KULLANILAN MATEMATİKSEL MODEL** **20**
3.1. Türbülanslı Yanma Mekanizması 20
3.2. Türbülanslı Yanma Mekanizması ile Silindir İçi Parametrelerinin Hesaplanması 21
3.2.1. Silindir İçi Basınç ve Sıcaklığının Hesaplanması 21
3.2.2. Yanma Sürecinin Hesaplanması 22
3.2.3. Vuruntu Hesabı 28
3.2.4. İndike ve Efektif Parametrelerin Hesabı 28
3.2.5. Modelin Deney Sonuçlarıyla Karşılaştırılması 30
3.3. Model Üzerinde Yapılan Çalışmalar 31
3.3.1. Optimum Çalışma Noktasının Belirlenmesi 31
3.3.2. Optimum Sıkıştırma Oranının Belirlenmesi 32

**4. AZOT OKSİT MODELİ ÜZERİNDE ve YAPILAN ÇALIŞMALAR** **34**
4.1. Azot Oksit Modeli 34
4.1.1. Örnek Azot Oksit Emisyonu Hesabı 37
4.2. Motor Parametreleri ile Azot Oksit Emisyonu Değişiminin İncelenmesi 41
4.3. Sonuçların İrdelenmesi 47

**5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA** **49**

**KAYNAKLAR** **51**

**EKLER** **53**

**ÖZGEÇMİŞ** **56**

## KISALTMALAR

**EGR** : Egzoz Gazı Resirkülasyonu
**HFK** : Hava Fazlalık Katsayısı
**kma** : Krank Mili Açısı
**NO** **:** Azot Oksit
**$NO_x$** : Azot Oksit Bileşikleri
**ppm** : Milyondaki Parçacık Sayısı (Parts Per Million)
**ÜÖN** : Üst Ölü Nokta
**YFK** : Yakıt Fazlalık Katsayısı

## TABLO LİSTESİ

Sayfa No

**Tablo 3.1.** Model sonuçlarının deney verileriyle karşılaştırılması..... 31

## ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No


| | | |
|---|---|---|
| **Şekil 2.1** | : Yanma sürecinde azot oksit oluşumu..... | 6 |
| **Şekil 2.2** | : Hava yakıt oranı ve ateşleme zamanının azot oksit oluşumuna etkisi..... | 7 |
| **Şekil 2.3** | : Farklı zamanlarda yanan iki bölgenin fonksiyonu olarak azot oksidin kütlesel yüzdesi..... | 9 |
| **Şekil 2.4** | : Yanma odasına açılan iki pencereden gözlenerek elde edilen azot oksit konsantrasyonu..... | 9 |
| **Şekil 2.5** | : Su püskürtme işlemi sonucu azot oksit miktarındaki teorik ve deneysel azalma..... | 10 |
| **Şekil 2.6** | : Su püskürtmenin yakıt tüketimine etkisinin deneysel olarak gösterimi..... | 11 |
| **Şekil 2.7** | : Yakıt fazlalık katsayısı ile azot oksit konsantrasyonu değişimi | 11 |
| **Şekil 2.8** | : EGR'nin yakıt tüketimine etkisi..... | 12 |
| **Şekil 2.9** | : Yükün, farklı EGR oranlarında $NO_x$ konsantrasyonuna etkisi | 12 |
| **Şekil 2.10** | : Yanmış gazların farklı zamanlarda yanan beş bölgeye ayrıldığı modelde, krank mili açısının fonksiyonu olarak azot oksit konsantrasyonu..... | 16 |
| **Şekil 2.11** | : Adyabatik (noktalı çizgi) ve adyabatik olmayan (düz çizgi) modellerle tahmin edilen azot oksit konsantrasyonları..... | 17 |
| **Şekil 2.12** | : EGR miktarının ve yakıt fazlalık katsayısının fonksiyonu olarak egzoz NO konsantrasyonu..... | 17 |
| **Şekil 2.13** | : Motor hızı ve yakıt fazlalık katsayısının fonksiyonu olarak azot oksit konsantrasyonu..... | 18 |
| **Şekil 3.1** | : Türbülanslı yanma mekanizmasında bölgeler..... | 23 |
| **Şekil 3.2** | : Hesaplama sonucu elde edilen değerlerin, deneysel sonuçlarla karşılaştırılması..... | 30 |
| **Şekil 3.3** | : Yanma sırasında silindir basınç ve sıcaklık eğrilerinin değişimi..... | 32 |
| **Şekil 3.4** | : Sıkıştırma oranı ve ateşleme avansına göre ortalama indike basıncın değişimi..... | 33 |
| **Şekil 3.5** | : Sıkıştırma oranı ve ateşleme avansına göre özgül yakıt tüketimi değişimi..... | 33 |
| **Şekil 4.1** | : Azot oksit oluşumu sırasında parametrelerin değişimi..... | 35 |
| **Şekil 4.2** | : Yanma işlemi sırasında farklı zamanlarda yanan gazlarda oluşan azot oksit konsantrasyonları..... | 40 |
| **Şekil 4.3** | : Krank mili açısının fonksiyonu olarak toplam azot oksit konsantrasyonu ve yanmış yakıt kesri değişimi..... | 41 |

**Şekil 4.4** : Farklı ateşleme avanslarında hava fazlalık katsayısının azot oksit emisyonlarına etkisi..... 42
**Şekil 4.5** : Azot oksit konsantrasyonunun ve indike verimin ateşleme avansıyla değişimi..... 43
**Şekil 4.6** : Farklı yük değerlerinde, en yüksek verim için gerekli olan ateşleme avansı ve bu avanslar kullanılarak yapılan yük değişimlerinde, azot oksit emisyonunun davranışı eğrileri..... 44
**Şekil 4.7** : Sabit ateşleme avansında azot oksit konsantrasyonunun motor yükü ile değişimi..... 45
**Şekil 4.8** : Farklı sıkıştırma oranlarında, optimum ateşleme avansı ile yaklaşık olarak eşit motor performansı elde edilmesinin, azot oksit konsantrasyonuna etkisi..... 45
**Şekil 4.9** : Farklı yakıt hava karışımı oranlarında, motor hızına bağlı olarak azot oksit konsantrasyonu eğrileri..... 46
**Şekil 4.10** : Sabit ateşleme avansında azot oksit konsantrasyonunun motor devir sayısı ile değişimi..... 47
**Şekil A.1** : Türbülanslı yanma mekanizmasını kullanarak motor indike ve efektif parametrelerini hesaplayan ana programın akış şeması..... 53
**Şekil B.1** : Yanmış gazları bölümlere ayıran alt programın akış şeması 54
**Şekil C.1** : Runge Kutta sayısal yöntemini kullanarak azot oksit konsantrasyonunu belirleyen alt programın akış şeması..... 55

## SEMBOL LİSTESİ

| | |
|---|---|
| [ ] | : Konsantrasyon |
| A | : Yanma odası yüzeylerinin toplam alanı |
| $b_i$ | : Özgül yakıt tüketimi |
| C | : Sabit |
| $c_p$ | : Karışımın sabit basınçta özgül ısısı |
| D | : Silindir çapı |
| $d\alpha$ | : Krank mili dönme açısının $d\tau$ zamanında değişimi |
| DNO1 | : İterasyon değişkeni |
| DNO2 | : İterasyon değişkeni |
| DNO3 | : İterasyon değişkeni |
| DNO4 | : İterasyon değişkeni |
| $dQ_w$ | : $d\tau$ zamanında soğutmaya giden ısı |
| dU | : İç enerji değişimi |
| dV | : $d\tau$ zamanında silindir hacmi değişimi |
| dx | : $d\tau$ zamanında yanan yakıtın kütlesel oranı |
| g | : Bir çevrimde kullanılan yakıt miktarı |
| G, R | : İş gazının kütlesi ve gaz sabiti |
| $G_0$ | : Yanmadan önce silindir içinde yer alan iş gazının kütlesi |
| Hu | : Yakıtın alt ısıl değeri |
| i | : Silindir sayısı |
| $k_1$,$k_2$,... | : Reaksiyon hız sabitleri |
| $k_{e_H}$ , $k_{e_O}$ ,... | : Denge sabitleri |
| $k_j$ | : Yanma ürünlerinin adyabatik üssü |
| $k_k$ | : İş karışımının $T_{kar}$ sıcaklığındaki adyabatik üssü |
| $K_p$ | : Korelasyon katsayısı |
| l | : Türbülans ölçeği |
| $L_0$ | : 1 kg yakıtın tam yanması için gerekli minimum hava miktarı |
| $l_0$ | : Normal atmosfer şartlarında türbülans ölçeğinin entegral değeri |
| $M_{NO1,2,..}$ | : Bölgelerdeki azot oksit miktarları |
| $M_{NO\Sigma}$ | : Toplam azot oksit miktarı |
| $m_y$ | : Yakıtın mol kütlesi |
| n | : Krank mili devir sayısı |
| $N_i$ | : İndike güç |
| OS | : Yakıtın oktan sayısı |
| p, T | : İş gazının basıncı ve sıcaklığı |
| $p_a$ | : Sıkıştırma başlangıcındaki basınç |
| $p_a$ | : Emme sonu basıncı |
| $p_c$ | : İş karışımının yanmadan önceki basıncı |
| $P_j$ | : Hesaplama adımı başında silindir basıncı |
| $P_{j+1}$ | : Hesaplama adımı sonunda silindir basıncı |
| $p_r$ | : Egzoz sonu basıncı |
| $p_x$ | : Yanmasız gerçekleşen motor çevriminde iş gazının basıncı |

$R_1$, $R_2$,... : Reaksiyon oluşum hızları
$R_h$ : Havanın gaz sabiti
$R_{yü}$ : Yanma ürünleri hacminin yarıçapı
T . Yanma odası yüzeylerinin ortalama sıcaklığı
$T_a$ : Sıkıştırma başlangıcındaki sıcaklık
$T_{ad}$ : Adyabatik alev sıcaklığı
$T_c$ : İş karışımının yanmadan önceki sıcaklığı
$T_j$ : Hesaplama adımı başında silindir sıcaklığı
$T_{j+1}$ : Hesaplama adımı sonunda silindir sıcaklığı
$T_{kar}$ : Yanmamış yakıt-hava karışımının sıcaklığı
$T_{y.ü.}$ : Yanma ürünlerinin sıcaklığı
$U'_{\Sigma}$ : Türbülans şiddetinin geometrik ortalama değeri
$U_n$ : Laminar yanma hızı
$U_{n_0}$ : Normal atmosfer koşullarında laminar yanma hızı
$U_t$ : Alev cephesi ilerleme hızı
$V_h$ : Silindirin strok hacmi
$V_{p,ort}$ : Pistonun ortalama hareket hızı
W : Yanma ürünleri ilerleme hızı
$W_{ig}$ : Motor çevriminin çeşitli zamanlarında iş gazının hareket hızı
x : Yanmış yakıt kesri
y : Yanma ürünleri hacminin silindir hacmine oranı
$\alpha$ : Krank mili dönme açısı
$\alpha_{\Sigma}$ : Yanma odası yüzeylerinin toplam ısı transferi katsayısı
$\beta$ : Sabit
$\gamma_r$ : Artık gaz katsayısı
$\delta$ : Alev bölgesi kalınlığı
$\Delta t$ : Hesaplama adımı
$\Delta\alpha_d$ : Yanma ürünlerinin denge haline gelmesi için gerekli süre (° kma)
$\Delta\tau_d$ : Yanma ürünlerinin denge haline gelmesi için gerekli süre (s)
$\varepsilon$ : Sıkıştırma oranı
$\varepsilon_c$ : Yanma ürünlerinin genişleme oranı
$\varepsilon_{max}$ : Genişleme oranının maksimum değeri
$\varepsilon_t$ : Türbülanslı alev içinde yanmış ürünlerin genişleme oranı
$\eta_i$ : İndike verim
$\eta_v$, $\eta_{vmax}$ : Volumetrik verimin kısmi ve maksimum yüklerdeki değerleri
$\theta$ : Ateşleme avansı
$\lambda$ : Yakıt hava karışımının hava fazlalık katsayısı
$\lambda_1$ : Karışımın ısı iletim katsayısı
$\lambda_b$ : Krank mili yarıçapının biyel uzunluğuna oranı
$\mu$ : İş karışımının moleküler değişim katsayısı
$\xi_d$ : Disosiyasyon kaybı nedeniyle kullanılan katsayı
$\rho$ : Yakıt hava karışımının yoğunluğu
$\rho_{kar}$ : Yanmamış karışımın yoğunluğu
$\Phi$ : Yakıt fazlalık katsayısı
$\chi$ : Yakıt–hava karışımının ısıl yayınım katsayısı

# BUJİ ATEŞLEMELİ MOTORLARDA TÜRBÜLANSLI YANMA MEKANİZMASI KULLANILARAK AZOT OKSİT EMİSYONLARININ BELİRLENMESİ

## ÖZET

Bu çalışmada, Rusya Bilimler Akademisi Kimyasal Fizik Enstitüsü'nde teklif edilen Türbülanslı Yanma Mekanizmasını temel alarak, buji ateşlemeli motorlarda indike ve efektif parametreleri yeterli hassasiyetle tahmin edebilen termodinamik bir modelin geliştirilmesi kapsamında, azot oksit emisyonlarının hesaplanması amacıyla bir model oluşturulmuştur.

Modelin oluşturulması aşamasında, yüksek sıcaklıkta azot oksit oluşumuna açıklama getiren üç basamaklı genişletilmiş Zeldovich mekanizması esas alınmıştır. Azot oksit konsantrasyonunu hesaplamada en büyük problem, silindir içerisindeki sıcaklığın, basınç gibi her yerde eşit olmamamsıdır. Azot oksit oluşum hızının, sıcaklıkla çok fazla değişmesi, farklı zamanlarda yanan karışımların sıcaklıklarının belirlenmesi ihtiyacını doğurmaktadır.

Bu amaçla Mach tarafından açıklanan, basınç artışının silindir içerisindeki gazları adyabatik olarak sıkıştırması prensibi kullanılarak ve yanmış gazlar bölgelere ayrılarak, yerel sıcaklıkların hesaplanması sağlanmıştır.

Genişletilmiş Zeldovich mekanizmasının düzenlenmesi ile oluşturulan ve azot oksit konsantrasyonunun oluşum hızına açıklama getiren diferansiyel denklem, hesaplanan yerel sıcaklıklar kullanılarak, Runge Kutta sayısal yöntemi yardımıyla çözülmüştür.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde toplam azot oksit emisyonunun çok büyük bir bölümünün, yanmanın devam etmesi ve yanmış gazları sıkıştırması sonucu oluşan basınç ve sıcaklık artışı nedeniyle, yanmanın ilk safhalarında oluştuğu belirlenmiştir.

Ayrıca çeşitli motor dizayn ve işletme parametrelerinin azot oksit emisyonuna etkisi, incelenmiş sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur. Bununla birlikte azot oksit emisyonlarını azaltma amacıyla yapılan dizayn ve işletme parametrelerindeki değişikliklerin diğer etkileri de vurgulanmıştır.

Yapılan çalışma sonucunda elde edilen azot oksit emisyonu değerleri, diğer araştırmalarda elde edilen sonuçlarla benzerlik gösterdiği ve motorun dizayn ve çalışma parametreleri ile gerçekçi bir değişim sergilediği için çalışmanın geliştirilmeye açık geçerli bir model olduğunu söylemek mümkündür.

**DETERMINATION OF NITRIC OXIDE EMISSION IN SPARK IGNITION ENGINES BY TURBULENT COMBUSTION MECHANISM**


## SUMMARY

In this study, a model is formed to calculate nitric oxide emission as an improvement of a thermodynamic modeling of a spark ignition engine which has been developed by using the turbulent combustion mechanism and proposed by The Soviet Academy of Sciences, Institute of Chemical Physics.

In formation process of model, the extended Zeldovich mechanism, explains nitric oxide formation at high temperatures, has been established. The biggest problem encountered during the calculation of nitric oxide concentration is being different of temperatures throughout the combustion chamber. The strong dependence of the nitric oxide formation with the temperature implies that in order to accurately predict nitric oxide formation, it is necessary to consider temperature gradients.

As explained first by Mach, the unburned mixture that burns first is compressed adiabatically as combustion products. To solve this problem, the effects the temperature gradients throughout the combustion chamber have on nitric oxide formation can be considered by dividing the burnt gases into several groups.

A first order ordinary differential equation which has been formed by arranging of extended Zeldovich mechanism that explains nitric oxide formation rate, is solved by using Runge Kutta numerical method and calculated local temperatures.

When the results that obtained are studied, it can be seen that the most of nitric oxide concentration is formed in post flame gases that burn early. The main reason of this situation is the compression of early burned gases during the combustion process which leads an increase in the maximum pressure and temperature.

In addition, the effects of several design and operating variables on nitric oxide formation are also studied and results have been given as graphics. Besides this, the other effects of the changes in the design and operating variables to minimize nitric oxide formation are also emphasized.

In conclusion, the amount of nitric oxide have obtained is similar to research made before and the reactions of nitric oxide formation to engine design and operating variables are realistic. Because of these reasons it can be said that this is a valid model to calculate nitric oxide formation in spark ignition engines.

# 1. GİRİŞ

Geride bıraktığımız yüzyılın başlarında gerçekleşen sanayi devrimi ile birlikte, insanoğlunun doğaya, hava kirliliği şeklinde verdiği zarar ivme kazanmıştır. O günden bu yana dünya nüfusundaki artışın yanı sıra kişi başına enerji tüketiminin de artış göstermesi, son dönemlerde çevre kirliliği açısından önemli sorunlar yaratmaya başlamıştır.

Günümüzde, dünya enerji ihtiyacının % 70'i, kömür, petrol, vb. fosil yakıtların yakılması sonucu açığa çıkan ısı enerjisinden karşılanmaktadır. Temel olarak hidrojen ve karbondan oluşan bu yakıtların yanması sonucu açığa çıkan ürünler çeşitli şekillerde doğaya zarar vermektedir. Ayrıca yanma işleminin yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmesi, havadaki azotun yanma reaksiyonuna katılmasına neden olmakta bu da azot oksitlerin oluşmasına yol açmaktadır.

Yanma işleminin yüksek sıcaklıklarda gerçekleştiği ısı makinelerinden olan içten yanmalı motorlarda açığa çıkan azot oksit bileşiklerinden en önemlisi NO'dur. Renksiz ve kokusuz olan bu gaz atmosferde bulunan su ile birleşerek nitrik asit oluşumuna ve buna paralel olarak, bitki örtüsüne büyük zarar veren, asit yağmurlarına neden olmaktadır. Ayrıca bu gazın, akciğerdeki nemle birleşerek nitrik asit oluşturma etkisi de bulunmaktadır.

## 1.1 Çalışmanın Amacı ve Önemi

Bu çalışmanın amacı, yukarıda zararlı etkileri anlatılan azot oksitlerin, buji ateşlemeli motorlarda oluşumunun incelenmesi, yanma işleminin hangi safhalarında oluştuğunun belirlenmesi, motor dizayn ve çalışma parametrelerinden nasıl etkilendiğinin açıklanması ve azaltma amaçlı tedbirlerin ortaya konmasıdır.

Bu işlemin laboratuar ortamı yerine, matematiksel modelleme kullanılarak bilgisayar ortamında yapılması büyük önem taşımaktadır. Bu sayede birçok parametrenin motor performansına ve emisyonuna etkisinin, kısa zamanda ve düşük maliyetle incelenmesine olanak sağlanmaktadır.

# 2. BUJİ ATEŞLEMELİ MOTORLARDA AZOT OKSİT EMİSYONLARININ MODELLENMESİ

## 2.1 Matematiksel Modelleme

Özellikle 70'lerde ki petrol krizinden sonra hız kazanan motor geliştirme çalışmaları, günümüzde de temposundan bir şey kaybetmemiştir. Bu değişime ayak uydurmak, yeni açılımlar ortaya koymak ise çalışma, ve zaman gerektirmektedir. Ayrıca bu çalışmaların maliyetleri de göz ardı edilmemesi gereken bir husustur. Deneysel çalışmaların araştırmacılara getirdiği yükler yadsınamaz büyüklüktedir. Bu gerekçelerle, çok sayıdaki parametrenin motor performansına, verimine ve emisyonlarına etkisini, kısa zamanda ve düşük maliyetle optimize etmek amacıyla matematiksel modelleme teknikleri kullanılmaktadır.

### 2.1.1 Buji Ateşlemeli Motorlarda Matematiksel Modelleme

Buji ateşlemeli motorlar için kullanılan matematiksel modeller iki ana gruba ayrılabilir. Bunlar termodinamik ve boyutlu modellerdir. Termodinamik modeller kendi içerisinde tek bölgeli ve çok bölgeli olarak, boyutlu modeller ise kendi içerisinde tek boyutlu ve çok boyutlu modeller olarak gruplanabilir.

Tek bölgeli modellerde silindir içersindeki basınç, sıcaklık ve yakıt hava karışımının üniform olduğu kabul edilmektedir. Bu modeller bir teşhis yada tahmin aracı olarak kullanılabilir. Isı çıkışı analizlerinde deneysel olarak belirlenen basınç diyagramları, ısı çıkış hızını veya yanmış kütlenin miktarını belirlemek amacıyla giriş bilgisi olarak kullanılmaktadır. Basit yapıda olmalarına karşın bu modeller alevin yayılma hızını ve yanma odası geometrisini göz ardı ederler.

Tek bölgeli modeller, yanmış kütle kesri bilindiğinde de bir tahmin aracı olarak kullanılabilmektedir. Yakıtın yanma hızı, yanma süresi, ateşleme açısı, motor geometrisi, hava fazlalık katsayısı, artık gaz kütlesi, vb. gibi parametrelere bağlıdır. Bu nedenle farklı motorlarda yada aynı motorun değişik çalışma koşullarında, basınç diyagramının tahmin edilmesi sürecinde, ayarlama gerekli olabilmektedir.

Çok bölgeli modeller, tek bölgeli modellere göre yanma olayının çözümlenmesine daha çok fiziksel açıdan yaklaşırlar. Yanma odası genellikle yanmış ve yanmamış gazların olduğu bölgelere ayrılır, bazı çalışmalarda, yanmış ve yanmamış bölgelerde

termal sınır tabakaları da bulunabilmektedir. Yanma odasındaki iş gazının tamamı ideal gaz olarak kabul edilmektedir. Termodinamiğin birinci kanunu, durum denklemi ve kütlenin korunumu denklemleri yanmış ve yanmamış gazlara uygulanmaktadır. Silindir içersindeki baştan sona her yerde basıncın eşit olduğu kabul edilir ve basınç, kütle, hacim, karışım ve yanmış ile yanmamış gazların sıcaklığı için n adet birinci derece adi diferansiyel denklem elde edilebilir. Buna karşın n-1 adet korunum denklemi olduğu için, türbülent yanma hızı, örneğin laminar yanma hızının veya motor devir sayısının bir fonksiyonu olarak tanımlanmadığı sürece denklem sistemi çözülemez.

Alev cephesi alanı tanımlanmadığı sürece, türbülent yanma hızı kullanılarak yanmış kütle belirlenemez. Sıklıkla alevin, yanma odasının bir ucundan diğerine küresel olarak yayıldığı kabul edilir.

Türbülent yanma hızının tanımlandığı çoğu çok bölgeli modellerde, alev yayılımında ki ve yanmada ki türbülans şiddetine ve laminar yanma hızına açıklama getirilmektedir ancak alev yayılımında ki türbülans ölçeğinin etkileri için açıklama sunulmamaktadır. Bu etkiler bir türbülans kinetik enerji basamaklama işlemi, türbülans kinetik enerji ve disipasyonu için uygun denklemler kullanılarak açıklanabilir. Moleküler taşınma etkileri ise şu kabulle açıklanabilir, örneğin Taylor girdapları laminar tarzda yanar. Bu yolla laminar yanma hızının, türbülans şiddetinin ve türbülans ölçeğinin yanma üzerindeki etkileri de dahil edilmiş olmaktadır. Türbülans kinetik enerji ve kinetik enerjinin disipasyonu denklemleri kullanılarak, emme ve piston hareketi kaynaklı türbülans etkisi de hesaba katılabilmektedir.

Çok bölgeli modellerde sıkıştırma sırasında yanma odası baştan başa üniform kabul edilir ve ortalama akış ihmal edilir. Deneysel sonuçlar ve hesaplamalar, emme strokunda oluşan büyük ölçekli girdapların, sıkıştırma strokunda üst ölü noktaya kadar kalabildiğini ve türbülans şiddetinin 120 °kma sonra hafiflediğini göstermiştir. Süre bu kadar uzun olduğu için çok bölgeli modellerde motor türbülansı hesaplamaları hassas sonuçlar vermemektedir. Buna ek olarak bu modeller alev cephesini sonsuz küçüklükte varsayarak, alevin yapısını ihmal etmektedir. Duvarlardan kaybedilen ısı bir entegral metodu ile hesaplanmadığı sürece ısı transfer korelasyonları kullanılması zorunludur.

Tek boyutlu modeller çok boyutlu modellerden önce geliştirilmiştir ve alev yayılımının düzlemsel yada silindirik olduğu varsayılmıştır. Düzlemsel alev yayılımının kullanıldığı modellerde piston ile silindir kafası arasındaki mesafe, silindir çapından çok daha geniş olmalıdır. Silindirik modeller alev pistona ulaştıktan sonra yanma olayını simüle edebilirler ancak yanmanın başlangıcında yeterli hassasiyeti sağlayamazlar.

Çok boyutlu modeller, zamana bağlı kütle, momentum, enerjinin korunumu ve konsantrasyonların değişimi denklemleri üzerine oturtulmaktadır. Günümüzde ki ve gelecekteki bilgisayarlarla bütün akışları çözmek imkansız olduğundan modelleme gereklidir; ortalama bir akış ve dalgalanma miktarı tanımlanarak, denklemde yerine konmaktadır.

Korunum denklemlerinin ortalamasını almak narin bir konudur. Ortalama zaman sabit türbülans için kesinlikle geçerlidir. Motor türbülansı sabit değildir ve akışın yavaşlaması çevrimler boyunca sürebilir. Bu nedenle ortalama zaman motor akış analizleri için geçerli olmayabilir. Buna ek olarak, motor türbülansını analiz etmek için kullanılan türbülans modellerinin çoğu sabit, sıkıştırılamayan akışlar için geliştirilmiştir. Motor akışları kararsız, sıkıştırılabilir yapıdadır ve bölgelerde karmaşık dolaşımlar gerçekleşmektedir.

Kısıtlamalarına rağmen çok boyutlu modeller, düşük devirli çalışmada akış alanlarının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Tahmin edilen ve ölçülen, ortalama hızlar ve türbülans şiddeti değerlerinin kıyaslanması cesaret verici sonuçlar ortaya koymaktadır. Ancak, günümüze kadar elde edilen deneysel bilgilerin çoğu, türbülans şiddetinin belirlenmesinde çevrimden çevrime olan farklılıkları içinde barındırmaktadır ve çok boyutlu modellerin geçerliliğine değer biçme konusunda yeterince doğru olmayabilir. Aslında çevrim başına yapılan ölçümler, çevrim başına yapılmayan hesaplamaların, türbülans şiddetini, değerinden daha yüksek gösterdiğini ortaya koymuştur.

Motorlarda, akış alanlarını analiz etmek amacıyla bir çok matematiksel modelin kullanılabilir olduğunu belirtmek yanlış olmaz. Ancak, sadece çok boyutlu modeller, yoğun geçerlilik çalışmalarının konusu olmuştur. Çok boyutlu modeller genel olarak motor bilgileriyle onaylanmıştır ama henüz bu modeller motor geometrisi, bujinin silindir içerisindeki konumu ve çap strok oranı gibi bazı faktörlerin, motor performansına, yanmaya ve ateşleme olmadığı durumda emisyona etkilerini tahmin edememektedir. [4]

## 2.2 Azot Oksit Emisyonları

### 2.2.1 Azot Oksit Emisyonları ve Zararları

Oda sıcaklığında termodinamik olarak dengede olmayan azot oksit bileşikleri (NO, $NO_2$, $N_2O_2$, vb.) motor içerisinde yüksek yanma sıcaklıklarında oluşur. Bu bileşikler egzoz sürecinde ve atmosferik koşullarda oldukça yavaş şekilde yok edilir.

Karbon monoksite benzer şekilde azot oksitler kandaki hemoglobine bağlanma eğilimi gösterirler. Ancak azot oksit bileşiklerinin en olumsuz etkisi bu değildir. En

zararlı etkisi akciğerlerdeki nem ile birleşerek, nitrik asit oluşturmasıdır. Oluşan nitrik asit miktarının düşük seviyede olması nedeniyle etkisi de çok küçük boyutlarda olmaktadır, ancak uzun süre etkisine maruz kalındığında, özellikle solunum yolu rahatsızlıkları olanlarda istenmeyen sonuçlar ortaya çıkmaktadır. [1-3]

Azot oksitler ayrıca kimyasal sis oluşumunu da etkilemektedir. Bu bileşikler atmosferde bulunan su ile (yağmur, sis, vb.) birleşerek asit oluşumuna neden olmaktadır. Böylece atmosferde asit yağmuru olayını meydana getirirler ve bu durum özellikle bitki örtüsüne zarar vermektedir. NO gazı ayrıca felç etme özelliğine de sahiptir.

Azot oksit bileşikleri içerisinde NO renksiz, kokusuz bir gazdır. $NO_2$ ise kırmızı ile kahverengi arası renkte, kötü kokulu, tahriş edici bir gazdır. Yanma ürünleri arasında genellikle NO bulunmasına rağmen, atmosfere atıldıktan sonra bir kısmı $NO_2$'ye dönüşmektedir. [3]

Aşağıda farklı azot oksit bileşikleri ve özellikleri verilmiştir.

NO: Renksiz, kararlı, (yüksek sıcaklıkta yanma ürünü), Motor egzozundan çıkan azot oksit, oksijen ile reaksiyona girerek azot dioksit oluşturabilir.

$N_2O_4$: ($N_2O_4 \leftrightarrow 2NO_2$), renksiz.

$NO_2$: Koyu kahverengi, 160 °C'de kararlı, 20 °C ile 160 °C arasında $NO_2$ ve $N_2O_4$ karışımları görülebilir.

$N_2O$: Renksiz, göreceli olarak kararlı, atmosferdeki sürekli konsantrasyonu yaklaşık olarak 0.5 ppm,

$N_2O_3$: Renksiz, su ile birleşerek nitrik asit oluşturur.

$N_2O_5$: Renksiz, kararsız, su ile birleşerek nitrik asit oluşturur.

$NO_x$: içeriği bilinmeyen bir azot oksit bileşiği için kullanılan terim

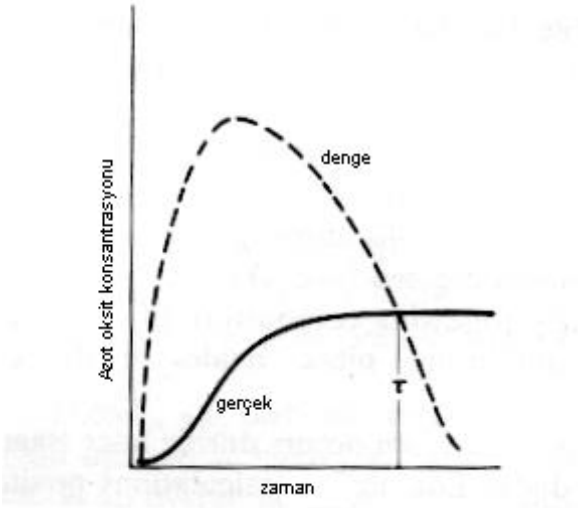
Farklı azot oksit bileşiklerinin denge konsantrasyonu oluşumun inceleyen bir çalışmada, motordaki yanma işleminde sadece NO'nun yüksek düzeyde öneme sahip olduğu ortaya konmuştur. [2]

### 2.2.2 Buji Ateşlemeli Motorlarda Azot Oksit Oluşumu

Kimyasal denge hesaplamaları, yüksek sıcaklıkta yanma sonucu azot oksit konsantrasyonunun, hava fazlalık katsayısı ve sıcaklığa bağlı olarak, milyonda birkaç yüz ile en fazla yüzde iki arasında değiştiğini ortaya koymaktadır. Dolaylı olarak bu hesaplamalar ürünlerin yanma sırasında dengeye ulaşmak için yeterli zamana sahip olduğunu kabul etmektedir. Yakın zamanda yapılan çalışmalar göstermiştir ki

gerçekte, tipik alev sıcaklıklarında azot oksidin kimyasal dengeye ulaşması, büyük ölçüde yanma işleminin süresine bağlıdır. Ayrıca azot oksit oluşumu reaksiyon hızları sıcaklığa çok duyarlıdır. Genelde, maksimum denge konsantrasyonu düzeylerine ulaşılmadan önce yanmış gazlar hızla soğur ve dengeden bir sapma oluşur.

Kimyasal denge durumundan bir ikinci ayrılma ise yanmış gazların sonraki soğuma süreçlerinde ortaya çıkar. Denge hesaplamaları NO'nun yanma odasından çıkarken göreceli olarak düşük sıcaklıklarda, büyük ölçüde $N_2$ ve $O_2$'ye dönüştüğünü öngörmektedir. Ancak gerçekte oradaki kimyasal reaksiyonlar düşük sıcaklıklar nedeniyle çok yavaş gelişir. Sonuç olarak yanmanın ilk bölümlerinde oluşan NO konsantrasyonlarında azalma olmamaktadır. Bu durum Şekil 2.1 den de görülebilir. Bu şekilde ayrıca yanma sürecinde, her anda denge durumu olduğu varsayılarak oluşan NO konsantrasyonu da verilmiştir. Yanma işleminin başlangıcında kimyasal reaksiyon hızlarının, azot oksit oluşumunu zirveye çıkaracak kadar yüksek olmadığı şekilden görülmektedir. Bir süre sonra ( $\tau$ ), denge konsantrasyonu sıcaklığın düşmesi sonucu sıfıra doğru ilerlerken, gerçek konsantrasyonlar sabit kalmaktadır. Burada önemli nokta yanmanın yüksek sıcaklık kısmında NO konsantrasyonu belirleyen en önemli etkenin reaksiyon hızı olmasıdır. Bu nedenle toplam oluşan NO miktarı reaksiyon hızına ve zamana bağlıdır.

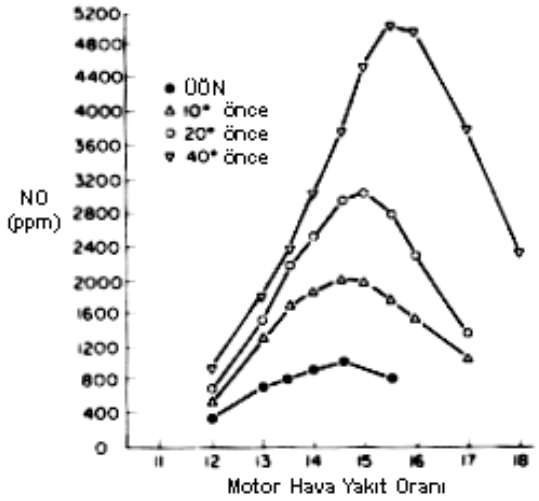



Şekil 2.1: Yanma sürecinde azot oksit oluşumu

Azot oksit oluşumunun sıcaklık bağımlılığına ek olarak, yanma ürünleri içerisinde bulunana oksijene de bağımlılığı bulunmaktadır. Bu nedenle azot oksit düzeyleri, zengin karışımlarda azalma eğilimi gösterir ve maksimum değeri yaklaşık olarak % 10 fakir karışımlarda ortaya çıkar. Daha fakir karışımlar kullanıldığında ise, içeri giren fazla havanın yanma sıcaklığını düşürmesi, oksijenin azot oksit oluşumunu artırma etkisini telafi eder ve emisyonda bir azalma gözlenir.

Buji ateşlemeli motorlarda azot oksit oluşumu, ateşlemenin olduğu noktaya en yakın bölgelerde başlar ve en uzak bölgelerde sonlanır. Piston aşağı doğru ilerlerken yanma işleminin sonuna doğru, ürünlerin hızla genişlemesi ve soğuması sonucu azot oksit oluşum reaksiyonları sona erer. İlk yanan bölgelerde, alev cephesinin ayrılmasından sonra, pistonun aşağı yönlü hareketi sonucu oluşan soğuma ve genişlemeye kadar göreceli olarak, daha uzun süre olduğu için bu bölgelerde daha yüksek azot oksit konsantrasyonları oluşur. Bu fenomen, ateşleme bölgesi civarında sıcaklıkların ve reaksiyon hızlarının yüksek olması nedeniyle daha da şiddetlenmektedir.

Daha önce bahsedildiği gibi maksimum azot oksit emisyonu hafifçe fakir karışımlarda gözlenmektedir. Buna ek olarak ateşleme zamanının da azot oksit düzeylerine büyük etkisi bulunmaktadır. Bu etki hem azot oksit oluşumu için gerekli zamanı artırması hem de sıcaklıkları artırması ile ortaya çıkmaktadır. Ateşleme zamanının ve hava fazlalık katsayısının etkileri Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Azot oksit oluşum hızları, yükselen basınçla artma eğilimi gösterirler, bu nedenle artan yükle birlikte motor emisyonlarında yükselme gözlenir. [1]




Şekil 2.2: Hava yakıt oranı ve ateşleme zamanının azot oksit oluşumuna etkisi

### 2.2.3 Azot Oksit Oluşum Mekanizması

Yanma sırasında azot oksit, azot ve oksijen moleküllerini içeren bir grup temel reaksiyonun gerçekleşmesi sonucunda oluşmaktadır. Bunlar;

1. Oksijen ile azot arasındaki basit reaksiyon:

$$N_2 + O_2 \leftrightarrow 2NO \tag{2.1}$$

Eyzat ve Guibet tarafından kullanılan bu mekanizma, içten yanmalı motorlarda ölçülenden çok daha az azot oksit konsantrasyonu vermektedir. Bu mekanizmaya

göre maksimum sıcaklık düzeyinde NO oluşum hızı, denge değerlerine ulaşmak için çok yavaş kalmaktadır.

2. Zeldovich zincir reaksiyon mekanizması:

$$O_2 \leftrightarrow 2O \tag{2.2}$$

$$O + N_2 \leftrightarrow NO + N \tag{2.3}$$

$$N + O_2 \leftrightarrow NO + O \tag{2.4}$$

Denklem 2.2'de görülen oksijen, yanma işlemi sırasında ulaşılan yüksek sıcaklıklar nedeniyle disosiyasyona uğrayarak, denklem 2.3'teki şekilde zincir reaksiyonları başlatır. Denklem 2.3'teki oksijen atomu, azot molekülü ile reaksiyona girerek azot oksit ve bir azot atomu oluşmasına yol açar. Denklem 2.4'te ise azot atomu, oksijen molekülü ile reaksiyona girerek azot oksit ve atomik oksijen oluşturur. Bu mekanizmaya göre zincir reaksiyonunu azot atomları başlatmaz çünkü yanma sürecinde onların denge konsantrasyonları, atomik oksijeninkinden bağıl olarak daha düşüktür. Hem oksijen atomlarının hem de azot molekülünün denge konsantrasyonları sıcaklıkla ve karışımın fakirleşmesiyle artar.

3. Lavoie, Heywood ve Keck tarafından Zeldovich mekanizmasına şu adımlar eklenmiştir:

$$N + OH \leftrightarrow NO + H \tag{2.5}$$

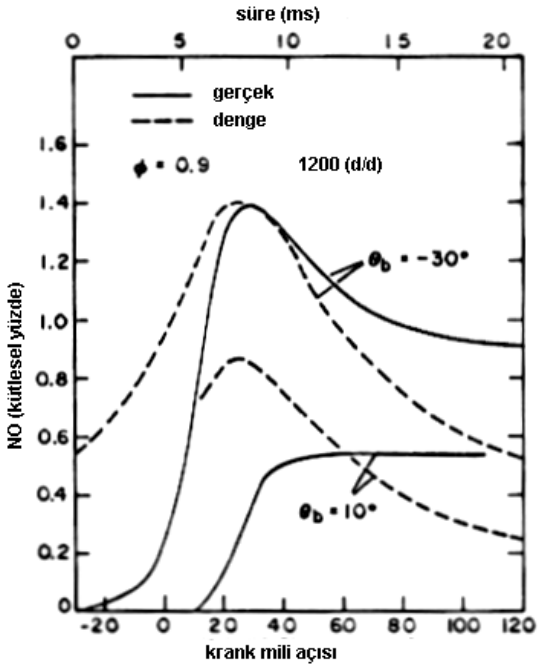
$$H + N_2O \leftrightarrow N_2 + OH \tag{2.6}$$

$$O + N_2O \leftrightarrow N_2 + O_2 \tag{2.7}$$

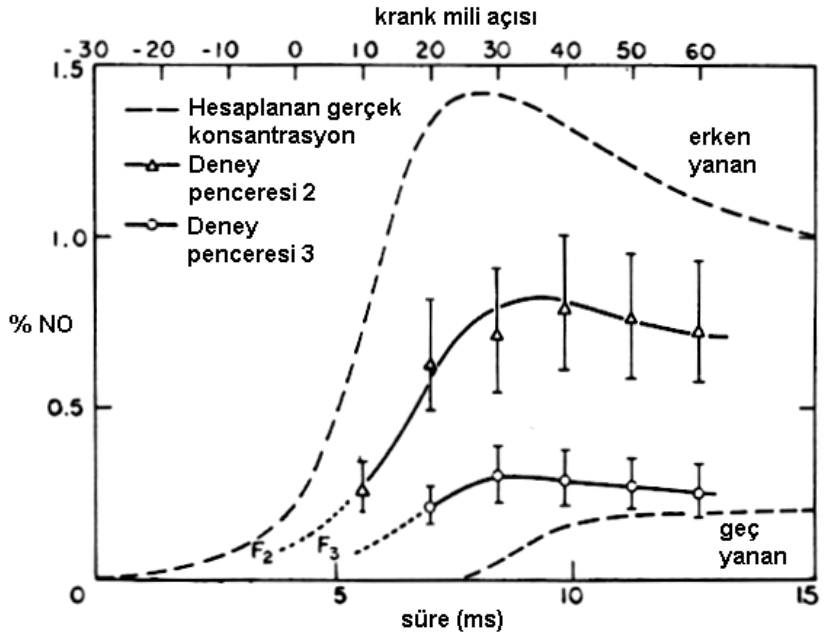
$$O + N_2O \leftrightarrow NO + NO \tag{2.8}$$

Genişleme sürecinde denklem 2.8 çok yavaş gelişir bu nedenle azot oksit konsantrasyonu neredeyse sabit kalır. Şekil 2.3, bu mekanizma ile yapılan hesaplamaları göstermektedir. Bu hesaplamalar yanmış gazların iki farklı bölümü esas alınarak yapılmıştır. İlk hesaplama yanmanın başlangıcında, üst ölü noktadan 30 °kma önce, ikinci hesaplama ise yaklaşık karışımın üçte biri yandığında, üst ölü noktadan 10 °kma sonra başlamaktadır. Şekil 2.3'te ki kesikli çizgiler hesaplanan denge konsantrasyonu değerlerini, düz çizgiler ise gerçek hesaplama sonuçlarını göstermektedir. Şekil 2.4'te ise elde ettikleri deney sonuçları görülmektedir. Bu çalışmada yanma odasının farklı bölgelerinde azot oksit konsantrasyonu ölçümü yapılmıştır. Yanma odasına açılan pencerelerden 2. pencere, 3. pencereye göre bujiye daha yakın konumdadır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, bujiye yakın

bölgedeki konsantrasyonun çok daha yüksek olmasıdır. Şekilde ki kesikli çizgiler ise hesaplanan eğrileri göstermektedir. [2]



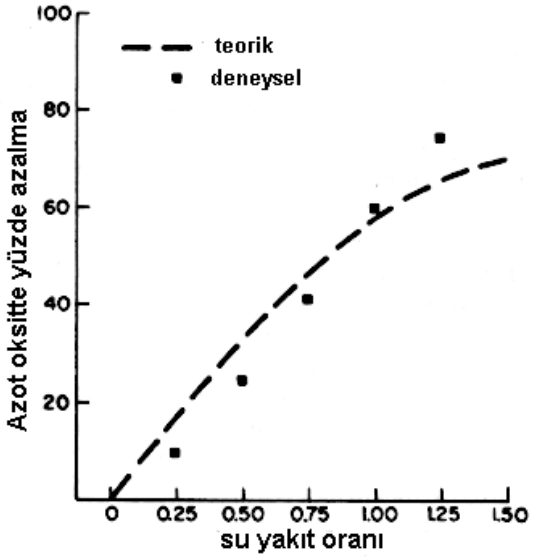

Şekil 2.3: Farklı zamanlarda yanan iki bölgenin fonksiyonu olarak azot oksidin kütlesel yüzdesi. $\theta_b$=30° kma iş gazının ilk yanan kısmı, $\theta_b$=10° kma iş gazının üçte biri yandığında. Yakıt fazlalık katsayısı (Φ) 0.9, motor hızı 1200 d/d, artık gaz kesri 0.05.




Şekil 2.4: Yanma odasına açılan iki pencereden gözlenerek elde edilen azot oksit konsantrasyonu. 2. pencere, 3. pencereye göre bujiye daha yakın konumdadır. Kesikli çizgiler erken ve geç yanan gazlardaki NO davranışını gösteren bilgisayar çözümünü ifade etmektedir. Yakıt fazlalık katsayısı 0.9.

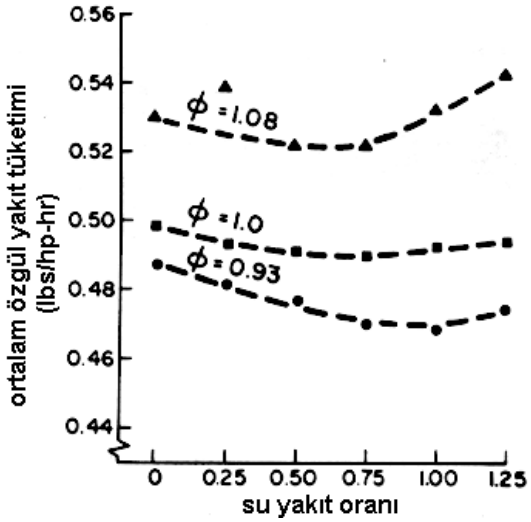
### 2.2.4 Önleme ve Azaltma Amaçlı Tedbirler

NO, egzoz emisyonundaki azot oksit bileşiklerinin en önemlisidir. Maksimum sıcaklık ve oksijenin artmasıyla artış göstermektedir. Fakir karışımlar CO ve HC emisyonlarını azaltır ancak NO emisyonunu artırır. Yanma odasındaki NO emisyonunu düşürmenin tek pratik yolu maksimum yanma sıcaklığının düşürülmesidir. Bu düşüş, ateşlemeyi geciktirerek yada taze dolguyu seyrelterek sağlanabilir. Seyreltme işlemi ise, su gibi inert bir sıvıyı püskürterek yada egzoz gazının bir kısmını tekrar yanma sürecine sokarak gerçekleştirilebilir.



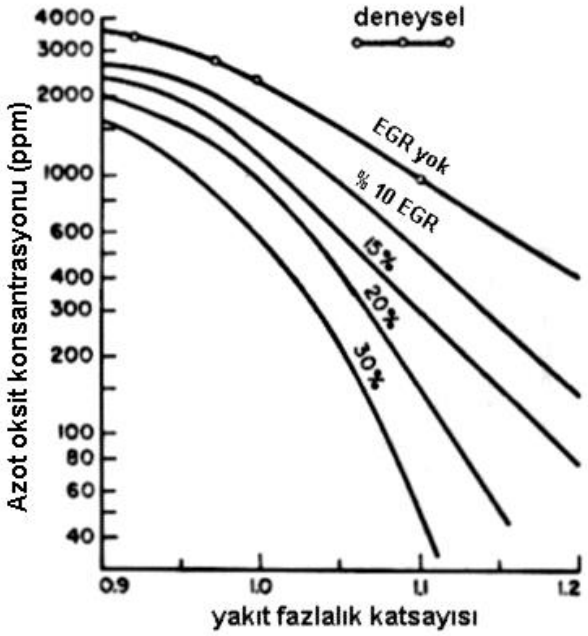

Şekil 2.5: Su püskürtme işlemi sonucu azot oksit miktarındaki teorik ve deneysel azalma. Yakıt fazlalık katsayısı 1.

Şekil 2.5'te görüldüğü gibi su püskürtme işleminin NO emisyonunu düşürdüğü deneysel olarak kanıtlanmıştır. Bu grafikte püskürtülen su miktarının, yakıt miktarına oranının bir fonksiyonu olarak NO emisyonundaki % düşüş eğrisi verilmiştir. Yakıt ile eşit miktarda su yanma odasına sokulduğunda NO emisyonunda % 60 azalma olduğu grafikten görülmektedir. Teorik olarak su püskürtme işlemi sonucu özgül yakıt tüketiminde sağlanan kazanç ise Şekil 2.6'da ortaya konmuştur. Hızlanma gibi yüksek yük altında çalışma durumlarında, NO emisyonu arttığı için su püskürtme işlemi sadece bu bölümlerde gerekli olabilir. Mühendisler su püskürtme konusuna pek eğilimli değildir çünkü emisyon kontrol sisteminin verimli çalışabilmesi için, müşterinin sürekli dolu tutmak zorunda olduğu, büyük bir su tankına ihtiyaç duyulmaktadır. Donma, yağın sulanması ve paslanma ise bu konunun önündeki diğer problemlerdir.

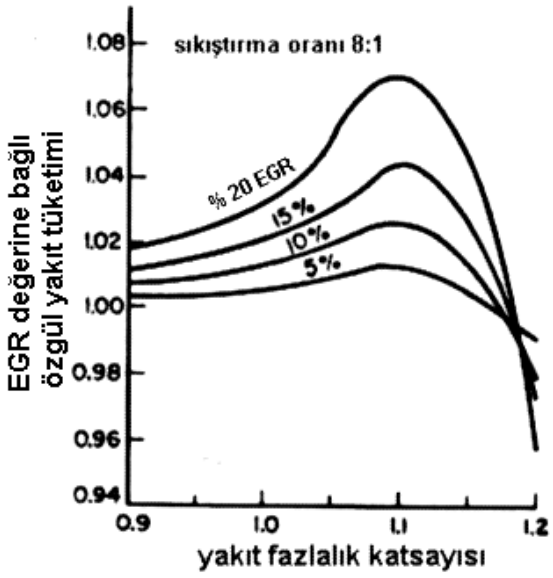



Şekil 2.6: Su püskürtmenin yakıt tüketimine etkisinin deneysel olarak gösterimi. Emme manifoldu basıncı 1.014 bar (nominal), sıkıştırma oranı 8.5:1, ateşleme avansı 28° kma, Φ: yakıt fazlalık katsayısı.

Egzoz gazının tekrar çevrime katılması, EGR, NO emisyonunun azaltılmasında çok daha fazla ümit veren bir yöntemdir. Şekil 2.7 ve 2.8, EGR'nin teorik olarak hesaplanan faydalarını göstermektedir. % 20 EGR ile kimyasal olarak doğru bir hava fazlalık katsayısında NO emisyonunda % 70 azalma sağlanabilmektedir. Teorik olarak bu işlem, Şekil 2.8'den görüldüğü gibi yakıt ekonomisinde sadece % 3 düşüşe neden olmaktadır. Şekil 2.9'da 50 km/h hızla giden bir aracın farklı EGR düzeylerinde elde edilen bilgileri verilmiştir. Aracın yakıt ekonomisi düzeyinde fark edilir bir azalma gözlemlenmiştir.

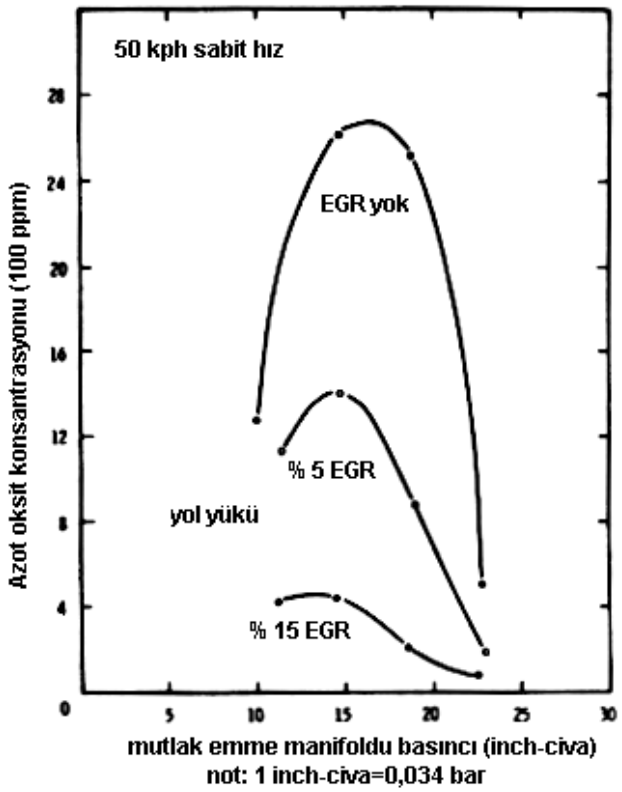



Şekil 2.7: Yakıt fazlalık katsayısı ile azot oksit konsantrasyonu değişimi. Sıkıştırma oranı 8:1




Şekil 2.8: EGR'nin yakıt tüketimine etkisi.

EGR'nin başlıca problemi artık gaz miktarının artmasıdır. Bu genellikle zengin karışımların kullanılmasına zorunlu kılar. Buna ek olarak emme sisteminde aşırı tortu oluşması ve yağın bozulması diğer problemlerdir. [2]




Şekil 2.9: Yükün, farklı EGR oranlarında $NO_x$ konsantrasyonuna etkisi.

## 2.3 Matematiksel Modelleme ile Azot Oksit Emisyonlarının Belirlenmesi

Azot oksit temel olarak üç farklı mekanizma ile oluşmaktadır, bunlar;

a) Termal azot oksit

b) Yakıt kaynaklı azot oksit

c) Hızlı oluşan (prompt) azot oksit

İkinci mekanizmadaki azot oksit, yakıtla birlikte gelen azot bileşiklerinin oksijenle reaksiyona girmesi sonucunda oluşmaktadır. Hızlı oluşan azot oksit ise HCN'nin azot radikalleri ile reaksiyona girmesi ile oluşmaktadır. Çok zengin karışımlar haricinde önemsiz miktarlarda prompt NO oluşmaktadır. Doğal gaz ve rafine edilmiş yakıtların bir çoğunda kimyasal olarak azot bileşikleri bulunmadığından, azot oksit oluşumunda termal azot oksidi baz almak mantıklı bir kabuldür. [13]

Azot oksit oluşumu, yanmış gazların sıcaklık değişimine bağlı, dengesiz bir fenomendir. Karışımın önce yanan kısımlarının sıcaklıkları artma eğilimindedir çünkü yanmanın sürmesi ve genellikle pistonun yukarı yönlü hareketi bu gazları sıkıştırır. Son yanan kısım ise yanmadan önce, yanmamış karışım olarak sıkıştırılmaktadır. Yanma işlemi sırasında, farklı zamanlarda yanan gaz elementlerinin, denge kompozisyonu ve termodinamik özellikleri basınç diyagramından hesaplanabilir.

Buji ateşlemeli motorlarda, mevcut olan yüksek basınçta hidrokarbonun oksidasyon reaksiyonları çok hızlı ilerleyerek tamamlanır. Buna ek olarak, türbülent alev cephesi, birkaç yanan girdap oluşturarak alev cephesi kalınlığını artırmasına rağmen reaksiyon bölgesi incedir. Bu nedenle, yanmış gazların kimyasal olarak, neredeyse dengede olduklarını kabul etmek mantıklı bir yaklaşımdır. NO konsantrasyonları genişletilmiş Zeldovich mekanizması yada termal mekanizma kullanılarak hesaplanabilir.

$$O + N_2 \leftrightarrow NO + N \tag{2.9}$$

$$N + O_2 \leftrightarrow NO + O \tag{2.10}$$

$$N + OH \leftrightarrow NO + H \tag{2.11}$$

NO oluşum hızı şu şekilde ifade edilebilir;

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_1[N_2][O] - k_2[NO][N] + k_3[N][O_2]$$

$$- k_4[NO][O] + k_5[N][OH] - k_6[NO][H] \tag{2.12}$$

burada köşeli parantezler konsantrasyonları, $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ ise reaksiyon hız sabitlerini ifade etmektedir.

Denklem 2.12 NO oluşumunu hesaplamak için verilmiştir. O, OH, H ve N konsantrasyonlarının bilinmesi zorunludur. Çoğunlukla N atomu için bir kararlı durum yaklaşımı kullanılır, bu da;

$$\frac{d[N]}{dt} = k_1[N_2][O] - k_2[NO][N] - k_3[N][O_2]$$

$$+ k_4[NO][O] - k_5[N][OH] + k_6[NO][H] = 0 \qquad (2.13)$$

N konsantrasyonu şu şekilde yazılabilir;

$$[N] = \frac{k_1[N_2][O] + k_4[NO][O] + k_6[NO][H]}{k_2[NO] + k_3[O_2] + k_5[OH]} \qquad (2.14)$$

2.14 numaralı denklem, 2.12 numaralı denklemde yerine konursa sonuçta;

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2\{k_1[N_2][O] - k_2[NO][N]\} \qquad (2.15)$$

Aşağıdaki kısmi denge reaksiyonları kullanılarak O, OH ve H konsantrasyonları hesaplanabilir;

$$\frac{1}{2}O_2 \leftrightarrow O(k_{e_O}) \qquad (2.16)$$

$$H + O_2 \leftrightarrow OH + O(k_{e_H}) \qquad (2.17)$$

burada $(k_{e_H})$ ve $(k_{e_O})$ denge sabitlerini ifade etmektedir.

$$k_{e_O} = \frac{[O]}{[O_2]^{1/2}} \qquad (2.18)$$

$$k_{e_H} = \frac{[OH][O]}{[H][O_2]} \qquad (2.19)$$

2.18 ve 2.19 numaralı denklemler, 2.15 numaralı denklemde yerinde konursa sonuçta;

$$\frac{d[NO]}{dt} = R_1 \frac{1 - ([NO]/[NO]_e)^2}{1 + k[NO]/[NO]_e} \qquad (2.20)$$

Burada;

$$R_1 = k_1[O]_e[N_2]_e = k_2[N]_e[NO]_e \tag{2.21}$$

$$R_2 = k_3[N]_e[O_2]_e = k_4[NO]_e[O]_e \tag{2.22}$$

$$R_3 = k_5[N]_e[OH]_e = k_6[NO]_e[H]_e \tag{2.23}$$

$$k = \frac{R_1}{R_2 + R_3} \tag{2.24}$$

ve e indisi dengeyi simgelemek için kullanılmıştır.

Eğer NO konsantrasyonu denge değerinin çok altında ise 2.15 numaralı denklem şu şekilde değiştirilebilir;

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_1[N_2][O] \tag{2.25}$$

2.18 numaralı denklem, 2.25 numaralı denklemde yerine yazılırsa sonuçta;

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_1k_{e_O}[N_2][O_2]^{1/2} \tag{2.26}$$

N atomlarının konsantrasyonu çok düşüktür; bu nedenle, 2.13 numaralı denklemde N atomları için bir kararlı durum yaklaşımı yapılmıştır. Buna ek olarak, buji ateşlemeli motorlarda yüksek basınç ve sıcaklıklarda, hidrokarbon oksidasyon reaksiyonu çok hızlı şekilde tamamlanır ve O, $O_2$, OH ve H'in dengede olduklarını kabul etmek mantıklıdır (denklem 2.16 ve 2.17).

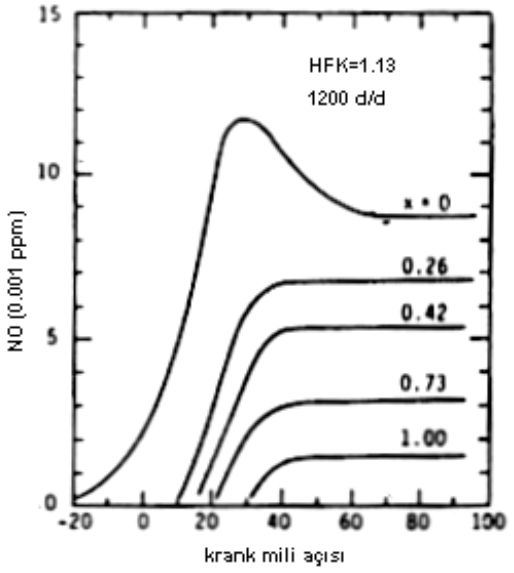
Spectral soğurma ölçümleri, NO oluşumunun öncelikle alev sonrası gazlarda oluştuğunu ve 2.9 ile 2.10 numaralı denklemlerle, oksijen ve azot atomlarının denge konsantrasyonları kullanılarak doğru sonuçlara ulaşıldığını göstermiştir.

Genişleme strokunda NO donar ve yanma odası içerisindeki NO konsantrasyonunda bir artış gözlenmez. Ayrıca NO oluşumu sıcaklık ve oksijene çok kuvvetli olarak bağımlıdır.

2.9 numaralı denklemin ileri yönlü aktivasyon enerjisi, denklem 2.10 ve 2.11 deki aktivasyon enerjilerinden yüksektir; bu nedenle, denklem 2.9'da ki ileri reaksiyonun karakteristik zamanları, her zaman hidrokarbon oksidasyon zamanını aşar. Bu nedenle termal NO oluşum işlemi ile hidrokarbon yanmasını birbirinden ayrı tutmak uygundur.

2.9 numaralı denklemin ileri yönlü reaksiyonunun sıcaklıkla yüksek derecede bağımlı olması, NO oluşumunu doğru hesaplamak için, sıcaklık artışlarını göz önüne almak gerektiği anlamına gelmektedir çünkü ilk yanan karışım, yanma devam ettiği için sıkıştırılmaya devam etmektedir. Son yanan karışım ise sadece yanmaya başlamadan önce, yanmamış karışım olarak sıkıştırılmaktadır. Yanma odasının farklı yerlerinde farklı sıcaklıkların olmasının NO oluşumuna etkileri yanmış gazları bölgelere ayırma işlemi ile hesaba katılabilmektedir; yanma sürecinde farklı zamanlarda yanan bu bölgelerin termodinamik ve denge kompozisyonları, silindir basıncı ve sıcaklığından hesaplanabilir. Böylece iki bölgeli termodinamik bir modelde, karışım yanmış ve yanmamış olarak iki bölgeye ayrılır; yanmış gazlar ise kendi içerisinde birkaç gruba ayrılarak, NO oluşumunu doğru hesaplamak amacıyla çeşitli parametrelerin zamana göre değişimi belirlenmektedir.

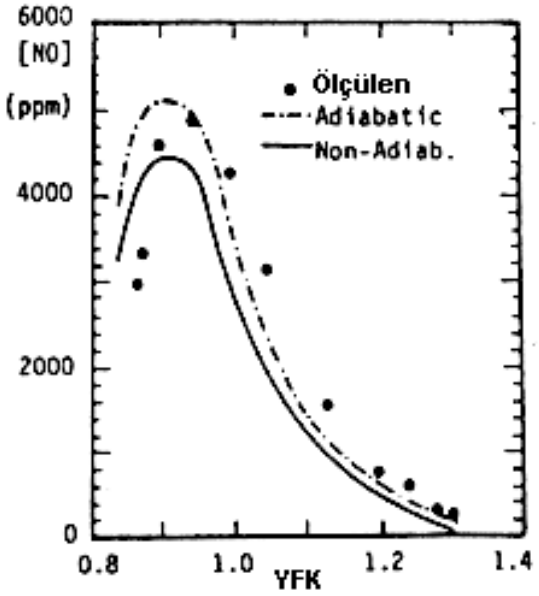
NO oluşumu kinetik olarak kontrol edilmektedir basınç ve sıcaklık artarken, değeri, yerel denge değerinin altında kalabilir. NO konsantrasyonu, ilk yanan bölgede, maksimum basınç ve sıcaklıkta denge düzeyinin üstüne çıkabilir ama geç yanan kısımlarda bu durum gözlenmez. Ayrıca, yanmış gazlar genişlerken, NO konsantrasyonunun donması için yeterince düşük sıcaklıklara düşülmeden önce bazı bozulmalar meydana gelmektedir.



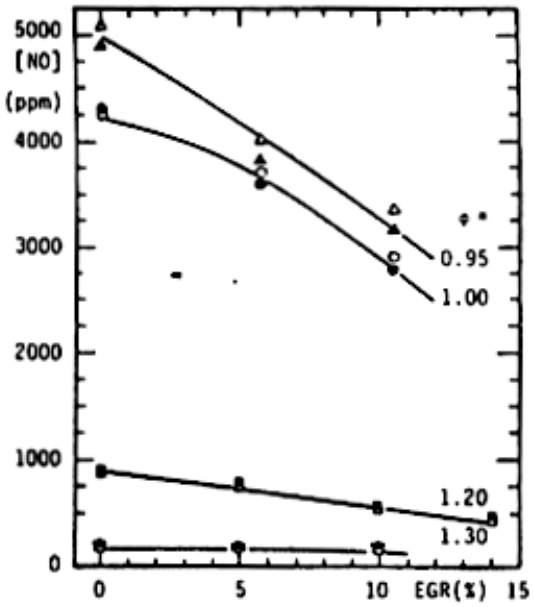

Şekil 2.10: Yanmış gazların farklı zamanlarda yanan beş bölgeye ayrıldığı modelde, krank mili açısının fonksiyonu olarak azot oksit konsantrasyonu. λ: 1.13, motor hızı 1200 d/d, tam gaz.

Sıcaklığı her yerde üniform kabul etmenin NO emisyonunu belirlemede yetersiz kaldığı gösterilmiştir. Şekil 2.10, farklı zamanlarda yanan beş bölgeden oluşan bir sistemde, yanmış gazlar içerisindeki NO konsantrasyonunu, krank mili açısının bir fonksiyonu olarak vermektedir. Şekil 2.11, NO konsantrasyonunun, fakir karışımlı

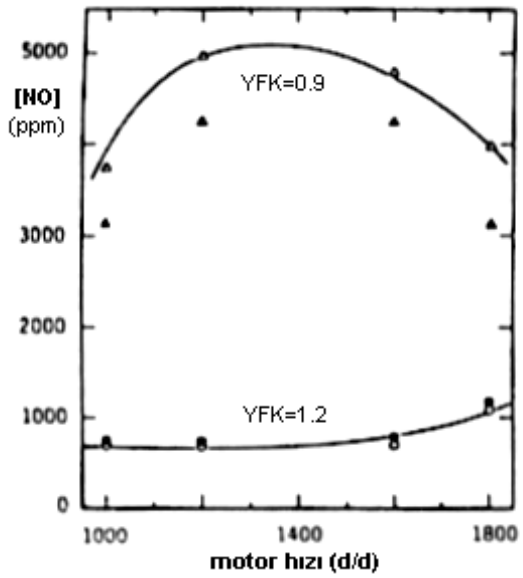
yanmada yaptığı zirveyi göstermektedir. Şekil 2.12, egzozdaki NO konsantrasyonunun fakir, stokiyometrik ve zengin karışımlarda EGR yüzdesi ile düştüğünü ancak zengin karışımlarda motor devir sayısı ile arttığını göstermektedir (Şekil 2.13).




Şekil 2.11: Adyabatik (noktalı çizgi) ve adyabatik olmayan (düz çizgi) modellerle tahmin edilen azot oksit konsantrasyonları.




Şekil 2.12: EGR miktarının ve yakıt fazlalık katsayısının fonksiyonu olarak egzoz NO konsantrasyonu. Φ: yakıt fazlalık katsayısı (0.95...1.3).




Şekil 2.13: Motor hızı ve yakıt fazlalık katsayısının fonksiyonu olarak azot oksit konsantrasyonu. Φ: yakıt fazlalık katsayısı (0.9...1.2).

2.21, 2.22 ve 2.23 numaralı denklemlerde görülen O, NO, N, $O_2$, H ve OH denge konsantrasyonları, yakıt fazlalık katsayısına, yanmış gaz oranına, basınca ve sıcaklığa bağımlıdır. Fakir ve stokiyometrik yanma için ana yanma ürünleri yanmamış yakıt, $H_2O$, $CO_2$, $O_2$ ve $N_2$ iken, zengin yanmada ana yanma ürünleri, yanmamış yakıt, $CO_2$, CO, $H_2$, $H_2O$, $O_2$, ve $N_2$'dir. Denge konsantrasyonları hesaplanırken bu durumda göz önünde bulundurulmalıdır.

Fakir karışımlarda NO, oluşum ile kontrol edilirken, zengin karışımlarda ayrışma ile kontrol edilmektedir. NO emisyonu ile yakıt ekonomisi arasında bir çatışma olduğu da gösterilmiştir. Emme manifolduna NO eklendiği zaman, bu modeller NO emisyonunu hesaplamakta yetersiz kalmaktadır. Stokiyometrik karışımda, maksimum sıcaklıkta NO denge konsantrasyonuna ulaşamamaktadır, bu durum NO oluşum mekanizmasında bir değişim olduğunu göstermektedir.

Fakir karışımlarda, maksimuma basınca ulaşıldığı andaki krank mili açısı değerinden sonra küçük miktarda NO parçalanır ve genişleme strokunda NO donar. Zengin karışımlarda maksimum basınç ve sıcaklıkta NO neredeyse denge değerine ulaşır ve genişleme strokundaki NO parçalanması önemlidir.

NO'nun oluşumunda ve parçalanmasında sıcaklık değişiminin önemli olduğu gösterilmiştir. Ayrıca yanma sırası, ve yanma anının da NO emisyonunun doğru tahmin edilmesinde belirleyici olduğu ortaya konmuştur.

NO oluşumu için kullanılan genişletilmiş Zeldovich mekanizması, başlıca NO emisyonunun alevin arkasında veya yanmış gazlarda oluştuğunu ortaya koymakta ve

hidrokarbon reaksiyonlarının bağıl olarak çok daha hızlı olması temeline dayanmaktadır. Deneysel ölçümler alev cephesinin önünde NO konsantrasyonunun sıfır olmadığını ve alev bölgesinde bir miktar NO oluştuğunu ortaya koymaktadır. Burada oluşan NO, prompt (hemen oluşan, hazır) NO olarak adlandırılmaktadır.

Alev cephesi önünde oluşan NO şu şekilde açıklanabilir;

$$HC + N_2 \leftrightarrow HCN + N \tag{2.27}$$

$$C_2 + N_2 \leftrightarrow 2CN \tag{2.28}$$

Burada üretilen N atomları Zeldovich mekanizması içerisinde NO oluşumuna neden olmaktadır. $O_2$ ve O saldırısı sonucunda CN'den de NO oluşumu ortaya çıkabilmektedir.

NO konsantrasyonu azot ve hidrokarbonlar ile yükselmektedir ve $C_2H_2$'nin bir molekülü, $CH_4$'ün bir molekülünden daha çok NO oluşmasına sebep olmaktadır. Hayhurst ve Vince'e göre NO oluşumunda aşağıdaki kimyasal reaksiyonlarda önem taşımaktadır;

$$HC + N_2 \leftrightarrow HCN + N \tag{2.29}$$

$$CH_2 + N_2 \leftrightarrow HCN + NH \tag{2.30}$$

Burada HCN, N ve NH, O ve $O_2$ ile yakılarak NO oluşturabilirler.

Çok bölgeli termodinamik modellerde, genişletilmiş Zeldovich mekanizması üzerindeki düzeltmelerle "prompt NO" miktarı hesaba katılabilmektedir. [4]

# 3. BU ÇALIŞMADA KULLANILAN MATEMATİKSEL MODEL

## 3.1 Türbülanslı Yanma Mekanizması

İçten Yanmalı Motorlarda (İYM) türbülanslı yanma olayının teorik olarak hassas hesaplanması enerji, kütle ve hareket miktarının korunumları ile kimyasal maddelerin konsantrasyon değişimlerini tanımlayan denklemlerin kullanıldığı çok boyutlu matematik modeller yardımıyla mümkündür. Karmaşık ve büyük moleküllü hidrokarbonlardan oluşan motor yakıtlarının yanması sırasında meydana gelen zincir reaksiyonların kinetik mekanizması ve türbülanslı ortamda gerçekleşen ısı ve kütle transferi olayları hakkındaki mevcut bilgilerimizin yetersizliği çok boyutlu etkin modellerin geliştirilmesini zorlaştırmaktadır. Öte yandan dünya otomobil pazarında mevcut olan yüksek rekabet, kullanılan motorların hızla gelişmesini ve yüksek performans, düşük emisyon değerleri sağlayacak yöntemlerin bulunmasını, yanma ve vuruntu da dahil olarak tüm silindir içi olayların fiziksel yapısını tanımlayabilen matematik modellerin oluşturulmasını gerektirmektedir. Bu konuda ünlü Rus bilim adamı N. N. Semyonov'un adını taşıyan Rusya Bilimler Akademisi Kimyasal Fizik Enstitüsü'nde (KFE) yapılmış olan birçok çalışma, içten yanmalı motorlarda türbülanslı yanma olayına açıklama getirmektedir. Bu çalışmaların en önemli sonuçlarından biri emme süresince yüksek hızda oluşan anizotropik türbülanslı gaz hareketinin kinetik enerjisi, piston üst ölü noktaya doğru giderken disipasyona uğrayıp yanma başlamadan önce izotropik hale dönüşmesidir. Dolayısıyla yanma odasının çeperlerinden 4-5 mm uzaklığa kadar yer alan her bir yerel hacimde yakıt hava karışımının (veya havanın) türbülans şiddeti ve türbülans ölçeği birbirine eşit olmaktadır. Son yıllarda lazer ve diğer teknolojilerin kullanıldığı hassas cihazların ve k-ε gibi türbülans modellerinin kullanıldığı üç boyutlu simülasyon tekniklerinin yardımıyla yapılmış olan çalışmalar Kimyasal Fizik Enstitüsü'nde alınmış olan sonuçlar ile uyuşmaktadır. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda, yanma modeli olarak, çok boyutlu modellerden daha sade yapıda olan ve daha düşük bilgisayar zamanı gerektiren, fakat fiziksel bakımdan prosesin gidişini ve çeşitli faktörlerin bu prosese etkilerini çok boyutlu modellerden geri kalmayacak ölçüde gerçek prosese yakın bir şekilde veren tek boyutlu modelin uygulanması büyük önem taşımaktadır.

Bu bölümde Kimyasal Fizik Enstitüsü'nde teklif edilmiş olan türbülanslı yanma mekanizması temelinde yapılmış olan, silindir içi proseslerin ve azot oksit oluşumunun tek boyutlu matematik modelinin özellikleri verilmiştir. [5]

### 3.2 Türbülanslı Yanma Mekanizması ile Silindir İçi Parametrelerin Hesabı

#### 3.2.1 Silindir İçi Basınç ve Sıcaklığının Hesaplanması

Sunulan matematik model ile dört zamanlı gerçek motor çevriminde, emme supabının kapandığı andan egzoz, supabının açıldığı ana kadar geçen süre içerisinde (sıkıştırma, yanma ve genişleme olayları) silindir içi basınç ve sıcaklığın hesabı yapılabilmektedir. Bu modelde kullanılan denklemler aşağıdaki gibidir:

Kapalı sistem için termodinamiğin I Kanunu;

$$dU = \xi_d \left(H_u - \Delta H_u\right) g dx - dQ_w - pdV \tag{3.1}$$

Burada;

dU :iç enerji değişimi,

$\xi_d$ :disosiyasyon kaybı nedeniyle kullanılan katsayı,

Hu :yakıtın alt ısıl değeri,

g :bir çevrimde kullanılan yakıt miktarı,

dx :dτ zamanında yanan yakıtın kütlesel oranı,

$dQ_w$ :dτ zamanında soğutmaya giden ısı,

dV :dτ zamanında silindir hacmi değişimi

İdeal gaz hal denklemi;

$$pV = GRT \tag{3.2}$$

Burada;

p, T :iş gazının basıncı ve sıcaklığı,

G, R :iş gazının kütlesi ve gaz sabiti

Silindir hacmi;

$$V = \frac{V_h}{\varepsilon - 1}\left\{1 + \frac{\varepsilon - 1}{2}\left[\left(1 + \frac{1}{\lambda_b}\right) - \left(\cos\alpha + \frac{1}{\lambda_b}\sqrt{1 - \lambda_b^2 \sin^2\alpha}\right)\right]\right\} \tag{3.3}$$

$V_h$ :silindirin strok hacmi,

$\varepsilon$ :sıkıştırma oranı,

$\lambda_b$ :krank mili yarıçapının biyel uzunluğuna oranı,

$\alpha$ :krank mili dönme açısıdır.

Soğutmaya giden ısı Newton-Riehman denklemi ile hesaplanır;

$$dQ_w = \alpha_\Sigma (T - T_w) A d\tau \tag{3.4}$$

Burada;

A :yanma odası yüzeylerinin toplam alanı,

T .yanma odası yüzeylerinin ortalama sıcaklığı,

$\alpha_\Sigma$ :yanma odası yüzeylerinin toplam ısı transferi katsayısı,

n :krank mili devir sayısı,

$d\alpha$ :krank mili dönme açısının $d\tau$ zamanında değişimi

Toplam ısı transferi katsayısı Voschni denklemin-den bulunabilir;

$$\alpha_\Sigma = 819.5 \left(p_x 10^{-3}\right)^{0.8} W_{ig}^{0.8} D^{-0.2} T^{-0.53} \tag{3.5}$$

$p_x$ :yanmasız gerçekleşen motor çevriminde iş gazının basıncı,

$W_{ig}$ :motor çevriminin çeşitli zamanlarında iş gazının hareket hızı,

D :silindir çapıdır.

İş gazının hareket hızı sıkıştırma zamanında aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$W_{ig} = 2.28 V_{p.ort} \tag{3.6}$$

genişleme zamanında ise;

$$W_{ig} = 2.28 V_{p.ort} + 3.24 \cdot 10^{-3} \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \frac{T_a}{p_a} (p - p_x) \tag{3.7}$$

$V_{p.ort}$ :pistonun ortalama hareket hızı,

$p_a$ :sıkıştırma başlangıcındaki basınç,

$T_a$ :sıkıştırma başlangıcındaki sıcaklıktır. [5]

### 3.2.2 Yanma Sürecinin Hesaplanması

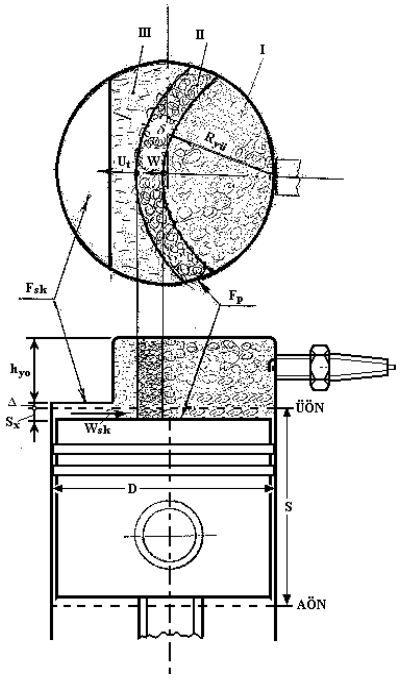
Daha önce belirtildiği gibi, yanma parametreleri Kimyasal Fizik Enstitüsü'nde Karpov tarafından tanımlanmış olan türbülanslı yanma modeline dayanarak

hesaplanmaktadır. Bu modele göre yanma sırasında silindir hacmi üç bölgeye ayrılmaktadır (Şekil 3.1):

I.Yanma ürünleri bölgesi

II. Alev bölgesi

III.Yanmamış yakıt – hava karışımı bölgesi




Şekil 3.1: Türbülanslı yanma mekanizmasında bölgeler.

Bilindiği gibi, bujide kıvılcım çaktığı anda ilk alev cephesi patlama şeklinde oluşmaktadır. Fakat belirli bir süre basınçta, yanmasız sıkıştırma basıncına göre bir artış görülmemektedir. Çünkü tutuşma gecikmesi süresi olarak tanımlanan bu sürede yanan yakıt miktarı çok az olup, toplam yakıt miktarının % 1'i kadardır. Bu süre aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\alpha_i = \frac{Cl\left(U_n \varepsilon_c / U'_\Sigma\right)^\beta}{U_n \varepsilon_c} 6n \qquad (3.8)$$

C ve β :sabitler;

$U'_\Sigma$ :türbülans şiddetinin geometrik ortalama değeri,

l :türbülans ölçeği,

$U_n$ :laminar yanma hızı,

$\varepsilon_c$ :yanma ürünlerinin genişleme oranıdır.

Tutuşma gecikmesi sona erdikten sonra türbülanslı alev cephesi $U_t$ hızı ile ilerlerken, yanma ürünlerinin $R_{y.ü.}$ yarıçaplı küresel yüzeyi ise W hızı ile hareket eder (Şekil 3.1). Sunulan türbülanslı yanma modeli, mevcut modellerden farklı olarak, yanma prosesinin kimyasal ve fiziksel özelliklerine dayanarak, yanma ürünleri hacminin genişleme hızını, dolayısıyla yanma ürünlerinin, yanma odasında oluşturacağı hacim değişimini göz önüne almaktadır. Yanma ürünlerinin hacim değişimi yanma odasındaki basınç değişimi ile lineer orantılı olduğundan, indike parametrelerin bu modelle hesaplanması daha kesin sonuçlara ulaşmayı sağlamaktadır. Bu modelin bir başka önemli özelliği de yanma ürünleri hacmi hesaba katıldığı için, çok boyutlu modellerde olduğu gibi, yanma odası geometrisinin etkilerinin de incelenebilmesine olanak vermesidir.

Yanma ürünlerinin küresel yüzeyinin ilerleme hızı veya yanma ürünleri hacminin artış hızı aşağıdaki ifade ile bulunabilir:

$$W = U_n + \frac{4}{3} \cdot K_p U'_\Sigma - \frac{0.17 \cdot 10^{-3} \left(U'_\Sigma\right)^2}{\aleph \sqrt{\varepsilon_t}} \tag{3.9}$$

$K_p$ :korelasyon katsayısı,

$\chi$ :yakıt–hava karışımının ısıl yayınım katsayısı,

$\varepsilon_t$ :türbülanslı alev içinde yanmış ürünlerin genişleme oranıdır.

3.9 numaralı denklemde ki negatif işaretli üçüncü terim, yanma hızının türbülans şiddetine bağlı olarak lineer orantılı değişmediğini göstermektedir, dolayısıyla türbülans şiddetinin belli bir değerden fazla olması, yanma prosesini hızlandırmak yerine yavaşlamasına neden olacaktır. Karpov'a göre bu olay $U'_\Sigma \geq 10$ m/s olduğunda gerçekleşmektedir.

3.9 numaralı denklemde yer alan normal yanma hızı hesaplanırken, yakıt hava karışımının kimyasal özelliğinin etkisi de dikkate alınmaktadır. Hidrokarbon bileşimlerinden oluşan motor yakıtlarının normal yanma hızının, ortamın basınç ve sıcaklığına bağlı olarak belli bir değere sahip olduğu bilinmektedir. Yapılan deneyler, normal yanma hızına, artık gazlarında etki ettiğini ortaya koymuş ve hesaplamalar için aşağıdaki ampirik formül tavsiye edilmiştir;

$$U_n = U_{n_0} \left(T_{kar} / T_0\right)^m \left(p / p_0\right)^n - 0.076 \left(100 \gamma_r\right)^{0.73} \tag{3.10}$$

$U_{n_0}$ :normal atmosfer koşullarında laminar yanma hızı,

$T_{kar}$ :yanmamış yakıt-hava karışımının sıcaklığı,

$\gamma_r$ :artık gaz katsayısıdır.

Yanma süresince basınç artışı veya düşüşü, alev cephesinin karşısındaki yanmamış yakıt hava karışımını adyabatik olarak sıkıştırarak yada genişleterek yerel sıcaklıklarını değiştirmektedir. Bu olay göz önüne alınarak yanmamış karışımın sıcaklığı aşağıdaki bağıntıdan hesaplanabilir;

$$T_{kar} = T_c \left(p / p_c\right)^{k_k - 1/k_k} \tag{3.11}$$

$T_c$ :iş karışımının yanmadan önceki sıcaklığı,

$p_c$ :iş karışımının yanmadan önceki basıncı,

$k_k$ :iş karışımının $T_{kar}$ sıcaklığındaki adyabatik üssüdür.

Yanmış ürünlerin genişleme oranının ani değeri ise;

$$\varepsilon_t = 1 + (\varepsilon_{max} - 1)(1 - y) \tag{3.12}$$

denkleminden bulunabilir.

y :yanma ürünleri hacminin silindir hacmine oranı,

$\varepsilon_{max}$ :genişleme oranının maksimum değeridir.

Benzin motorlarında yanma hızı yüksek olduğundan adyabatik alev sıcaklığı yanma süresince, otto teorik çevriminde olduğu gibi yanma odası hacminin sabit kalması şartına ve termodinamiğin 1. kanununa dayanarak çok küçük hata ile hesaplanabilir:

$$\frac{\xi_d \left(H_u - \Delta H_u\right)}{(1 + \lambda l L_0)(1 + \gamma_r)} + \left(mc_v\right)_{t_0}^{t_{kar}} \left(T_{kar} - 273\right) = \mu \left(mc_v\right)_{t_0}^{t_{kar}} T_{ad} \tag{3.13}$$

$\left(mc'_v\right)_{t_0}^{t_{kar}}$ :iş karışımının $T_{kar}$ sıcaklığında moleküler özgül ısısı,

$\left(mc''_v\right)_{t_0}^{t_{ad}}$ :yanma ürünlerinin $T_{ad}$ sıcaklığında moleküler özgül ısısı,

$L_0$ :1 kg yakıtın tam yanması için gerekli minimum hava miktarı,

$\lambda$ :yakıt hava karışımının hava fazlalık katsayısı,

$m_y$ :yakıtın mol kütlesi.

3.9 denkleminde kullanılan korelasyon katsayısı;

$$K_p = \sqrt{(U_n \cdot l / \aleph)} / 11(1 + \sqrt{\varepsilon_{max}}) \tag{3.14}$$

ısıl yayınım katsayısı ise;

$$\aleph = \lambda_1 / c_p \cdot \rho \tag{3.15}$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

$\lambda_1$ :karışımın ısı iletim katsayısıdır,

$c_p$ :karışımın sabit basınçta özgül ısısı,

$\rho$ :yakıt hava karışımının yoğunluğudur.

Karışımın yoğunluğu ve ısı iletim katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$\rho = \frac{p}{R_h . T_{kar}} \tag{3.16}$$

$R_h$ :havanın gaz sabitidir.

$$\lambda_1 = \left[24.3 + 0.178\left(T_{kar} - 273\right)^{0.835}\right] \cdot 10^{-9} \tag{3.17}$$

Türbülans ölçeğinin basınca bağlı olarak değişimi;

$$l = l_0 \left(p/p_0\right)^{-0.4} \tag{3.18}$$

$l_0$ :normal atmosfer şartlarında türbülans ölçeğinin entegral değeridir.

3.9 denkleminin çözümünde motorun tüm çalışma rejimlerine bağlı olarak türbülans şiddetinin doğru olarak değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. İlk bakışta türbülans şiddetinin gerçek değerini bulmak için çok boyutlu modellerden yararlanmak gerektiği düşünülebilir. Fakat daha önceden de belirtildiği gibi, silindir içindeki türbülans şiddeti ateşleme anında izotropik hale dönüşür. Böylece çok boyutlu olay sanki tek boyutlu olaya dönüşmüş olur. Teorik ve deneysel olarak yapılmış çok sayıda çalışmada türbülans şiddetinin, motorun dönme hızı ve volumetrik verimi ile lineer orantılı olarak değiştiği açıklanmış ve aşağıdaki ampirik ifade tavsiye edilmiştir;

$$U_{\Sigma}^{'} = 0.08 \cdot \left(2.6 + 0.18Sn\right) \cdot \eta_v / \eta_{vmax} \tag{3.19}$$

$\eta_v$, $\eta_{vmax}$ :volumetrik verimin kısmi ve maksimum yüklerdeki değerleridir.

Yanmış ürünlerin ilerleme hızı belli olursa alev cephesinin ilerleme hızı aşağıdaki ampirik formülle hesaplanabilir;

$$U_t = W\left[1 + 0.065\sqrt{\frac{U_n l}{\chi}}\left(\frac{U_{\Sigma}'}{U_n}\right)^{0.30\div0.33}\right] \tag{3.20}$$

Alev bölgesinin boyutu ise belli bir $\Delta\tau$ zamanı aralığında;

$$\delta = \left(U_t - W\right) \cdot \Delta\tau \tag{3.21}$$

denklemi ile hesaplanabilir. Türbülanslı yanma hızı bulunduktan sonra $d\tau$ zamanında yanma ürünleri küresel hacminin yarıçapı değişimi;

$$dR_{y.ü.} = W\varepsilon_t \frac{d\alpha}{6n} \tag{3.22}$$

$R_{yü}$'nün entegral boyutu ise;

$$R_{yü} = \frac{1}{6n} \int_{\alpha_0}^{\alpha} W\varepsilon_t d\alpha \tag{3.23}$$

yanma ürünleri hacminin silindir hacmine oranı ise;

$$y = V_{yü}/V \tag{3.24}$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Yanma odası Şekil 3.1'de gösterildiği gibi bir geometrik forma sahip olursa, yanma ürünleri hacmi; $V_{y.ü.}$, kesiti $R_{y.ü}$ yarıçapına göre değişen bir daire parçası; ($A_{y.ü.}=f(R_{y.ü.})$), yüksekliği ise piston strokuna bağlı olarak değişen ($S_x = f(\alpha)$) bir silindirin hacmi gibi hesaplanabilir;

$$V_{y.ü.} = A_{y.ü.}\left(h_{yo} + \Delta + S_x\right) \tag{3.25}$$

Yanmamış karışımın hacmi ve kütlesi ise;

$$V_{kar} = V - V_{y.ü.} \tag{3.26}$$

$$G_{kar} = V_{kar}\rho_{kar} \tag{3.27}$$

denklemleriyle hesaplanır.

$\rho_{kar}$ :yanmamış karışımın yoğunluğudur.

Bu durumda yanmış ürünlerin kütlesi;

$$G_{y.ü.} = G_0 - G_{kar} \tag{3.28}$$

olacaktır.

$G_0$ :yanmadan önce silindir içinde yer alan iş gazının kütlesidir.

Yanmış gazların kütlesel oranının değişimi veya "yanma kanunu" aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$x = \frac{G_{y.ü.}}{G_0} = 1 - \frac{G_{kar}}{G_0} \tag{3.29}$$

Teorik olarak yanma sona erdiğinde $G_{kar}=0$ ve x=1 olur. Fakat çok fakir karışımlar kullanıldığında yanma hızı düşük olduğu için yanma ürünleri hacminin artış hızı, pistonun alt ölü noktaya doğru hareketi nedeniyle silindir hacminin artış hızından düşük olabilir. Bu nedenle hesaplamayı ($x_{j+1}$-$x_j$) ifadesi negatif değer kazandığında durdurmak gerekir. Bu durumda x'in 1'den ne kadar farklı olduğunu inceleyerek yanma olayının tam olup olmadığını açıklamak mümkündür. [5]

### 3.2.3 Vuruntu Hesabı

Benzinli motorlarda yanma sürecinin normal hızla seyredip etmemesinin, yakıtın oktan sayısına bağlı olduğu bilinen bir durumdur. Eğer benzinin oktan sayısı mevcut sıkıştırma oranı veya ateşleme avansı ile uyuşmaz ise vuruntu meydana gelir, yanma sürecinin normal gidişi bozulur ve hesaplama sonuçları gerçek ile bağdaşmaz. Buna göre yanma sürecinin yukarıda sözü edilen yöntemle hesaplanmasına paralel olarak vuruntunun oluşup oluşmadığını göz önüne alabilecek bir hesap yönteminden de yararlanmakta fayda vardır.

Vuruntu olayının oluşumu, oktan sayısı 80 ile 100 arasında değişen benzin yakıtları için geçerli olan Daut-Eyze kriteri yardımıyla açıklanır:

$$J = \frac{1}{Da}\left(\frac{OS}{100}\right)^{-3.4107}(10.2p)^{1.7}\exp(-Eg/T_{kar})\frac{d\alpha}{6n} \tag{3.30}$$

Burada, Da = 30.75 ve Eg = 4200 olmak üzere ampirik yolla açıklanmış sabitlerdir. Yanma başladığı anda hesaplamaya dahil edilen 3.30 denklemi, yanma sona erene kadar J<1 sonucunu verirse, yanmanın vuruntu gerçekleşmeden sona erdiği söylenebilir. Eğer yanma sırasında herhangi bir anda J = 1 olursa ve bu anda yakıt hava karışımının % 80'in den azı yanmışsa çok şiddetli vuruntu olduğu, % 80'in den fazlası yanmış ise düşük şiddetli vuruntu olduğu söylenebilir. [5]

### 3.2.4. İndike ve Efektif Parametrelerin Hesabı

Silindir içi parametreleri hesaplamak için gerekli olan veriler şunlardır:

a) Yakıtın kimyasal bileşimi ve oktan sayısı,

b) Motorun ana boyutları, silindir sayısı, sıkıştırma oranı ve yanma odasının geometrik şekli;

c) Motorun çalışma parametreleri (devir sayısı, hava fazlalık katsayısı, yük, vb. ).

Bu parametreler kullanılarak, 3.1 numaralı diferansiyel denklem sonlu farklar yöntemiyle çözülür. Şu halde silindir içi ortalama sıcaklık;

$$T_{j+1} = T_j + \left\{ \frac{1}{G(c_v)_0^T} \left[ \xi_d \left(H_u - \Delta H_u\right) \cdot g \cdot \Delta x - \alpha_\Sigma (T - T_w) A \frac{\Delta\alpha}{6n} - p \cdot \Delta V \right] \right\}_{j+i-\frac{1}{2}} \quad (3.31)$$

ve 3.2 numaralı denklem kullanılarak basınç;

$$p_{j+i} = \frac{GR_{j+i} T_{j+i}}{V_{j+i}} \quad (3.32)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada $i = 1/2,\ 1$; küme parantezinin indisi $j + i - 1/2$, tüm değişen parametrelerin $j$ veya $j + 1/2$ adımında, sonlu farkların ise $(\alpha_{j,}\ \alpha_{j+1/2})$ veya $(\alpha_{j,}\ \alpha_{j+1})$ bölgesinde hesaplandığını göstermektedir.

İndike parametreler ise aşağıdaki formüllerle hesaplanabilir;

İndike işin anlık değeri:

$$W_{j+1} = W_j + \frac{(p_{j+1} + p_j) \cdot (V_{j+1} - V_j)}{2}, \quad (3.33)$$

gerçek değeri;

$$W_i = \oint p dV = \Sigma \frac{1}{2} (p_{j+1} + p_j)(V_{j+1} - V_j) \quad (3.34)$$

ortalama indike basınç, pompalama kayıpları göz önüne alınmadığında;

$$p_i = \frac{W_i}{V_h} \quad (3.35)$$

pompalama kayıpları göz önüne alındığında;

$$p_i = \frac{W_i}{V_h} - (p_r - p_a) \quad (3.36)$$

$p_r$ :egzoz sonu basıncı,

$p_a$ :emme sonu basıncıdır.

İndike güç (4 zamanlı motor);

$$N_i = \frac{p_i \cdot V_h \cdot i \cdot n}{120} \tag{3.37}$$

İndike verim;

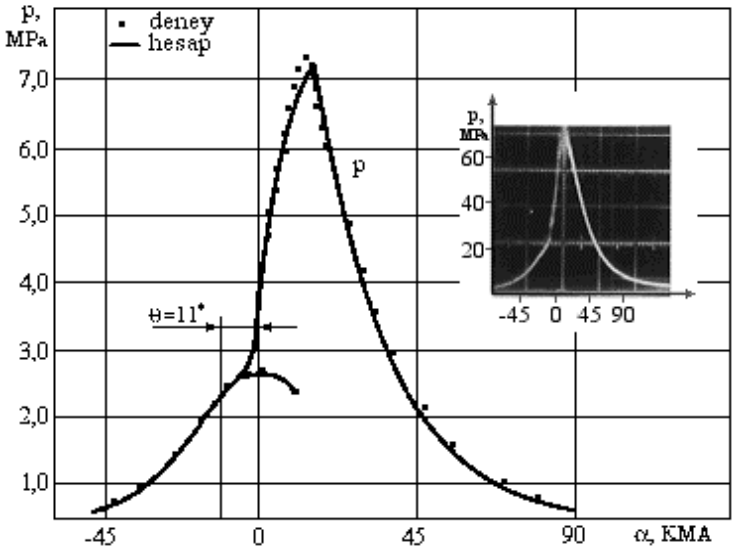
$$\eta_i = \frac{p_i \cdot l_0 \cdot \lambda}{H_u \cdot \rho_0 \cdot \eta_v} \tag{3.38}$$

Özgül indike yakıt tüketimi;

$$b_i = \frac{3600}{H_u \cdot \eta_i} \tag{3.39}$$

### 3.2.5 Modelin Deney Sonuçlarıyla Karşılaştırılması

Şekil 3.2'de silindir çapı ve stroku 92 mm olan tek silindirli deney motorunun, sunulan türbülanslı yanma modelinin yardımıyla hesaplanmış indikatör diyagramı verilmiştir. Bu diyagramın üzerinde noktalar deney verilerini ifade etmektedir. Ayrıca diyagramın osiloskop ekranında çekilmiş fotoğrafı da verilmiştir.




Şekil 3.2: Hesaplama sonucu elde edilen değerlerin, deneysel sonuçlarla karşılaştırılması. Sıkıştırma oranı 11.6, motor devir sayısı 2000 d/d, hava fazlalık katsayısı 1.2, volumetrik verim 0.818. [5]

Tablo 1'de bu diyagramlardan elde edilmiş bazı parametreler ve hesaplamanın hassaslık oranı verilmiştir. Bu bilgilerden ve diğer bir çok deney sonuçlarının karşılaştırmasından anlaşılmaktadır ki, sunulan hesap yöntemi yeterli hassasiyetle silindir içi parametrelerin açıklanmasına imkan vermektedir. [5]

Tablo 3.1: Model sonuçlarının deney verileriyle karşılaştırılması. [5]

| Parametreler | Pi (MPa) | $\eta_i$ | pmax (MPa) | $\alpha_z$ (°kma) |
|---|---|---|---|---|
| Hesaplanan sonuçlar | 0.921 | 0.396 | 7.17 | 21 |
| Deney sonuçları | 0.917 | 0.385 | 7.28 | 20 |
| Farklılık (%) | 0.320 | 2.770 | 1.50 | 4.76 |

## 3.3 Model Üzerinde Yapılan Çalışmalar

Sunulan matematik modelde özellikleri aşağıda verilen 4 silindirli, 4 zamanlı tofaş motoru kullanılmıştır. Bu çalışmanın amacı, motorun en uygun çalışma noktasının belirlenmesi ve optimum sıkıştırma oranının test edilmesidir.

Silindir çapı/stroku: 86.4/67.4 mm

Sıkıştırma oranı: 9.2 +0.1/-0.2

Biyel boyu: 128.5 +/-0.05 mm

### 3.3.1 Optimum Çalışma Noktasının Belirlenmesi

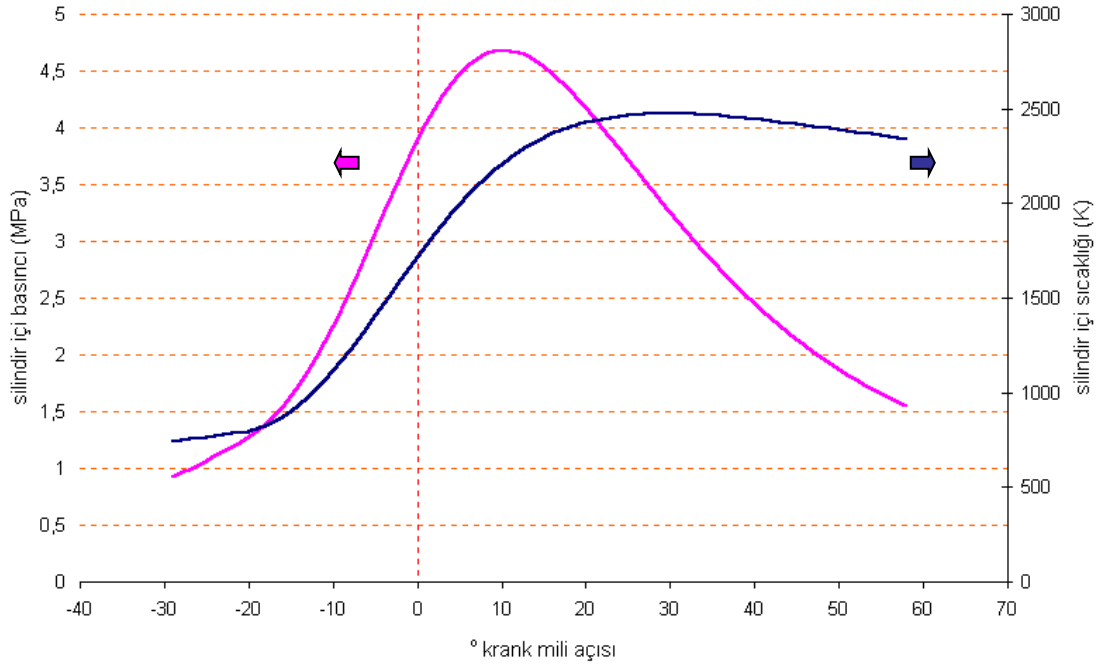
Optimum çalışma noktası belirlenirken ortalama indike basınç ve özgül yakıt tüketimi parametreleri kullanılmıştır. Bu amaçla motorun dakikadaki dönme sayısı, 1500 devirden 5000 devire kadar 100'er devir artırılarak, en uygun ateşleme avansıyla ulaşılan en yüksek indike basınç ve en düşük özgül yakıt tüketimi değerleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Bu çalışma sonucunda, ortalama indike basıncın en yüksek değeri olan 1.306 MPa'a ve özgül yakıt tüketiminin en düşük değeri olan 184.02 g/kW-h değerine, 4800 d/d'da, 30° kma ateşleme avansıyla ulaşılmıştır.

Ayrıca bu çalışma noktasında elde edilen silindir içi basınç ve sıcaklık eğrileri Şekil 3.3'te verilmiştir.

Şekil 3.3'ten de görülebileceği gibi, bu çalışma şartında silindir basıncının en yüksek noktası olan 4.681 MPa değerine üst ölü noktadan 10° kma sonra erişilmiştir. Silindir içi ortalama sıcaklığının en yüksek değeri olan 2476.5 K değerine ise üst ölü noktadan 30° kma sonra ulaşılmıştır. Yanma işlemi toplam 98° kma sürmüş, maksimum basınca ulaşıldığı ana kadar yakıtın % 50.4'ü yanmış, maksimum

sıcaklığa ulaşıldığında ise yanmış yakıt oranı % 80 olmuştur ve vuruntu gözlenmemiştir.

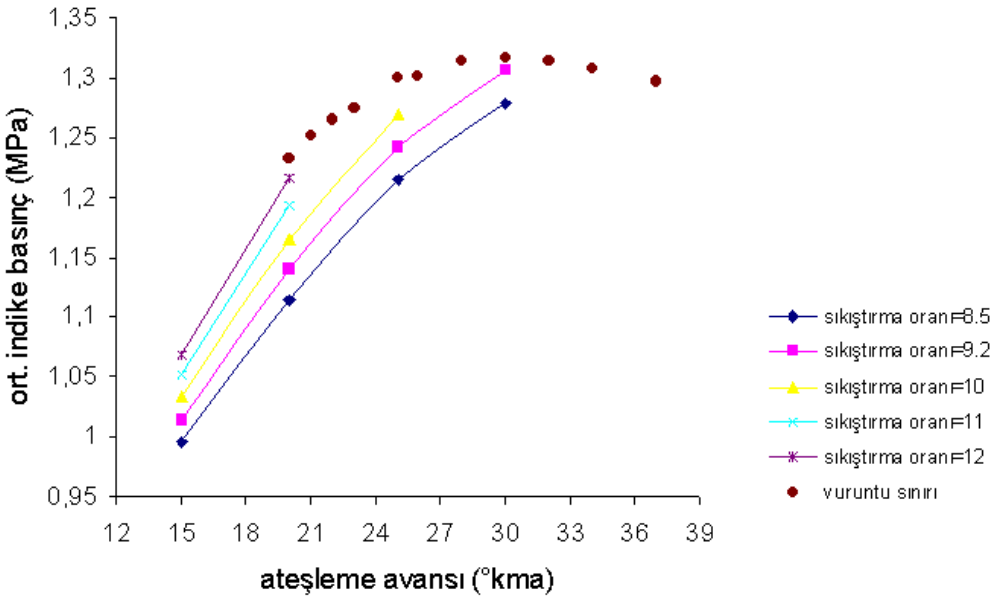



Şekil 3.3: Yanma sırasında silindir içi basınç ve sıcaklık eğrilerinin değişimi. sıkıştırma oranı 9.2, motor hızı 4800 d/d, hava fazlalık katsayısı 1.0, tam yük, ateşleme avansı 30° kma, yakıt oktan sayısı 85.6.

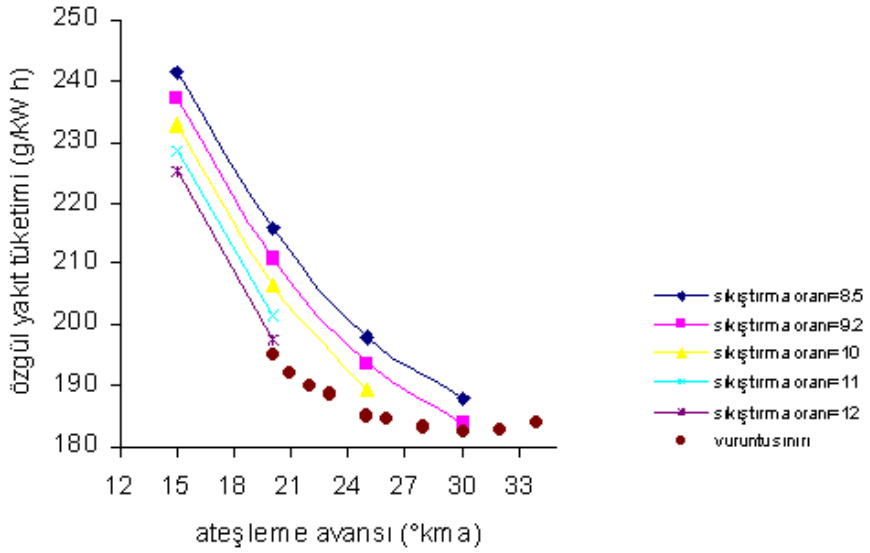
### 3.3.2 Optimum Sıkıştırma Oranının Belirlenmesi

Motorun en uygun çalışma şartları belirlendikten sonra uygulanan adım sıkıştırma oranının ideal olup olmadığının belirlenmesidir. Bu işlem sırasında motor 4800 d/d'da çalıştırılırken, ateşleme avansı ve sıkıştırma oranı değiştirilerek, hangi sıkıştırma oranında en yüksek ortalama indike basınç ve en düşük özgül yakıt tüketimi değerlerine ulaşıldığı belirlenmeye çalışılmıştır.

Şekil 3.4'te düz çizgiler her bir sıkıştırma oranında, farklı ateşleme avansıyla ulaşılabilen ortalama indike basınç değerlerini gösterirken, noktalardan oluşan eğri vuruntu sınırını göstermektedir. Grafikten de görülebileceği gibi, sıkıştırma oranı arttıkça vuruntu eğilimi artmakta ancak ateşleme avansı düşürülerek vuruntu bölgesine girmekten kaçılabilmektedir. Noktalardan oluşan vuruntu sınırının en yüksek değerini, ateşleme avansının 30° kma değeri için aldığı şekilden okunabilmektedir. Diğerleri bu ateşleme avansında vuruntu sınırına girdiği için 30° kma ile en yüksek basınca ulaşmak için kullanılabilecek sıkıştırma oranları 8:1 ve 9.2:1'dir. 8:1 sıkıştırma oranı kullanıldığında, indike basınç daha düşük olduğundan 9.2:1 sıkıştırma oranı en uygun olanıdır.




Şekil 3.4: Sıkıştırma oranı ve ateşleme avansına göre ortalama indike basıncın değişimi. Hava fazlalık katsayısı 1.0, motor hızı 4800 d/d, tam yük, yakıt oktan sayısı 85.6.




Şekil 3.5: Sıkıştırma oranı ve ateşleme avansına göre özgül yakıt tüketimi değişimi. Hava fazlalık katsayısı 1.0, motor hızı 4800 d/d, tam yük, yakıt oktan sayısı 85.6.

Şekil 3.5'te düz çizgiler her bir sıkıştırma oranında, farklı ateşleme avansıyla ulaşılabilen özgül yakıt tüketimi değerlerini gösterirken, noktalardan oluşan eğri vuruntu sınırını göstermektedir. Burada da sıkıştırma oranının 9.2:1 değeri için en düşük özgül yakıt tüketimi değerine ulaşıldığı görülmektedir. O halde ele alınan bu iki kritere göre motor sıkıştırma oranının en uygun değeri 9.2:1'dir.

# 4. AZOT OKSİT MODELİ ve ÜZERİNDE YAPILAN ÇALIŞMALAR

## 4.1 Azot Oksit Modeli

Türbülanslı yanma mekanizması kullanılarak, silindir içi parametrelerinin belirlendiği ana programa ek olarak, azot oksit emisyonlarının belirlenmesinde üç basamaklı genişletilmiş Zeldovich mekanizması kullanılmıştır. Üç basamaklı genişletilmiş Zeldovich mekanizması denklem 2.3, 2.4 ve 2.5'te verilmiştir. Bu denklemler Bölüm 2.3'te anlatıldığı şekilde düzenlenirse aşağıdaki diferansiyel denklem elde edilir [5];

$$\frac{dM_{NO}}{d\alpha} = \frac{2\times(1-\beta^2)}{6\times n}\times\left[\frac{R_1}{\frac{\beta\times R_1}{(R_2+R_3)}+1}+R_4\right] \tag{4.1}$$

β :gerçek azot oksit miktarının denge miktarına oranı olmak üzere, 4.1 denkleminde ki reaksiyon hızları aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır;

$$R_1 = K_1'[NO]\cdot[N] \tag{4.2}$$

$$R_2 = K_2[O_2]\cdot[N] \tag{4.3}$$

$$R_3 = K_3[N]\cdot[OH] \tag{4.4}$$

4.2, 4.3 ve 4.4 numaralı denklemlerde ki köşeli parantezli ifadeler ürünlerin denge konsantrasyonlarını, alt indisli K terimleri ise reaksiyon hız sabitlerini ifade etmektedir ve değerleri aşağıdaki gibidir;

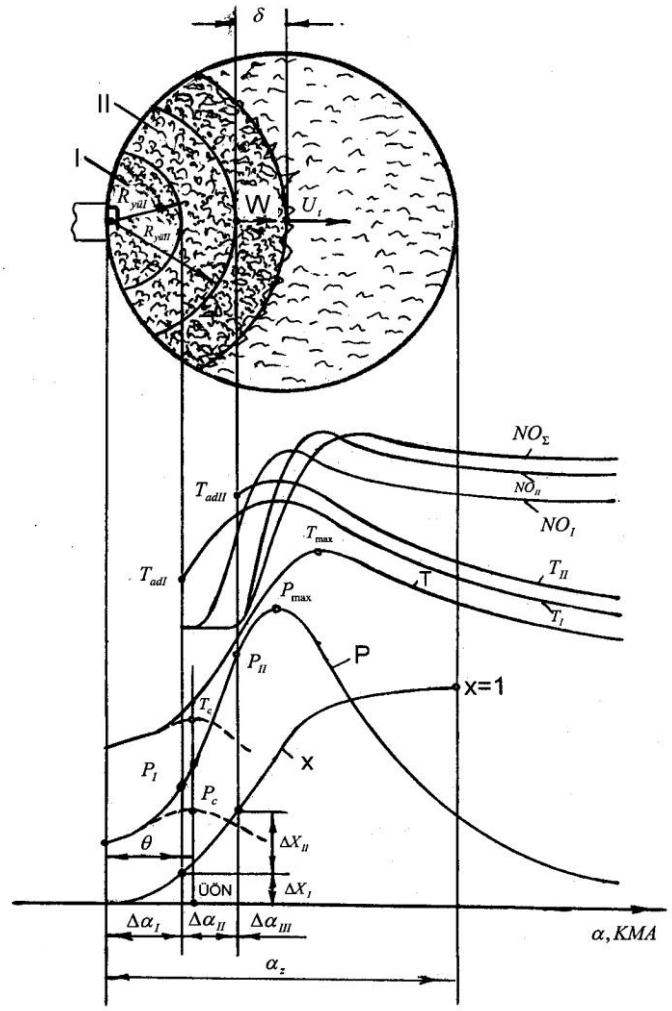
$$K_1' = 3.1\cdot10^{13}\cdot\exp(160/T) \tag{4.5}$$

$$K_2 = 6.4\cdot10^{9}\cdot T_{yerel}\cdot\exp(-3125/T) \tag{4.6}$$

$$K_3 = 4.2\cdot10^{13} \tag{4.7}$$

4.5 denkleminde reaksiyon hız sabiti üzerindeki üs işareti ters yönlü reaksiyonun kullanılması buna paralel olarak ters reaksiyon sabitinin kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Burada T ile gösterilen sıcaklıklar daha önce Bölüm 2.3'te

açıklandığı gibi yanma ürünlerinin, farklı bölgelerdeki yerel sıcaklıklarını ifade etmektedir. Yanma sonucu oluşan gazların farklı bölgelerinde farklı sıcaklılar olması ve azot oksit oluşumunun sıcaklıkla çok fazla değişmesi nedeniyle bu şekilde bir bölme işlemine ihtiyaç duyulmaktadır.




Şekil 4.1: Azot oksit oluşumu sırasında parametrelerin değişimi.

Reaksiyon hızlarının hesaplanması aşamasında, denge konsantrasyonlarının kullanılmasının nedeni ise hidrokarbon oksidasyon reaksiyonlarının, azot oksit oluşum reaksiyonlarına göre en az 100 kat daha hızlı olmasıdır. Dolayısıyla azot oksit oluşumu, esas yanma reaksiyonları sona erdikten ve yanma ürünleri denge konsantrasyonlarına ulaştıktan sonra başlamaktadır. Bu koşullara göre yanma ürünlerinin denge haline gelmesi için gerekli süre, krank mili açısı cinsinden şu şekilde ifade edilebilmektedir;

$$\Delta\alpha_d = 6n \cdot \Delta\tau_d \qquad (4.8)$$

Şekil 4.1'de yanma sürecinde azot oksit emisyonunun hesabı iki bölge için gösterilmiştir. Birinci hesaplama bölgesindeki ürünlerin dengeye ulaşma süresi $\Delta\alpha_I$, ikinci hesaplama bölgesinde ise $\Delta\alpha_{II}$ olmuştur. Bu süreler boyunca birinci bölgede $\Delta x_I$, ikinci bölgede ise $\Delta x_{II}$ kadar yakıt yanmış ve uygun olarak basıncı $p_I$ ve $p_{II}$'ye, adyabatik alev sıcaklığı $T_{adI}$ ve $T_{adII}$'ye , yerel sıcaklıkları ise $T_I$ ve $T_{II}$'ye kadar artırmıştır. Azot oksit oluşumu hesaplama işlemi birinci bölgede $\Delta\alpha_I$, ikinci bölgede ise $\Delta\alpha_{II}$ kadar zaman geçtikten sonra başlamıştır. Azot oksit oluşum hesabı bu şekilde x=1'e kadar devam ettirilmelidir.

Söz konusu olan türbülanslı yanma modeli, yanma ürünlerinin denge konsantrasyonlarına ulaşma zamanlarının hesaplanmasına da imkan vermektedir. Şekil 4.1'de gösterildiği gibi W hızıyla ilerleyen yanma ürünleri, kalınlığı $\delta$ olan alev bölgesini kapladıktan sonra buradaki gazlar ısı enerjisini tam olarak sıcaklık ve basınç artışına sarf ederek denge haline gelir ve yanma reaksiyonları sona erer. Buna göre yanma ürünlerinin $\delta$ yolunu gitmesi için tükettiği zaman farkını bu bölge gazlarının denge haline gelmesi gereken zaman farkına eşit olarak kabul etmek mümkündür;

Azot oksit oluşumuna açıklama getiren Zeldovich mekanizması, yanma süresince yanma odasında "Mach" etkisiyle meydana gelen sıcaklık farkının da göz önüne alınmasını gerektirir. Yanma süresince artmakta olan basıncın ses hızı ile yayılarak yanma odasının tümünde belli bir anda aynı değere sahip olduğunu söylemek mümkündür. Fakat sıcaklık, basınç gibi çok hızlı yayılmadığından yanma odasının farklı bölgelerinde belli bir anda sıcaklıklar birbirinden farklı olmaktadır. Bunun nedeni yanma süresince basınç artışının adyabatik olarak, hem yakıt-hava karışımını, hem de yanmış ürünleri sıkıştırarak sıcaklığını artırmasıdır (bu olay ilk önce Avusturyalı fizikçi E.Mach tarafından açıklandığı için "Mach" etkisi olarak adlandırılır). "Mach" etkisini göz önüne alınarak azot oksit oluşan bölgedeki gazların, basınca bağlı olarak sıcaklıklarının değişimi aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir:

$$T_{y.ü.} = T_{ad} \cdot \left( \frac{p_{j+1}}{p_j} \right)^{\frac{k_j - 1}{k_j}} \tag{4.9}$$

Yapılan hesaplamalarda, yanma ürünlerinin farklı bölgelerdeki sıcaklıklarının, azot oksit oluşumuna etkilerini hesaba katmak için yanma odası bir birine eşit hacimli bölgelere ayrılmaktadır ve alev cephesi sırayla bu bölgeleri kapsamaktadır. İncelenen bölgede yanma sona erdikten sonra bu bölge diğer bölgelerden izole edilmekte (ısı ve kütle transferi olmadığı varsayılır) ve buradaki yerel sıcaklığa göre azot oksit oluşumu hesaplanmaktadır. Eşit hacimli bölgelerde gazların denge haline gelip

gelmediği göz önüne alınmadığı için bu yöntem tam olarak doğru sayılmaz. Bu nedenle hesaplama bölgelerinin sayısı tesadüfi olarak değil, türbülanslı yanma hızına bağlı olarak, dolayısıyla denge konsantrasyonunun oluşum zamanı göz önüne alınarak tayin edilmelidir. Bu bölgelerin her birinde yanma süresi bir birinden farklılaştığı için sözü geçen bölge hacimleri de birbirine eşit olmayacaktır.

3.21 ve 4.8 numaralı denklemler kullanılarak, yanma ürünlerinin denge konsantrasyonlarına ulaşma zamanını krank mili açısı cinsinden hesaplamak mümkündür;

$$\Delta\alpha_d = \left(\frac{U_t}{W} - 1\right) \cdot \Delta\alpha \tag{4.10}$$

Azot oksit oluşumu hesabına başlamak için gerekli zaman aralığı ise aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta\alpha_d}{\left(U_t/W - 1\right)} \tag{4.11}$$

Rusya Bilimler Akademisi Kimyasal Fizik Enstitüsü'nde yapılan çalışmalar sonucunda dört zamanlı motorlarda, petrol esaslı yakıtların yanması sonucu oluşan ürünlerin denge haline gelmesi için gerekli olan zaman farkı; $\Delta\tau_d = (0.3 \div 0.6)\ 10^{-3}$ s veya krank mili açısı cinsinden $\Delta\alpha_d = 6n\ (0.3 \div 0.6)\ 10^{-3}$ °kma'dır.

Egzoz gazlarındaki azot oksit emisyonu, farklı bölgelerde yanmış yakıt miktarına ve oluşmuş azot oksit miktarlarına göre hesaplanmaktadır;

$$NO(\alpha) = \sum_{1}^{B} NO_j(\alpha) \cdot \Delta x_j \tag{4.12}$$

4.1 numaralı diferansiyel denklem başlangıç şarları $T_{y.ü.}=T_{ad}$, $p=p_j$, $dM_{NO} = 0$ olmak üzere Runge Kutta sayısal yöntemi kullanılarak çözülmektedir [5]. Yanmış gazları bölümlere ayıran ve azot oksit emisyonlarını hesaplayan alt programların akış şemaları Ek B ve C de verilmiştir.

### 4.1.1 Örnek Azot Oksit Emisyonu Hesabı

Örnek olarak yanmanın % 24'ü tamamlanmış olsun (motorun çalışma şartları; hava fazlalık katsayısı 1, motor hızı 4800 d/d, ateşleme avansı 30° kma, tam yük). Bu durumda yakıtın % 10'luk kısmının yanması tamamlandığında birinci bölüm için azot oksit emisyonu hesaplama işlemi başlayacaktır. % 20'lik bölüm geçildiğinde ise ikinci bölüm için hesaplama işlemi devreye girecektir.

Başlangıçta adyabatik alev sıcaklığı 3.13 denkleminde belirtildiği gibi ana programda hesaplanarak alt programa girer. Bu adyabatik alev sıcaklığı kullanılarak bölgelerin yerel sıcaklıkları hesaplanır. Yakıtın % 24'ünün yandığını varsaydığımıza göre, yakıtın % 10'u yandığında alt program devreye girecek ve ilk bölgenin yerel sıcaklığının hesaplanmasına başlanacaktır. % 24'lük yanma tamamlandığında bu örnek için, birinci bölgenin yerel sıcaklığı 2903 K, ikinci bölgenin yerel sıcaklığı ise 2705 K düzeyindedir. Bu sıcaklıklara göre alt programda ürün konsantrasyonları hesaplanarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

N = 0.00000365 kmol/kg yakıt

NO = 0.0091 kmol/kg yakıt

$O_2$ = 0.0133 kmol/kg yakıt

OH = 0.0206 kmol/kg yakıt

$N_2$ = 0.4189 kmol/kg yakıt

Bu değerler 1 kg yakıt için alınan ürünlerdir. Bu sonuçları kmol/cm$^3$'e çevirmek için;

$$\frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \times \frac{1\text{kg}}{1.369\,\text{lt}} \times \frac{1\text{lt}}{1000\,\text{cm}^3} = 0.73\times10^{-3}\,\frac{\text{kmol}}{\text{kg}} = \frac{\text{kmol}}{\text{cm}^3} \tag{4.13}$$

işlemi yapılarak;

N = $0.26\times10^{-8}$ kmol/cm$^3$

NO = $0.66\times10^{-5}$ kmol/cm$^3$

$O_2$ = $0.97\times10^{-5}$ kmol/cm$^3$

OH = $0.15\times10^{-4}$ kmol/cm$^3$

$N_2$ = $0.31\times10^{-3}$ kmol/cm$^3$

sonucuna ulaşılır. Ayrıca 4.1 numaralı denklemdeki reaksiyon hızlarını hesaplamak için gerekli olan hız sabitleri;

$$K_1' = 3.1\cdot10^{16}\cdot\exp(160/T_{yerel}) \qquad \text{cm}^3/\text{kmol s} \tag{4.14}$$

$$K_2 = 6.4\cdot10^{12}\cdot T_{yerel}\cdot\exp\left(-3125/T_{yerel}\right) \qquad \text{cm}^3/\text{kmol s} \tag{4.15}$$

$$K_3 = 4.2\cdot10^{16} \qquad \text{cm}^3/\text{kmol s} \tag{4.16}$$

olarak hesaplanır. Buradan reaksiyon 4.2 numaralı denklemler kullanılarak reaksiyon hızı;

$$R_1 = 3.1\times10^{16}\exp(-160/2903)\frac{cm^3}{kmols}\times0.66\times10^{-5}\frac{kmol}{cm^3}\times0.26\times10^{-8}\frac{kmol}{cm^3} = 503.4\frac{kmol}{cm^3 s}$$

bulunur. Burada 2903 K değeri yakıtın % 24'ü yandığı anda birinci bölgenin yerel sıcaklığıdır. Benzer şekilde 4.3 ve 4.4 numaralı denklemlerin reaksiyon hızları hesaplanırsa;

$R_2$ = 159.6 kmol/cm$^3$s

$R_3$ = 1638 kmol/cm$^3$s

sonuçları elde edilir. Bu değerler 4.1 numaralı diferansiyel denklemde yerine konularak dört adımlı Runge Kutta sayısal yöntemi ile çözümlenirse;

$$DNO1 = \Delta t\times\frac{2\times R_{1son}\times\left(1-\beta^2\right)}{\left[1+\frac{\beta\times R_{1son}}{R_{2son}+R_{3son}}\right]} \tag{4.17}$$

$$\beta = \beta+\frac{1}{2}\times DNO1 \tag{4.18}$$

$$DNO2 = \Delta t\times\frac{2\times R_{1ort}\times\left(1-\beta^2\right)}{\left[1+\frac{\beta\times R_{1ort}}{R_{2ort}+R_{3ort}}\right]} \tag{4.19}$$

$$\beta = \beta+\frac{1}{2}\times DNO2 \tag{4.20}$$

$$DNO3 = \Delta t\times\frac{2\times R_{1ort}\times\left(1-\beta^2\right)}{\left[1+\frac{\beta\times R_{1ort}}{R_{2ort}+R_{3ort}}\right]} \tag{4.21}$$

$$\beta = \beta+DNO3 \tag{4.22}$$

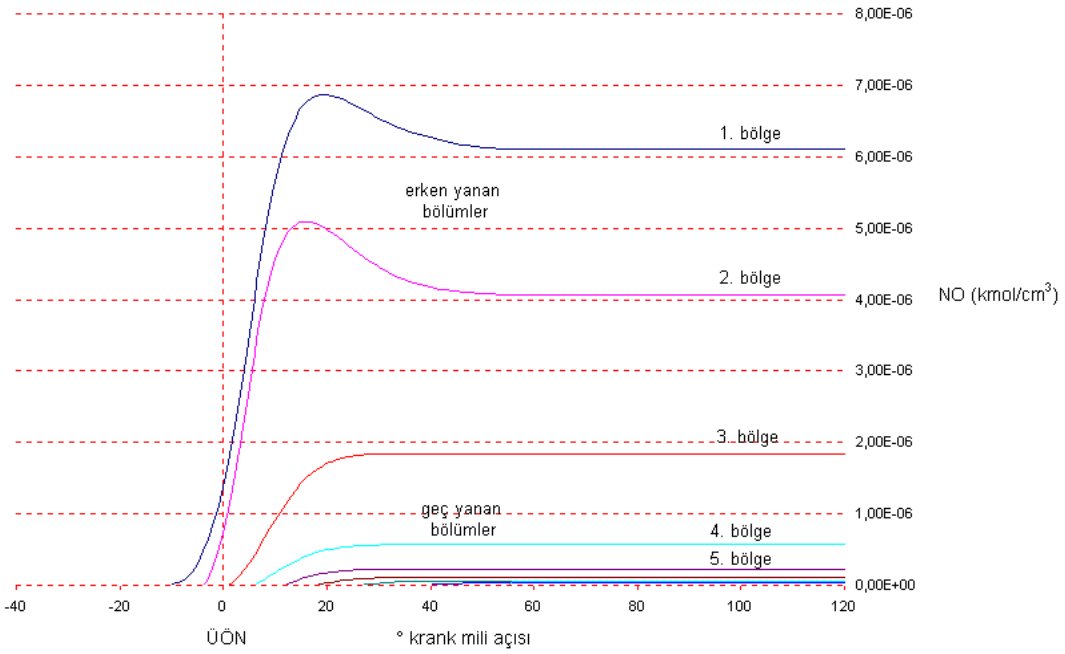
$$DNO4 = \Delta t\times\frac{2\times R_1\times\left(1-\beta^2\right)}{\left[1+\frac{\beta\times R_1}{R_2+R_3}\right]} \tag{4.23}$$

$$\beta = \beta+\frac{DNO1}{6}+\frac{DNO2}{3}+\frac{DNO3}{3}+\frac{DNO4}{6} \tag{4.25}$$

Gerçek azot oksit konsantrasyonun denge konsantrasyonuna oranı olan $\beta$ değeri bulunmuş olur. Azot oksidin denge konsantrasyonu bilindiğine göre, buradan azot oksidin gerçek değeri;

$M_{NO1} = 0.3787 \times 10^{-5} kmol/cm^3$ olarak bulunmuş olur. Burada kullanılan $\Delta t$ adım aralığı 0.2° krank mili açısına tekabül eden zaman farkıdır. Benzer şekilde aynı hesaplamalar ikinci bölüm içinde yapıldığında;

$M_{NO2} = 0.1449 \times 10^{-5} kmol/cm^3$ sonucuna ulaşılır. Bu değerleri toplayıp kmol/kg cinsinden ifade etmek istersek;




Şekil 4.2: Yanma işlemi sırasında farklı zamanlarda yanan gazlarda oluşan azot oksit konsantrasyonları. motor hızı 5000 d/d, ateşleme avansı 35° kma, hava fazlalık katsayısı 1.03, sıkıştırma oranı 9.2, tam yük.

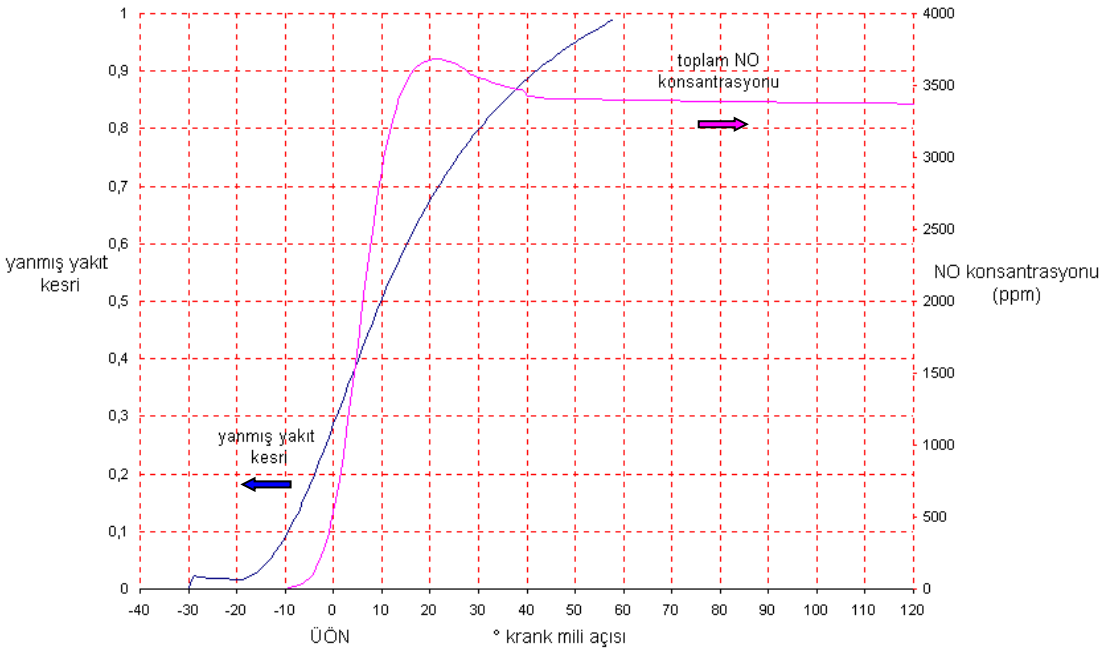
$$M_{NO\Sigma} = 0.5236 \times 10^{-5} \frac{kmol}{cm^3} \times \frac{1000\,cm^3}{1lt} \times \frac{1.369\,lt}{1kg} \times \frac{1}{BS} = 0.7964 \times 10^{-3} kmol/kg$$

sonucuna ulaşılır. Burada BS bölüm sayısını ifade etmektedir. Bu çalışmada yanma odası 9 bölüme ayrılmıştır. Eğer bu sonucu ppm cinsinden görmek için toplam ürün konsantrasyonuna bölüp ve milyonla çarparsak;

$$M_{NO\Sigma} = 0.7964 \times 10^{-3} \frac{kmol}{kg} \div 0.609 \frac{kmol}{kg} \times 10^6 = 1307.7 ppm$$

sonucuna ulaşılır. Bu çalışma şartında motorun toplam azot oksit emisyonu 3074 ppm olarak hesaplanmıştır. Buradan yakıtın % 24'ü yandığında toplam azot oksit emisyonunun % 42.5'inin oluştuğu görülmektedir. Bu bağlamda azot oksit emisyonunun büyük kısmının ilk yanan kısımlarda ortaya çıktığını söylemek yanlış olmaz.

Bu model kullanılarak elde edilen sonuçlar Şekil 4.2'de sunulmuştur. Görüldüğü gibi erken yanan kısımlarda oluşan azot oksit konsantrasyonu diğer bölümlere kıyasla çok daha yüksektir.



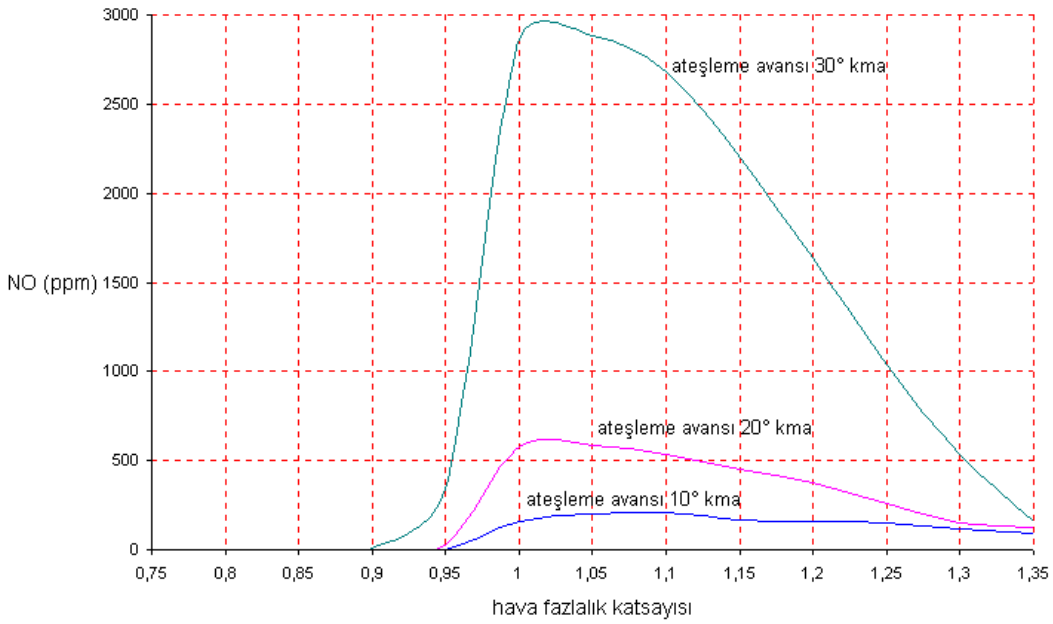

Şekil 4.3: Krank mili açısının fonksiyonu olarak toplam azot oksit konsantrasyonu ve yanmış yakıt kesri değişimi. motor hızı 5000 d/d, ateşleme avansı 30° kma, hava fazlalık katsayısı 1.03, sıkıştırma oranı 9.2, tam yük.

Yanmış gazlar içerisinde her bir bölümde oluşan azot oksit emisyonlarının toplamı ve yanmış gazın, iş gazına oranı Şekil 4.3'te görülmektedir. Yanma işlemi üst ölü noktadan 30° kma önce başlamasına rağmen ilk bölümün yanma işlemi -10° kma'da tamamlanmaktadır. Bu noktadan itibaren azot oksit konsantrasyonu hesabı başlamaktadır.

## 4.2 Motor Parametreleri ile Azot Oksit Emisyonu Değişiminin İncelenmesi

Egzoz azot oksit emisyonu, birbiriyle ilişkili motor dizayn parametreleri ve çalışma şartlarının kontrolü ile minimize edilebilmektedir. Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda bir parametrenin etkisini diğerlerinden izole etmek pek mümkün olmamıştır. Örnek olarak, hidrokarbon ve karbon monoksit emisyonunu azaltma amaçlı yapılan oksijen artırımı, azot oksit emisyonlarını negatif yönde etkilemektedir. Bu bölümde motor dizayn ve çalışma parametrelerinin azot oksit emisyonuna nasıl etki ettiği, yukarıda anlatılan model kullanılarak incelenecektir.

Egzoz gazları içerisindeki azot oksit konsantrasyonu, çevrimin en yüksek sıcaklığındaki oluşum hızı ile genişleme zamanında sıcaklık düşüşü ile oluşan parçalanma hızı arasındaki farka bağlıdır. Azot oksidin parçalanması konusunda yapılan bir araştırmada, genişleme zamanında yeterli süre olmadığı için parçalanmanın ihmal edilebilir boyutlarda olduğu gösterilmiştir [2].



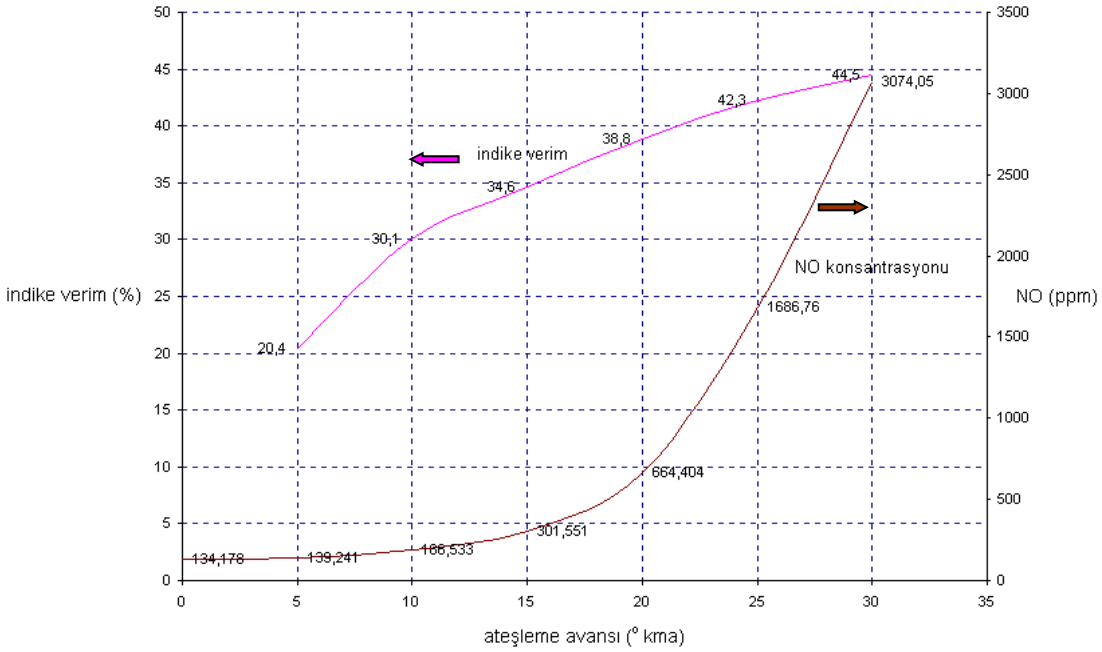

Şekil 4.4: Farklı ateşleme avanslarında hava fazlalık katsayısının azot oksit emisyonlarına etkisi. sıkıştırma oranı 9.2, motor hızı 5000 d/d, tam yük.

Şekil 4.4'de azot oksit konsantrasyonunun hava fazlalık katsayısı ile değişimi, farklı ateşleme avansları kullanılarak gösterilmiştir. Azot oksit konsantrasyonu, hafif fakir karışımı gösteren hava fazlalık katsayısının 1.05 değerinde, 2884 ppm ile en yüksek değerine ulaşmıştır. Benzer şekilde diğer ateşleme avanslarında da, azot oksit konsantrasyonunun en yüksek değerlerine, hava fazlalık katsayısının 1.05-1.1 değerleri arasında ulaştığı görülmektedir.

Her üç ateşleme avansı eğrisinde de stokiyometrik karışım noktasının sol tarafına gidildikçe azot oksit konsantrasyonunda büyük düşüşler gözlenmektedir. Örnek olarak 30° kma ateşleme avansı kullanıldığında, hava fazlalık katsayısının değerini stokiyometrikten 0.95'e getirmek, azot oksit konsantrasyonunda % 90'a yakın azalma sağlamaktadır.

20° kma ateşleme avansında azot oksit konsantrasyonunun maksimum değeri 581 ppm iken, 30° kma ateşleme avansında konsantrasyon 2900 ppm düzeyine yaklaşmaktadır. Bu da ateşleme avansının azot oksit emisyonuna etkisini ortaya koymaktadır.

Maksimum azot oksit emisyonunun hafifçe fakir karışımlarda meydana gelmesinin nedeni ise maksimum sıcaklıkların düşmesine rağmen oksijen konsantrasyonunun artması ile açıklanmaktadır. Daha fakir karışımlara gidildikçe azot oksit emisyonunun azalmasının nedeni ise, silindir içerisine giren fazla havanın soğutma etkisinin, oksijenin azot oksit emisyonunu artırıcı etkisini gölgelemesidir.

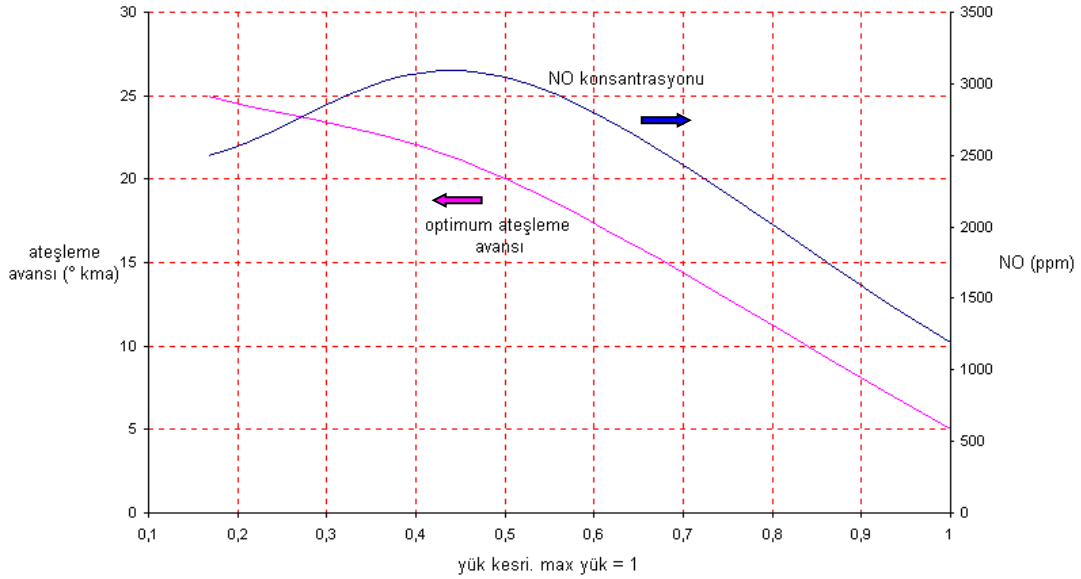



Şekil 4.5: Azot oksit konsantrasyonunun ve indike verimin ateşleme avansıyla değişimi. hava fazlalık katsayısı 1, sıkıştırma oranı 9.2, motor hızı 4800 d/d, tam yük.

Şekil 4.5'te ateşleme avansına bağlı olarak azot oksit konsantrasyonu ve indike verim eğrileri bir arada verilmiştir. Grafiğin sağ alt kısmındaki eğri azot oksit konsantrasyonunu, sol üst tarafındaki eğri ise indike verimi ifade etmektedir. Görüldüğü gibi, motorun optimum çalışma şartı, indike verimin en yüksek olduğu nokta olan 30° kma ateşleme avansıyla gerçekleşmektedir. Bu noktada özgül yakıt tüketimi 184 g/kW h ile en düşük değerine ulaşmaktadır. Yukarıda da belirtildiği gibi azot oksit konsantrasyonu, ateşleme avansıyla üstel olarak artmakta, ayrıca avansın artmasıyla indike verimde de belirgin bir artış gözlenmektedir.

Azot oksit konsantrasyonu eğrisi ile indike verim eğrisinin bir arada verilmesinde ki temel amaç, ateşleme avansı düşürülerek indike verimden yapılacak fedakarlığın, azot oksit konsantrasyonunda ne kadar düşüşe yol açacağını ortaya koymaktır.

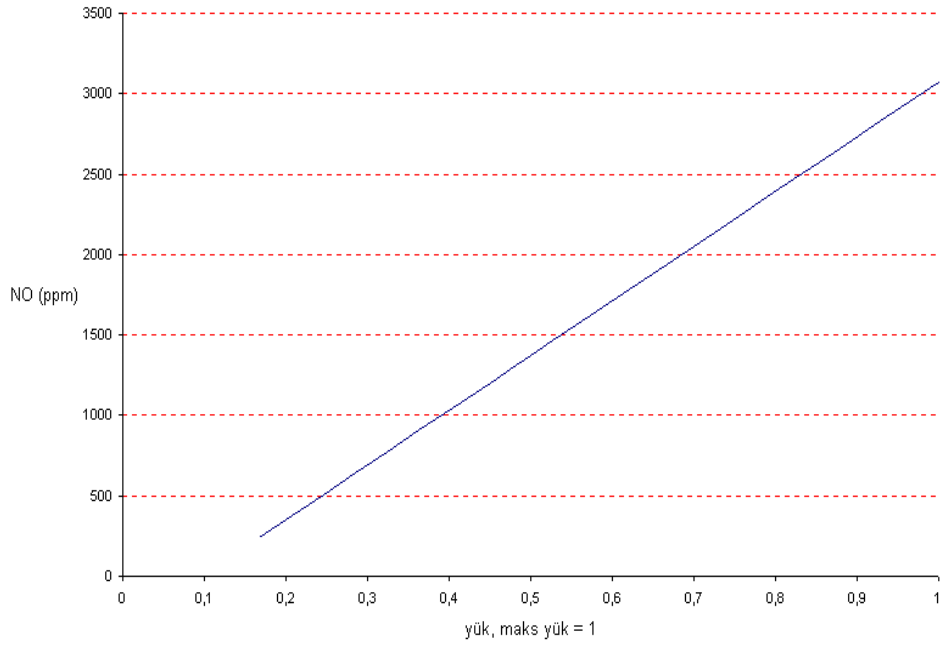
30° kma ateşleme avansında azot oksit konsantrasyonu 3074 ppm ile en yüksek düzeyindeyken, indike verim % 44.5 seviyesindedir. Ateşleme avansını 5° kma düşürmek indike verimde % 2.2 kayba yol açarken, azot oksit emisyonunun 1686 ppm seviyesine inmesine yol açarak, emisyonda % 45 azalma sağlamaktadır. Benzer şekilde ateşleme avansını 20° kma'na düşürmek maksimum verimden % 5.7 fedakarlık etmek anlamına gelirken, azot oksit emisyonunda % 78 azalmayı da beraberinde getirmektedir.



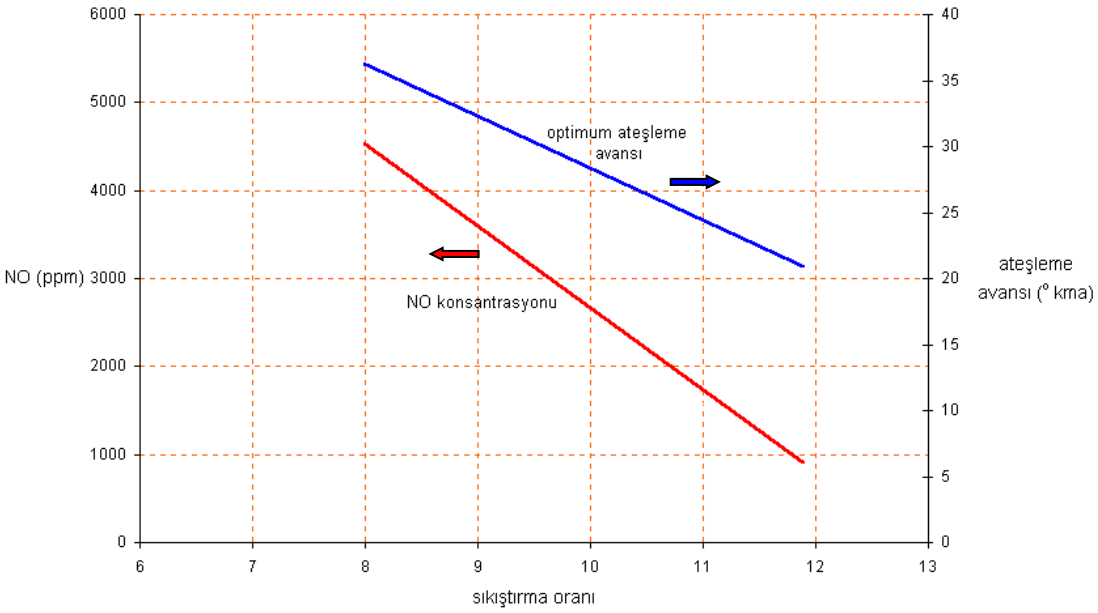

Şekil 4.6: Farklı yük değerlerinde, en yüksek verim için gerekli olan ateşleme avansı ve bu avanslar kullanılarak yapılan yük değişimlerinde, azot oksit emisyonunun davranışı eğrileri. hava fazlalık katsayısı 1, sıkıştırma oranı 9.2, motor hızı 1800 d/d.

Şekil 4.6'te azot oksit konsantrasyonunun optimum ateşleme avansı ile farklı yüklerde değişimi verilmiştir. Yükün maksimum olduğu 1 değerinde kullanılan ateşleme avansı 5° kma'dır ve daha yüksek avans kullanılması vuruntuya neden olmaktadır. Bu noktada azot oksit konsantrasyonu 1000 ppm düzeyinde iken sola doğru gidildikçe azot oksit emisyonunda artış gözlenmektedir. Bunun başlıca nedeni ise yük azaldığı için vuruntu sınırına girmeden ateşleme avansının artırılabilmesi, bunun sonucu olarak ta Şekil 4.5'ten de görülebileceği gibi azot oksit emisyonunun artmasıdır.

Şekil 4.7'ten de görülebileceği gibi sabit ateşleme avansında, motor yükünün azaltılması ile birlikte azot oksit emisyonunda lineer bir düşüş gözlenmektedir. Yükün azot oksit emisyonuna lineer etki etmesi, ateşleme avansının ise parabolik bir etki de bulunmasının bir sonucu olarak, yük azatlımı ile birlikte ateşleme avansının artırılması, azot oksit emisyonlarında bir artışa sebep olmaktadır. Grafiğin sol tarafında görülen azot oksit emisyonunda ki azalma ise yükün çok azalması buna karşın gerekli olan optimum ateşleme avansında çok küçük bir artış olmasıdır.




Şekil 4.7: Sabit ateşleme avansında azot oksit konsantrasyonunun motor yükü ile değişimi. hava fazlalık katsayısı 1, sıkıştırma oranı 9.2, motor hızı 4800 d/d, ateşleme avansı 30° kma.

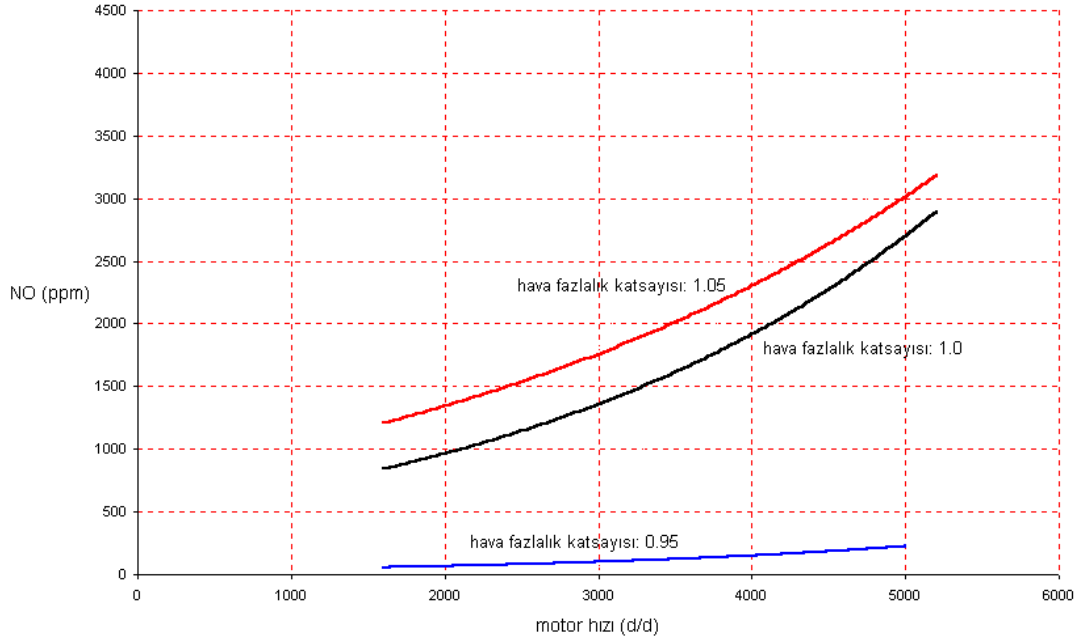



Şekil 4.8: Farklı sıkıştırma oranlarında, optimum ateşleme avansı ile yaklaşık olarak eşit motor performansı elde edilmesinin, azot oksit konsantrasyonuna etkisi. hava fazlalık katsayısı 1.03, motor hızı 4800 d/d, tam yük, yaklaşık olarak ortalama indike basınç 1.2 MPa, yaklaşık özgül yakıt tüketimi 200 g/kW h

Şekil 4.8'da motor dizayn parametrelerinden biri olan sıkıştırma oranının azot oksit emisyonuna etkisi verilmiştir. Bu çalışmada sadece sıkıştırma oranı değiştirilmemiş, bununla birlikte ateşleme avansı da değiştirilerek her sıkıştırma oranında yaklaşık olarak aynı motor performansının elde edilmesine çalışılmıştır. Motor performansında kullanılan kriterler ortalama indike basınç ve özgül yakıt tüketimi

kriterleridir. Her sıkıştırma oranın da elde edilen ortalama indike basıncın yaklaşık değeri 1.2 MPa ve yaklaşık özgül yakıt tüketimi 200 g/kW h'tir.

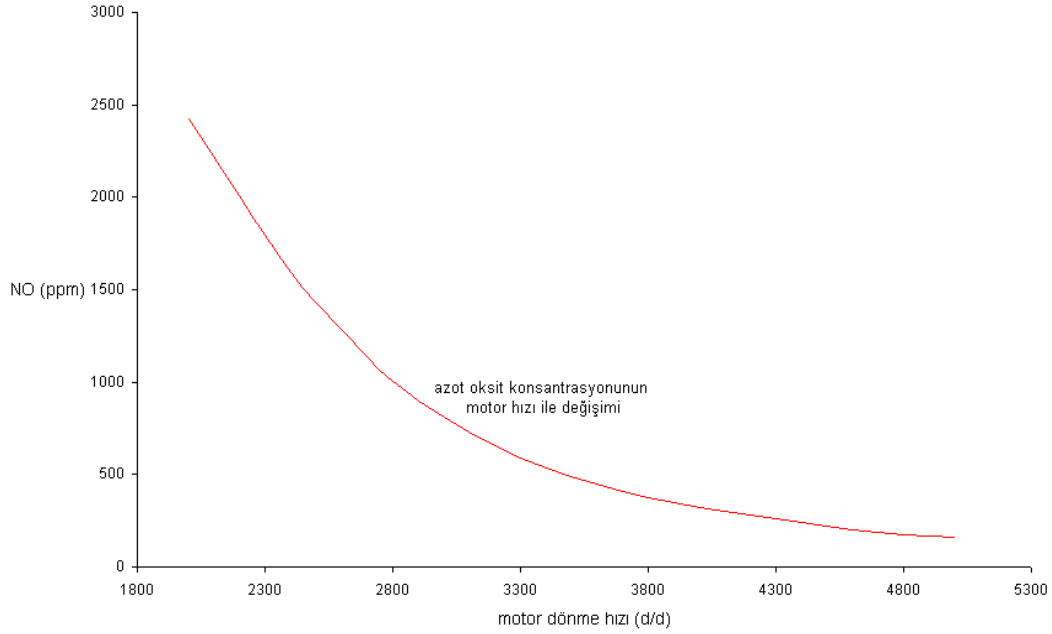
Örnek olarak sıkıştırma oranının 8:1 değeri için, yukarıda bahsedilen aynı performans değerlerine ulaşmak amacıyla kullanılması gereken ateşleme avansı 35° kma civarındadır. Bu derece yüksek bir ateşleme avansının kullanılması sonucunda oluşan azot oksit emisyonu ise sol sütundan okunabilmektedir. Bu çalışma şartında motorun çıkardığı azot oksit emisyonu 4500 ppm düzeyindedir. Benzer deneme sıkıştırma oranının 11:1 değeri için yapıldığında, aynı performans için gerekli ateşleme avansı 25° kma ve oluşan azot oksit emisyonu 1800 ppm seviyesinde olmaktadır. Motor dizaynı aşamasında bu durumu göz önünde bulundurmak mümkünse sıkıştırma oranını yüksek seçmek azot oksit emisyonlarını olumlu yönde etkileyecektir.




Şekil 4.9: Farklı yakıt hava karışımı oranlarında, motor hızına bağlı olarak azot oksit konsantrasyonu eğrileri. sıkıştırma oranı 9.2, ateşleme avansı her devir sayısı için optimum, tam yük.

Şekil 4.9'de azot oksit konsantrasyonunun, farklı motor hızlarında ki davranışı görülmektedir. Ortadaki eğri stokiyometrik karışımda elde edilen sonuçları gösterirken, üstteki ve alttaki eğriler sırasıyla fakir ve zengin karışım eğrilerini ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlarda, sabit ateşleme avansında, motor devir sayısının artmasıyla birlikte azot oksit oluşumunda bir azalma görülmektedir (Şekil 4.10). Bu eğrilerdeki artış ise, optimum performans ve yakıt tüketimi değerlerini elde etmek amacıyla, devir sayısının artışı ile birlikte ateşleme avansının artırılmasından kaynaklanmaktadır.

Zengin karışımda azot oksit konsantrasyonu çok düşük mertebelerde gerçekleşmekte buna paralel olarak motor hızıyla artışı çok yüksek değerlere ulaşmamaktadır. Hafifçe fakir karışımda ise beklenildiği gibi azot oksit emisyonu en yüksek değerlere ulaşmaktadır.




Şekil 4.10: Sabit ateşleme avansında azot oksit konsantrasyonunun motor devir sayısı ile değişimi. hava fazlalık katsayısı 1, sıkıştırma oranı 9.2:1, yarım yük, sabit ateşleme avansı 20° kma.

## 4.3 Sonuçların İrdelenmesi

Yapılan çalışmalar sonucunda, buji ateşlemeli motorların azot oksit emisyonu oluşumunda, belirleyici olan işletme parametrelerinden en büyük ölçüde etkili olanın ateşleme avansı olduğu ortaya çıkmaktadır. Diğer parametrelerin azot oksit konsantrasyonuna lineer olarak etki etmesine karşın, ateşleme avansı, logaritmik olarak artan bir etkide bulunmaktadır. Özellikle 25° kma ateşleme avansından sonra azot oksit emisyonunda büyük artışlar gözlenmektedir. Bu nedenle azot oksit emisyonu kontrol altına alınmak isteniyorsa öncelikle bu parametrenin değiştirilmesi gerektiği açıktır ancak ateşleme avansı azaltılmasının toplam motor verimini düşürmesi, bu adım üzerindeki en büyük engeldir. Çünkü verim düştüğünde aynı işi yapmak için daha çok yakıt harcanacağından azot oksit emisyonunda beklenen azalma tam olarak sağlanamayacaktır.

Yapılan çalışma sonucunda ortaya çıkan bir diğer nokta ise eşit performans ve yakıt tüketimi değerleri için daha yüksek sıkıştırma oranlı motor seçmek azot oksit emisyonunu azaltıcı bir etki göstermektedir.

Azot oksit emisyonunda büyük etkisi olan parametrelerden biri de hava fazlalık katsayısıdır. Özellikle % 4-5 fakir karışımlarda maksimum değerine ulaşan azot oksit

emisyonları, hava fazlalık katsayısının 0.95 değeri için, stokiyometrik duruma göre % 80'lere yaklaşan oranda azalmaktadır. Ancak zengin karışımlı yanmanın da eksik yanma nedeniyle, toplam verimi düşürdüğünü göz ardı etmemek gerekmektedir.

Sonuç olarak parametrelerin hepsinin birbirine bağımlı olması, bir yandan kazanç sağlarken, diğer yandan fedakarlık yapmayı zorunlu kılmaktadır. Yapılması gereken, her bir parametrenin getirdiklerini ve götürdüklerini analiz ederek optimum dizayn ve çalışma şartını bulmaktır.

## 5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Benzin motorlarının geliştirilmesi konularında yapılması öngörülen çalışmalara faydası olacağını düşünerek yapılmış olan bu matematik model Rusya Bilimler Akademisi Kimyasal Fizik Enstitüsü'nde teklif edilmiş "Türbülanslı Yanma Mekanizmasına" dayanmaktadır. Bu mekanizmaya göre;

a) Emme sürecinde yüksek hızla silindire giren izotropik olmayan türbülanslı gaz hareketinin kinetik enerjisi piston ÜÖN'ya doğru giderken disipasyona uğrayıp yanma başlamadan önce izotropik hale dönüşür (türbülanslı mikro bölgedeki çalkantı hızı yaklaşık olarak her yönde eşittir).

b) Yakıt hava karışımının kimyasal ve fiziksel özelliklerine ve türbülans şiddetine bağlı olarak yanma ürünlerinin hacminin değişimi basıncın değişimiyle lineer orantılıdır.

Matematik model termodinamiğin 1. Kanunu, ideal gaz hal denklemi ve silindir hacminin krank milini açısına göre değişim denkleminin yanısıra ısı transferi ile gerçekleşen enerji kaybının Woschni denklemi ve yanma süresince vuruntu olayının oluşup oluşmadığını gösteren Daut ve Eyze kriterinden oluşturulmuştur.

Sayısal yöntemle hesaplama sonucu değerlerinin deney verileri ile karşılaştırılmasından sunulan matematik modelin yeterli hassasiyette silindir içi parametrelerin açıklanmasına ve bununla bağlantılı olarak benzin motorlarının çalışma şartlarında indike ve efektif parametreleri etkileyen tüm faktörlerin incelenmesine ve optimizasyonuna imkan sağladığı anlaşılmaktadır. Bu bakımdan benzin motorlarının geliştirilmesinde ve yeni motor çalışma yöntemlerinin incelenmesinde sunulan model faydalı olacaktır.

Bu modelin, azot oksit emisyonlarını hesaplamak amacıyla geliştirilmesi aşamasında, yüksek sıcaklıkta azot oksit oluşumuna açıklama getiren üç basamaklı genişletilmiş Zeldovich mekanizması kullanılmıştır.

Yapılan çalışma sonucunda elde edilen azot oksit emisyonu değerleri, diğer araştırmalarda elde edilen sonuçlarla benzerlik gösterdiği ve motorun dizayn ve çalışma parametreleri ile gerçekçi bir değişim sergilediği için çalışmanın geliştirilmeye açık geçerli bir model olduğunu söylemek mümkündür. Modelin geliştirilmeye açık yönleri ise şu şekilde sıralamak mümkündür;

a) 3 basamaklı genişletilmiş Zeldovich mekanizmasına 4. basamağında ilave edilmesi ile daha hassas ve gerçekçi sonuçlara ulaşmak mümkün olacaktır. Mevcut modelde yanmış gazlar içerisinde yüksek sıcaklıkta oluşan azot oksit emisyonları hesaplanmaktadır. Bu adım sayesinde, alev cephesi içerisinde oluşan ve literatürde "prompt NO" olarak adlandırılan azot oksit emisyonunun da hesaba katılması mümkün olacaktır.

b) Yanma sürecinde silindir içerisinde ki basınç neredeyse her noktada aynı olmasına karşın sıcaklık için aynı şeyi söylemek mümkün değildir. Farklı noktalarda farklı sıcaklıklar olması ve azot oksit oluşumunun sıcaklık değişikliklerinden çok fazla etkilenmesi, hassas bir hesaplama için yanmış gazları, kendi içerisinde bölgelere ayırmayı ve yerel sıcaklıklarını hesaplamayı zorunlu kılmaktadır. Mevcut modelde yanmış gazlar eşit hacimli bölgelere ayrılmıştır ve hesaplamalar bu bölgelerde yanma işlemi tamamlandıktan sonra başlatılmıştır. Ancak bu hesaplamanın tam olarak doğru olduğu söylenemez çünkü burada oluşan ürünlerin dengeye ulaşıp ulaşmadığı bilinmemektedir. Daha hassas sonuçlar için her bölgenin kimyasal dengeye ulaşma zamanı belirlenmeli ve hesaplamalar bundan sonra başlatılmalıdır.

## KAYNAKLAR


[1] **Springer, S. G. and Patterson, J. D.,** 1973. Engine emissions pollutant formation and measurement. Plenum Pres, New York.

[2] **Patterson, J. D., and Henein, A. N.,** 1972. Emission from combustion engines and their control. Ann Arbor Science Publishers, Michigan.

[3] **Ergeneman, M., Mutlu, M., Kutlar, O. A. ve Arslan, H.,** 1998. Taşıt egzozundan kaynaklanan kirleticiler. Birsen Yayınevi, 1998.

[4] **Ramos, J. I.,** 1989. Internal combustion engine modeling, pp. 236-311, Hemisphere Publishing Corporation, New York.

[5] **Mehdiyev, R., Soruşbay, C., Kutlar, O. A., Bağırov, H. ve Farzaliyev, M.,** 2002. Benzin motorlarında türbülanslı yanma mekanizması kullanılarak silindir içi parametrelerin ve azot oksit emisyonunun hesabı, Otomotiv Teknolojileri Kongresi, Bursa, Türkiye, 24-29 Haziran, s. 211-219.

[6] **Ferguson, C. R. and Kirkpatrick, A. T.,** 2000. Internal combustion engines applied thermo sciences. John Wiley and Sons Inc., New York.

[7] **Turns, S. R.,** 1996. An introduction to combustion concepts and applications. McGraw-Hill, New York

[8] **Heywood, J. B.,** 1988. Internal combustion engine fundamentals. McGraw-Hill, New York.

[9] **Carnahan, B., Luther, H. A. and Wilkes, J. O.,** 1969. Applied numerical methods. John Wiley and Sons Inc., New York.

[10] **Zeilinger, K.,** 1971. Influence of water injection on nitric oxide formation in petrol engines, Symposium Arranged by The Automobile Division and The Combustion Engines Group of The Institution of Mechanical Engineers, London, November 9-11, pp. 7-14.

[11] **Muzio, L., Newhall, H., Starkman, E. S.,** 1971. Spatial and temporal history of nitrogen oxides in the spark ignition combustion chamber, Symposium Arranged by The Automobile Division and The Combustion Engines Group of The Institution of Mechanical Engineers, London, November 9-11, pp. 163-172.

[12] **Henault, C.,** 1971. The influence of valve overlap on oxides of nitrogen exhaust emissions, Symposium Arranged by The Automobile Division

and The Combustion Engines Group of The Institution of Mechanical Engineers, London, November 9-11, pp. 273-279.

[13] **Campbell, L. M., Stone, D. K., Shareef, G. S.,** 1991. Sourcebook $NO_x$ control technology data, pp. 5-11, National Technical Information Service, Springfield, Virginia.

[14] **Semyonov Y.S.,** 1965. Kapalı hacimde suni yapılmış olan mühitte türbülans karakteristiğinin ölçümü, Nauçno-Tekniçeskie problemi goreniya i vzriva (Yanma ve patlamanın bilimsel teknik problemleri), Novosibirsk, **2,** 83-92.

[15] **Karpov V.P., Semyonov Y.S., Sokolik A. S.,** 1959. Kapalı hacimde türbülanslı yanma. Dokladı Akademii Nauk SSSR (SSBD bilimsel akademisi raporları), **128.cilt 6**, 1220-1223.

[16] **Karpov V.P.,** 1981. Kapalı hacimde yanma kuralları bazında yüksek ekonomili ve düşük emisyonlu pistonlu motorların gelişimi, Avtoreferat dis. Dr. Tek. Nauk, KFE Çernegolovka, 29

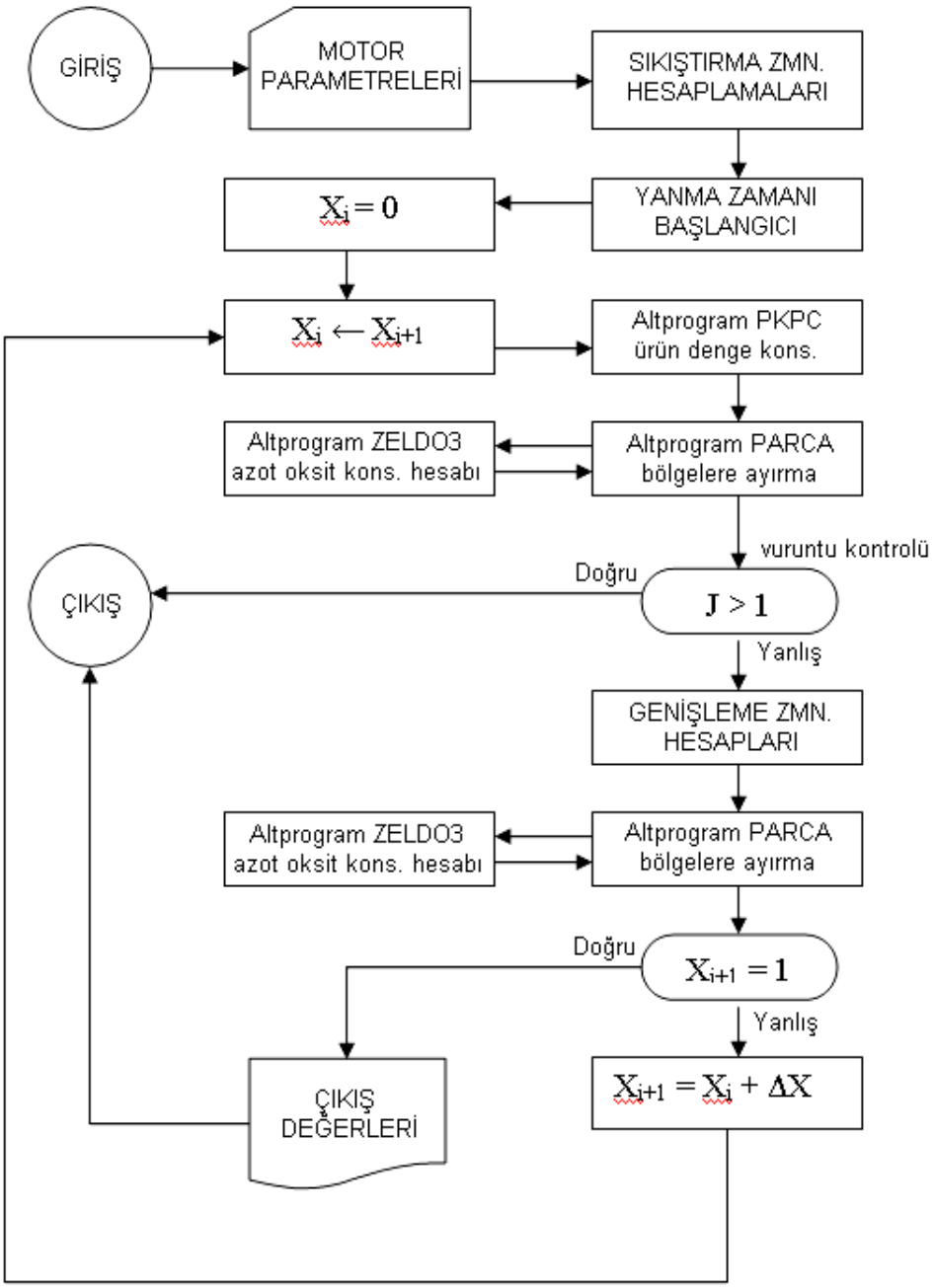
[17] **Mehdiyev, R.I., Bağırov, H. B., Farzalıyev, M.N.,** 1986. Mecburi buji ile ateşlenen pistonlu motorlarda türbülanslı yanma olayının matematik modellenmesi, Ximiçeskaya Fizika Prosessov Goreniya i vzriva (Yanma ve patlama proseslerinin kimyasal fiziği), Çernogolovka, 107-111.

[18] **Blumberg P., Kummer T.,** 1970. Prediction of NO formation in spark ignited-Engines, An Analysis of Methods of Control, Combustion Sci. And Technology, **4,** 73-95.

[19] **Mehdiyev R.I., Posvyansky, V., Bağırov, H. B.,** 1981. İçten yanmalı motorlarda yanmış ürünlerin denge konsantrasyonlarının hesabı, Dvigatelestroyenie, Leningrad, **3,** 13-15.

# EKLER

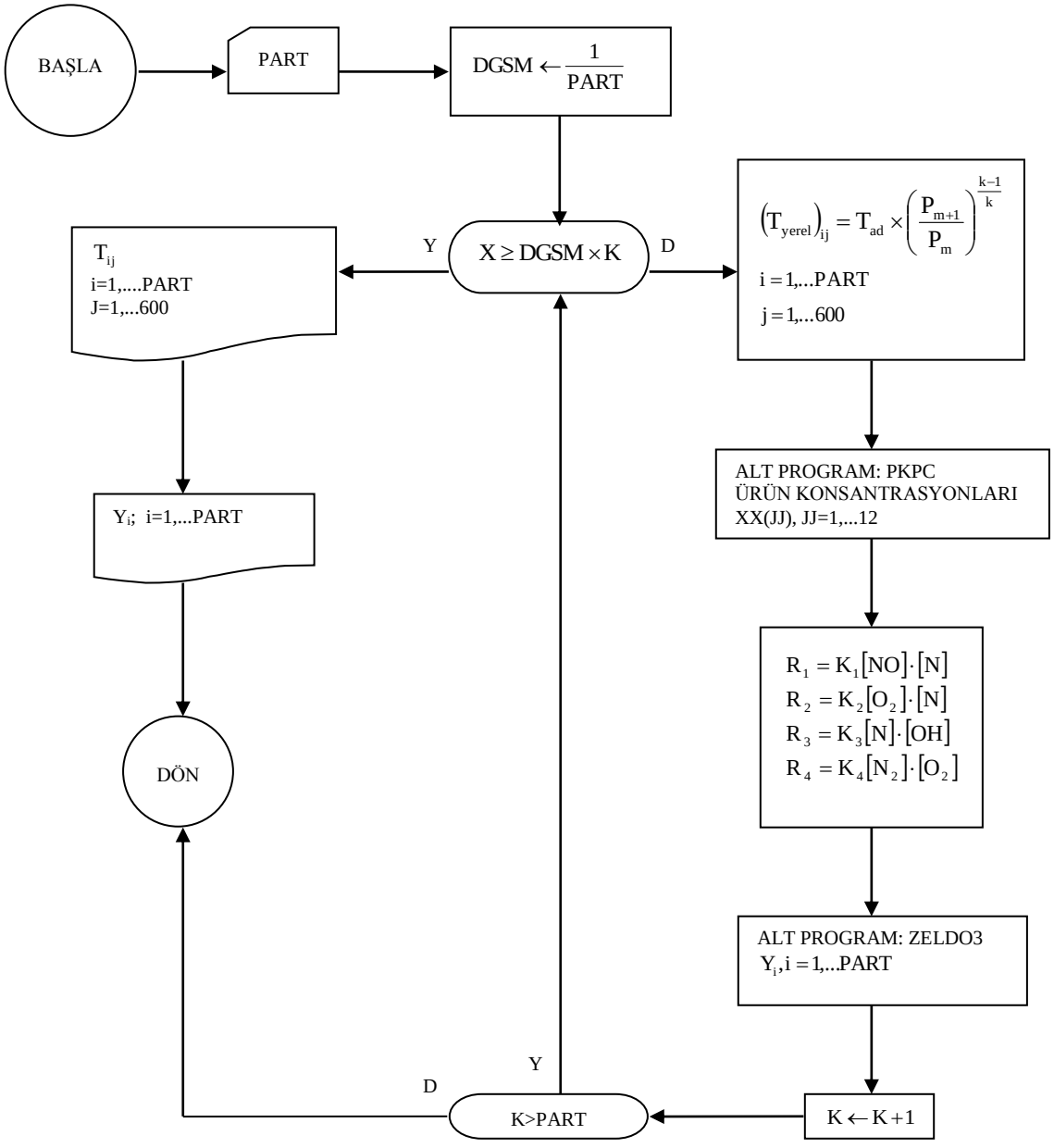
## EK A




Şekil A.1: Türbülanslı yanma mekanizmasını kullanarak motor indike ve efektif parametrelerini hesaplayan ana programın akış şeması.

## EK B

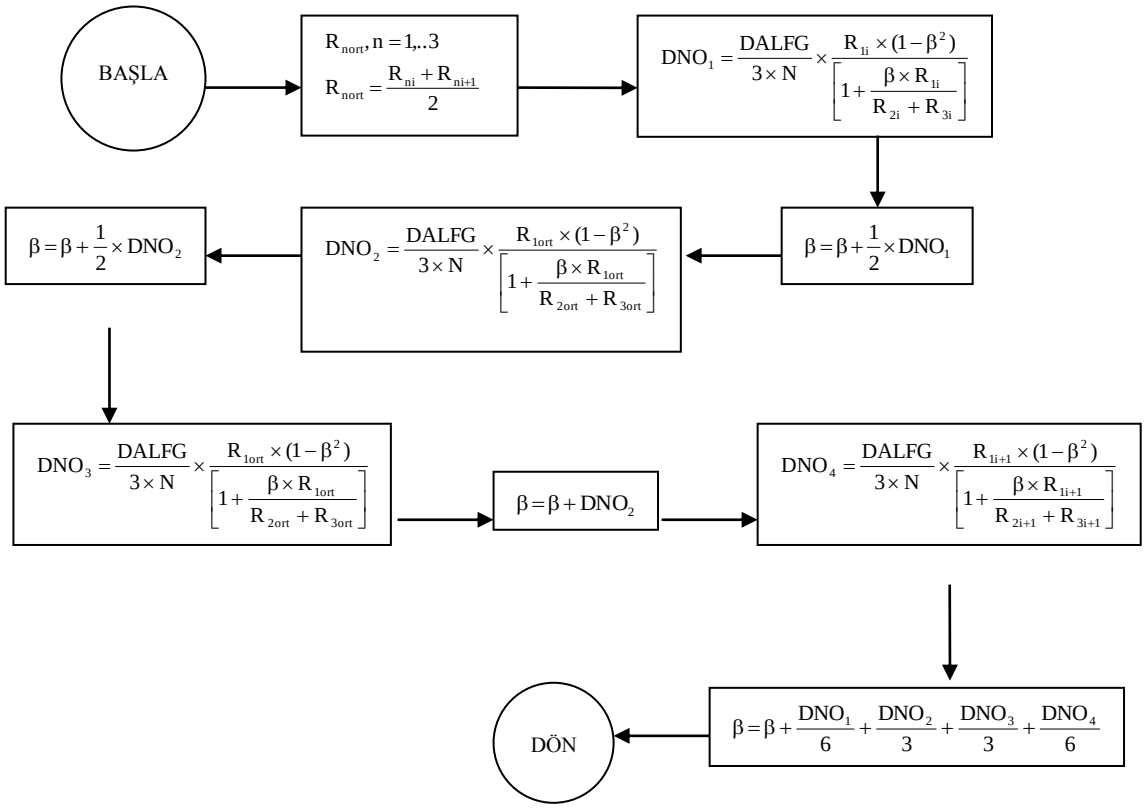
Alt Program: PARCA(XX, XH, XK, TAD, PH, ALFK, JJ, PK, CPA, TYRL, IDOG, ALT, TG1, KCID, KCI)




Şekil B.1: Yanmış gazları bölümlere ayıran alt programın akış şeması

## EK C

ALT PROGRAM ZELDO3 (ALFK, R1, R2, R3, BETA, EK, YX)




Şekil C.1: Runge Kutta sayısal yöntemini kullanarak azot oksit konsantrasyonunu belirleyen alt programın akış şeması

## ÖZGEÇMİŞ

Feridun Çoğalan 1978 yılında Üsküdar'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini tamamladıktan sonra İstanbul Ticaret Odası Anadolu Teknik Lisesi'nde Elektrik eğitimi aldı. 1997 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'ne başlayan Çoğalan, 2001 yılında Enerji Dalı'ndan mezun olarak, İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Otomotiv Programı'nda Yüksek Lisans eğitimine başladı.

2003