İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

DİZEL MOTOR EMİSYON DÜZENLEMELERİ İÇİN LNT'NİN MATEMATİKSEL OLARAK MODELLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ferit Orçun PARLAK

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

ARALIK 2017

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

DİZEL MOTOR EMİSYON DÜZENLEMELERİ İÇİN LNT'NİN MATEMATİKSEL OLARAK MODELLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ferit Orçun PARLAK

(301131010)

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Serdar Yaman

ARALIK 2017

İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 301131010 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ferit Orçun PARLAK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "DIZEL MOTOR EMİSYON DÜZENLEMELERİ İÇİN LNT'NİN MATEMATİKSEL OLARAK MODELLENMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Serdar YAMAN** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Üner ÇOLAK** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Doç. Dr. Alp Tekin ERGENÇ Yıldız Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : **15 Kasım 2017**
Savunma Tarihi : **15 Aralık 2017**

Aileme,

ÖNSÖZ

Öğrenim hayatım boyunca benden desteklerini esirgemeyen sevgili aileme, tez çalışması boyunca değerli görüşleri ve yorumlarıyla yön gösteren ve destek olan tez danışmanım Prof. Dr. Serdar Yaman'a, tez çalışmamı destekleyen ve yardımcı olan Ford Otosan firmasına ve çalışma arkadaşlarıma içten dileklerimi sunarım.

Aralık 2017

Ferit Orçun Parlak
(Makina Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
SEMBOLLER ..... **xiii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xv**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xvii**
ÖZET ..... **xix**
SUMMARY ..... **xxi**
1. GİRİŞ **1**
2. DİZEL MOTORLARIN TARİHİ GELİŞİMİ VE ÇALIŞMA PRENSİBİ **3**
2.1 Dizel Motorların Tarihi Gelişimi 3
2.2 Dizel Motorların Çalışma Prensibi 5
2.2.1 Emme zamanı 5
2.2.2 Sıkıştırma zamanı 5
2.2.3 Yanma ve genişleme zamanı 6
2.2.4 Egzoz zamanı 6
2.3 Dizel Yakıtının Genel Özellikleri 6
2.3.1 Setan sayısı 7
2.3.2 Viskozite 7
2.3.3 Isıl değer 8
2.3.4 Özgül ağırlık 8
2.3.5 Uçuculuk 8
2.3.6 Kükürt oranı 8
3. DİZEL MOTORLARDA EGZOZ EMİSYONU OLUŞUMU **9**
3.1 Karbonmonoksit (CO) Oluşumu 10
3.2 Hidrokarbon (HC) Oluşumu 10
3.3 Azot Oksit (NO_x) Oluşumu 11
3.4 Partikül Madde (PM) Oluşumu 11
4. DİZEL MOTORLARDA EMİSYON STANDARTLARI VE GELİŞİMİ **13**
4.1 Emisyon Standartları 14
4.2 Emisyon Test Çevrimleri 15
5. DİZEL MOTORLARDA EMİSYON KONTROL YÖNTEMLERİ **21**
5.1 NO_x Kontrol Yöntemleri 22
5.1.1 Motor tasarımıyla yapılan NOx kontrol yöntemleri 22
5.1.1.1 Hava soğutmalı şarj 22
5.1.1.2 Yakıt sistemleri 23
5.1.1.3 Yanma odası tasarımı 23
5.1.1.4 Egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) 23
5.1.2 Egzoz katalistleri ile yapılan NO_x kontrol yöntemleri 24
5.1.2.1 Seçici katalitik indirgeme (SCR) 24
5.1.2.2 Fakir NOx tutucu (LNT) 25
5.1.2.3 Su ekleme 25
5.2 PM Kontrol Yöntemleri 26

5.2.1 Motor tasarımıyla yapılan PM kontrol yöntemleri 26
5.2.1.1 Yakıt sistemleri 26
5.2.1.2 Yanma odası tasarımı 27
5.2.1.3 Hava şarjı sistemi 28
5.2.2 Egzoz katalistleri ile yapılan PM kontrol yöntemleri 28
5.2.2.1 Dizel oksidasyon katalisti (DOC) 28
5.2.2.2 Dizel partikül filtre (DPF) 28
5.3 Emisyon Kontrol Sistemleri 30
5.3.1 Euro 4 sistemler 30
5.2.2 Euro 5 ve Euro 6 sistemler 30
6. LNT TEKNOLOJİSİ 33
6.1 LNT'nin Çalışma Prensibi 33
6.2 LNT'de Gerçekleşen Kimyasal Tepkimeler 34
6.2.1 NO_x emisyonlarının oksitlenmesi ve tutulması 34
6.2.2 NO_x emisyonlarının bırakılması 35
6.2.3 NO_x emisyonlarının çevrilmesi 35
6.3 LNT'nin Çalışma Koşullarını Etkileyen Faktörler 36
6.3.1 LNT'nin sıcaklığı 36
6.3.2 LNT'nin doluluk oranı 37
6.3.3 LNT'deki akış hızı 38
6.3.4 Egzoz gazındaki O_2 derişimi 39
6.3.5 Kükürt zehirlenmesi 39
6.3.6 Katalist formülasyonu 39
7. LNT'NİN MATEMATİKSEL OLARAK MODELLENMESİ 41
7.1 LNT Matematiksel Model İhtiyacı 41
7.2 LNT Model Tasarımı 41
7.2.1 NO oksidasyonu 42
7.2.2 Maksimum NO_x tutma kapasitesi 43
7.2.3 NO_2 tutma 45
7.2.4 NO_2 bırakma 48
7.2.5 NO_2 çevrimi 50
8. MODEL SONUÇLARI 55
9. SONUÇ VE ÖNERİLER 59
KAYNAKLAR 61
ÖZGEÇMİŞ 65

KISALTMALAR

DOC **:** Diesel Oxidation Catalyst
DPF **:** Diesel Particulate Filter
ECU **:** Engine Control Unit
edmh : en düşük motor hızı
EGR **:** Exhaust Gas Recirculation
ELR **:** European Load Response
ETC **:** European Transient Cycle
EUDC **:** Extra Urban Driving Cycle
eymh : en yüksek motor hızı
LNT **:** Lean NO_x Trap
NEDC **:** New European Driving Cycle
NSC **:** NO_x Storage Catalyst
PAC **:** Plasma Assisted Catalyst
PM **:** Particulate Matter
RDE **:** Real Driving Emissions
SCR **:** Selective Catalytic Reduction
SV : Space Velocity
UDC **:** Urban Driving Cycle
VGT **:** Variable-Geometry Turbocharger
WHSC **:** World Harmonized Stationary Cycle
WHTC **:** World Harmonized Transient Cycle
WLTC **:** Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle

SEMBOLLER

λ	**:** Hava-yakıt oranı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Dizel binek araçların Euro standartı emisyon şimitleri. 14
Çizelge 4.2 : Dizel ağır ticari araçların emisyon limitleri (sabit nokta). 15
Çizelge 4.3 : Dizel ağır ticari araçların emisyon limitleri (transient). 15
Çizelge 4.4 : UDC-R49 testi noktaları ve ağırlık faktörleri..... 16
Çizelge 4.5 : ESC testi noktaları ve ağırlık faktörleri..... 17
Çizelge 4.6 : WHSC test noktaları ve ağırlık faktörleri..... 19
Çizelge 5.1 : Emisyon kontrol yöntemleri ve emisyona olan etkileri..... 21

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Rudolf Diesel'in patenti. 4
Şekil 2.2 : Carnot çevrimi. 4
Şekil 2.3 : Dört zamanlı dizel motorun gösterimi. 6
Şekil 3.1 : Dizel motorlarda egzoz emisyonları. 9
Şekil 3.2 : Benzen molekülü. 10
Şekil 3.3 : NO_x – PM bulutu. 12
Şekil 4.1 : Avrupa'daki emisyon standartları gelişim süreci. 14
Şekil 4.2 : NEDC ve WLTC araç hızı profili. 16
Şekil 4.3 : ELR testi hız ve yük profili. 18
Şekil 4.4 : ETC testi araç hızı Pprofili. 19
Şekil 5.1 : EGR sistemi çalışma prensibi. 24
Şekil 5.2 : SCR sistemi. 25
Şekil 5.3 : LNT'de gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar. 25
Şekil 5.4 : Yakıt enjektörü kesiti. 26
Şekil 5.5 : Ezilmiş akış oluşturan piston kesiti. 27
Şekil 5.6 : Havanın girdap oluşturması. 27
Şekil 5.7 : DPF'nin yapısı. 28
Şekil 5.8 : DPF kesiti. 29
Şekil 5.9 : Kırılmış bir DPF kesiti. 30
Şekil 5.10 : Euro 4 sistemi ve kullanılan egzoz emisyon kontrol yöntemleri. 30
Şekil 5.11 : SCR'li sistemler. 31
Şekil 5.12 : DPF'li LNT'li sistemler. 31
Şekil 6.1 : Üç yollu katalitik konvertör. 33
Şekil 6.2 : LNT katalisti. 34
Şekil 6.3 : LNT'nin sıcaklığa bağlı NO_x tutma kapasitesi. 36
Şekil 6.4 : LNT'nin sıcaklığa bağlı NO_x indirgeme verimi. 37
Şekil 6.5 : LNT doluluk oranının NO_x tutma verimine etkisi. 37
Şekil 6.6 : LNT'deki akış hızının NO_x tutma verimine etkisi. 38
Şekil 7.1 : LNT'nin model blokları. 42
Şekil 7.2 : Sıcaklığa bağlı NO molekülünün oksitlenme eğrisi. 42
Şekil 7.3 : NO molekülünün sıcaklığa bağlı oksitlenmesinin Simulink modeli. 43
Şekil 7.4 : LNT'nin 200°C'de maksimum tutabileceği NO_2 testi. 44
Şekil 7.5 : Sıcaklığa bağlı LNT'nin NO_2 depolama kapasitesi. 45
Şekil 7.6 : Maksimum NO_2 tutma miktarının Simulink modeli. 45
Şekil 7.7 : LNT'nin 280°C'de maksimum tutabileceği NO_2 testi. 46
Şekil 7.8 : LNT'nin 280°C'deki tutma verimi ve doluluk yüzdesi. 47
Şekil 7.9 : LNT'nin NO_2 tutma veriminin Simulink modeli. 47
Şekil 7.10 : LNT'nin NO_2 tutma veriminin 3 Boyutlu haritası. 47
Şekil 7.11 : LNT'nin 300°C'deki NO_2 tutma ve bırakma testi. 48
Şekil 7.12 : LNT'nin 300°C'deki NO_2 bırakma testi. 49
Şekil 7.13 : LNT'nin NO_2 bırakma hızının Simulink modeli. 49
Şekil 7.14 : LNT'nin NO_2 bırakma hızının 3 Boyutlu haritası. 50
Şekil 7.15 : 0.9 Lamda ve 300°C LNT sıcaklığında yapılan LNT rejenerasyonu. 51

Şekil 7.16 : LNT'nin NO_2 çevrim veriminin Simulink modeli. 52
Şekil 7.17 : LNT'nin NO_2 çevrim veriminin 3 boyutlu haritası. 52
Şekil 7.18 : LNT matematiksel modelinin girdi ve çıktılarıyla Simulink modeli. 53
Şekil 7.19 : LNT'nin Simulink modeli. 54
Şekil 8.1 : LNT'nin NEDC'deki doluluk oranı. 56
Şekil 8.2 : LNT'nin NEDC'de normalleştirilmiş NO_2 salınımı..... 56
Şekil 8.3 : NEDC'deki LNT rejenerasyonunda çevrilen normalleştirilmiş NO_2..... 57
Şekil 8.4 : LNT'nin içindeki NO_2 molekünün model ve gerçek sonucu. 57
Şekil 8.5 : Model sonucunun R^2 analizi..... 58

DİZEL MOTOR EMİSYON DÜZENLEMELERİ İÇİN LNT'NİN MATEMATİKSEL OLARAK MODELLENMESİ

ÖZET

Dünya'da dizel motorlu makina ve taşıt sayısı günden güne artmaktadır. Dizel motorlar ile ilgili ilk çalışma 1824 yılında yapılmıştır ve günümüze hala dizel motorların verimini arttırmak için çalışmalar yapılmaktadır. Aynı zamanda dizel yakıtının da setan sayısı, viskozite ve kükürt oranı özelliklerinde de çalışmalar yapılarak daha verimli dizel yakıtı üretme çalışmaları da devam etmektedir.

Dizel motor kullanımının yaygınlaşması beraberinde zararlı emisyon gazlarının kontrolü açısından da birçok düzenleme getirmiştir. Dizel motorda yanma sonucu oluşan karbonmonoksit, hidrokarbon, partikül madde ve azot oksitler insan sağlığına ve çevreye oldukça zararlıdır.

Dizel araçlardan çıkan zararlı egzoz emisyonları için ilk düzenleme 1968 yılında ABD'nin California eyalatinde yapıldı. Avrupa'da ise ilk düzenleme 1972 yılında yapılmıştır. Euro standartlarına ise 1992 yılında geçilmiştir. Türkiye ise Euro standartı emisyon seviyesi geçisini 2001 yılında Euro 1 ile başlatmıştır. Daha sonradan Avrupa'da sırasıyla Euro 2, Euro 3, Euro 4, Euro 5 ve Euro 6 emisyon seviyelerine geçilmiştir. Türkiye'de yatırım eksikleri sebebiyle 2009 yılında Euro 1'den Euro 4'e ancak geçilebilmiştir. Son yıllarda yaşanan dizel araçlardaki emisyon krizlerinden sonra Avrupa bu konudaki denetimi arttırarak RDE (Real Driving Emissions) testlerini Euro 6 emisyonları için zorunlu hale getirerek, dizel araçların her sürüş koşulunda emisyon limitlerini sağlaması zorunluluğunu getirmiştir.

Zararlı gaz emisyonlarını azaltmak için ilk çalışmalar yeni motor teknolojilerinin geliştirilmesi ile başladı. Yeni motor teknolojileri ise; yanma odası tasarımları, yakıt sistemleri, hava soğutmalı şarj, egzoz gazı resirkülasyonu geliştirmelerini kapsamaktadır. Geliştirilen motor tasarımları Euro 4 emisyon seviyelerini sağlamaya kadar yeterli olmayı başarabilmiştir. Euro 5 ve Euro 6 emisyon seviyelerinin zorunlu hale getirilmesiyle yeni motor teknolojilerinin yanında egzoz sisteminde de değişiklikler yapılmasını gerekli kılmıştır. Motordan çıkan zararlı emisyon gazları egzoza yerleştirilen katalistler ile Euro 6 seviyelerine getirilebilmektedir. Egzoz sisteminde emisyonların iyileştirilmesi için kullanılan en yaygın yöntemlerden biri SCR (Seçici Katalist İndirgeme) teknolojisidir. Ağır ticari araçlarda yaygın olarak kullanılan SCR sistemi motordan çıkan azot oksitleri azaltmak için kullanılır. Diğer bir yaygın yöntem olan sistem ise DPF (Dizel Partikül Filtre) teknolojisidir. DPF dizel araçlardan çıkan partikül maddeleri tutarak biriktirir ve sonrasında belirli periyotlar ile rejenerasyon yaparak içerisinde biriken partikül maddeleri yüksek sıcaklıkta yakarak filtreyi temizler. Dizel binek araçlarda ise SCR sistemi yerine LNT (Fakir Azot Oksit Tutucu) teknolojisi kullanılmaktadır. Binek araçlarda SCR sisteminin kullanılmamasının en önemli nedeni SCR'nin yatırım maliyetinin çok yüksek olmasıdır. LNT teknolojisi ise hidrokarbon ve karbonmonoksitleri oksitleyerek HC ve CO'nun azalmasını sağlar, oksitlenme reaksiyonlarının yanında LNT'nin en önemli özelliği motordan çıkan azot oksitleri indirgemektir. LNT'nin çalışma prensibi ise

motordan çıkan azot oksitleri belirli bir sıcaklık aralığında tutarak belirli periyotlarla rejenere ederek biriken azot oksitleri, azota indirgemesidir. HC ve CO'nun oksitlenmesi diğer bir katalist olan DOC (Dizel Oksidasyon Katalisti) ile de yapılabilmektedir. LNT'den farkı DOC'nun azot oksit çevrimi yapamamasıdır. DOC genellikle SCR'li sistemlerle beraber kullanılmaktadır.

Tez çalışmasında ise LNT'nin matematiksel modeli yapılarak, motor ve egzoz sistemindeki değişikliklerin yanında model yardımıyla LNT'nin maksimum verimde kullanılarak hem yakıt tüketimi hem de zararlı emisyon gazlarının azaltılması amaçlanmıştır.

LNT'nin matematiksel modelinin yapılabilmesi için öncelikle LNT'de gerçekleşen temel kimyasal reaksiyonlar araştırılmıştır. Temel kimyasal reaksiyonlar bloklar halinde düşünülerek dört farklı başlık altında toplanmıştır. LNT'de gerçekleşen tepkimeler ise NO oksitlenmesi, LNT'nin oksitlenme reaksiyonu sonucu oluşan NO_2 moleküllerinin tutulması, yüksek sıcaklığın ve LNT'nin kapasite limitine ulaşmasıyla tutulan NO_2 moleküllerinin salınması ve LNT rejenerasyonu sonucunda tutulan NO_2 moleküllerinin çevrimi. Bu dört tepkimenin matematiksel modeli yapılabilmesi için bu tepkimelerin hızlarının nelere ne kadar bağlı olduğu yapılan testler ile belirlenerek her modele ait girdiler belirlenmiştir. LNT'nin matematiksel modelinin yapılabilmesi için en önemli iki parametre LNT sıcaklığı ve LNT doluluk oranı olarak bulunmuştur. İki parametre haricinde LNT'ye giren NO, NO_2 miktarı ve LNT'nin girişindeki lamda değeri LNT modelin diğer iki girdisini oluşturmaktadır. LNT'nin doluluk oranının belirlenebilmesi için LNT'nin belirli sıcaklıklarda maksimum tutabileceği NO_2 miktarı hesaplanmıştır ve anlık olarak içinde NO_2 miktarıyla oranlanmasıyla LNT'nin doluluk oranı belirlenmiştir.

Yapılan testler sonucunda üç boyutlu haritalar oluşturularak matematiksel modeller oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller Matlab-Simulink programı kullanılarak birleştirilmiş ve tek bir model haline getirilmiştir.

Model validasyonunun yapılabilmesi için ise Euro emisyon standartlarında kullanılan NEDC testi kullanılarak model çıktıları emisyon cihazından ölçülen değerler ile karşılaştırılarak regresyon analizi yapılmıştır ve R^2, 0,9754 olarak bulunmuştur.

LNT'nin matematiksel olarak modellendip araçlarda bulunan motor kontrol ünitesine yazılımsal olarak gömülerek modelin çıktısını oluşturan LNT'nin içinde biriken NO_2 miktarı kontrol ünitesinde bir girdi olarak kullanılabilir. LNT'nin içinde biriken NO_2 miktarının bilinmesiyle LNT'nin hangi zamanda LNT rejenerasyonu yapması gerektiği kararı verilir. Böylece LNT doğru zamanda purge yaparak, yakıt tüketimini azaltır ve LNT'nin yüksek doluluk oranlarına ulaşmasıyla tutma verimi düşen LNT'yi purge etmesi gerektiğini söylerek çevreye yayılan zararlı egzoz emisyonlarını da azaltmış olur.

MATHEMATICAL MODELLING OF LNT FOR DIESEL ENGINE EMISSIONS REGULATIONS

SUMMARY

The number of diesel engine machines and vehicles in the world are increasing day by day. The first known work was done on diesel in 1824 and there are still scientific studies to increase the efficiency of the diesel engines. At the same time, efforts to produce more efficient diesel fuel by working on the cetane number, viscosity and sulfur ratio diesel fuel are also being worked through.

The widespread use of diesel engines has also brought many emissions regulations to control harmful emission gases. Carbon monoxide, hydrocarbons, particulate matter and nitrogen oxides which are formed as a result of diesel engine combustion are quite harmful to human health and environment.

The first regulation for harmful exhaust emissions from diesel vehicles was made in the US state of California in 1968. The first regulation in Europe was made in 1972. Euro standards were implemented at the begining of 1992. Turkey started the Euro standard emission level transition with Euro 1 in 2001. Later on in Europe, the emission levels of Euro 2, Euro 3, Euro 4, Euro 5 and Euro 6 have been applied respectively. Due to the lack of investment in Turkey, Euro 1 could only be implemented in Euro 4 in 2009. After the emission crises in diesel vehicles that have came over in recent years, Europe has made it mandatory to raise emission limits in every driving condition of diesel vehicles, raising the level of control in this area, making RDE (Real Driving Emissions) tests mandatory for Euro 6 emissions.

Initial initiative to reduce harmful gas emissions began with the development of new engine technologies. The new engine technologies are; combustion chamber designs, fuel systems, air-cooled charging, exhaust gas recirculation development. The engine designs develops were able to achieve Euro 4 emission levels. With the Euro 5 and Euro 6 emission levels becoming mandatory, it was necessary to make changes in the exhaust system as well as new engine technologies. The harmful emission gases emitted from diesel engine can be reduced to Euro 6 levels with catalysts that placed in the exhaust. One of the most common methods used to improve emissions in the exhaust system is SCR (Selective Catalytic Reduction) technology. The SCR system which is widely used in heavy commercial vehicles is used to reduce the nitrogen oxides from engine. Another common method is the DPF (Diesel Particulate Filter) technology. DPF accumulates particulate matter coming out from diesel vehicles and regenerates them with certain periods afterwards to clean the filter by burning accumulated particulate matter at high temperature. LNT (Lean NO_x Trap) technology is used instead of SCR system in diesel passenger cars. The most important reason that the SCR system is not used in passenger vehicles is that the investment cost of the SCR is very high. LNT oxidizes hydrocarbons and carbon monoxides to reduce HC and CO, besides the oxidation reactions, the most important feature of LNT is the reduction of the nitrogen oxides out of the diesel engine. The working principle of the LNT is adsorption mechanism of nitrogen oxides in certain temperature range and

purging them periodically to start conversion reaction from NO_2 to N_2. Oxidation of hydrocarbon and carbon monoxide can also be done with another catalyst, DOC (Diesel Oxidation Catalyst). The main difference between LNT and DOC is that DOC can not perform NO_2 conversion reaction due to lack of rhodium. Diesel Oxidation Catalyst is usually used with SCR systems.

In the thesis study, the mathematical model of LNT is aimed to reduce both fuel consumption and harmful emission gases by using LNT with maximum efficiency thanks to LNT mathematical model.

For the mathematical modeling of LNT, basic chemical reactions in LNT have been investigated firstly. The basic chemical reactions are grouped under four different headings in the form of model blocks. The reactions occurring in LNT are NO oxidation which is increasing by temperature and after decreasing with very high tempeatures just as oxidation reaction reaches equlibrium the other LNT reaction is the capturing of NO_2 molecules as a result of the oxidation reaction. This reaction is known as adsorption of NO_2 molecules. Adsorption mechanism is function of LNT temperature and LNT filling ratio. The third reaction which is occuring in LNT is releasing of retained NO_2 molecules by high temperature and capacity limit reach of LNT. This reaction is known as desortion of NO_2 which adsorbs by LNT. The last mechanism of LNT is conversion of NO_2 molecules as a result of LNT regeneration. LNT regeneration procedure is known as purge. In order to make a mathematical model of these four reactions, the inputs of each model are determined by testing LNT at different conditions. The two most important parameters for the mathematical modeling of LNT are LNT temperature and LNT filling ratio. Except the two parameters, the amount of NO, NO_2 entering the LNT and the lambda value at the inlet of the LNT constitute the other two inputs of the LNT model. In order to determine the filling ratio of LNT, the amount of NO_2 that the LNT can adsorb at a certain temperature is calculated and the filling ratio of LNT is determined by proportioning the amount of NO_2 in LNT. The model output is amount of NO_2 in LNT can be obtained after these four model work together.

As a result of these tests, 3D maps which are function of two inputs and 2D curves which are function of only one input were created and mathematical models were implemented. The generated models are combined using Matlab-Simulink and converted into a single LNT mathematical model. Simulink is used as a type fixed-step and ode3 (Bogachi-Shampine) solver for validation tests.

For the validation of the model, the NEDC test used which is used in Euro emission standards. To validate mathematical LNT model completely, at the end of the NEDC LNT rejeneration was performed and NO_2 conversion model can be compared with this purge. Regression analysis was performed by comparing the model outputs with the measured values from the emission device, and R^2 was found to be 0.9754.

The LNT can be mathematically implemented and embedded in the engine control unit software which is placed in the vehicles and model output amount of nitrogen dioxide accumulated in the LNT used as an input in the control unit. By knowing the amount of nitroden dioxide accumulating in the LNT, it is determined when the LNT should purge and convert nitrogen dioxide to nitrogen. Thus, the LNT performs purge correctly and reduces fuel consumption. By reaching high filling ratios of the LNT, the nitrogen dioxide adsorbing efficiency will decrease and the harmful exhaust emissions are released to the enviroment, in this situation LNT model can understand

that LNT needs to be purged and engine control unit requests a purge to convert adsorpted nitrogen dioxide molecules.

1. GİRİŞ

Alman mucit ve makina mühendisi Rudolf Diesel'in soyismi ile anılan dizel motor, kullanılan araç sayısı bakımından günden güne hızlı bir şekilde artmaktadır. Dizel motorun benzinli motora göre daha düşük yakıt tüketimine sahip olması insanları dizel motora yönlendirmiştir. Ancak artan dizel motorlu araç sayısı, zararlı emisyon gazlarını da beraberinde getirmiştir. Fazla hava ile çalışan dizel motor, insan sağlığına zararlı birçok yan ürün üretmektedir. Çevreye doğrudan verilen zararlı emisyon gazlarının düzenlemeleri için ilk olarak ABD'de daha sonra da Avrupa'da çalışmalar yapılmıştır. Bu emisyon düzenlemeleri ile yeri üretilecek araçların emisyon seviyeleri belirli bir limit içerisinde tutulması amaçlanmıştır. Yeni düzenlemeler ile dizel motorlarda birçok yenilik yapılmıştır. Dizel motorun yanma teknolojileri ve motor tasarımları geliştirilerek daha düşük emisyona sahip motorlar üretilmiştir. Emisyon limitlerinin daralmasıyla da egzoz sisteminde de değişiklikler yapılarak Euro 6 seviyesinde araç üretimi sağlanabilmiştir.

Egzoz sisteminde yapılan donanımsal değişikliklerden biri de binek araçlarda kullanılan LNT sistemidir. NO_x azaltmaya yarayan bu sistem Euro 5 ve Euro 6 emisyon seviyelerine sahip dizel araçlarda bulunmaktadır. LNT sisteminin efektif kullanabilmesi oldukça önemlidir. LNT efektif kullanıldığında zararlı emisyon gazları ve yakıt tüketimi en düşük seviyede tutulabilmektedir. Tezin amacı, LNT'yi en optimum şekilde kullanmayı sağlayacak olan bir matematiksel model geliştirmektir. Oluşturulan LNT'nin matematiksel modeli LNT'nin içinde biriken NO_2 miktarını tahmin ederek doğru zamanda kendini rejenere etmeyi sağlayacaktır. LNT'yi doğru kullanabilmeyi sağlayan matematiksel model, motor kontrol ünitesine yazılımsal olarak gömülerek araçlarda kullanılabilmektedir.

LNT'nin matematiksel modeli ise LNT'de gerçekleşen kimyasal tepkimelerin neye bağlı olduğu bulunup, bu girdilerin belirli aralıklarla değiştirilip kontrollü deney yapılmasıyla oluşturulmuştur. Kontrollü deneyler ile kimyasal tepkimelerin hızının hangi girdilere ne kadar bağlı olduğu matematiksel olarak ifade edilmiştir. Matematiksel formülasyonlar Matlab Simulink ortamına aktarılarak LNT'nin masaüstünde çalışması sağlanmıştır.

LNT'nin en optimum şekilde çalışması, yakıt tüketimi ve emisyon salımını bakımından pozitif bir etki göstermektedir. LNT'nin gereğinden fazla rejenerasyon yapmasını engelleyerek yakıt tüketimini azaltıp, LNT'nin NO_2 tutma kapasitesi dolduğu esnada rejenerasyon yaparak zararlı emisyon gazlarının egzozdan salınmasını engellemektedir.

Geliştirilen donanımsal ve yazılımlar yenilikler dizel motorlu araçların çevreyi daha az kirletlemesini sağlayarak, hava kirliliğine bağlı akciğer kanseri olasılığını günden güne düşürmektedir.

2. DİZEL MOTORLARIN TARİHİ GELİŞİMİ VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

2.1 Dizel Motorların Tarihi Gelişimi

Fransız bilim adamı Nicholas Leonard Sadi Carnot 1824 yılında dizel motorların çalışma prensibiyle ilgili ilk araştırmayı yaptı. Carnot 1832 yılında öldükten sonra dizel motorların çalışma ilkeleriyle sırasıyla Herbert Akroyd Stuart, Capitaine ve Rudolf Diesel ilgilenmiştir [1].

Carnot'un ilgisini o dönemde özellikle gazlar teorisi çekmektedir; buhar makineleri de genellikle su pompalamak, tahıl öğütmek gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktaydı. Bu makinelerin verimi düşük olmasına rağmen Sanayi Devrimi'nin beşiği olan İngiltere'de çokça kullanılmaktaydı. Hatta Carnot, Fransa'nın sanayi devrimi olarak İngiltere'den geri kalmasını buhar makinelerinin yeterince kullanılmamasından kaynaklandığını düşünmüştür.

Carnot çalışmalarını buhar makinelerindeki ısı ve enerji kaybına yoğunlaştırmadan önce bu konuda çalışanlar ilgilerini elde edilen iş ve harcanan enerjiye yoğunlaştırmıştı. Carnot ise buhar gücünün temel niteliğini ele alıp, bu süreçte hareket enerjisinin, buharın yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa geçerken elde edildiğini belirtmiştir. Sonuç olarak Carnot'un ifade etmek istediği, buhar gücü ile çalışan bir makinenin verimi buharın verimine değil, makinenin en yüksek ve en düşük sıcaklıklarına bağlıdır.

Carnot yaptığı bu çalışmaları yaşamı sırasında yayımlanan tek yapıtı olan "Ateşin Devindirici Gücü ve Bu Gücü Açığa Çıkaran Makineler Üzerine Düşünceler" adlı makalesinde yayımlanmıştır. Pierre Girard makalenin yayımlanmasından kısa bir süre sonra Paris'te gerçekleşen Bilimler Akademisi'nde Carnot'un makalesiyle ilgili uzun bir inceleme sunmuştur ve çok olumlu geridönüşler almıştır. [2].

Dizel motorların temellerini atan Carnot, havanın atmosferik basınç yerine yüksek basıcın sıkıştırıldıktan sonra yakıt odasına gönderilip yakıtın da bu aşamada yollanması gerektiğini önermiştir. Aynı zamanda çevrimin devamlılığı için yanma odası duvarlarının soğutulması gerekliliğini ortaya koymuştur [3].

1892 yılında Rudolf Diesel yanma odasına girecek olan havanın belirli oranlarda sıkıştırılarak elde edilen sıcaklığın, yakıtın tutuşma sıcaklığından daha yüksek olduğunu ispat ettiği makinesiyle ilk patentini almıştır. İlgili patent Şekil 2.1'de gösterilmiştir.


PATENT-URKUNDE

an Rudolf Diesel, Ingenieur, in Berlin

EIN PATENT ERTHEILT WORDEN.

GEGENSTAND DES PATENTES IST:

Arbeitsverfahren und Ausführungsart für Verbrennungskraftmaschinen.

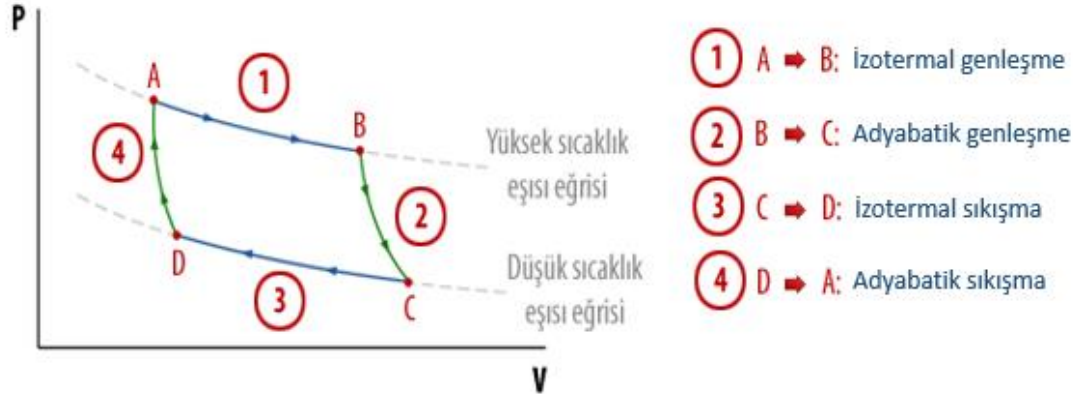
ANFANG DES PATENTES: 28. Februar 1892.

Berlin, den 23. Februar 1893.

KAISERLICHES PATENTAMT.

Şekil 2.1 : Rudolf Diesel'in patenti [1].

Rudolf Diesel'in tasarladığı bu makinenin temelinde havanın gerekli sıkıştırma oranına ulaştıktan sonra, yakıtın piston üst ölü noktaya geldiğinde püskürtülmekte ve oluşan ısı enerjisiyle genişleme olarak hareket enerjisi elde edilmektedir. Bu makinede Rudolf Diesel, Şekil 2.2'de gösterilen Carnot Çevrimi verimine ulaşabilmek için makinesinde gerçekleşen çevrimi iki sabit ısı (adyabatik) ve iki sabit sıcaklık (izoterm) eğrilerine uygun olacak şekilde piston duvarlarını mümkün olduğunca yalıtmıştır. Ancak havanın yüksek sıkıştırma oranlarına sıkıştırılmasıyla ve soğutulamayan pistonlar sebebiyle tasarlanan bu makine amacına ulaşamamıştır.



Şekil 2.2 : Carnot çevrimi [4].

Rudolf Diesel'in başarısız sonuçlanan ilk denemesinden sonra 1895 yılında çalışır hale getirdiği dört zamanlı dizel motorda önceki denemesine göre yaptığı farklılıklar şu şekilde olmuştur; silindirler artık su ile soğutuluyordu, silindirler içinde iyi bir karışım elde edebilmek amacıyla 35-40 atm basınca sıkıştırılan hava 70 atm basınçtaki yakıt ile karıştırılıyordu, yanma sonucunda da oluşan yanmış gazlar basınç ile dışarı atılıyordu. Tasarlanan bu motorun termik verimi %24 olarak belirtilmişti.

1897 yılında, Rudolf Diesel'in MAN firması ile yaptığı görüşmeler sonucunda dizel motorların ilk örneği üretilmiş oldu. Dizel motor ilk olarak yüksek güç gerekli olan makinelerde kullanılmaya başlansa da daha sonradan kara taşıtlarında da kullanılmaya başlanmıştır. Dizel motorlar 1939 yılına kadar gemilerde, inşaat makinelerinde, demiryolu taşımacılığında kullanılmıştır, daha az güç gereken yerlerde ise benzinli motorlar kullanılmıştır.

Günümüze kadar dizel motorlarda birçok değişiklik yapılmasına rağmen Rudolf Diesel'in temelleri üzerinden ilerlenildiği için bu motorlara hala dizel adı verilmektedir [1].

2.2 Dizel Motorların Çalışma Prensibi

Dizel motorda iş, dizel yakıt-hava karışımının yanma zamanında oluşturduğu basınç ile pistonun aşağıya itilmesi ve krank milinin döndürülmesi ile elde edilir. Bir dizel motor dört zamanlı (emme, sıkıştırma, yanma ve genişleme, egzoz) olarak çalışmaktadır.

2.2.1 Emme zamanı

Emme zamanında emme supabının açılmasıyla piston üst ölü noktadan alt ölü noktaya hareket eder. Pistonun bu hareketiyle silindir içindeki hacim artar ve basınç azalır. Basınç farkının etkisiyle basınçlandırılan hava silindir içine girmiş olur. Piston alt ölü noktaya geldiğinde silindir içindeki basınç 0,7 – 0,9 bar, sıcaklık ise 80-120 °C'dir. Emme zamanı tamamlandığında emme supabı kapanır.

2.2.2 Sıkıştırma zamanı

Emme zamanının tamamlanmasıyla alt ölü noktaya gelen piston sıkıştırma zamanında tekrar üst ölü noktaya hareket eder. Bu sırada emme ve egzoz supabları kapalıdır. Sıkıştırmanın etkisiyle piston içindeki havanın basıncı ve sıcaklığı artar. Sıkıştırma

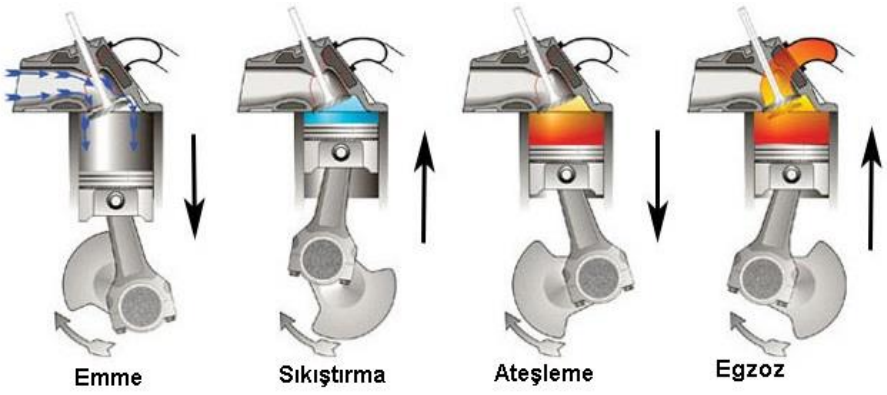
zamanı sonunda sıkıştırılan havanın sıcaklığı 600-900°C'ye basıncı ise 30-45 bar'a yükselir.

2.2.3 Yanma ve genişleme zamanı

Sıkıştırma zamanının sonunda basıncı ve sıcaklığı artmış havanın içine enjektörlerden yanma stratejisine uygun olacak şekilde pilot, main ve post enjeksiyonlar yapılır. Püskürtme işlemiyle yanma işlemi başlar ve açığa çıkan enerji pistonun aşağı itilmesini sağlar. Pistonun bu hareketiyle silindir içindeki gazların basıncı azalır. Yanma işlemi sırasında silindir içindeki sıcaklık 2000 °C'ye basınç ise 60-80 bar seviyelerine yükselir.

2.2.4 Egzoz zamanı

Yanma işlemi sonucunda piston alt ölü noktaya kadar gelir. Bir sonraki çevrime başlayabilmek içinse yanma sonucunda oluşan gazların silindir içinden dışarıya atılması gerekmektedir. Egzoz zamanında piston alt ölü noktadan üst ölü noktaya gelerek silindir içindeki gazlar egzoz supabından dışarıya atılır. Bu işlemin sonunda sıcaklık 80-120 °C'ye basınç ise 3-4 bar'a gelir [2]. Şekil 2.3'te de bir dizel motorun yanma zamanlarının görünümü mecvuttur.



Şekil 2.3 : Dört zamanlı dizel motorun gösterimi [5].

2.3 Dizel Yakıtının Genel Özellikleri

Dizel motorlarda kullanılan yakıt motorin olarak adlandırılır. Dizel yakıtı ham petrolün damıtma ürünlerinden biridir. Motorin, ham petrolün damıtılırken 200-300 °C'de kaynama sıcaklığı aralığında alınarak elde edilir. Dizel yakıtının en iyi yanma koşullarına ulaşması için aşağıda sıralanan özelliklere sahip olması beklenir.

2.3.1 Setan sayısı

Setan sayısı, sıkıştırma zamanı sonunda basıncı ve sıcaklığı artmış olan havaya enjekte edilen yakıtın kolayca tutuşabilmesini gösteren bir ölçüdür. Setan sayısı yüksek olan dizel yakıtı hızlı yanabilir ve kolay tutuşabilir özellik gösterir. Dizel motorlarda yakıt bir kıvılcım olmaksızın yüksek sıcaklık ve yüksek basıncın etkisiyle kendiliğinden tutuşur; setan sayısının önemi de bu aşamada devreye girer. Yakıtın istenilen zaman aralığında tamamen yanabilmesi motorun performansı için çok önemlidir. Eğer setan sayısı olması gerekenden az ise yakıt istenilen zaman aralığında yanamaz ve genişleme zamanında pistonlara yeteri kadar itme gücü sağlayamaz. Büyük dizel motorlarda setan sayısının yüksek olması beklenmez hatta bu motorlarda setan sayısının düşük olması motor için daha verimli olur. Küçük hacimli motorlarda setan sayısının yüksek olması gereklidir çünkü bu küçük hacimli motorlarda motor hızı büyük hacimli motorlara göre daha yüksektir ve yakıtın bu kısıtlı zaman (0,01 – 0,001 saniye) içerisinde tutuşabilmesi için setan sayısı yüksek olmalıdır. Sonuç olarak yakıttaki setan sayısı motorun hızına ve silindirlerin büyüklüğüne göre olmalıdır. Gerekmeyen durumlarda yüksek setan sayılı yakıt kullanılmamalıdır.

2.3.2 Viskozite

Viskozite, akışkanların akma eğilimine karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Kinematik ve dinamik olarak ikiye ayrılır. Dinamik viskozite, birbirine birim uzaklıkta bulunan iki düzlem arasında kalan birim miktardaki sıvının birim ivme ile kayması için gerekli olan kuvvete denir. Kinematik viskozite ise dinamik viskozitenin akışkanın yoğunluğuna oranına denir. Dizel yakıtlarının aynı zamanda yakıt sistemini yağlama özellikleri olduğundan viskoziteleri yüksek, enjektör deliklerinden püskürtülerek silindir içerisinde homojen bir şekilde dağılması gerektiği için de düşük viskoziteye sahip olmalıdır. Yüksek viskozitenin aynı zamanda diğer bir olumsuz özelliği ise yanma sonundaki zararlı emisyon gazlarını arttırmasıdır. Yüksek viskoziteli yakıtlar, silindir içerisinde kolay parçalanamaz ve silindir duvarlarına çarptıktan sonra parçalanırlar. Bu durum da yanma veriminin düşmesiyle ve egzoz emisyonlarının artmasıyla sonuçlanır [6]. Aynı zamanda silindir duvarlarından süzülen yakıt motor yağı içerisinde toplanarak yağın özelliğini bozar ve motoru yatak sarma tehlikesiyle karşı karşıya bırakır.

2.3.3 Isıl değer

Isıl değer, yakıtın birim kütle başına sahip olduğu enerjiyi gösterir. Yakıtın ısıl değerinin fazla olması hem yakıt tüketimini azaltma hem de enjeksiyon sisteminin kullanım ömrünü arttırma açısından önemlidir. Isıl değerin birimi kJ/kg veya kcal/kg olarak gösterilir. Yanma ürünlerinin belirli referans bir sıcaklığa göre entalpilerinin hesaplanıp tüketilen yakıt kütlesine bölünmesiyle elde edilir [7].

2.3.4 Özgül ağırlık

Özgül ağırlık, ham petrolden elde edilen ürünlerin tanınması için kullanılan bir özelliktir. 15,6°C'deki yakıtın yoğunluğunun, aynı sıcaklıktaki suyun yoğunluğuna oranı olarak tanımlanır. Özgül ağırlığı fazla olan yakıtlar yüksek karbon oranına sahiptirler ve ısıl enerjileri yüksektir [8].

2.3.5 Uçuculuk

Uçuculuk, yakıtların buharlaşma kabiliyetini ifade eder. Düşük sıcaklıklarda buharlaşabilen bir yakıtın uçuculuk özelliği fazladır. Dizel motorlarda yakıtların uçucu özellik göstermesi soğuk motorlarda ilk hareketi verirken dumansız bir yanma için önemlidir [9].

2.3.6 Kükürt oranı

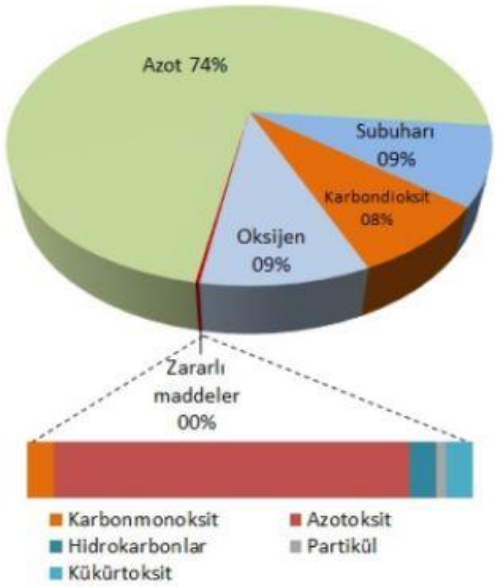
Günümüzde üretilen dizel yakıtında kükürt oranları oldukça düşürülmektedir. Ham petrolün damıtılması sırasında kükürtten yeterince arındırılamazsa, yanma sırasında kükürt O_2 ile birleşerek SO_2 veya SO_3 oluşturabilir. SO_3 gazı da H_2O ile birleşerek H_2SO_4 oluşturur. Sülfürik asit motor parçaları için şiddetli bir aşındırıcıdır ve zamanla silindir cidarlarını aşındırıp motorun arızalanmasına sebep olabilir [10].

3. DİZEL MOTORLARDA EGZOZ EMİSYONU OLUŞUMU

Yanma, yakıtın havadaki oksijen ile birleşerek enerji açığa çıkardığı kimyasal reaksiyona denir. Dizel motorlarında yakıt olarak kullanılan motorin $C_{17}H_{34}$ formülü ile gösterilir. İdeal bir yanmada oluşan yanma ürünleri; CO_2, H_2O ve N_2'dir. Eğer tam bir yanma olmamışsa ana yanma ürünlerinin yanında tam yanmamış ürünler de oluşmaktadır. Bir dizel motordaki yanma, denklem (3.1)'de ifade edilmiştir..

$$C_{17}H_{34} + 25{,}5(O_2 + 3{,}76N_2) \rightarrow PM + NO_X + CO_2 + CO + CH_4 + H_2O + N_2 \quad (3.1)$$

Dizel motorlarda egzoz emisyonları oluşumu motor tipine, kullanılan yakıta, emisyon kontrol sistemi olup olmamasına, yakıt kalitesi ve sürüş şartlarına göre değişiklik gösterebilir. Dizel motorlarda partikül madde (PM) ve NO_x emisyonları benzinli motora göre oldukça fazladır. Çünkü dizel motorların fakir hava ile çalışması ve yanma sıcaklıklarının yüksek olması NO_x ve PM oluşumunu arttırır. Buna karşın HC ve CO oluşumu benzinli motorlara göre daha düşüktür [1]. Bir dizel motorda egzoz emisyonları oranı Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Dizel motorlarda egzoz emisyonları [11].

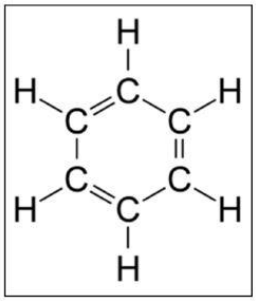
3.1 Karbonmonoksit (CO) Oluşumu

Karbonmonoksit, yanma sırasında karbon atomlarının oksijen ile buluşamama durumunda oluşur. O_2 ile buluşamama durumu O_2 yetersizliğinden veya silindir içinde bazı bölgelerin O_2 bakımından fakir kalması durumu olabilir. Dizel motorlar da benzinli motorlara göre daha fazla fakir hava ile çalıştığından dizel motorlarda benzinli motorlara göre yanma sonucunda oluşan CO miktarı daha azdır. Oluşan CO miktarı yanma veriminin bir göstergesidir. Yanma verimi yüksek olan motorlarda CO miktarı daha azdır. Yüksek CO oluşumuna neden olabilecek etkenler ise; tıkanmış veya tıkanmak üzere olan hava filtresi, yakıt sistemindeki arızalar, rölanti durumundaki düşük motor hızı ve egzoz hattında bulunan oksidasyon katalistindeki sorunlar [1]. Soğuk bir motorda da yüksek CO miktarı görülebilir çünkü egzoz hattında bulunan oksidasyon katalisti yeterli sıcaklığa ulaşmadan CO oksidasyonu yapamayabilir.

CO, insan sağlığı için oldukça zararlı bir gazdır. Renksiz, kokusuz ve tatsız olan karbonmonoksit solunduğunda zehir etkisi yaparak alyuvarlara oksijen bağlanmasına engel olur ve konsantrasyonuna ve maruz kalınan süreye bağlı olarak ölümle sonuçlanabilir.

3.2 Hidrokarbon (HC) Oluşumu

Hidrokarbonlar, egzoz emisyonunda birçok hidrokarbon çeşidinin birarada bulunmasıyla oluşur. Genel olarak kimyasal formülasyonu C_nH_m olarak ifade edilir [12]. Hidrokarbonlar yanma sırasındaki hava fazlalığı durumunda oluştuğu gibi yakıt fazlalığı durumunda da (zengin karışım) oluşur. Yanma sırasında çok fazla hava olduğunda yanma odasındaki sıcaklık düşer ve tam yanma olmaz bu durumda HC miktarı artar. Karışımın zengin olması durumunda da yetersiz oksijen olacağı için yine tam yanma olmaz ve HC miktarı artar. Bir hidrokarbon olan benzen molekülünün kimyasal yapısı Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : Benzen molekülü [13].

Hidrokarbon, emisyon kontrol yöntemleriyle egzoz hattında tekrar tepkimeye sokularak azaltılabilir. Bazı türleri insan sağlığına oldukça zararlıdır ve içten yanmalı motorlarda düşük seviyelerde tutulması insan sağlığı bakımından önemlidir.

3.3 Azot Oksit (NO_x) Oluşumu

Azot oksitler emisyon regülasyonu olarak azaltılması mecburi olan gazlardır. Azot oksitlerinin içinde Azot Oksit (NO), Azot Dioksit (NO_2) ve Nitröz Oksit (N_2O) bulunur. Yanma sonunda oluşan azot oksitlerin miktarı 50-1000ppm arasındadır. Bir dizel motordan çıkan azot oksitlerin %85'i NO olarak çıkar, %15'i ise NO_2 olarak çıkar. %1'den daha az miktarda da N_2O çıkar. NO gazı renksiz ve kokusuz bir gazdır. Yüksek basınç ve sıcaklık durumunda N_2, O_2 ile birleşerek NO oluşturabilir. Aynı zamanda azotun oksitlenme tepkimesi bir redoks tepkimesidir, düşük sıcaklık ve basınçta tepkime tersi yönde gerçekleşir. Azotun oksitlenmesi denklem (3.2)'de gösterilmiştir [12].

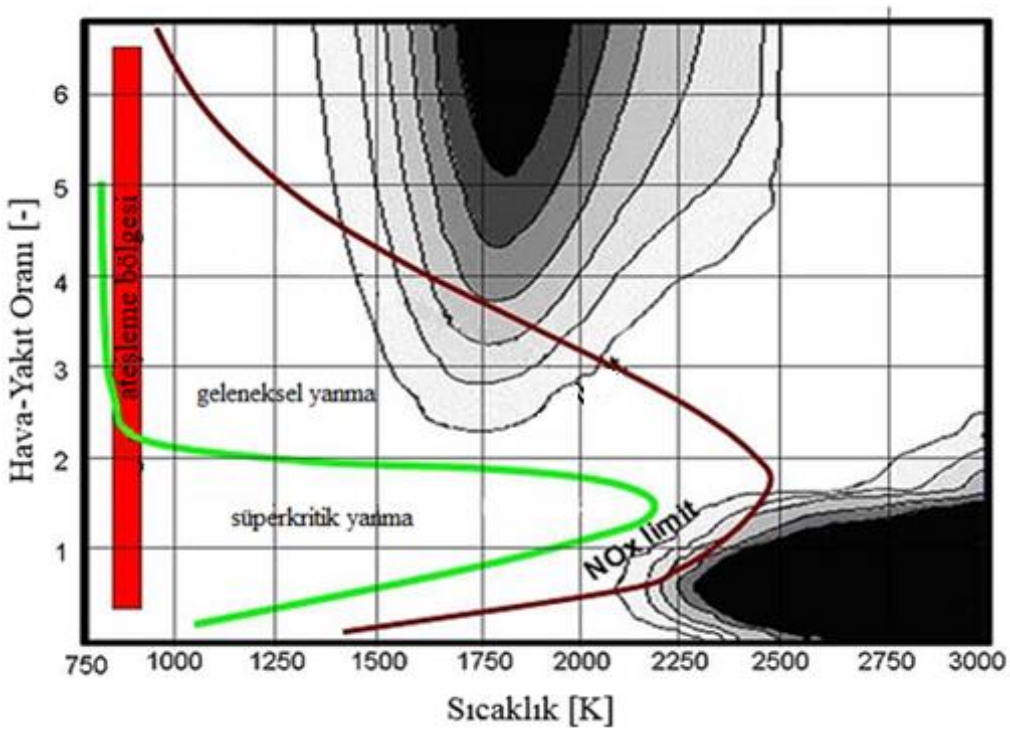
$$N_2 + O_2 \leftrightarrow 2NO \tag{3.2}$$

NO_x emisyonlarının oluşmasının en büyük sebebi silindir içindeki sıcaklığın 1800K üzerine çıkmasıdır. Fazla hava durumunda da NO_x emisyonları artış göstermektedir. Dizel motorlar benzinli motorlara göre daha fazla havayla çalıştığı için de dizel motorlarda NO_x emisyonları daha fazladır. Dizel yakıtı biyodizel yakıt ile karşılaştıracak olursak da biyodizelin NO_x emisyonları daha fazladır.

3.4 Partikül Madde (PM) Oluşumu

Partikül madde oluşumu, dizel yakıtının en karakteristik özelliklerinden biridir. Dizel araçlarda gözlemlenen siyah duman oluşumunun tek nedenidir. PM'nin kimyasal olarak tanımlanması oldukça zordur. PM'nin tanımlanması elde ediliş yöntemine göre değişiklik göstermektedir. Ezgoz gazından alınan numune hava ile seyreltilir ve filtre kullanılarak elde edilebilir. Bu durumda farklı tipte bir filtre kullanılması veya farklı seyreltme parametreleri kullanılması PM'nin kimyasal olarak tanımlanmasını etkilemektedir. Bu yüzden numune elde edilme yöntemlerinin standartlaştırılması büyük önem taşımaktadır. PM temel olarak çekirdek kısmında karbon ve etrafını çevreleyen organik ve inorganik bileşiklerden oluşur, bu bileşikler de karbon içerikli maddeler, hidrokarbonlar ve sülfatlardan oluşabilir [12]. Dizel motorda PM'nin

oluşması yakıt cinsine ve hava-yakıt (lamda) değerine bağlıdır. Yanma sırasında karbon atomları yeteri kadar oksijen bulamama durumunda is olarak egzozdan atılır [15]. Emisyon regülasyonlarının PM için düzenleme getirmesiyle birlikte emisyon kontrol yöntemleriyle PM miktarı, dizel partikül filtre aracılığı ile tutulup tekrar rejenere edilerek azaltılabilmektedir. Aynı zamanda hava-yakıt oranı ve silindir içi sıcaklık ile NO_x ve PM oluşumu azaltılabilir. Şekil 3.3'de NOx ve PM için uygun sıcaklık ve hava-yakıt oranı gösterilmiştir.



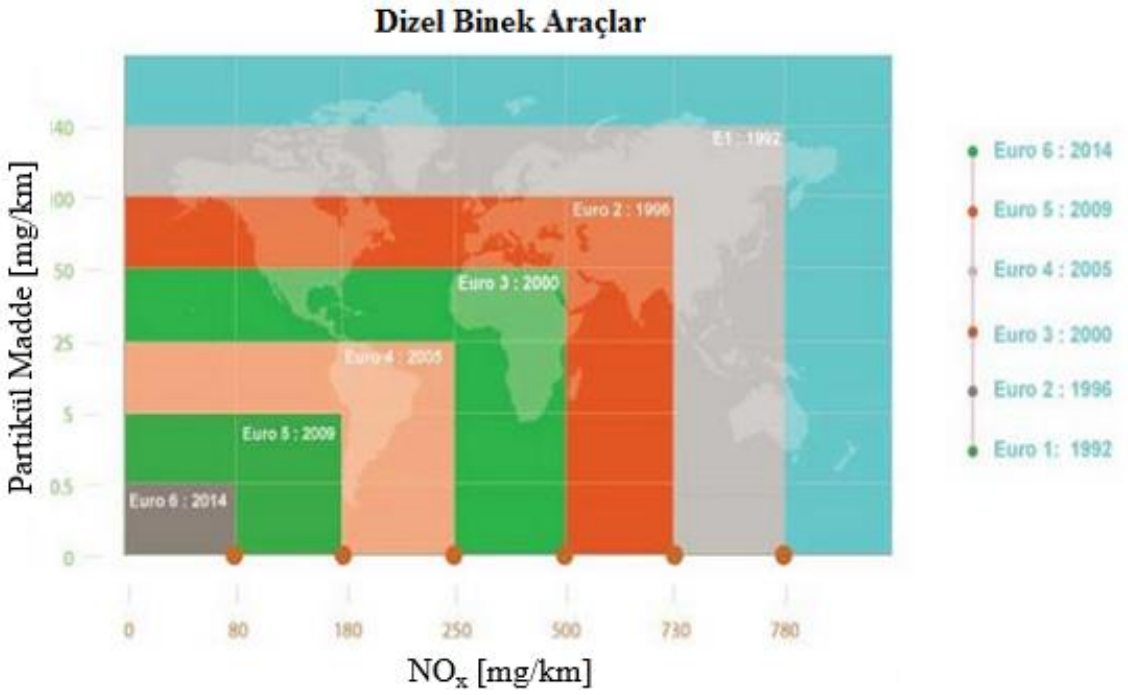
Şekil 3.3 : NO_x – PM bulutu [16].

4. DIZEL MOTORLARDA EMİSYON STANDARTLARI VE GELİŞİMİ

Dizel araçlardan çıkan zararlı egzoz emisyonları için ilk düzenleme 1968 yılında ABD'nin California eyaletinde yapıldı. Avrupa'da ise ilk sınırlama 1972 yılında yapılmıştır.

Günümüzde de Dünya'da farklı standartlarda birçok düzenleme uygulanmaktadır. Avrupa'da 1992 yılında Euro 1 standartı uygulanmaya başlandı. Türkiye'de ise Euro emisyon standartlarına geçiş 2001 yılında Euro 1 ile başlamıştır. Euro standartı uygulaması Avrupa'da 2005 yılına kadar sırasıyla Euro 2, Euro 3 ve Euro 4 olarak devam etmiştir. Ancak Türkiye'de direkt olarak Euro 1'den Euro 4'e geçiş yapılmıştır yatırım maliyetlerinin yüksek olması sebebiyle. 2008 yılında Resmi Gazete'de yayımlanan "Motorlu Araçların Motorlarından Çıkan Gazların Havayı Kirletmesine Karsı Alınacak Tedbirlerle ilgili Tip Onayı Yönetmeliğinde Değisiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik"e göre 1 Ocak 2009'dan itibaren Euro 4 olmayan araçların satışının yapılmayacağı kararı açıklanmıştır. Avrupa ise 2009 yılında Euro 5 standartına geçerek 2012 yılından itibaren Avrupa'ya Euro 4 araçların girmesini yasaklamıştır. Avrupa'nın getirdiği bu yeni kararla birlikte Türkiye'de otomotiv sektörü için yeni bir süreç başlamıştır. Avrupa 2014 yılında Euro 6 standartına geçerken, Türkiye'de ise Euro 6 standartına geçişler 2016 yılında başlandı [1].

Emisyon kontrolünde yaşanan bazı krizlerden sonra Avrupa Birliği kontrolü arttırıp sahte yazılım kullanımını engelleyebilmek adına Euro 6 standartı üzerine çalışmaları devam ettirmiştir. Bu standartlar Euro 6.1 Euro 6.2 Step 1, Euro 6.2 Step 2 olarak devam etmektedir. Şekil 4.1'de Avrupa emisyon regülasyonlarının gelişim süreci gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Avrupa'daki emisyon standartları gelişim süreci [17].

4.1 Emisyon Standartları

Egzoz emisyon gazı düzenlemeleriyle getirilen sınır değerlere dizel motorlu araçlar uygun olmak zorundadır. Getirilen limitler binek ve ticari araçlara göre farklılık göstermektedir. Aynı zamanda emisyon değerlerinin ölçüldüğü çevrim testleri de farklılık göstermektedir. Euro standartı olarak uyulması zorunlu olan limitler CO, HC, NO_x ve PM'ye getirilmiştir. Emisyon değerleri olarak uyulması gereken limitler Çizelge 4.1-4.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 : Dizel binek araçların Euro standartı emisyon limitleri [18].

Standart	CO [g/km]	HC+NO_x [g/km]	NO_x [g/km]	PM [g/km]
Euro 1	2,72	0,97	-	0,14
Euro 2	1,00	0,7	-	0,08
Euro 3	0,64	0,56	0,5	0,05
Euro 4	0,50	0,3	0,25	0,025
Euro 5a	0,50	0,23	0,18	0,0000225
Euro 5b	0,50	0,23	0,18	0,0000225
Euro 6	0,50	0,17	0,08	0,0000225

Çizelge 4.2 : Dizel ağır ticari araçların emisyon limitleri (sabit nokta) [19].

Standart	Tarih	Test	CO [g/kWh]	HC [g/ kWh]	NO_x [g/ kWh]	PM [g/ kWh]
Euro 1	1992, ≤85kW	UDC	4,5	1,1	8	0,612
	1992, >85kW	-R19	4,5	1,1	8	0,36
Euro 2	1996.1	UDC	4	1,1	7	0,25
	1998.1	-R19	4	1,1	7	0,15
Euro 3	1999.10	ESC	1,5	0,25	2	0,02
	2000.1	ELR	2,1	0,66	5	0,1
Euro 4	2005.1	ESC ELR	1,5	0,46	3,5	0,02
Euro 5	2008.1	ESC ELR	1,5	0,46	2	0,02
Euro 6	2013.01	WHSC	1,5	0,13	0,4	0,01

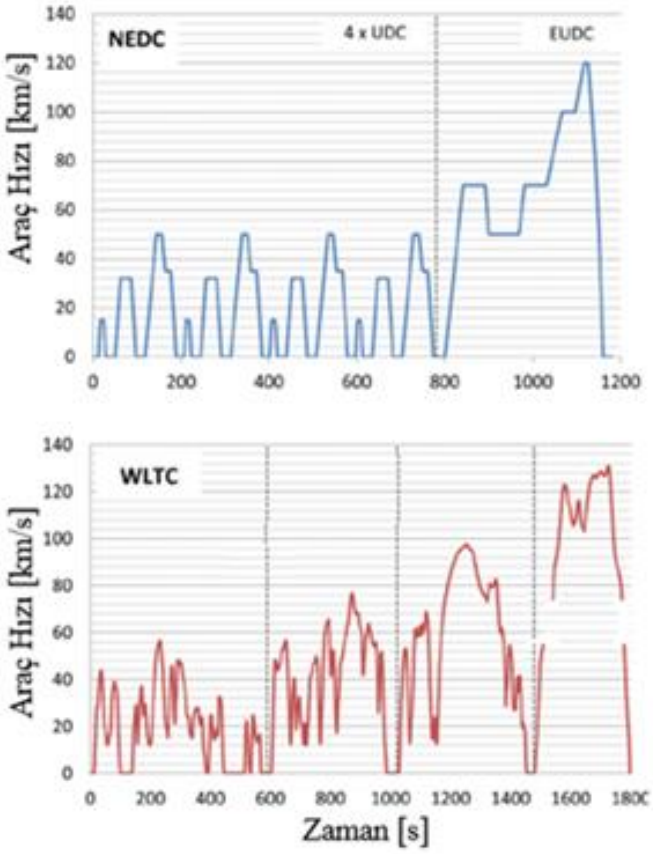
Çizelge 4.3 : Dizel ağır ticari araçların emisyon limitleri (transient) [16].

Standart	Tarih	Test	CO [g/kWh]	HC [g/ kWh]	NO_x [g/ kWh]	PM [g/ kWh]
Euro 3	1990.10	ETC	3	0,4	2	0,02
	2000.1		5,45	0,78	5	0,16
Euro 4	2005.1	ETC	4	0,55	3,5	0,03
Euro 5	2008.1	ETC	4	0,55	2	0,03
Euro 6	2013.1	WHTC	4	0,16[d]	0,46	0,01

d: Dizel motorlar için HC değeri.

4.2 Emisyon Test Çevrimleri

Emisyonlar NEDC (New European Driving Cycle) ile araç dinamometresinde yapılan test prosedürü ile ölçülür, Euro 6'nın gelmesiyle birlikte de WLTC (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle) kullanılmaya başlanmıştır. 2012-2017 yılları arasında da araç emisyonlarını kontrol edebilmek için RDE (Real Driving Emissions) test prosedürü devreye alınmıştır. RDE testi bir laboratuvar ortamında değil, araçlara emisyon cihazı bağlanarak yolda ölçüm yapılarak emisyonların ölçülmesi üzerine tasarlanmıştır. Binek araçlar için yapılan NEDC ve WLTC testlerinin araç hızı profilleri Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : NEDC ve WLTC araç hızı profili [20].

Ağır ticari araçların emisyon testleri binek araçlarınkine göre farklılık göstermektedir. Ağır ticari araçlarda WLTC testine ek olarak WHSC, UDC-R49, ESC, ETC ve ELR testleri de yapılır.

UDC-R49 testinde 13 farklı motor hızı ve tork noktasında sabit kalarak emisyon değerleri g/kWh olarak ölçülür. Bu noktaların ağırlıklı ortalamalara göre de kümülatif sonuç hesaplanır. Çizelge 4.4'de 13 test noktası ve bu noktaların ağırlık faktörleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.4 : UDC-R49 testi noktaları ve ağırlık faktörleri [21].

Test Noktası	Motor Hızı	Tork [%]	Ağırlık Faktörü
1	Rölanti	-	0,25/3
2	Maksimum Tork Hızı	10	0,08
3	"	25	0,08
4	"	50	0,08
5	"	75	0,08
6	"	100	0,25

Çizelge 4.4 (devam) : UDC-R49 testi noktaları ve ağırlık faktörleri [21].

Test Noktası	Motor Hızı	Tork [%]	Ağırlık Faktörü
7	Rölanti	-	0,25/3
8	Maksimum Güç Hızı	100	0,1
9	“	75	0,02
10	“	50	0,02
11	“	25	0,02
12	“	10	0,02
13	Rölanti	-	0,25/3

2000 yılından sonra Euro 3’e geçilmesiyle birlikte UDC-R49 testi yerine ESC (European Stationary Cycle) testi kullanılmaya başlandı. ESC testi de UDC-R49 testine benzer bir şekilde 13 farklı noktada sabit kalarak g/kWh biriminde ölçüm yaparak ağırlık ortalama hesaplanır. A,B ve C noktalarının hesaplanma yöntemi denklem (4.1), (4.2) ve (4.3)’de gösterilmiştir.

$$A = n_{en\ düşük\ motor\ hızı} + 0.25\left(n_{en\ yüksek\ motor\ hızı} - n_{edmh}\right) \quad (4.1)$$

$$B = n_{eymh} + 0.50(n_{eymh} - n_{edmh}) \quad (4.2)$$

$$C = n_{edmh} + 0.75(n_{eymh} - n_{edmh}) \quad (4.3)$$

En yüksek motor hızı maksimum güç alınan motor hızının %70’i alarak hesaplanırken, en düşük motor hızı ise maksimum güç alınan noktanın motor hızının %50’si alınarak hesaplanır. Çizelge 4.5’te de ESC testinin 13 farklı noktası ve ağırlık ortalaması gösterilmiştir.

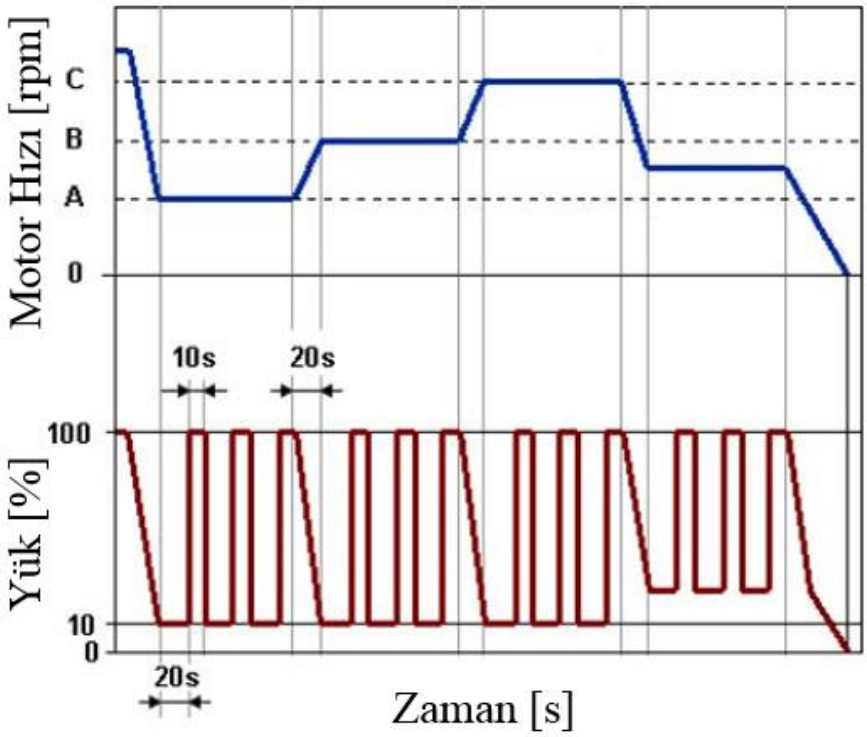
Çizelge 4.5 : ESC testi noktaları ve ağırlık faktörleri [22].

Test Noktası	Motor Hızı	Tork [%]	Ağırlık Yüzdesi [%]	Süre [dk]
1	Rölanti	0	15	4
2	A	100	8	2
3	B	50	10	2
4	B	75	10	2
5	A	50	5	2
6	A	75	5	2
7	A	25	5	2

Çizelge 4.5 (devam) : ESC testi noktaları ve ağırlık faktörleri [22].

Test Noktası	Motor Hızı	Tork [%]	Ağırlık Yüzdesi [%]	Süre [dk]
8	B	100	9	2
9	B	25	10	2
10	C	100	8	2
11	C	25	5	2
12	C	75	5	2
13	C	50	5	2

ELR (European Load Response) testi ağır ticari araçlarda Euro 3'ten itibaren kullanılmaya başlanmış olup PM ölçümü için yapılır. Üç farklı motor hızında ve yükte test yapılır. Dördüncü bir nokta ise sertifikasyon personeli tarafından seçilen yük ve hızda test edilir. ELR testi hız ve yük profili Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



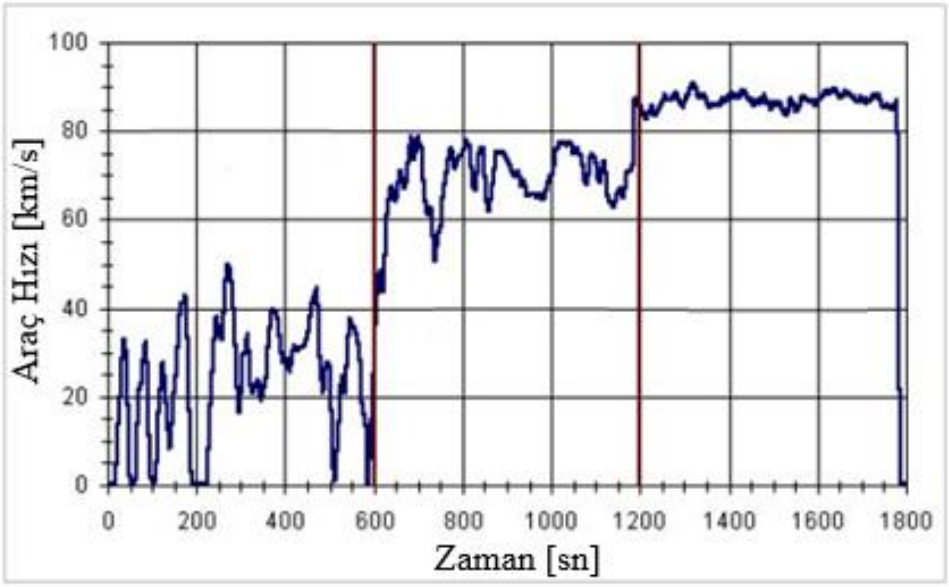
Şekil 4.3 : ELR testi hız ve yük profili [23].

WHSC (World Harmonized Stationary Cycle) testi ise ağır ticari araçlarda Euro 6'dan itibaren kullanılmaya başlanmıştır. UDC-R49 ve ESC testlerine benzer bir testtir. 13 farklı sabit noktada test edilir. Teste sıcak motorda başlanır. Test noktaları Çizelge 4.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6 : WHSC test noktaları ve ağırlık faktörleri [24].

Test Noktası	Motor Hızı [%]	Tork [%]	Ağırlık Faktörü	Süre [sn]
0	Motoring	-	0.24	-
1	0	0	0.17/2	210
2	55	100	0.02	50
3	55	25	0.1	250
4	55	70	0.03	75
5	35	100	0.02	50
6	25	25	0.08	200
7	45	70	0.03	75
8	45	25	0.06	150
9	55	50	0.05	125
10	75	100	0.02	50
11	35	50	0.08	200
12	35	25	0.1	250
13	0	0	0.17/2	210

.Ağır ticari araçlar için Euro 5'e kadar kullanılmış olan bir diğer transient test çevrimi ETC (European Transient Cycle), WLTC testi oluşturulduktan sonra kullanılmamaya başlanmıştır. Test üç farklı bölgeye sahiptir bu bölgeler şehir içi, şehir dışı ve karışık kullanımı temsil etmektedir. Toplam süresi 1800 saniye olan testin ortalama araç hızı 70 km/s'dir. Şekil 4.4'de ETC testinin hız profili gösterilmiştir.



Şekil 4.4 : ETC testi araç hızı profili [25].

5. DİZEL MOTORLARDA EMİSYON KONTROL YÖNTEMLERİ

Son zamanlarda dizel motor sayısının artması emisyon kontrol yöntemlerini de beraberinde getirdi. Dizel egzoz emisyonlarının ilk kontrol edilmeye başlandığı yıllarda emisyon limitleri motor ve yanma odası tasarımı, yakıt ve hava yolundaki tasarımlarla sağlanabilmekteydi. Ancak Euro 5'ten itibaren emisyonların kontrolü egzoz hattına yerleştirilen katalistler ile devam etti. Dizel egzoz emisyon kontrol yöntemleri üç grup altında toplanır; motor tasarım teknikleri, yakıt ve yağ teknolojileri, egzoz katalistleri. Çizelge 5.1'de gösterilen emisyon kontrol yöntemlerinden bazıları bugünün dizel motorlarında hala kullanılmakta bazıları ise geliştirme aşamasındadır.

Çizelge 5.1 : Emisyon kontrol yöntemleri ve emisyona olan etkileri [26].

Teknoloji	Emisyona Etkisi	Notlar
	Motor Tasarım Teknikleri	
Yakıt Sistemleri Turbo Şarj Sistemleri Yakıt Odası Tasarımı	%90 PM Azalışı %75 NO_x Azalışı HC,CO Azalışı	1990'ların sonuna kadar bu yöntemler emisyon kontrol yöntemlerinin ana kaynağıydı.
EGR (Egzoz Gazı Tekrar Sirkülasyonu)	%30-50 NO_x Azalışı	Binek araçlarda ilk kullanılmaya başlandı. 2007'den itibaren ağır ticari araçlarda da kullanılmaya başlandı.
İleri Yanma Stratejileri	Potansiyel çok düşük motor çıkış emisyonları	Yanma stratejilerinin gelişmesiyle egzoz katalistlerine olan ihtiyaç oldukça azalabilir.
	Yakıt ve Yağ Teknolojileri	
Yakıt ve Yağ	Modern motorlarda limitli bir pencerede emisyona etkisi bulunmaktadır.	Yakıtta bulunan kükürt ve yağ ile birlikte yağda bulunan inorganik kül ve fosforun kontrol edilmesi gerekir.
Alternatif Dizel Yakıtları	Yakıt tipine göre değişken etkisi bulunmaktadır.	Yararı uzun dönemde petrol rezervlerinin tükenmesiyle ortaya çıkacaktır.

Çizelge 5.1 (devam) : Emisyon kontrol yöntemleri ve emisyona olan etkileri [26].

Teknoloji	Emisyona Etkisi	Notlar
Yakıt Katkısı	Kaliteli yakıt ve modern motorlarda kullanıldıklarında emisyonlara küçük etkisi olmaktadır.	DPF için destekli rejenerasyon durumunda kullanılabilir.
Su Ekleme	%1 Su Ekleme İçin %1 NOx Azalışı	Denizcilik alanında kullanılma potansiyeli vardır.
	Egzoz Katalistleri	
DOC (Dizel Oksidasyon Katalisti)	HC, CO Azalışı	Euro 2-3 regülasyonlarında çokça kullanılmıştır ve kullanılmaya da devam edilmektedir.
DPF (Dizel Partikül Filtre)	%70-90 PM Azalışı	Tüm Euro 5 araçlarda kullanılmaktadır.
DPF (Dizel Partikül Filtre)	%70-90 PM Azalışı	Tüm Euro 5 araçlarda kullanılmaktadır.
SCR (Seçici Katalitik İndirgeme)	%90 NO_x Azalışı	Euro 5 ağır ticari araçlarda kullanılmaya başlanmıştır. Kısıtlı da olsa binek araçlarda da kullanılmaktadır.
LNT (Fakir NOx Tutucular)	Pasif Sistemlerde %10 NO_x Azalışı Aktif Sistemlerde %50 NO_x Azalışı	NOx azalışı bakımından uzun vadede yetersiz kalma riski bulunmaktadır.
PAC (Plazma Destekli Katalist)	%50 NO_x Azalışı	NOx azalışı bakımından uzun vadede yetersiz kalabilir.

5.1 NO_x Kontrol Yöntemleri

5.1.1 Motor tasarımıyla yapılan NOx kontrol yöntemleri

5.1.1.1 Hava soğutmalı şarj

Dizel motorlarda daha fazla güç elde edebilmek için yaygın bir metot olan havanın turbo tarafından basınçlandırılarak yanma odasına alınması aynı zamanda NO_x emisyonlarını arttırıcı etkiye sahiptir. Bu yöntem temel olarak silindir içine alınan hava miktarını arttırır bununla beraber kullanılan yakıt da artar. Fakat havanın basınçlandırılması sıcaklığını da yükseltir, sıcaklığın yükselmesi de NO_x konsantrasyonunu arttırır. Bu sorun kompresor sonrasına hava soğutmalı şarj sistemi konularak azaltılmaya çalışılır.

5.1.1.2 Yakıt sistemleri

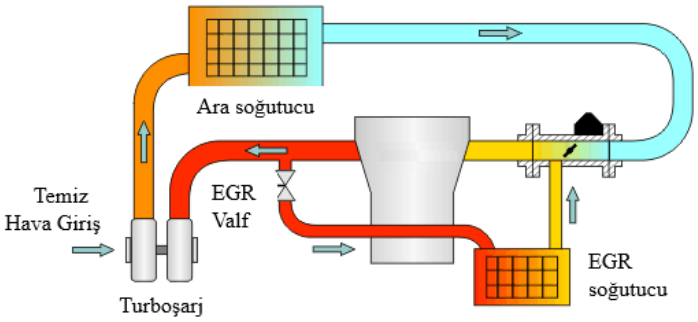
Egzoz emisyonları; enjeksiyon basıncı, yakıt püskürtme şekli, enjeksiyon miktarı ve zamanlaması değiştirilerek iyileştirilebilir. Ancak her yöntemin olumsuz bir etkisi vardır; yüksek maliyet ve düşük verim gibi. NO_x emisyonlarını azaltmak için rötarda yapılan enjeksiyonlar yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Rötarda yapılan enjeksiyon yanma sıcaklığı ve basıncını düşüreceği için NO_x emisyonlarını azaltır ancak yakıt ekonomisinin kötüleşmesine ve PM miktarının artmasına neden olur.

5.1.1.3 Yanma odası tasarımı

Yakıt-hava karışımının homojen olmasını sağlayan bir diğer yöntem yanma odası tasarımıdır. Yanma odasının şekli ve enjektörlerin konumu NO_x ve PM emisyonlarını azaltabilir. Ancak dayanıklılık problemlerini de beraberinde getirebilir. Sıkıştırma oranı emisyon kontrolünü etkileyen bir diğer motor tasarım parametresidir. Geliştirilmiş değişken sıkıştırma oranlarıyla emisyonlar azaltılabilir.

5.1.1.4 Egzoz gazı resirkülasyonu (EGR)

EGR teknolojisi, binek araçlardan ağır ticari araçlara kadar NO_x emisyonlarını azaltmak için kullanılan bir yöntemdir. Aynı zamanda EGR, dizel motorlarda yakıtın tutuşma özelliğini arttırarak pozitif bir etki de sağlamaktadır. EGR'ın çalışma prensibi ise egzoz gazının bir kısmını valf aracılığı ile tekrar silindir içine yollayarak, yanma sıcaklığını düşürür ve bu şekilde NO_x emisyonlarını azaltır [1]. Karbonmonoksitin tekrar silindir içine yollanması yanma odasındaki oksijen miktarını azaltarak yanma sıcaklığını düşürecektir. Ancak EGR hava-yakıt oranını etkilediğinden PM emisyonlarının artmasına neden olmaktadır. EGR sisteminin kullanımı ile yanma hızı da azalıp, püskürtülen yakıt gereken süre içinde yanamayacağından yakıt tüketimine olumsuz etkisi vardır. Kullanılan yakıtın setan sayısı arttırılarak, yakıtın daha hızlı tutuşması sağlanabilir. Dolayısıyla yakıt tüketimi kötüleşmemiş olur. Egzoz gazı resirküle edilip silindir içine verilmeden önceden bir soğutucudan geçirilerek soğutulur, bu işlem motorun volümetrik veriminin düşmemesini sağlar [1]. Şekil 5.1'de EGR sisteminin çalışma prensibi gösterilmiştir.



Şekil 5.1 : EGR sistemi çalışma prensibi [27].

5.1.2 Egzoz katalistleri ile yapılan NO_x kontrol yöntemleri

5.1.2.1 Seçici katalitik indirgeme (SCR)

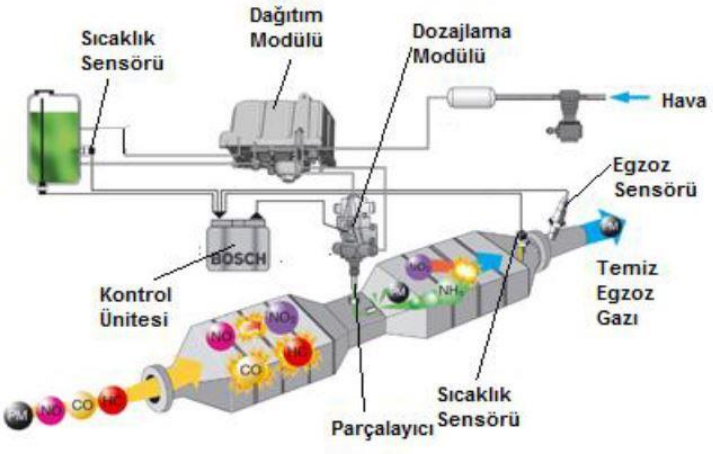
Seçici Katalitik İndirgeme ağır ticari araçlarda NO_x emisyonlarını azaltmak için kullanılan yaygın bir yöntemdir. Temel olarak, motordan çıkan NO_x emisyonları SCR'de tutulan amonyak ile tepkimeye girerek indirgenir. SCR'de biriken amonyak ise araçta bulunan bir adblue tankından enjektör ve pompa yardımıyla katalistten önce egzoz hattına püskürtülerek SCR'de tutulur. SCR sistemi ilk olarak 1970 yılında Japonya'da termik güç santralinde NO_x emisyonlarını azaltmak için kullanılmıştır [28]. SCR'de ilk olarak dozlanan adblue 200°C'de amonyağa indirgenir. Amonyak da üç tip kimyasal reaksiyona girer. Bu üç tip kimyasal reaksiyon üç farklı hızda gerçekleşir. Denklem (5.1) en hızlı gerçekleşen, denklem (5.2) hızlı gerçekleşen, denklem (5.3) ise çok yavaş gerçekleşen SCR reaksiyonu olarak bilinir.

$$NO + NO_2 + 2NH_3 \rightarrow 2N_2 + 3H_2O \quad (5.1)$$

$$4NO + O_2 + 4NH_3 \rightarrow 4N_2 + 6H_2O \quad (5.2)$$

$$2NO_2 + O_2 + 4NH_3 \rightarrow 3N_2 + 6H_2O \quad (5.3)$$

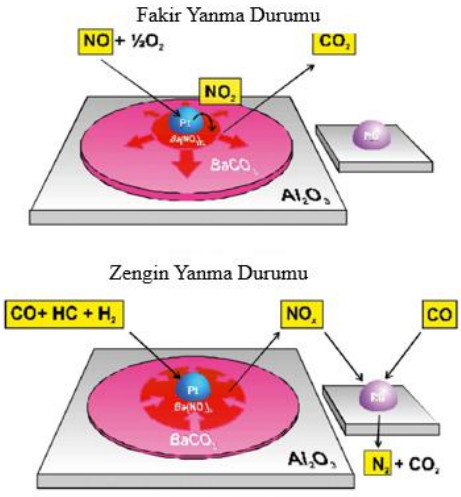
SCR sisteminin yatırım maliyetleri yüksek olduğundan dolayı binek araçlarda çok tercih edilmemektedir. Ancak emisyon regülasyonlarının gelişmesiyle birlikte bazı binek araçlarda SCR sistemine rastlanılmaktadır. SCR'de gerçekleşen NO_x çevriminin verimi çeşitli faktörlere bağlıdır, bu faktörler; SCR'nin malzemesi, SCR'nin egzoz gazı ile temas eden yüzey alanı, egzoz gazının SCR içinde kalma süresi, enjekte edilen adblue miktarı, SCR'de biriken amonyak miktarı ve SCR'nin sıcaklığı. Şekil 5.2'de SCR sisteminin şeması gösterilmiştir.



Şekil 5.2 : SCR sistemi [3].

5.1.2.2 Fakir NOx tutucu (LNT)

Fakir NO_x tutucular dizel binek araçlarda oldukça yaygın olarak kullanılır. LNT, fakir çalışma koşullarında (hava-yakıt oranının 1'den büyük olması) motordan çıkan NO_x emisyonlarını tutar ve zengin çalışma koşullarında ise (hava-yakıt oranının 1'den küçük olması) tuttuğu NO_x emisyonlarını kimyasal tepkimeye sokarak azota çevirir. Ağır ticari araçlarda kullanılmamasının sebebi LNT'de katalizör olarak kullanılan platin gibi metallerin bulunmasıdır. Ağır ticari araçlarda yatırım maliyetleri çok artmakta ve fizıbıl olmamaktadır. Şekil 5.3'de LNT üzerinde gerçekleşen reaksiyonlar gösterilmiştir.



Şekil 5.3 : LNT'de gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar [29].

5.1.2.3 Su ekleme

Yanma odasına su ilave edilmesi silindirdeki karışımı seyreltmenin başka bir yöntemidir. EGR'ın çalışma mantığıyla aynıdır. Yanma odasına gönderilen su ısıyı

emerek yanma sıcaklığını düşürür ve NO_x emisyonlarını azaltmış olur. Ancak su ekleme yöntemi CO ve HC emisyonlarını arttırır.

Su silindir içerisine üç farklı yöntemle ilave edilebilir; silindir içerisine doğrudan yapılan su enjeksiyonu, yakıtla birlikte bir su-yakıt emülsiyonu olarak ve emme manifoldundan buhar olarak. Su ekleme sistemine geçmek motor tasarımında büyük değişikliklere sebep olmaktadır; su rezervuarı, enjeksiyon hatları, pompalar, enjektörler gibi. Yatırım maliyetleri yanında birçok bakım ve korozyon sorunlarını da beraberinde getirir.

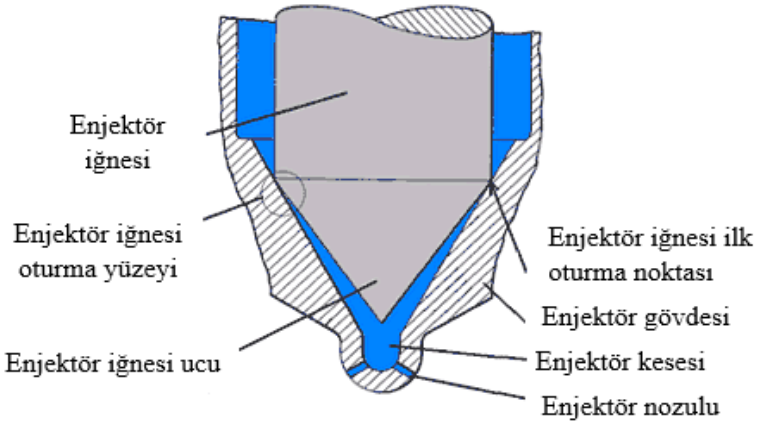
5.2 PM Kontrol Yöntemleri

5.2.1 Motor tasarımıyla yapılan PM kontrol yöntemleri

5.2.1.1 Yakıt sistemleri

Artan enjeksiyon basıncı, PM emisyonlarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Yüksek enjeksiyon basıncı, ateşleme öncesindeki yakıt-hava karışımının homojenize olmasını sağlar. Bunun sonucunda da daha az kurum üretilmiş olur. Aynı zamanda artan basınçlar yakıtın enjektör içinde daha az süre kalmasını sağlar böylece PM üretimi için zaman azalmış olur.

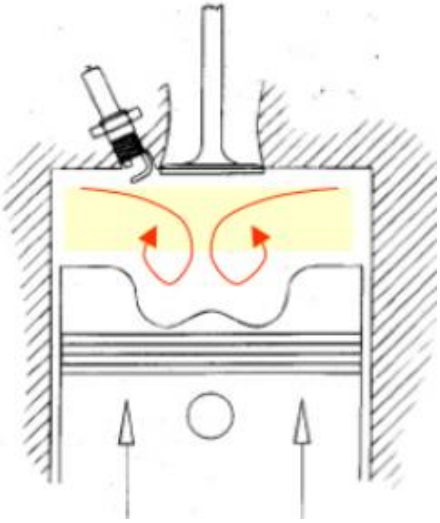
Enjektörlerle ilgili diğer bir tasarım parametresi ise enjektörde yakıt enjeksiyonu yapıldıktan sonra kalan yakıtın depolandığı kese hacmidir (sac volume). Eğer enjektörlerde bu hacim düşük tutulursa enjektörün içinde kalan yakıt miktarı azalmış olacaktır. Böylece enjeksiyon sonunda düşük yüklerde buradan kaçıp PM oluşmasına neden olan yakıt kaçağının miktarı engellenmiş olacaktır. Yakıt enjektörünün kesiti Şekil 5.4'de gösterilmiştir.



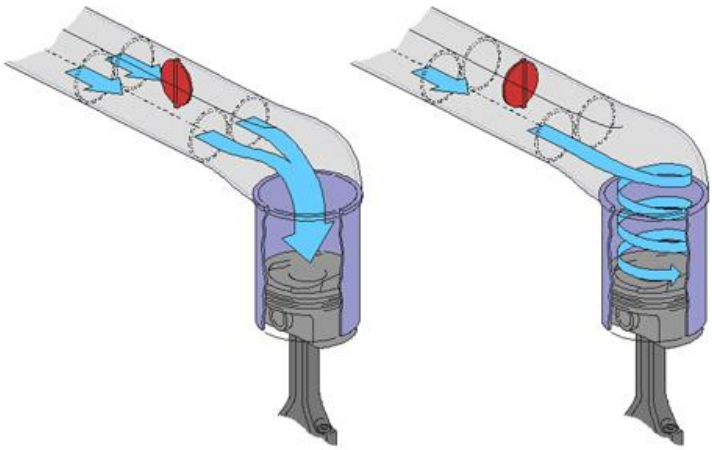
Şekil 5.4 : Yakıt enjektörü kesiti [30].

5.2.1.2 Yanma odası tasarımı

Silindir içerisinde türbülanslı akışı arttırarak hava-yakıt karışımını homojenize etmek, PM emisyonlarını azaltmaktadır. Yanma odasındaki türbülanslığı güçlendirmek de iki yöntemle yapılır; ezilmiş akış (squish flow) ve havanın girdap şeklinde silindir içerisine alınması (swirl). Ezilmiş akış, sıkıştırma zamanında pistonun "reentrant" denilen pistonun ucunun bir kase şeklinde boşluklu yapıda tasarlanması ile havanın sıkıştırılırken o boşluğa sıkışmasını sağlayarak yapılır, girdaplı akış ise havanın silindir içerisine direkt olarak verilmeyip hava girişinde yapılan tasarımlarla girdap yapacak şekilde verilmesine denir. Bu iki tasarım parametresi PM emisyonları azaltacak rolü oynar. Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da ezilmiş akış ve swirl teknolojileri gösterilmiştir.



Şekil 5.5 : Ezilmiş akış oluşturan piston kesiti [31].



Şekil 5.6 : Havanın girdap oluşturması [32].

5.2.1.3 Hava şarjı sistemi

PM emisyonlarının önemli bir miktarı motorun hızlanması sırasında oluşmaktadır. Hızlanma sırasında turbonun gerekli basıncı oluşturarak istenilen hava miktarını silindirin içine alana kadar geçen süre turbo gecikmesi olarak bilinmektedir. Hızlanma durumlarında turbo gecikmesi fazla olacağından PM emisyonları da fazla olacaktır. Turbo gecikmesini azaltmak için ise değişken geometrili turboşarj (VGT) kullanılarak motorun farklı operasyon noktalarına göre farklı turbo çalışma koşulları ayarlanabilir. Ya da elektrik motoru destekli turboşarjlar kullanılıp turbo gecikme süresi azaltılabilir.

5.2.2 Egzoz katalistleri ile yapılan PM kontrol yöntemleri

5.2.2.1 Dizel oksidasyon katalisti (DOC)

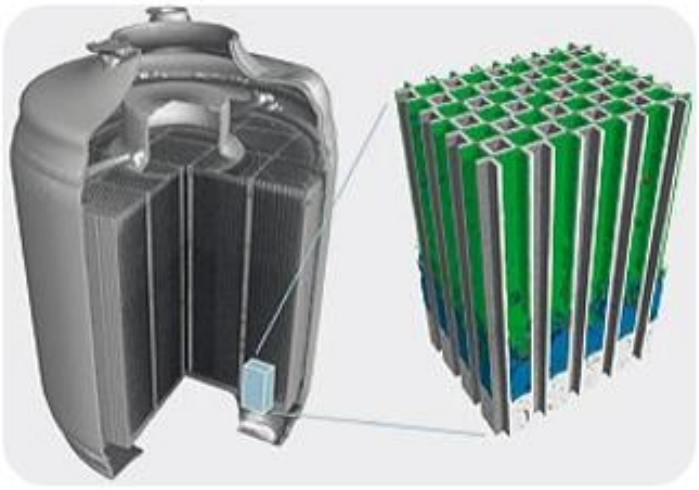
Dizel motorlarda oluşan PM emisyonlarının içeriğinde karbonlu partiküller, çözülebilir organik fraksiyon (SOF), sülfat ve absorbe edilmiş su bulunur. Dizel oksidasyon katalistleri ise PM'de bulunan SOF miktarını azaltabilir. Karbonlu partiküllerin azalmasında çok az payı vardır.

5.2.2.2 Dizel partikül filtre (DPF)

Dizel partikül filtre, motordan çıkan PM emisyonlarını azaltmak için kullanılır. Filtre malzemesi olarak genellikle seramik kullanılır. DPF'nin tasarımı bal peteğine benzerdir içerisinde birçok kanal bulunan DPF egzoz gazının üzerinden geçmesine izin verirken partiküler maddelerin filtrede tutulmasını sağlar. Şekil 5.7'de DPF'nin yapısı gösterilmiştir. Şekil 5.8'de ise DPF üzerinde egzoz gazı ve PM'lerin geçişi gösterilmiştir.



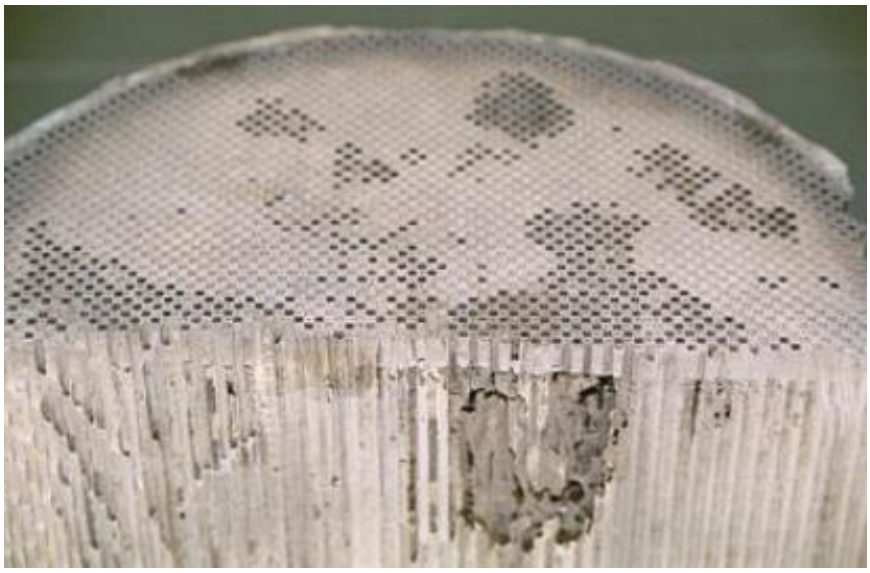
Şekil 5.7 : DPF'nin yapısı [33].



Şekil 5.8 : DPF kesiti [34].

DPF'de tutulan partikül maddeler bir süre sonra DPF'nin dolmasına sebep olur ve DPF'nin temizlenerek tekrar boş duruma getirilmesi gerekir. Bu işleme rejenerasyon adı verilir. DPF rejenerasyonu için iki yöntem kullanılır; birincisi pasif rejenerasyon olarak bilinir. DOC tarafından oksitlenen NO'lar NO_2'ye indirgenir. NO_2'ler ise 300°C ile 500°C arasında PM ile tepkimeye girerek devamlı bir yanma sağlar. İkinci yöntem ise aktif rejenerasyondur. Aktif rejenerasyon ise belirli periyotlarda DPF'nin sıcaklığının 600°C civarına yükseltilerek içinde tutulmuş olan PM'lerin yakılmasını ifade eder. DPF'nin sıcaklığını yükseltmek için ise kullanılan yöntemler; harici bir enjeksiyon sistemiyle egzoz hattına yakıt püskürtülerek, egzoz zamanında silindir içerisine gönderilen enjeksiyonların DOC'de ekzoterm oluşturarak ya da elektrikli ısıtıcılar kullanılarak gerçekleştirilen yöntemlerdir.

DPF'ler PM emisyonlarını azaltmak için kullanılan en efektif yöntemlerden biridir. %90'a varan PM tutma verimliliklerinden dolayı birçok dizel motorda kullanılmaktadır. DPF'lerin en büyük sorunu ise dayanıklılık ve yakıt tüketimine olan olumsuz etkisidir. Aktif rejenerasyon yapılan sistemlerde DPF'nin içinde biriken PM miktarının doğru modellenip, doğru yerde rejenerasyon yapması oldukça önemlidir. Eğer DPF içinde biriken PM doğru tahmin edilemezse yüksek PM miktarlarında kırılrejenerasyon yapıp kontrolsüz bir yanmaya sebep olabilir. Kontrolsüz bir yanma sonucunda da DPF kırılabilir. Şekil 5.9'da kontrolsüz bir yanma sonucunda kırılan bir DPF gösterilmiştir.

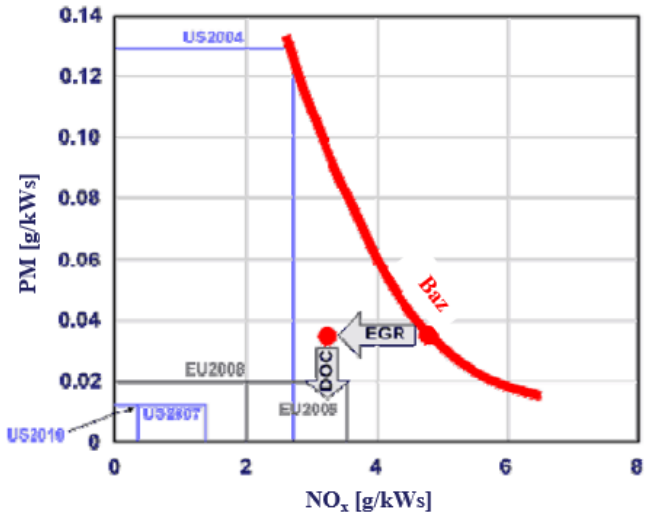


Şekil 5.9 : Kırılmış bir DPF kesiti [35].

5.3 Emisyon Kontrol Sistemleri

5.3.1 Euro 4 sistemler

Euro 4 emisyon regülasyonları genellikle EGR ve DOC kombinasyonuyla sağlanmaktadır. EGR, NO_x emisyonları azaltırken DOC ise HC ve CO emisyonlarını azaltmaktadır. Şekil 5.10'da PM ve NO_x dengesi gösterilmiştir, kırmızı çizgi ise motorun baz emisyon değerini temsil etmektedir.

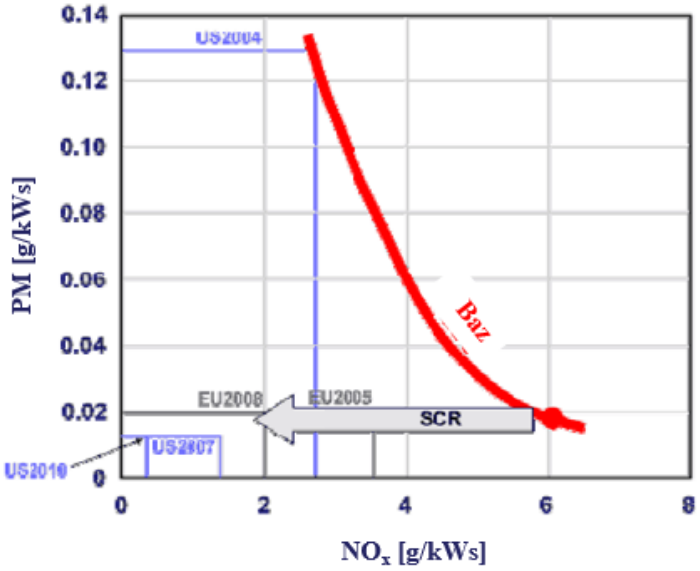


Şekil 5.10 : Euro 4 sistemi ve kullanılan egzoz emisyon kontrol yöntemleri [26].

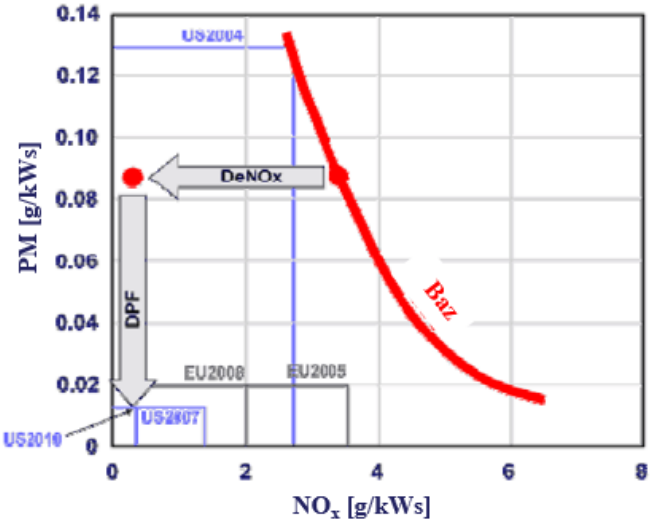
5.2.2 Euro 5 ve Euro 6 sistemler

Euro 5 ve Euro 6'nın zorunlu olmasıyla birlikte egzoz katalistleriyle yapılan emisyon kontrol yöntemleri zorunlu hale gelmiştir. Bu sistemler içinse iki farklı yöntem kullanılmıştır. Birincisi LNT ve DPF'li sistemler, ikincisi ise sadece SCR'li sistemler.

SCR'li sistemler NO_x emisyonlarını %90'a kadar azaltabileceği için baz emisyon eğrisinin PM'si çok düşük, NO_x'i çok yüksek bir noktadan DPF kullanmadan emisyonları sağlayabilmektedir. SCR'li sistemler Şekil 5.11'de gösterilmiştir. LNT'li sistemlerin NO_x çevrimleri ise SCR'li sistemlere göre daha düşüktür, bu yüzden baz emisyon eğrisinin PM'si daha yüksek, NO_x'i daha düşük bir noktasından ilerlenerek DPF ile emisyonları sağlanabilmektedir. DPF'li sistemler Şekil 5.12'de gösterilmiştir.



Şekil 5.11 : SCR'li sistemler [26].

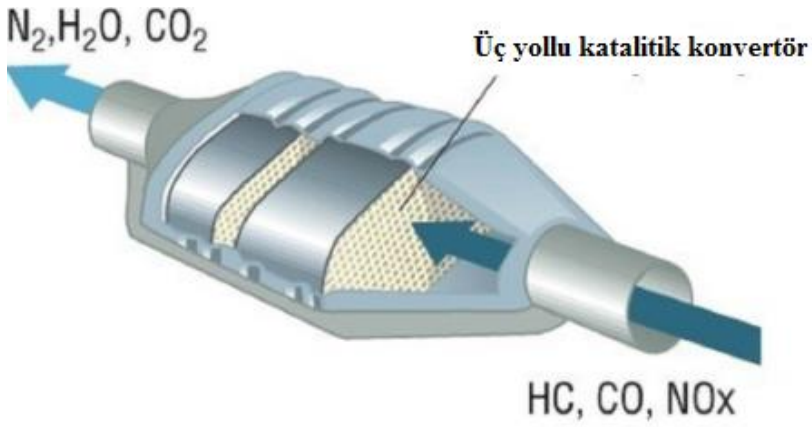


Şekil 5.12 : DPF'li LNT'li sistemler [26].

6. LNT TEKNOLOJİSİ

6.1 LNT'nin Çalışma Prensibi

İçten yanmalı motorlardan çıkan NO_x emisyonları stokiyometrik oranda çalışan motorlarda üç yollu katalitik konvertörler ile önlenmektedir. Üç yollu katalitik konvertörün çalışma prensibi ise içinde bulunan indirgeme ve oksidasyon katalistleri sayesinde motordan çıkan NO_x emisyonlarını indirgeyerek, CO ve HC'ları ise oksitleyerek temizler. Üç yollu olarak adlandırılmasının sebebi ise üç farklı emisyon olan NO_x, CO ve HC'yi temizlemesidir [36]. Üç Yollu Katalitik Konvertör Şekil 6.1'de gösterilmiştir.

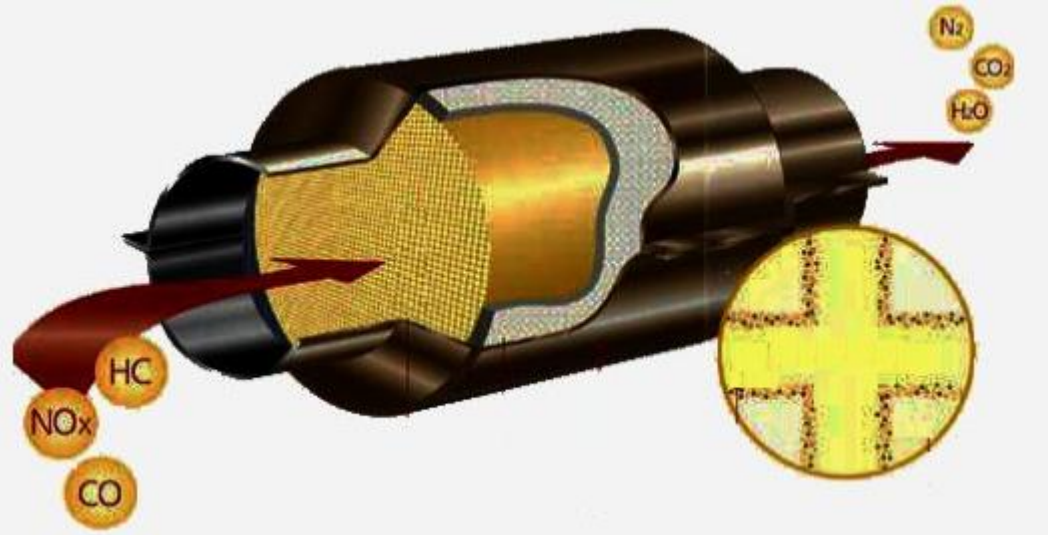


Şekil 6.1 : Üç yollu katalitik konvertör [37].

Ancak dizel motorlarda üç yollu katalitik konvertör kullanılmaz. Çünkü dizel motorlar benzinli motorlara göre daha fazla havayla çalıştığı için egzoz gazında çok fazla oksijen bulunur, oksijenli bir ortamda da NO_x emisyonları indirgenemez. Ancak CO ve HC'yi oksitleyen sistemler dizel araçlarda kullanılmaktadır.

Dizel motorlarda NO_x emisyonlarını indirgemek için kullanılan sistem Fakir NO_x Tutucu ismiyle bilinen LNT teknolojisidir. Diğer ismiyle NO_x Biriktirme İngirgeme (NSC) olarak da bilinir. LNT teknolojisinin temel mantığı normal yani fazla hava ile çalışma koşullarında egzoz gazındaki NO_x'i üzerinde biriktirerek, dolma kapasitesine yaklaştığında da periyodik olarak zengin çalışma koşuluna geçerek üzerinde biriktirdiği NO_x emisyonlarını indirger.

LNT'nin içerisinde petek yapısında çok küçük delikler bulunur. Seramikten yapılmış olan bu petek şeklindeki parçanın üzeri de katalizör denen elementler ile kaplıdır. Petek şeklinde tasarlanarak yüzey alanı arttırılan LNT katalizörler sayesinde egzoz gazından geçen NO_x emisyonlarını indirger. Katalizör olarak bulunan elementler ise platin, baryum ve rodyumdur. Platin, motordan çıkan NO gazını NO_2 gazına oksitler böylece LNT, NO_2 depolamaya başlar. LNT'nin NO'yu çok yavaş tuttuğu bilinmektedir. Baryum ise oksitlenme sonucu oluşan ve motordan direkt olarak çıkan NO_2 gazının LNT'ye tutulması sırasında görev alır. Rodyum ise zengin çalışma koşullarında NO_2'nin azot ve karbondioksit çevrilmesi tepkimesinde kullanılır. Şekil 6.2'de LNT'nin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 6.2 : LNT katalisti [38].

6.2 LNT'de Gerçekleşen Kimyasal Tepkimeler

LNT katalist teknolojisi temel olarak bünyesinde üç proses barındırır; fakir çalışma koşullarında NO_x emisyonlarının tutulması, zengin çalışma koşullarında NO_x emisyonlarının bırakılması ve son olarak bırakılan NO_x emisyonlarının N_2 ve CO_2'ye çevrilmesi.

6.2.1 NO_x emisyonlarının oksitlenmesi ve tutulması

NO_x emisyonlarının LNT tarafından tutulmasında baryum görev alır. Ancak öncesinde NO gazının NO_2'ye oksitlenmesi gerekmektedir. Bu oksitleme ile LNT yüksek tutma değerlerine ulaşabilmektedir. Bu aşamada oluşan tepkimeler denklem (6.1) ve (6.2)'de gösterilmiştir.

$$NO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow NO_2 \quad (6.1)$$

$$\frac{1}{2}BaCO_3 + NO_2 + \frac{1}{4}O_2 \rightarrow \frac{1}{2}Ba(NO_3)_2 + \frac{1}{2}CO_2 \quad (6.2)$$

6.2.2 NO_x emisyonlarının bırakılması

LNT'nin sonsuz bir NO_x tutma kapasitesi olmadığı için belirli zaman aralıklarıyla LNT'nin NO_x emisyonlarından temizlenmesi gerekmektedir. Bu işlemin adı LNT purge ya da LNT rejenerasyonu olarak bilinmektedir. NO_x emisyonlarının bırakılması motorun stokiyometrik oranının altına düştüğü anda gerçekleşir. LNT rejenerasyonunun ne zaman ve nasıl yapılacağı ise Motor Kontrol Ünitesi (ECU) olarak adlandırılan kontrol sistemiyle belirlenir. ECU'nun içinde bulunan LNT modeli sayesinde LNT'nin tutma kapasitesine yaklaştığı sinyali yollanır eğer purge için de uygun bir ortam varsa motorun çalışma koşulu değiştirilerek LNT'nin rejenere edilmesi için uygun ortam hazırlanır. Baryum tarafından tutulmuş olan NO_2 buradan ayrılır. Bırakılma aşamasında gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar (6.3) ve (6.4) numaralı denklemlerde gösterilmiştir.

$$Ba(NO_3)_2 \rightarrow BaO + 2NO_2 + \frac{1}{2}O_2 \quad (6.3)$$

$$BaO + CO_2 \rightarrow BaCO_3 \quad (6.4)$$

6.2.3 NO_x emisyonlarının çevrilmesi

Baryumdan ayrılan azot oksitler, eğer ortamda yeteri kadar HC, CO veya H_2 varsa kimyasal tepkimeye girerek azota dönüştürülür. İndirgeyici gazlardan en aktif olanı CO'dur. Azot oksitler bırakıldığında eğer ortamda yeteri kadar indirgeyici gaz yoksa ayrılan azot oksitler LNT'den çevrim yapılmadan ayrılmış olur ve bu da istenen bir durum değildir. NO_x emisyonlarının indirgenmesi sırasında gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar (6.5) ve (6.6) numaralı denklemlerde gösterilmiştir.

$$NO_2 \rightarrow NO + \frac{1}{2}O_2 \quad (6.5)$$

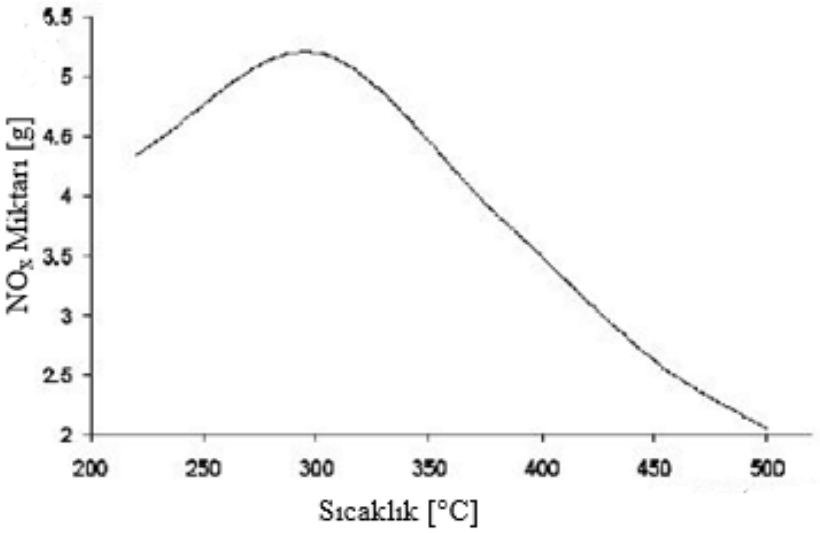
$$CO + NO \rightarrow CO_2 + \frac{1}{2}N_2 \quad (6.6)$$

6.3 LNT'nin Çalışma Koşullarını Etkileyen Faktörler

LNT'de gerçekleşen kimyasal tepkimelerin hızını etkileyen bazı faktörler vardır. Bunlar; LNT'nin sıcaklığı, LNT'nin doluluk oranı, egzoz gazının LNT'nin içinde geçirdiği zaman, motordan çıkan NO_x emisyonu miktarı, kükürt zehirlenmesi ve yaşlanma durumu gibi. Bu girdilerin değerine göre kimyasal tepkime hızı değişecektir.

6.3.1 LNT'nin sıcaklığı

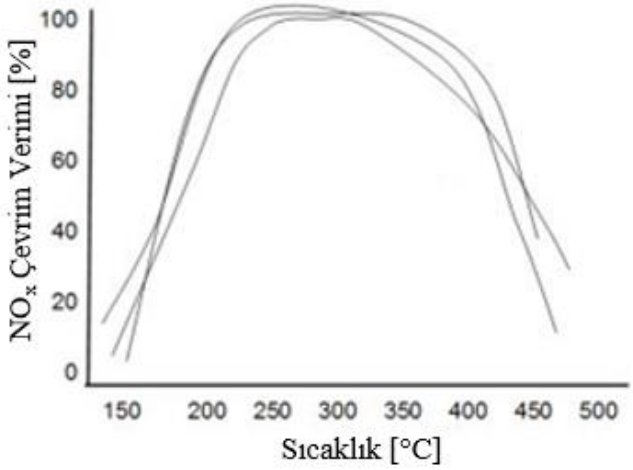
Sıcaklık kimyasal reaksiyonlarda tepkime hızını belirleyen en önemli faktörlerden biridir. LNT'de gerçekleşem kimyasal reaksiyonlarda da önemli bir performans parametresidir. LNT, düşük sıcaklıklarda motordan direkt olarak gelen NO_2 gazını tutar. Ancak düşük sıcaklıklarda NO oksitleme tepkimesi gerçekleşemediği için gelen NO gazları LNT üzerinden geçerek atmosfere karışır. Yüksek sıcaklıklada ise LNT'nin performansı yine azalır. LNT'nin NO_2 tutabileceği maksimum sıcaklık 600°C'dir. LNT'nin tutma kapasitesi olarak en verimli olduğu sıcaklık 300°C civarıdır. Ancak içinde bulunan baryum miktarı ve kaplama cinsine göre bu sıcaklıkta değişmeler olabilir. Şekil 6.3'de LNT'nin sıcaklığa bağlı olarak NO_x tutma kapasitesi gösterilmiştir.



Şekil 6.3 : LNT'nin sıcaklığa bağlı NO_x tutma kapasitesi [29].

Sıcaklığın tutma kapasitesine etkisi olduğu gibi NO_2 indirgeme tepkimesine de etkisi vardır. Düşük sıcaklık ve yüksek sıcaklıklarda LNT'nin tutma kapasitesi düşük olduğu gibi indirgeme tepkimesi verimi de oldukça düşüktür. LNT'nin en yüksek verimle

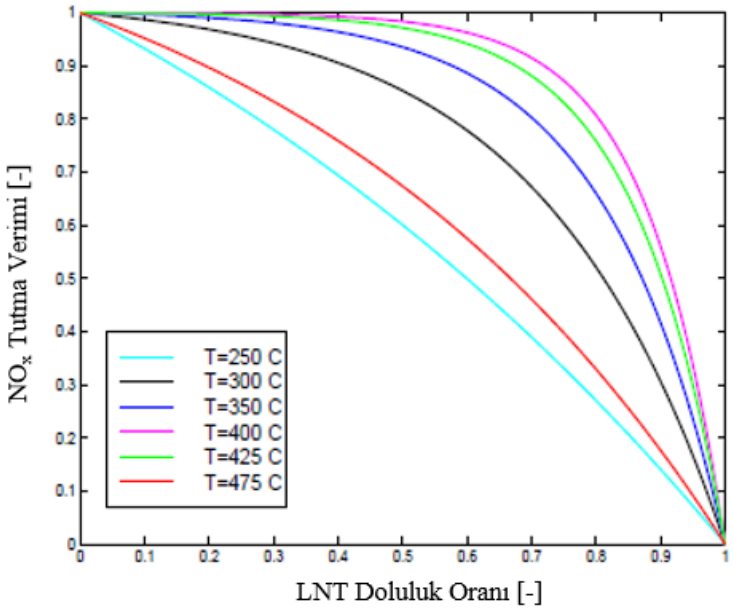
çevrim yaptığı sıcaklık aralığı 250°C ile 350°C arasıdır. Şekil 6.4.'de LNT'nin sıcaklığa bağlı NO_2 indirgeme verimi gösterilmiştir.



Şekil 6.4 : LNT'nin sıcaklığa bağlı NO_x indirgeme verimi [40].

6.3.2 LNT'nin doluluk oranı

LNT'nin doluluk oranı; LNT'de bulunan baryumların NO_x tutulan miktarının, tüm baryumların miktarına oranına denir. Eğer LNT tamamen boş ise LNT'nin doluluk oranı 0 olarak tamamen dolu ise 1 olarak belirtilir. Doluluk oranı azaldıkça LNT'nin NO_x tutma verimi artacaktır, LNT doldukça da bu verim azalacaktır. Nedeni ise LNT doldukça NO_2 molekülünün uygun baryum ile buluşma olasılığı azalacaktır. Şekil 6.5'te LNT'nin NO_x tutma verimi doluluk oranının fonksiyonu olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.5 : LNT doluluk oranının NO_x tutma verimine etkisi [39].

6.3.3 LNT'deki akış hızı

Egzoz'daki hacimsel akış hızı, kimyasal reaksiyonların hızının belirlenmesindeki en önemli dinamiklerden biridir. Ancak hacimsel akış hızı, LNT'nin içinden geçen akışın katalist ile temas etme hızı olarak belirlenir. Hesaplanışı (6.7) numaralı denklemde gösterilmiştir.

$$a = \frac{v * A}{V} \tag{6.7}$$

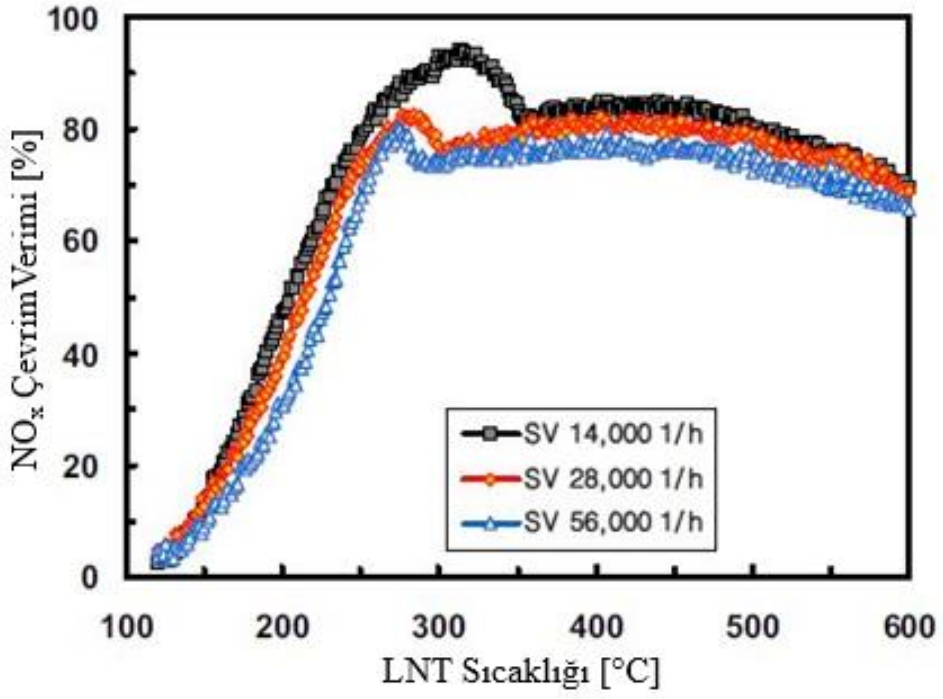
$a: Akışın\ hacimsel\ olarak\ LNT'ye\ temas\ hızı\ \left(\frac{1}{h}\right)$

$v: Akışkanın\ hızı\ (\frac{m}{s})$

$A: Kesitsel\ vektörel\ alan\ (m^2)$

$V: LNT\ hacmi\ (m^3)$

(6.7) numaralı denkleme göre LNT'den geçen egzoz gazının LNT ile temas etmesinin birimi 1/h olarak hesaplanmış olur. Eğer bu hız azalırsa LNT'nin NO_x tutma verimi artar çünkü egzoz gazının LNT'nin içinde geçirdiği zaman artacak ve kimyasal reaksiyonların gerçekleşme olasılığı daha yüksek olacaktır. Şekil 6.6'da sıcaklık ve akış hızına bağlı LNT'nin NO_x tutma verimi gösterilmiştir.



Şekil 6.6 : LNT'deki akış hızının NO_x tutma verimine etkisi [41].

6.3.4 Egzoz gazındaki O_2 derişimi

NO_x tutma verimi O_2 derişimiyle doğru orantılı olarak artmaktadır. Bunun nedeni NO'nun oksitlenerek NO_2'ye dönüşmesi ve LNT'de de NO_2'nin daha yüksek verimle tutulması olarak açıklanır. Oksitlenme tepkimesi de ortamda oksijen olduğu sürece daha hızlı gerçekleşecektir. Çizelge 6.1'de oksijen derişiminin NO_x tutma verimine etkisi gösterilmiştir.

6.3.5 Kükürt zehirlenmesi

Motor yağı ve dizel yakıtında bulunan kükürt, egzoz gazının içeriğinde kükürt olmasına sebep olur. Son zamanlarda yakıtlardaki kükürt oranı oldukça azaltılmış olsa da bazı bölgelerde hala kükürtlü yakıtlar kullanılmaktadır. Egzoz gazındaki kükürt ise LNT'deki aktif hücreler ile tepkimeye girerek LNT'deki baryumların üzerinde tepkime sonucu $BaSO_4$ olarak tutunur. NO_2 emisyonları ise kükürt zehirlenmesine maruz kalmış LNT'ye yüksek verim ile tutunamaz. Çünkü aktif hücreler azalmıştır ve kimyasal reaksiyonun gerçekleşme olasılığı düşmüştür. LNT'yi kükürt zehirlenmesinden arındırmak için desülfürüzasyon prosedürü uygulanır. Bu prosedür ise LNT'nin oldukça yüksek sıcaklıklarda (600-700°C) tutularak zengin ve fakir yanma periyodik olarak yapılarak uygulanır.

6.3.6 Katalist formülasyonu

LNT'nin içeriğinde bulunan platin, rodyum ve baryum metallerinin miktarları LNT'nin NO_x tutma ve NO_x çevrimi verimlerini belirlemede rol oynar. Daha düşük sıcaklıklarda NO'dan NO_2 oksitlenmesi gerçekleşmeye başlar ve LNT düşük sıcaklarda motordan çıkan NO_x'leri tutmaya başlar. Bu durum motor sıcaklığı soğuk olarak başlayan validasyon testlerinde oldukça iyimser bir tablo oluşturur.

7. LNT'NİN MATEMATİKSEL OLARAK MODELLENMESİ

7.1 LNT Matematiksel Model İhtiyacı

LNT'nin modellenmesinin amacı temel olarak gereksiz LNT rejenerasyonundan (purge) kaçınmaktır. Fazla miktarda yapılan LNT rejenerasyonunun motora birçok zararı vardır; yakıt tüketimini arttırır, motor yağındaki yakıt miktarını arttırır ve motor yağı daha hızlı viskozitesini kaybeder ve DPF'nin hızlı dolmasına yol açarak daha sık DPF rejenerasyonu yapmaya sebep olarak dolaylı yoldan yakıt tüketimi ve yağ viskozitesine bu da zarar verir.

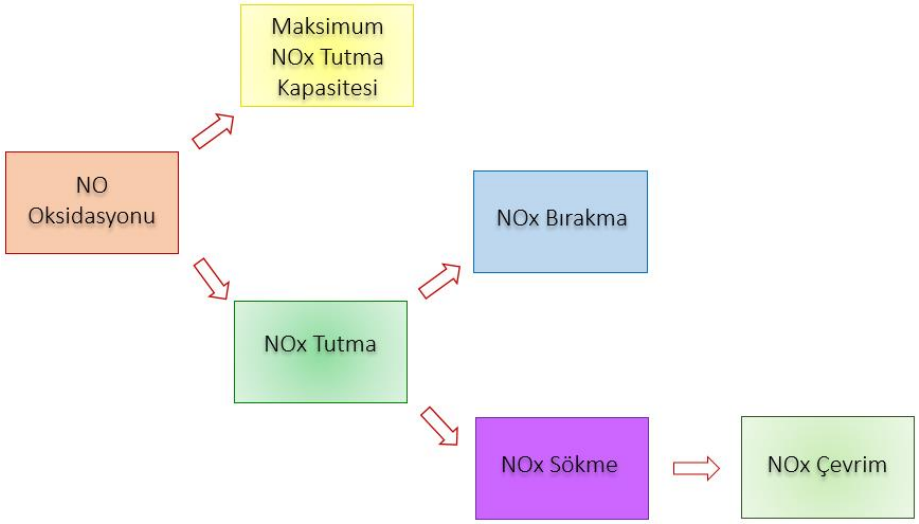
Araç yazılımına gömülü olarak bulunan LNT model, LNT'nin içerisindeki NO_x miktarını tahmin ederek doğru yerde ve doğru zamanda LNT rejenerasyonu yapmayı sağlar. Bu şekilde zararlı emisyon gazları en optimum şekilde kontrol edilerek LNT rejenerasyonunun da motora en az miktarda zararı olması sağlanmış olur.

LNT'nin matematiksel modelini oluşturabilmek için ise LNT'de gerçekleşen temel tepkimelerin üzerinde yoğunlaşmak gerekir. Temel tepkimeler belirlenerek, girdilerin mantıklı olarak değiştirilmesiyle sistemin buna nasıl tepki verdiği ölçülür ve matematiksel olarak ifade edilir. Her LNT tepkimesi farklı parametrelerle test edilip matematiksel olarak ifade edildikten sonra tüm tepkimeler sırası ile birbiri ile birleştirilir ve LNT'nin tüm matematiksel modeli çıkarılmış olur.

Oluşturulan LNT modeli, motor kontrol modülüne gömülerek belirlenen girdiler ile LNT rejenerasyon stratejisinin belirlenmesinde kullanılır.

7.2 LNT Model Tasarımı

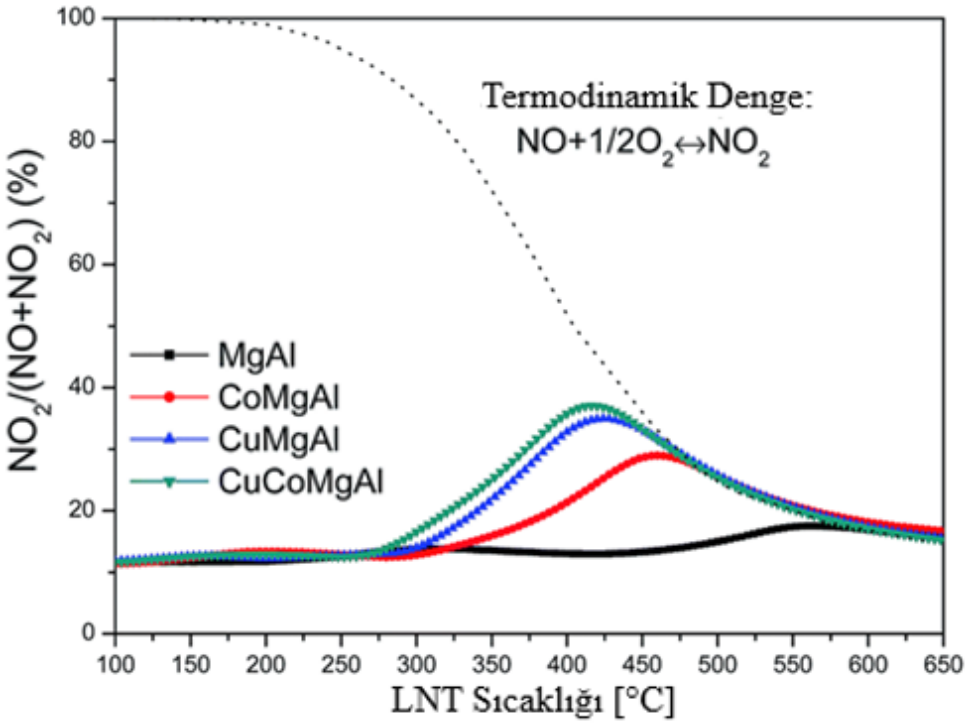
LNT'nin kümülatif bir matematiksel modelini elde etmek için temel olarak gerçekleşen tepkimeler farklı bloklar altında toplanır. Bu bloklar; maksimum NO_x tutma kapasitesi, NO_x tutma verimi, NO_x bırakma verimi, NO_x sökme verimi ve NO_x çevrim bloğu olarak 6 grupta toplanır. Şekil 7.1'de LNT'nin model blokları gösterilmiştir.



Şekil 7.1 : LNT'nin model blokları.

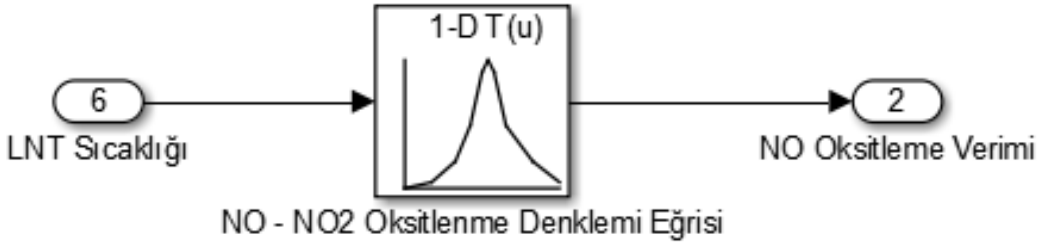
7.2.1 NO oksidasyonu

Denklem 7.1'de gösterilen NO'nun oksijen ile oksitlenerek NO_2 oluşturmasının matematiksel modelini motor testleriyle yapmak imkansıza yakındır. Oksitlenme modelinin yapılabilmesi için kimyasal dinamiklerin kontrollü bir ortamda test edilmesi gerekmektedir. Ancak LNT matematiksel modelinin de doğru çalışması için NO molekülünün NO_2 molekülüne oksitlenme verimi oldukça önemlidir. LNT modele bir oksitlenme verimi eklemek için Şekil 7.2'den yararlanıldı.



Şekil 7.2 : Sıcaklığa bağlı NO molekülünün oksitlenme eğrisi [42].

Şekil 7.2'de gösterilen verim grafikleri dört farklı katalist üzerinde yapılarak kaplamada kullanılan metallerin değiştirilerek bunların birbirine etkisine bakılmıştır. Ancak oksitlenme davranış olarak hemen hemen hepsinde aynı gelmektedir. Simulink modelimizde bu dört eğrinin ortalaması alınarak tek bir eğri modele girilmiştir. Şekil 7.3'de NO molekülünün sıcaklığa bağlı oksitlenme modelinin Simulink ortamına aktarılmış hali gösterilmiştir.



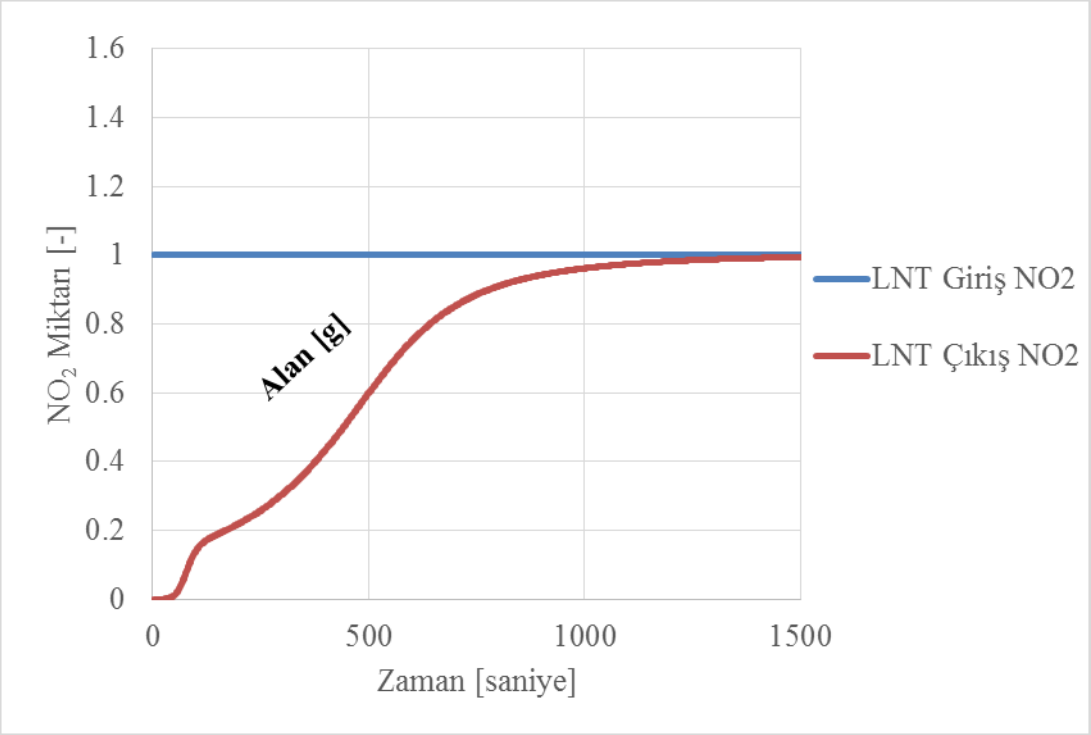
Şekil 7.3 : NO molekülünün sıcaklığa bağlı oksitlenmesinin simulink modeli.

7.2.2 Maksimum NO_x tutma kapasitesi

LNT'nin maksimum tutabileceği NO_2 miktarı katalistin sıcaklığına, yaşlanma durumuna ve sülfür zehirlenmesine bağlıdır. Maksimum depolama miktarı bu üç girdinin bir fonksiyonu olarak düşünülebilir. Oluşturacağımız matematiksel modelde LNT'nin sülfür zehirlenmesine uğramadığı ve bir yaşlanma durumu olmadığı kabulü yapılmıştır. Buna göre matematiksel modelde maksimum NO_x depolama miktarı sadece katalist sıcaklığına bağlı olarak tasarlandı.

LNT'nin sıcaklığa bağlı bir bilinmeyenli, ikinci dereceden bir fonksiyonunu oluşturabilmek için, sekiz farklı sıcaklık noktası belirlendi ve bu sıcaklık noktalarında sabit bir şekilde durarak LNT'nin içinde biriken NO_2 miktarı LNT'nin giriş ve çıkışına koyulan emisyon cihazları NO_2 ölçümü alınarak hesaplandı. LNT'nin giriş ve çıkışındaki NO_2 miktarı eşitleninceye kadar her sıcaklık noktasında sabit olarak test edildi. Elde edilen sonuç ilgili sıcaklık noktasının maksimum depolayacağı NO_2 miktarını vermektedir.

Şekil 7.4'de 200°C'de LNT'nin maksimum tutabileceği NO_2 miktarının modellenebilmesi için yapılan test gösterilmiştir.

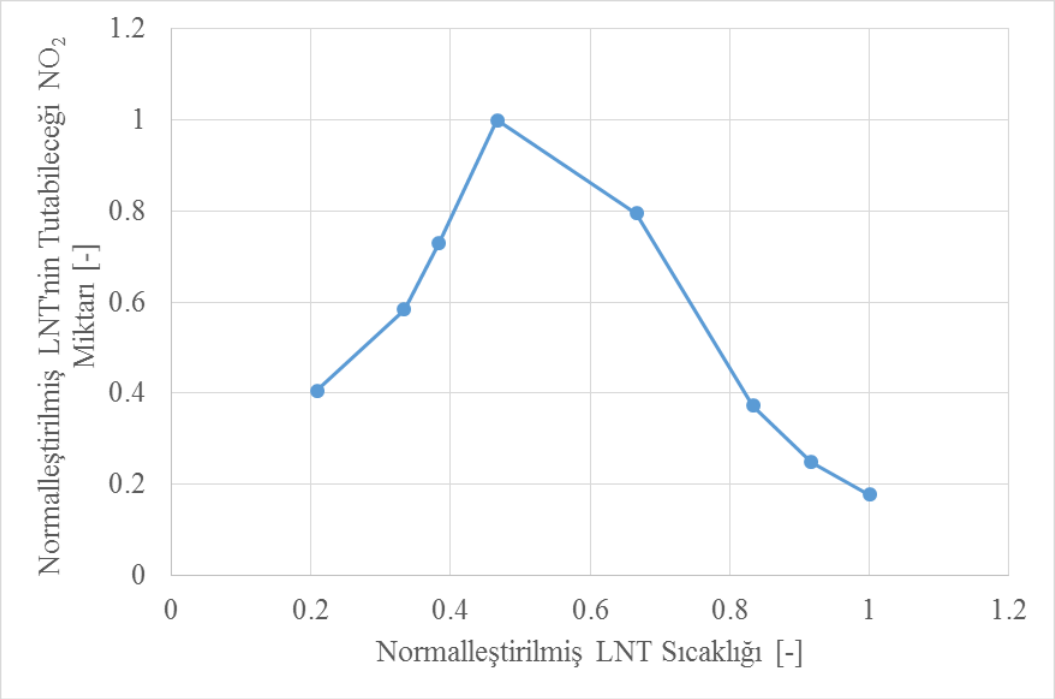


Şekil 7.4 : LNT'nin 200°C'de maksimum tutabileceği NO_2 testi.

LNT'nin çıkışında ölçülen NO_2 miktarı girişinde ölçülen NO_2 miktarına ulaştığında test durdurulur ve Şekil 7.4'de gösterildiği gibi kırmızı ile mavi alan arasındaki bölgenin alanı hesaplanarak 200°C'deki maksimum depolama miktarı hesaplanmış olur.

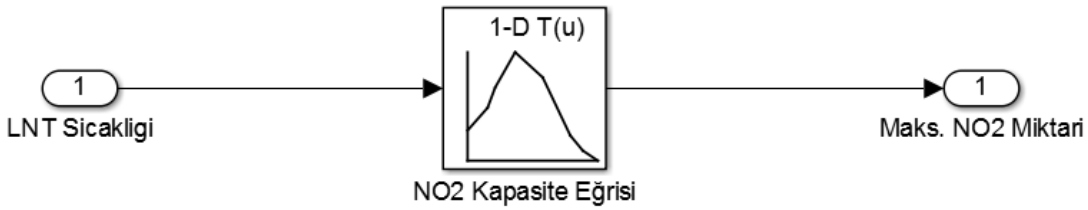
Bu test aynı şekilde toplamda sekiz farklı sıcaklık noktasında tekrarlanarak bu noktalar için de LNT'nin maksimum tutabileceği NO_2 miktarı hesaplanmıştır.

Elde edilen sekiz farklı maksimum NO_2 tutma değeri ile LNT'nin maksimum NO_2 tutma karakteristiği sıcaklığın bir fonksiyonu olarak modellenmiştir. Elde edilen bu değerler ile LNT'nin sıcaklığa bağlı NO_2 tutma karakteristiği Şekil 7.5'de gösterilmiştir.



Şekil 7.5 : Sıcaklığa bağlı LNT'nin NO_2 depolama kapasitesi.

Oluşturulan eğri Simulink ortamına aktarılarak bu modelin çıktısı, LNT'nin doluluk oranının belirlenmesi için gerekli girdiyi oluşturacaktır. Maksimum NO_2 tutma miktarının Simulink ortamına aktarılmış hali Şekil 7.6'da gösterilmiştir.



Şekil 7.6 : Maksimum NO_2 tutma miktarının Simulink modeli.

7.2.3 NO_2 tutma

LNT'nin NO_2 tutma verimi şu şekilde tanımlanabilir; LNT'ye giren NO_2'nin yüzde kaçıncının LNT'nin içinde kalacağını belirleyen parametreye NO_2 tutma verimi denir. Tutma verimi ise; LNT'nin sıcaklığına, LNT'nin doluluk oranına, LNT yaşlılık durumuna ve LNT'nin sülfür zehirlenme durumuna bağlıdır. Ancak LNT'yi temiz ve yeni bir LNT olarak kabul ettiğimiz için yine aynı şekilde sülfür zehirlenmesi ve yaşlılık durumu ihmal edildi.

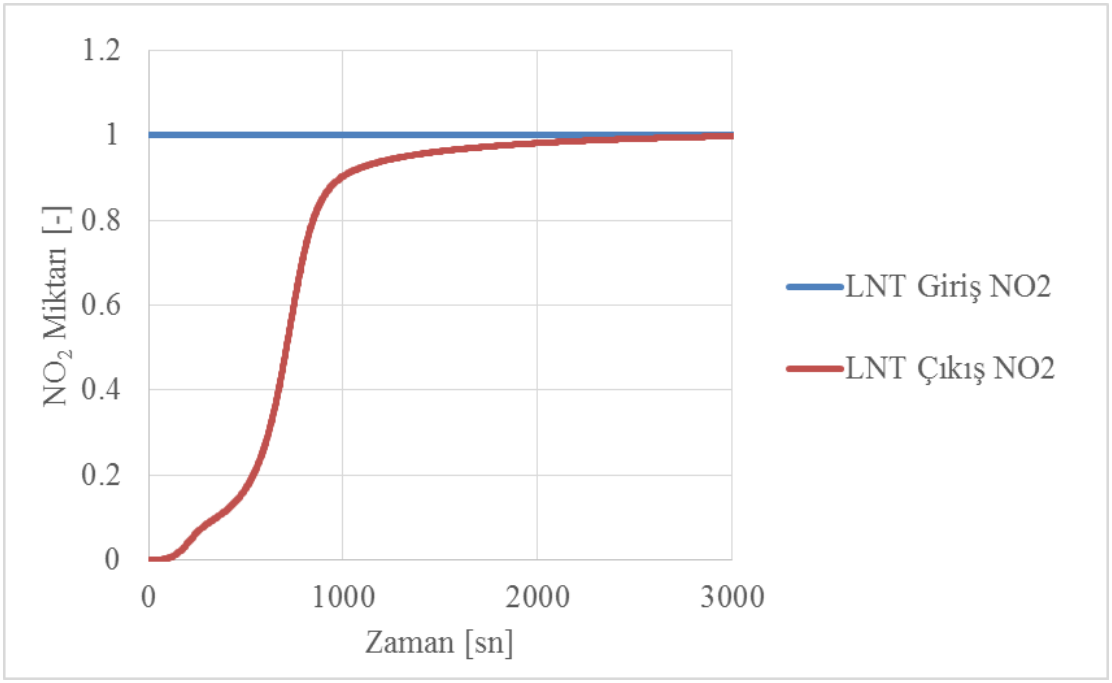
Tutma verimi hesaplanırken maksimum NO_2 tutma modeli yaparken oluşturduğumuz veriler kullanıldı. Tutma verimi LNT'nin sıcaklığı ve LNT'nin doluluk oranına göre

modellenmiştir. Maksimum doluluktan farklı olarak LNT'nin tutma verimi LNT doldukça azalacaktır.

LNT'nin NO_2 tutma verimi iki girdiye bağlı olduğundan bu modelde eğri yerine x,y, ve z ekseni olan bir harita kullanılmıştır. Bu haritanın x ekseni LNT'nin sıcaklığını, y ekseni LNT'nin doluluk oranını ve z ekseni ise LNT'nin belirli sıcaklık ve doluluk oranında tutma verimini gösterir.

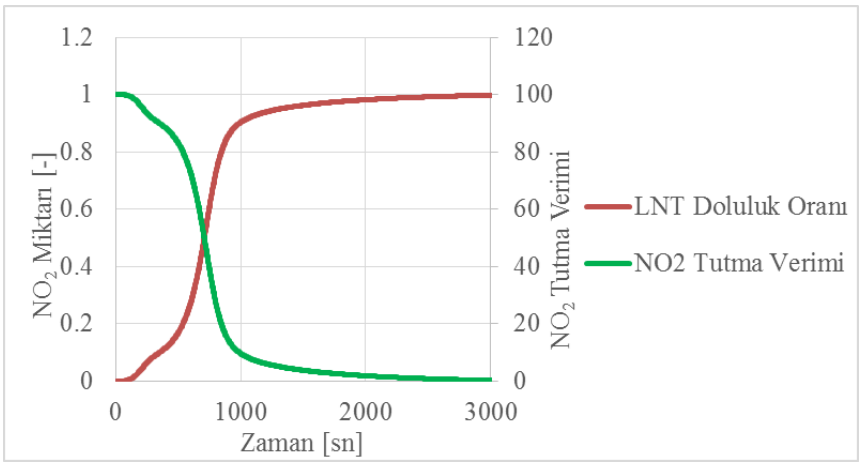
Sekiz farklı sıcaklık noktasında LNT tamamen NO_2 ile doldurularak tutma verimi hesaplanmıştır. Tutma verimini hesaplamak için ise LNT'nin çıkışındaki NO_2 miktarı girişindeki NO_2 miktarı g/s olarak çıkartılmıştır ve LNT içinde kalan NO_2 miktarı g/s olarak hesaplanmıştır.

LNT'nin doluluk oranı ise LNT içindeki NO_2 miktarının, o sıcaklıkta maksimum tutacağı NO_2 miktarına bölünmesiyle elde edilir. Şekil 7.7'de 280°C'de LNT'nin maksimum tutabileceği NO_2 miktarının modellenebilmesi için yapılan test gösterilmiştir.



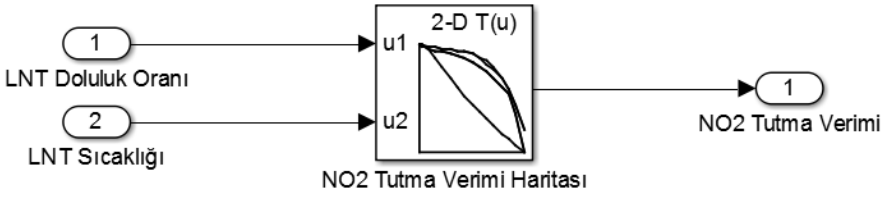
Şekil 7.7 : LNT'nin 280°C'de maksimum tutabileceği NO_2 testi.

Şekil 7.8'de ise LNT'nin 280°C'deki tutma verimi ve doluluk yüzdesi gösterilmiştir. LNT doldukça, doluluk oranının bir fonksiyonu olan NO_2 tutma veriminin azaldığı görülebilir. Aynı zamanda LNT tam doluluğa ulaştığında ise LNT'nin NO_2 veriminin sıfıra yakınsadığı da görülebilir.

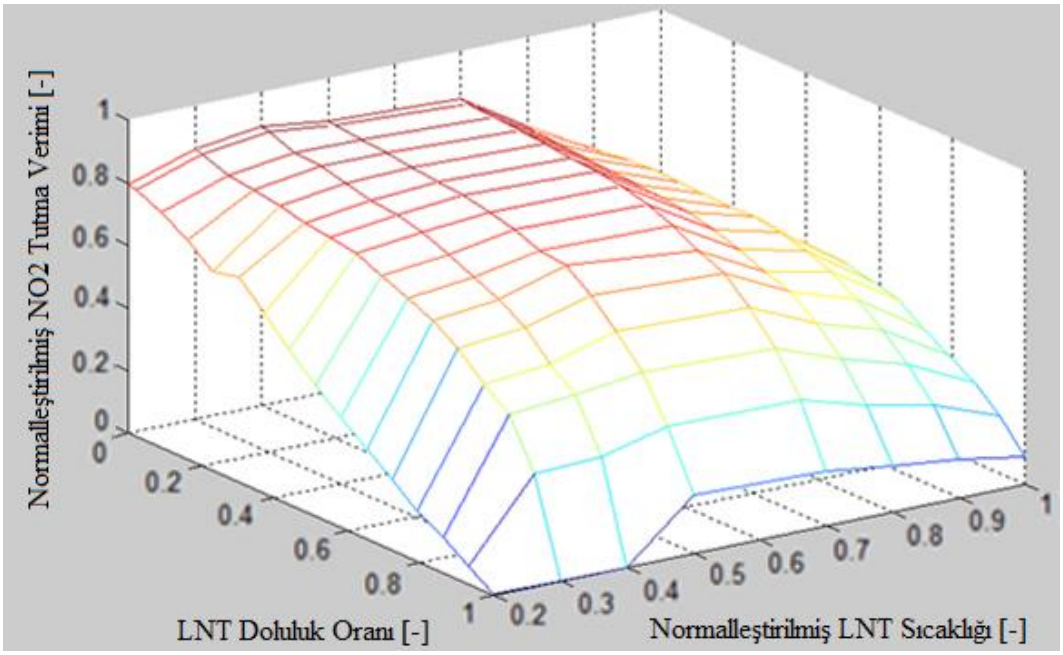


Şekil 7.8 : LNT'nin 280°C'deki tutma verimi ve doluluk yüzdesi.

Son olarak her sıcaklık noktasındaki LNT'nin NO_x tutma verimi eğrileri toplu hale getirilerek üç boyutlu bir harita oluşturulur. Bunun sonucunda da iki bilinmeyeni olan ikinci dereceden bir denklem elde edilmiş olur. Simulink ortamına aktarılmış hali Şekil 7.9'da gösterilmiştir. Simulink ortamında oluşturulan üç boyutlu harita ise Şekil 7.10'da gösterilmiştir.



Şekil 7.9 : LNT'nin NO_2 tutma veriminin Simulink modeli.



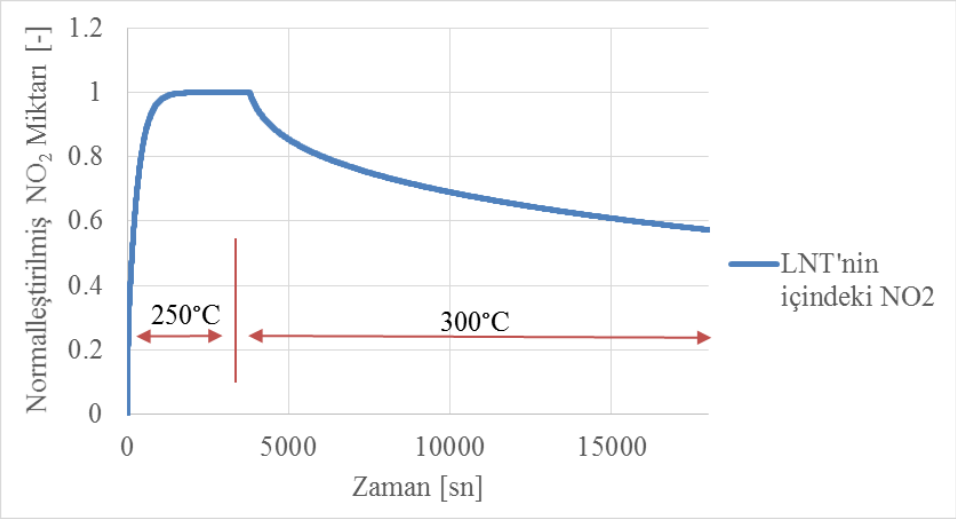
Şekil 7.10 : LNT'nin NO_2 tutma veriminin 3 boyutlu haritası.

7.2.4 NO_2 bırakma

LNT'nin sıcaklığa bağlı tutma kapasitesi belirli testler ile modellenebilmektedir. LNT, motordan çıkan NO_2'yi tutabiliyorken aynı zamanda tuttuğu NO_2'yi sıcaklık etkisiyle çevrim yapmadan salabilmektedir. LNT'nin belirli bir sıcaklıktan sonra tutma kapasitesinin azaldığı bilinmektedir. Artan sıcaklıkla birlikte tuttuğu NO_2'yi bu şekilde salabilmektedir. Aynı zamanda LNT doluluk oranının NO_2 tutma verimine etkisi olduğu gibi NO_2 bırakma verimine de etkisi vardır. LNT doluluk oranı ne kadar fazlaysa o kadar hızlı NO_2 bırakılmasına neden olur.

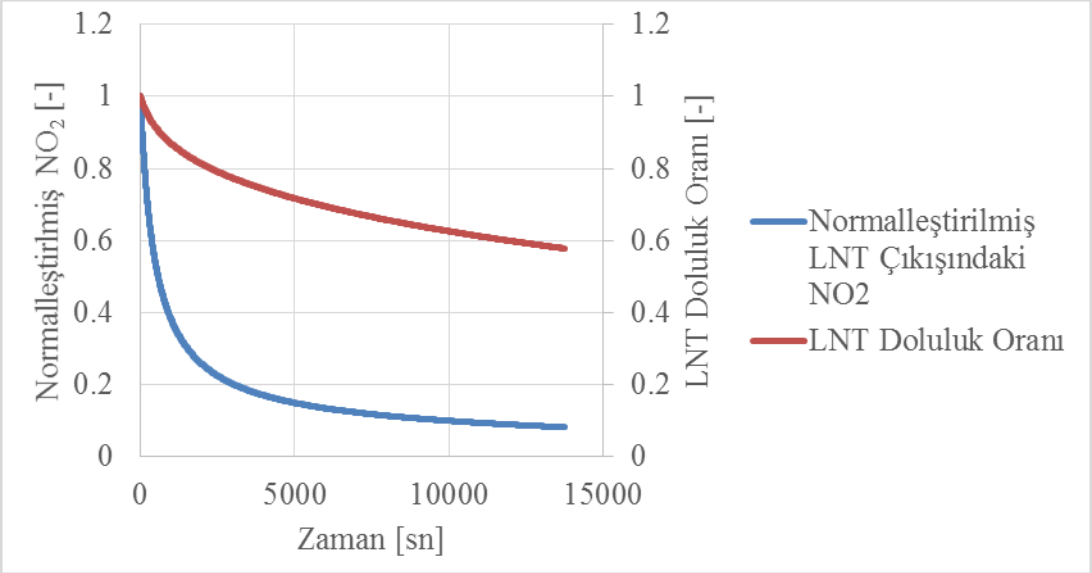
LNT'nin NO_2 bırakmasının matematiksel modelinin yapılabilmesi için öncelikle LNT'nin belirli bir sıcaklıkla NO_2 ile tamamen doldurulması gerekmektedir. LNT'nin tamamen dolduğu ise LNT'nin giriş ve çıkışındaki NO_2 miktarlarının eşit olmasıyla anlaşılır. Daha sonra belirlenen yüksek sıcaklık noktalarında LNT'nin çıkışındaki NO_2 miktarı ölçülür ve doluluk oranının bir fonksiyonu olarak LNT'nin yüksek sıcaklık etkisiyle NO_2 bırakma modeli matematiksel olarak ifade edilmiş olur.

Şekil 7.11'de LNT'nin içindeki NO_2 miktarı normalleştirilerek gösterilmiştir. Normalleştirme ise tüm değerlerin maksimum NO_2 miktarına bölünmesiyle elde edilmiştir. LNT'ye NO_2'nin, 250°C'de tutunup 300°C'de bırakılması sağlanmıştır. 250°C'de maksimum doluluğa ulaşan LNT, sıcaklığın 300°C'ye çıkmasıyla içindeki NO_2'nun bir miktarını LNT'nin doluluk oranına bağlı olarak belirli bir hızda bırakmıştır.



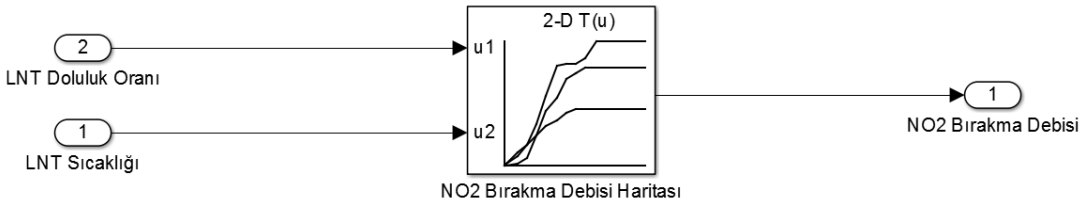
Şekil 7.11 : LNT'nin 300°C'deki NO_2 tutma ve bırakma testi.

Yapılan bu test ile tamamen dolu bir LNT'nin 300°C'deki NO_2 bırakma karakteristiği çıkarılmıştır. Bu davranışı matematiksel olarak ifade edebilmek için ise iki bilinmeyen olan LNT doluluk oranı ve LNT çıkışındaki NO_2 miktarı yapılan testten çıkarılarak Şekil 7.12'de gösterilmiştir. Aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi LNT doluluk oranı azaldıkça, LNT'nin NO_2 bırakma hızı azalmaktadır.



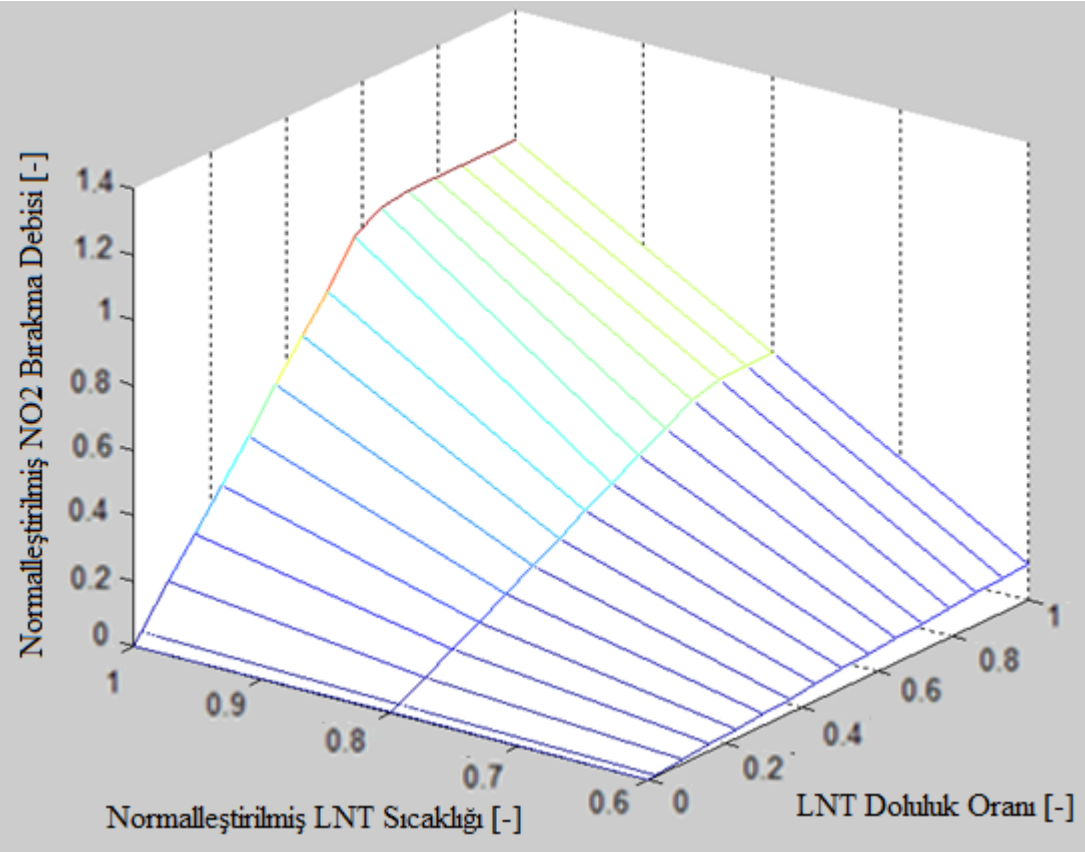
Şekil 7.12 : LNT'nin 300°C'deki NO_2 bırakma testi.

LNT'nin NO_2 bırakma modelinin tamamlanabilmesi için aynı testler iki farklı sıcaklık noktasında daha tekrar edilerek aynı bırakma eğrilerinden toplamda üç adet oluşturulmuştur. Bu üç eğri birleştirilerek x ekseni LNT doluluk oranı, y ekseni LNT sıcaklığı ve z ekseni de NO_2 bırakma debisini gösterecek şekilde üç boyutlu bir harita oluşturulmuştur. Bu 3 boyutlu harita da Simulink modele Şekil 7.13'de gösterildiği gibi aktarılmıştır.



Şekil 7.13 : LNT'nin NO_2 bırakma hızının Simulink modeli.

Simulink ortamında oluşturulan üç boyutlu harita ise Şekil 7.14'de gösterilmiştir.



Şekil 7.14 : LNT'nin NO_2 bırakma hızının 3 boyutlu haritası.

7.2.5 NO_2 çevrimi

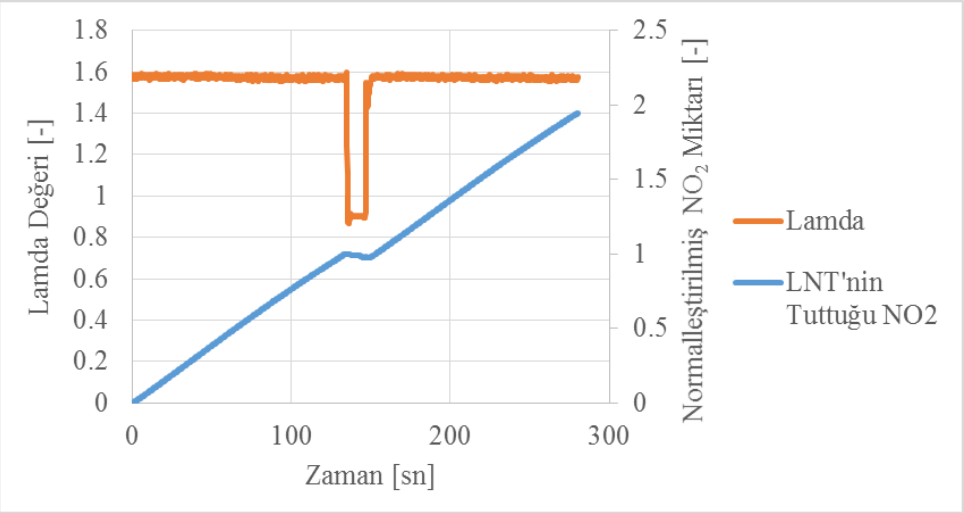
LNT'nin matematiksel modelinin tamamlanabilmesi için NO oksidasyonu, LNT'nin maksimum tutma kapasitesi, LNT'nin NO_2 tutma verimi ve LNT'nin NO_2 bırakma hızının matematiksel modeli tamamlandıktan sonra son kısım olan LNT'nin NO_2 çevrimi matematiksel modeli de gerekmektedir. Böylece LNT'nin içinde biriken NO_2 miktarına modellenecek ve LNT rejenerasyonu mantıklı aralıklarla yapılabilecektir.

LNT'deki NO_2 çevrimi ortamdaki HC, CO ve H_2 miktarına bağlı olduğu gibi LNT'nin sıcaklığına da bağlıdır. Ancak matematiksel olarak LNT'deki HC, CO ve H_2 miktarının modellenmesi oldukça zordur. Bu indirgeyicileri LNT'nin matematiksel modelini oluşturarak başka bir girdi olan LNT'nin girişindeki lamda değerine bağlayacağız. λ değeri ne kadar düşük ise ortamdaki HC, CO ve H_2'nin o kadar fazla olduğunu gösterecek. Buna göre LNT'nin NO_2 çevriminin matematiksel modelinin oluşturabilmesi için LNT girişindeki λ değeri ve LNT'nin sıcaklığı girdileri oluşturur. Sonuç olarak x ekseni lamda değeri, y ekseni LNT sıcaklığı ve z ekseni de NO_2 çevrim verimi olacak şekilde 3 boyutlu bir harita oluşturuldu.

Daha önceki bölümlerde baryumdan ayrılan azot oksitlerin eğer ortamda yeteri kadar HC, CO veya H_2 varsa NO_2 çevrimi olabileceğinden bahsedilmişti. Baryumdan ayrılan NO_2 moleküllerinin hepsi yeteri kadar HC, CO veya H_2 ile buluşamaz ve bu durumda LNT çıkışında bir miktar hiç çevrilmeden bırakılmış NO_2 görülebilir. Baryumun bıraktığı NO_2 moleküllerinin hepsinin N_2'ye dönüşmesi LNT'nin o sıcaklık ve o lamda değerinde LNT rejenerasyonunun maksimum verimde çevrim yaptığını gösterir.

Matematiksel modelimizde LNT'den ayrılan NO_2 miktarı ve bu ayrılan NO_2 moleküllerinin ne kadarı N_2'ye dönüşür şekilde iki ayrı model yapılmayıp, tek harita ile LNT rejenerasyonunda yüzde olarak ne kadar NO_2'nin çevrileceği ifade edilmiştir.

LNT'nin NO_2 çevrim verim değerlerinin oluşturulabilmesi için iki farklı lamda değerinde ve iki farklı sıcaklık noktasında LNT rejenerasyonu yapılarak 3 boyutlu çevrim haritası oluşturulmuştur. Şekil 7.15'de LNT'ye 0.9 lamda değerinde ve 300°C'de yapılan rejenerasyon testi gösterilmiştir.

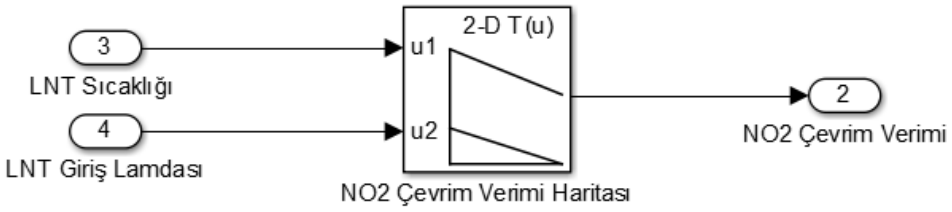


Şekil 7.15 : 0.9 Lamda ve 300°C LNT sıcaklığında yapılan LNT rejenerasyonu.

Şekil 7.15'de gösterilen teste LNT'nin tamamen boş olduğu durumda başlanıp tamamen dolana kadar sabit sıcaklıkta NO_2 tutması sağlanmıştır. LNT maksimum kapasiteye ulaştıktan sonra 12 saniye süreyle LNT rejenerasyonu yapılıp tekrar aynı sıcaklıkta maksimum kapasiteye ulaşana kadar NO_2 doldurulmuştur.

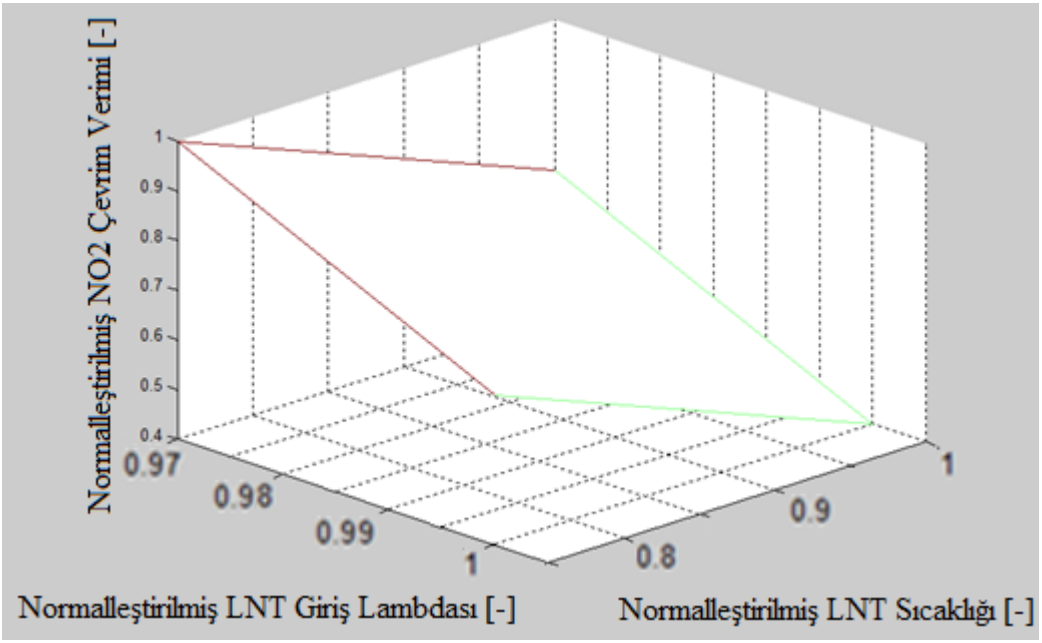
LNT'nin tuttuğu NO_2 miktarı LNT girişindeki kümülatif NO_2 miktarının LNT çıkışındaki kümülatif NO_2 miktarından çıkarılmasıyla elde edilmiştir. LNT'nin girişindeki ve çıkışındaki NO_2 değeri NO_x sensörleriyle ölçülmüştür.

İki farklı lamda ve iki farklı sıcaklık değerinde olmak üzere toplam dört farklı noktada yapılan LNT rejenerasyon testi ile elde edilen dört farklı verim eğrisi birleştirilerek x ekseni LNT girişindeki lamda değeri, y ekseni LNT sıcaklığı ve z ekseni de LNT NO_2 çevrim verimi olan 3 boyutlu bir harita elde edilir. Bu haritanın Simulink ortamına aktarılmış hali Şekil 7.16'de gösterilmiştir.



Şekil 7.16 : LNT'nin NO_2 çevrim veriminin Simulink modeli.

Simulink ortamında oluşturulan üç boyutlu harita ise Şekil 7.17'de gösterilmiştir.

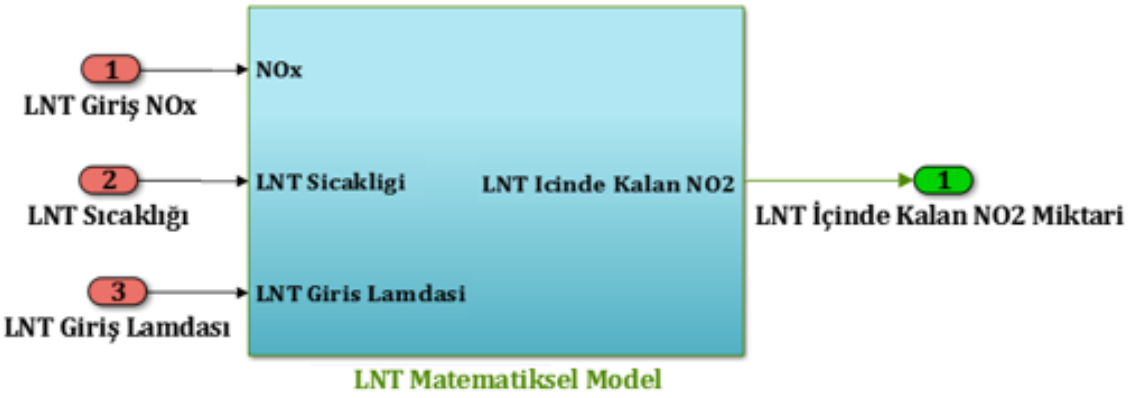


Şekil 7.17 : LNT'nin NO_2 çevrim veriminin 3 boyutlu haritası.

LNT'nin modelinin oluşturulması için ilgili testler yapılıp ve gerekli matematiksel modeller yapıldıktan sonra, oksidasyon, maksimum NO_2 tutma kapasitesi, NO_2 tutma, NO_2 bırakma ve NO_2 çevrim modelleri tek bir Simulink modeli altında toplanır. Gerekli girdiler de belirlendikten sonra model son aşamasına getirilir.

LNT matematiksel modelinin çalışabilmesi için gerekli olan girdiler ise; LNT girişindeki NO_2 ve NO miktarı, LNT sıcaklığı ve LNT girişindeki lamda değeri. Tüm bu girdiler araçlarda çoğunlukla bulunan NO_x sensörü, sıcaklık sensörü ve oksijen

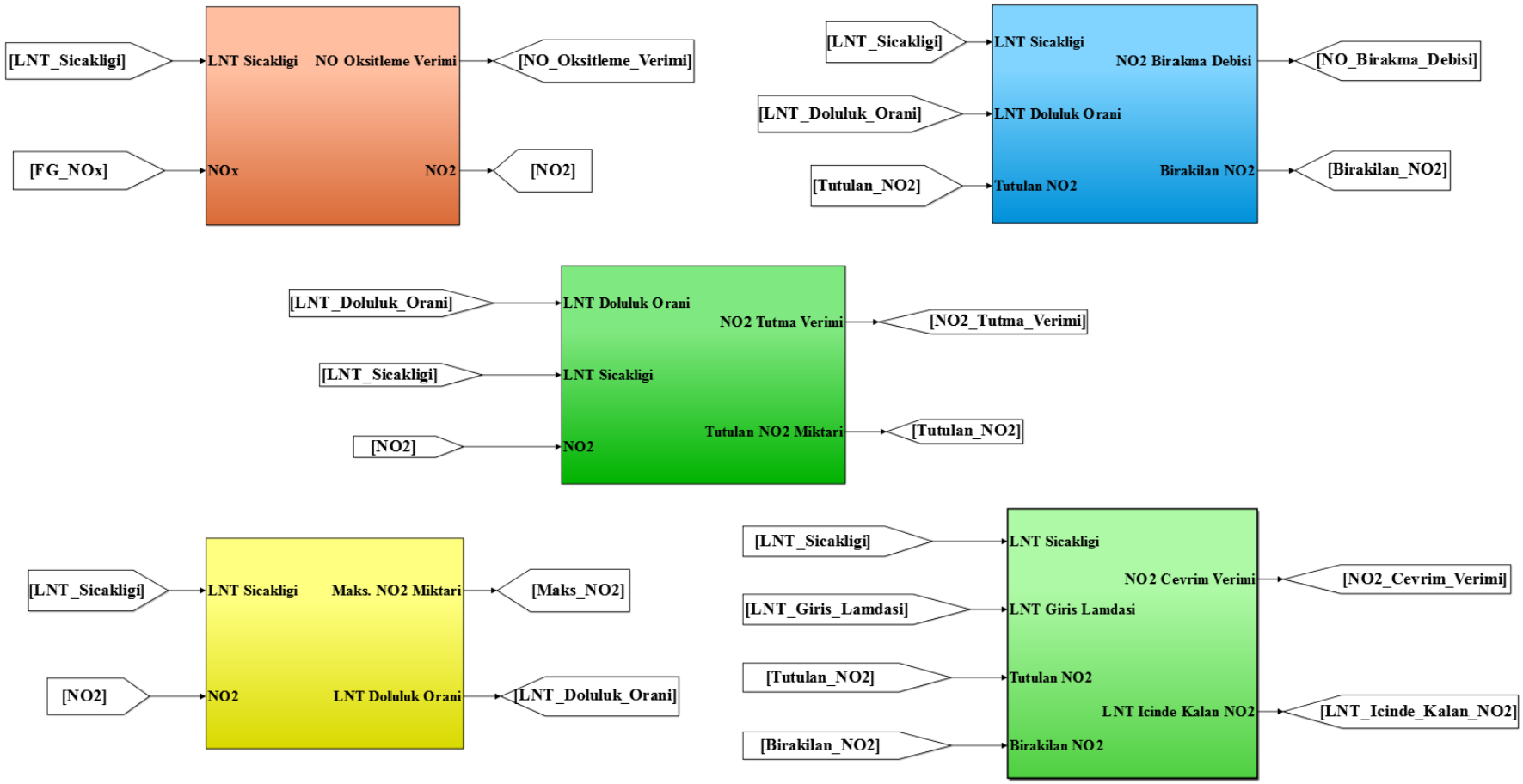
sensörü ile belirlenebilmektedir. Yani aracın kontrol modeline yüklenenebilen LNT'nin matematiksel modeli, sensörler tarafından iletilen değerlerle sorunsuz çalışabilmektedir. LNT matematiksel modelin tek çıktısı ise LNT içinde kalan NO_2 miktarıdır. Bu çıktıya göre LNT dolduğunu anlayıp LNT rejenerasyonu yapabilmektedir. Şekil 7.18'de LNT modelin girdileri ve çıktıları Simulink'e aktarılmış haliyle gösterilmiştir.



Şekil 7.18 : LNT matematiksel modelinin girdi ve çıktılarıyla Simulink modeli.

Üç girdi ve bir çıktıdan oluşan LNT'nin matematiksel modelinin Simulink'e akratılmış hali Şekil 7.19'da gösterilmiştir.

LNT model üç girdiden oluşmasına rağmen ilk girdi olan LNT giriş NO_x değeri aslında iki girdi olarak da düşünülebilir. Birincisi LNT giriş NO, ikincisi ise LNT giriş NO_2 değeri. Çünkü LNT matematiksel modelin içeriğinde bulunan NO oksidasyon modeli LNT girişindeki NO girdisine göre çalışmaktadır. Daha sonra oksidasyon modelinin çıktısı olan NO_2 miktarı ile LNT girişindeki NO_2 değeri toplanarak LNT modelin diğer blokları için girdi oluşturacaktır.



Şekil 7.19 : LNT'nin Simulink modeli.

8. MODEL SONUÇLARI

Tez kapsamında; dizel motorlarının tarihi gelişimi, emisyon regülasyonları, zararlı emisyon gazlarının emisyonlarının önlemesi ve son olarak dizel binek araçlarda önemli bir emisyon indirgeme yöntemi olarak kullanılan LNT'nin matematiksel modeli yapılmıştır. LNT modelin araç yazılımlarına gömülü olarak kullanılmasıyla LNT'nin içinde biriken NO_2 miktarı kontrol modülünde işlenerek buna göre aracın ne zaman LNT rejenerasyonu yapması gerektiği kontrol edilebilecektir. Böylece gereksiz ve zamanında yapılmayan LNT rejenerasyonundan kaçınılarak aracın çevreyi daha az kirletmesi ve düşük yakıt tüketimi değerleri sağlanabilmesine olanak tanımıştır.

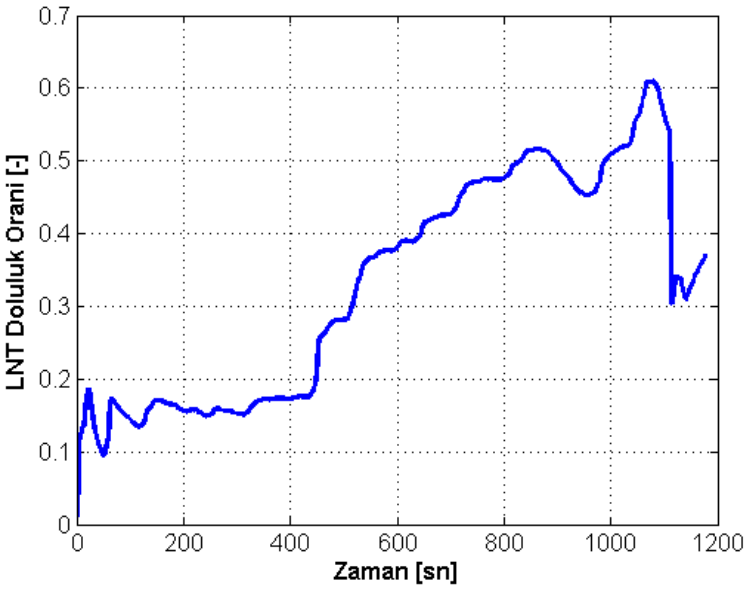
LNT'nin matematiksel modelinin validasyon testi için emisyon regülasyonlarında yasal test olarak kullanılan NEDC (New European Driving Cycle) testi kullanılmıştır. NEDC'nin araç hızı profili Şekil 4.2'de gösterilmiştir. LNT matematiksel modelinin NO_2 çevrim modelinin validasyonu da yapılması için NEDC'nin sonunda LNT rejenerasyonu yapılmıştır.

LNT modelin tek çıktısı olan LNT'nin içinde kalan NO_2 miktarının doğru hesaplandığının kontrolü için LNT'nin giriş çıkışına koyulan emisyon cihazlarıyla LNT'nin içindeki NO_2 miktarının doğru değeri hesaplanmaya çalışılmıştır. Aynı zamanda kurulan modeller ile; LNT'nin NO molekülünün oksitlenme verimi, LNT'nin maksimum tutabileceği NO_2 miktarı dolaylı olarak LNT'nin doluluk oranı, NO_2 tutma verimi, LNT'nin yüksek sıcaklıkla saldığı NO_2 miktarı ve NO_2 çevrim verimi de hesaplanabilmektedir.

NEDC'deki sıcaklık profili tüm modellerin çalışmasını etkileyecektir. Sıcaklık arttıkça LNT'nin NO_2 tutma kapasitesi artacak aynı zamanda sıcaklığın artması LNT'nin NO_2 salmasına neden olabilecektir.

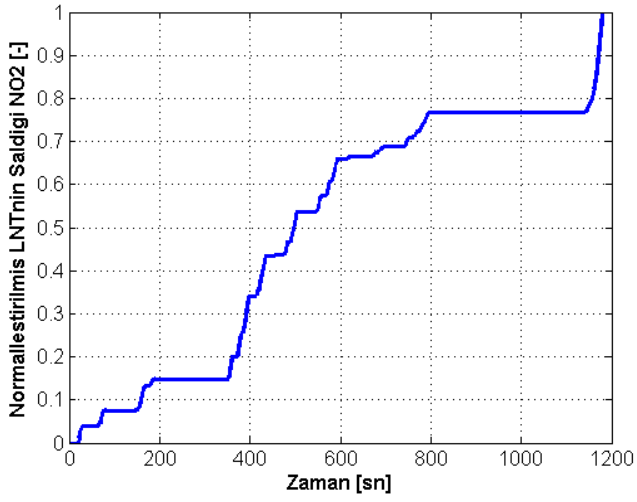
Şekil 7.5'te LNT'nin maksimum NO_2 tutma kapasitesi gösterilmişti. Bu model ile LNT'nin sıcaklığı girdisini kullanılarak NEDC'de LNT'nin maksimum tutma kapasitesini anlık olarak hesaplanır ve LNT'nin anlık olarak içindeki NO_2 miktarını da kullanarak LNT'nin doluluk oranı hesaplanır. Şekil 8.1'de LNT'nin NEDC'deki anlık doluluk oranı gösterilmiştir. Testin sonlarına doğru LNT'nin doluluk oranının

azalmasının sebebi LNT rejenerasyonu yapılmış olmasıdır. LNT rejenerasyonundan sonra NO_2 çevrimi olduğu için LNT'nin doluluk oranı azalmıştır.



Şekil 8.1 : LNT'nin NEDC'deki doluluk oranı.

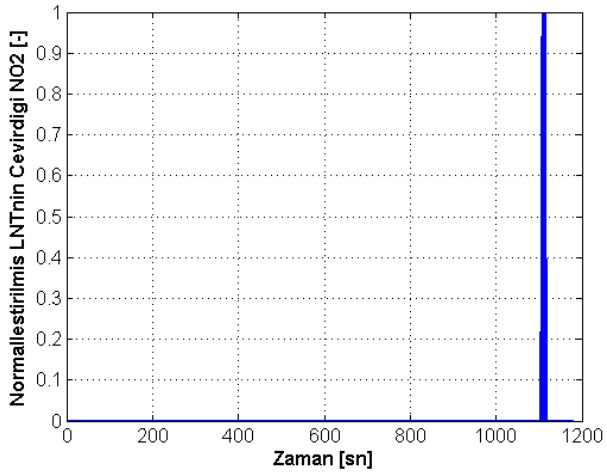
Artan sıcaklıkla beraber eğer LNT optimum NO_2 tutabileceği miktardan daha fazla NO_2 içeriyorsa, NO_2 molekülleri LNT'den salınır. Şekil 8.2'de NEDC'deki LNT'den salınan NO_2 miktarı normalleştirilmiş olarak gösterilmiştir.



Şekil 8.2 : LNT'nin NEDC'de normalleştirilmiş NO_2 salınımı.

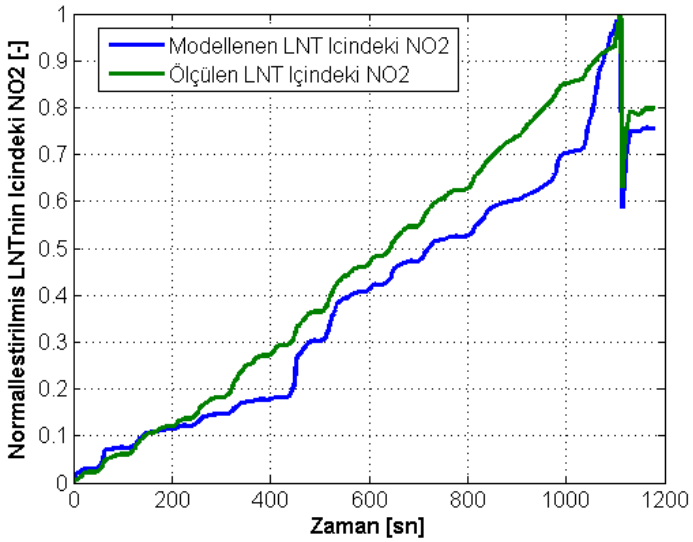
NEDC testinin sonlarına doğru LNT yaklaşık olarak 0.6 doluluk oranına ulaşmıştır. Bu doluluk oranından sonra artık LNT yüksek verim ile NO_2 tutamamaktadır. LNT'nin doluluk oranının artmasıyla NO_2 tutma verimi azalmakta, NO_2 salma oranı

artmaktadır. Bu durumda LNT'ye rejenerasyon yapılması gerekmektedir. LNT rejenerasyonundan sonra LNT'deki tutulan NO_2 moleküllerinin bir miktarı N_2 molekülünü çevrilecek ve LNT'nin doluluk oranı azalacaktır. Böylece tekrar yüksek verimli NO_2 tutmaya devam edecektir. Şekil 8.3'de LNT rejenerasyonunda çevrilen NO_2 miktarı normalleştirilmiş olarak gösterilmiştir.



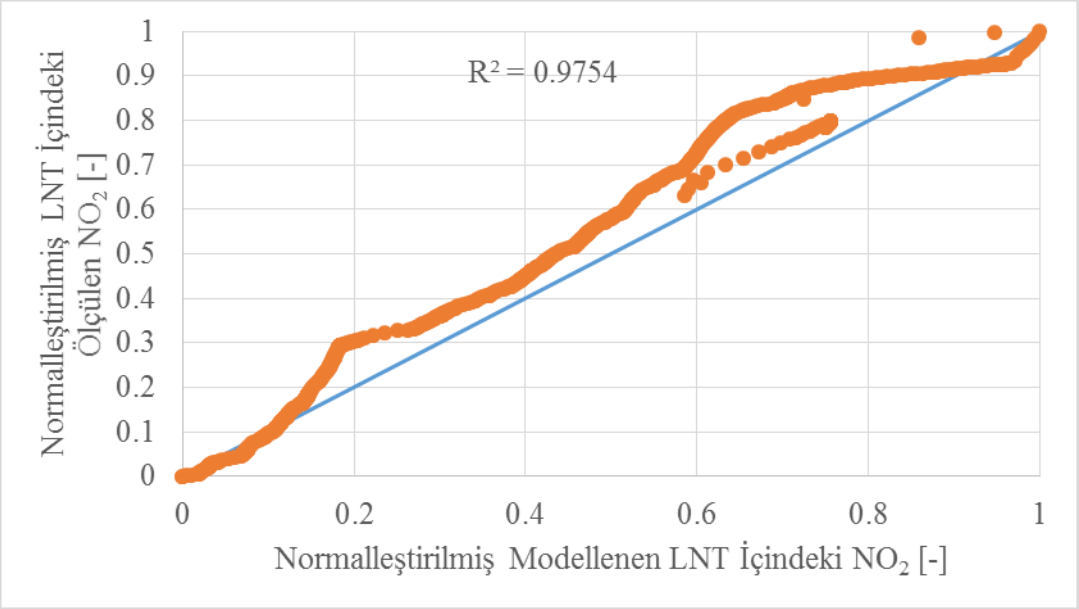
Şekil 8.3 : NEDC'deki LNT rejenerasyonunda çevrilen normalleştirilmiş NO_2.

LNT'nin tuttuğu NO_2, saldığı NO_2 ve çevirdiği NO_2 modellenip NEDC üzerinde Simulink programıyla hesaplandıktan sonra LNT'nin içinde kalan NO_2 miktarı rahatlıkla hesaplanabilmektedir. Şekil 8.4'te modellenen LNT içindeki NO_2 miktarı, emisyon cihazlarıyla ölçülerek LNT'nin tuttuğu NO_2 miktarı hesaplanarak normalleştirilmiş olarak karşılaştırılarak gösterilmiştir.



Şekil 8.4 : LNT'nin içindeki NO_2 molekünün model ve gerçek sonucu.

Elde edilen modellenmiş LNT'nin içindeki NO_2 miktarı gerçek sonuç ile x ve y ekseni olarak çizdirilerek R^2 hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 8.5'de gösterilmiştir.



Şekil 8.5 : Model sonucunun R^2 analizi.

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tezde öncelikle dizel emisyonları nedir ve nasıl oluşur konularından bahsedildi. Dizel emisyonlarına getirilen regülasyonlar ile emisyon kontrol stratejilerindeki gelişmeler incelendi. Daha sonra emisyon kontrolü için dizel binek araçlar için önemli bir donanım olan LNT teknolojisi belirtildi. LNT teknolojisinin matematiksel modeli yapılan testler sonucunda ampirik olarak oluşturuldu. LNT modelin çıktısı ise LNT'de biriken NO_2 miktarını motorun her çalışma koşulunda tahmin edilmesi olarak verildi.

Matematiksel olarak modellenen LNT sistemi araçlarda bulunan motor kontrol ünitesine aktarılarak LNT'nin doğru zamanda ve doğru yerde purge yapması sağlanabilir. Model çıktısı ne kadar gerçek sonuca yakın olursa o kadar verimli bir şekilde LNT'nin purge yapması sağlanabilir.

LNT'nin matematiksel olarak modellenmesi hem yakıt tüketime hem de dizel emisyonlarına olumlu etki gösterir. NO_2 bakımından çok dolu bir LNT üzerinden NO_2 emisyonlarını geçirmeye başlar ve çevreye zararlı emisyon gazları vermeye başlar. Bunun önlenebilmesi için LNT'nin tuttuğu NO_2 miktarı tahmin edilip, tutma veriminin düşmeye başlasının görülmesiyle LNT'ye purge emri verilir ve LNT doğru yerde purge yaparak emisyon gazlarının çevreye yayılmasını engeller. Yakıt tüketimi açısından faydası ise yakıt tüketimini iyileştirecek yöndedir. LNT belli bir dolma kapasitesine kadar motordan çıkan NO_2 emisyonlarını yüksek verimle tutmaktadır. Eğer LNT yüksek verimle NO_2 tutabileceği halde purge yaparsa, yapması gereken zamandan daha erken purge yapmış olacaktır. Bu şekilde yapılan bir stratejide toplam purge sayısı artacaktır. Gereksiz yapılan purgeler yakıt tüketimini olumsuz yönde etkileyecektir. Matematiksel model ile LNT'nin yüksek verimde NO_2 tuttuğu noktalar bilinebileceğinden yanlış zamanda purge yapması engellenecek ve yakıt tüketimini en optimum seviyede tutmuş olacaktır.

LNT modelin tahmin başarısı ne kadar yüksek olursa çevre ve müşteri için faydası o kadar yüksek olacaktır. Daha iyi bir LNT model yapabilmek için ise test edilen nokta sayısı arttırılırsa modelin çözünürlüğü artacaktır ve gerçek sonuca o kadar yaklaşılabilecektir. Matematiksel bir LNT modelden daha iyi bir model yapabilmek

için ise kimyasal modeller çalışılabilir. Kontrollü ortamlarda yapılan deneyler ile LNT'de gerçekleşen kimyasal tepkimelerin karakteristiği çıkartılarak kimyasal modeller yapılabilmektedir. Böyle bir modelin çıktı kalitesinin başarılı olma olasılığı matematiksel modele göre daha yüksektir.

KAYNAKLAR

[1] **Akbal, O.** (2013). *Ağır Ticari Taşıt Dizel Motoru SCR Sisteminin Sıcaklık Modellenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[2] **Soykan, T.** (2012, Mart). Termodinamiğin Gen ve Talihsiz Babası: Sadi Carnot. *Moment Dergisi*. Erişim adresi http://www.momentexpo.com/termodinamigin-gen-ve-talihsiz-babasi-sadi-carnot

[3] **Demiröz, G.** (2010). *Seçici Katalitik İndirgeme Sisteminin Ağır Taşıt Motorlarında Kullanımının Optimizasyonu.* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[4] **Url-1** <https://muhendishane.org/kutuphane/termodinamik/carnot-cevrimi-verimi>, erişim tarihi 23.08.2017.

[5] **Url-2** <http://sismebot.com/deniz-motor-bot-motor-4-zamanli/>, erişim tarihi 29.12.2017.

[6] **Bilginperk, H.** (1992). *Dizel motorları: temel ders kitabı*. Ankara: M.E.B.

[7] **Dorado, M., Ballesteros, E., Arnal, J., Gomez, J., Lopez, F.** (2003). "Exhaust Emissions From A Diesel Engine Fueled With Transesterified Waste Olive Oil", Fuel, 82:1311-1315.

[8] **Safgönül, B., Ergeneman, M., Arslan, H., Soruşbay, C.** (1999). *İçten Yanmalı Motorlar*. İstanbul: Birsen Yayınevi.

[9] **Haşimoğlu, C.** (2005). *Düşük Isı Kayıplı Bir Dizel Motorunda Biyodizel Kullanımının Performans Ve Emisyon Parametrelerine Etkisi*. (Doktora Tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

[10] **Georing, C.** (1992). *Engine and Tractor Power*. Boston, Massachusetts: Breton Publishers.

[11] **Url-3** <https://hayatinvirajliyollarinda.com/2015/10/04/dizellerin-diger-yuzu-volkswagen-dieselgate/>, erişim tarihi 29.12.2017.

[12] **Url-4** <https://www.dieselnet.com/tech/emi_gas.php>, erişim tarihi 25.08.2017.

[13] **Url-5** <http://www.worldofmolecules.com/solvents/benzene.htm>, erişim tarihi 26.08.2017

[14] **TERA.** (2014). *Occupational Exposure Limit Evaluation: Diesel Particulate Matter* [PowerPoint sunumu]. Erişim adresi http://www.worksafe.govt.nz/worksafe/about/who-we-work-with/consultation/closed-for-consultation/consultation-wes-diesel-particulate-matter/diesel-particulate-matter-proposed-wes

[15] **Öz, İ.H., Borat, O., Sürmen, A.** (2002). *İçten Yanmalı Motorlar*. İstanbul Birsen Yayınevi.

[16] **Url-6** <http://www.oil-gasportal.com/advanced-alternative-low-emission-fuels>, erişim tarihi 29.12.2017.

[17] **Url-7** <http://www.teknikbelgeler.com/2016/makale.php?id=40>, erişim tarihi 02.09.2017.

[18] **Url-8** <https://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php>, erişim tarihi 03.09.2017.

[19] **Url-9** <https://www.dieselnet.com/standards/eu/hd.php>, erişim tarihi 03.09.2017.

[20] **Url-10** <http://www.greencarcongress.com/2015/07/20150709-jrc.html>, erişim tarihi 03.09.2017.

[21] **Url-11** <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/ece_r49.php>, erişim tarihi 04.09.2017.

[22] **Url-12** <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/esc.php>,erişim tarihi 04.09.2017.

[23] **Url-13** <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/elr.php>, erişim tarihi 04.09.2017.

[24] **Url-14** <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/whsc.php>, erişim tarihi 04.09.2017.

[25] **Url-15** <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/etc.php>, erişim tarihi 04.09.2017.

[26] **Url-16** <https://www.dieselnet.com/tech/engine_control.php#methods>, erişim tarihi 05.09.2017.

[27] **Url-17** <http://kleentek.net.au/engine-reconditioning/egr-anti-pollution-syste m-reconditioning/>, erişim tarihi 05.09.2017.

[28] **Url-18** <https://www.dieselnet.com/tech/cat_scr.php>, erişim tarihi 06.09.2017

[29] **Url-19** <https://eic.rsc.org/feature/the-evolution-of-catalytic-converters/20202 5 2.article>, erişim tarihi 08.09.2017.

[30] **Url-20** <https://www.dieselnet.com/tech/engine_fi_nozzle.php>, erişim tarihi 29.12.2017.

[31] **Url-21** <https://www.quora.com/What-is-tumble-flow-and-what-are-its-effects-in-combustion-in-IC-engine>, erişim tarihi 29.12.2017.

[32] **Url-22** <http://pmmonline.co.uk/technical/the-function-of-tumble-flaps-and-swir l-flaps>, erişim tarihi 29.12.2017.

[33] **Url-23** <https://www.liqtech.com/diesel-particulate-filters-dpf/>, erişim tarihi 29.12.2017.

[34] **Url-24** <http://dpfclean.wales/Avoid%20a%20Blocked%20DPF/dpf%20compos ition.html>, erişim tarihi 29.12.2017.

[35] **Url-25** <https://www.dieselnet.com/tech/dpf_sys.php>, erişim tarihi 29.12.2017.

[36] **Url-26** <http://mechteacher.com/3-way-catalytic-converter>, erişim tarihi 09.09.2017.

[37] **Url-27** <https://www.indiamart.com/proddetail/three-way-catalytic-converter-16802815188.html>, erişim tarihi 29.12.2017.

[38] **Url-28** <http://old.vscht.cz/monolith/>, erişim tarihi 29.12.2017.

[39] **Wang, Y., Raman S., Grizzle J. W.** (1999). Dynamic Modelling of a Lean NO_x Trap for Lean Burn Engine Control, *University of Michigan.*

[40] **Xu, L., McCabe R. W.** (2012). LNT + in situ SCR catalyst system for diesel emissions control. Sciencedirect.

[41] **Seo, C., Kim, H., Choi, B.** (2011). De-NO_x Characteristics of a Combined System of LNT and SCR according to Space Velocity. SAE International.

[42] **Url-29** <http://pubs.rsc.org/-/content/articlelanding/2015/ra/c5ra07414b/unauth#!divAbstract>, erişim tarihi 12.09.2017.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad **:** Ferit Orçun Parlak

Doğum Yeri ve Tarihi **:** Eskişehir / 02.01.1990

E-Posta **:** orcunparlak@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2013, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Ford Otosan / Kalibrasyon ve Kontrol Departmanı / Uzman Kalibrasyon Mühendisi