

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**EGZOS SİSTEMLERİNDE SICAKLIK SENSÖRÜ ÖLÇÜM
DOĞRULUĞUNUN VE KATALİST SICAKLIĞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa HERGENÇ

Enerji Enstitüsü

Enerji Bilim ve Teknoloji Yüksek Lisans Programı

OCAK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**EGZOS SİSTEMLERİNDE SICAKLIK SENSÖRÜ ÖLÇÜM
DOĞRULUĞUNUN VE KATALİST SICAKLIĞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa HERGENÇ

(301111019)

Enerji Enstitüsü

Enerji Bilim ve Teknoloji Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Murat ÇAKAN

OCAK 2015

İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 30111019 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Mustafa Bahadır HERGENÇ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**EGZOZ SİSTEMLERİNDE SICAKLIK SENSÖRÜ ÖLÇÜM DOĞRULUĞUNUN VE KATALİST SICAKLIĞININ İNCELENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Murat ÇAKAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Levent KAVURMACIOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Burak BARUTÇU
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **12 Aralık 2014**

Savunma Tarihi : **23 Ocak 2015**

Aileme,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmalarını yöneten, yönlendiren, değerli görüş ve eleştirileri ile tez çalışmalarımı destekleyen çok değerli danışman hocam Sn. Yrd. Doç. Dr. Murat ÇAKAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımın her aşamasında bana gerekli desteklerini sunan, lisans ve yüksek lisans çalışma hayatımda ve tez çalışmalarım boyunca değerli görüşleri ile bilgi ve tecrübelerini hiçbir zaman eksik etmeyen Sn. Yük. Müh. Işıl USLU'ya çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans tez çalışmalarına sağladıkları desteklerden dolayı çok kıymetli çalışma arkadaşlarım, Birkan AYAZ, Recep TUNA, Koray ÖZDEMİR ve Araş. Gör. Mustafa ÖZSİPAHI'ye teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca her daim yanımda olan, bugünlere gelmemde benden maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen çok kıymetli ANNEM, BABAM ve ABLAM'a teşekkürlerimi sunarım.

Ocak 2015

Mustafa Hergenç
(Makine Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| ÖNSÖZ..... | vii |
| İÇİNDEKİLER..... | ix |
| KISALTMALAR..... | xi |
| ÇİZELGE LİSTESİ..... | xiii |
| SEMBOL LİSTESİ..... | xvii |
| ÖZET..... | xix |
| SUMMARY..... | xxi |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 1.1 Dizel Motorlarda Egzoz Sistemleri | 1 |
| 1.1.1 Egzoz gazı arıtma ekipmanları..... | 2 |
| 1.1.1.1 Dizel oksidasyon katalisti (DOC)..... | 2 |
| 1.1.1.2 Seçici katalitik indirgeme (SCR)..... | 4 |
| 1.1.1.3 Egzoz gaz resirkülasyonu (EGR) | 6 |
| 1.1.1.4 Fakir azotoksit tutucu (LNT)..... | 7 |
| 1.1.1.5 Dizel partikül filtresi (DPF) | 8 |
| 1.1.2 Egzoz sisteminde kullanılan sensörler..... | 10 |
| 1.1.2.1 Sıcaklık sensörleri..... | 10 |
| 1.1.2.2 Oksijen (lambda) sensörleri | 13 |
| 1.1.2.3 Basınç sensörleri..... | 15 |
| 1.1.2.4 Azotoksit sensörleri | 16 |
| 1.1.2.5 Partikül (PM) sensörü | 17 |
| 2. LİTERATÜR İNCELEMESİ | 19 |
| 3. TEST DÜZENEĞİ | 28 |
| 3.1 Belirsizlik Analizi..... | 34 |
| 3.2 Akış Test Düzeninde İncelenen Parametreler | 35 |
| 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR | 37 |
| 4.1 Sensör Prob Uzunluğunun Ölçüm Doğruluğuna Etkisi..... | 37 |
| 4.2 Motor ve Dizel Oksidasyon Katalisti Arasındaki Bağlantı Borusunun Uzunluğunun Dizel Oksidasyon Katalisti Giriş Sıcaklığına Etkisi..... | 49 |
| 5. SONUÇ ve ÖNERİLER..... | 55 |
| KAYNAKLAR | 61 |

KISALTMALAR

| | |
|------------|----------------------------------|
| AÖ | : Araç Ömrü |
| CFD | : Computational Fluid Dynamics |
| DOC | : Diesel Oxidation Catalyst |
| DPF | : Diesel Particulate Filter |
| EGT | : Exhaust Gas Temperature Sensor |
| LNT | : Lean NOx Trap |
| PM | : Particulate Matter |
| RP | : Rejenerasyon Periyodu |
| RS | : Rejenerasyon Süresi |
| SCR | : Selective Catalytic Reduction |
| TC | : Termoeleman |
| TYT | : Toplam Yakıt Tüketimi |
| YT | : Yakıt Tüketimi |

ÇİZELGE LİSTESİ

| | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| Çizelge 2.1: Toplam maliyete etki eden parametreler için belirlenen ağırlık katsayıları [13]. | 27 |
| Çizelge 2.2: Toplam maliyete ve çalışma performansına etki eden parametrelerin kıyaslanması [13]. | 28 |
| Çizelge 3.1: Akış test düzeneğinde incelenen parametreler. | 36 |
| Çizelge 4.1: Prob uzunluğuna bağlı olarak ortalama hata payları. | 42 |
| Çizelge 4.2: Yakıt tüketim miktarları. | 53 |

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Şekil 1.1: Dizel oksidasyon katalisti yapısı. | 2 |
| Şekil 1.2: Dizel oksidasyon katalisti çalışma prensibi. | 3 |
| Şekil 1.3: Katalitik konvertörde hava-yakıt oranı [1]..... | 3 |
| Şekil 1.4: SCR’ da gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar [2]..... | 4 |
| Şekil 1.5: SCR çalışma prensibi [2]. | 5 |
| Şekil 1.6: EGR oranına bağlı olarak NOx değişimi [3]..... | 7 |
| Şekil 1.7: LNT çalışma prensibi..... | 8 |
| Şekil 1.8: DPF çalışma prensibi [4]..... | 9 |
| Şekil 1.9: Sıcaklık sensörlerinin araç üzerinde gösterimi [5]. | 11 |
| Şekil 1.10: Sıcaklık sensörü probu. | 12 |
| Şekil 1.11: Sensör yapısı..... | 13 |
| Şekil 1.12: Oksijen sensörü..... | 14 |
| Şekil 1.13: Oksijen sensörü iç yapısı [7]. | 15 |
| Şekil 1.14: Basınç sensörü. | 16 |
| Şekil 1.15: Azotoksit sensörü..... | 16 |
| Şekil 1.16: Partikül sensörü. | 17 |
| Şekil 1.17: Partikül sensörü yapısı. | 18 |
| Şekil 2.1: Test düzeneği şematik gösterimi [9]..... | 19 |
| Şekil 2.2: Test düzeneği SCR bağlantı borusu [9]. | 20 |
| Şekil 2.3: Test düzeneği şematik gösterimi [10]..... | 21 |
| Şekil 2.4: Konvertörde giriş sıcaklığının zamana bağlı değişimi [10]..... | 22 |
| Şekil 2.5: Kanal yapısının analiz için bölünmüş durumu [11]..... | 23 |
| Şekil 2.6: Akış modeli [11]..... | 23 |
| Şekil 2.7: Monolit yapısı [12]. | 24 |
| Şekil 2.8: CO mol oranının giriş sıcaklığına ve zamana bağlı değişimi [12]..... | 25 |
| Şekil 2.9: NO/NO ₂ oranının DOC sıcaklığına bağlı olarak değişimi [13]..... | 26 |
| Şekil 2.10: Post enjeksiyon yakıt miktarı değişimi [13]..... | 27 |
| Şekil 2.11: NO/NO ₂ oranının değişimi [13]..... | 28 |
| Şekil 2.12: Toplam maliyetin değişimi [13]. | 28 |
| Şekil 3.1: Akış test düzeneği şematik gösterimi. | 31 |
| Şekil 3.2: Sıcaklık ölçüm noktalarının sistem üzerinde gösterimi. | 34 |
| Şekil 3.3: Testte kullanılan sıcaklık sensörleri..... | 36 |
| Şekil 4.1: Testte kullanılan farklı prob uzunluğuna sahip sıcaklık sensörlerinin temsili gösterimi. | 38 |
| Şekil 4.2: Üç farklı prob uzunluğu için gerçekleştirilen testlerde termoelemanlardan alınan sıcaklıklar. | 39 |
| Şekil 4.3: 30mm prob uzunluğu için test sonuçları. | 40 |
| Şekil 4.4: 50mm prob uzunluğu için test sonuçları. | 41 |
| Şekil 4.5: 70mm prob uzunluğu için test sonuçları. | 42 |

| | |
|--|----|
| Şekil 4.6: TC2 ve EGT1 sıcaklıklarının karşılaştırılması. | 43 |
| Şekil 4.7: TC2 ve EGT2 sıcaklıklarının karşılaştırılması. | 43 |
| Şekil 4.8: Dairesel kesitin elemanlara bölünmüş gösterimi. | 44 |
| Şekil 4.9: Bağlantı borusunda hız dağılımı. | 45 |
| Şekil 4.10: EGT1 konumunda dairesel kesitteki sıcaklık dağılımı (100 °C-300 °C giriş sıcaklığı için)..... | 46 |
| Şekil 4.11: EGT1 konumunda dairesel kesitteki sıcaklık dağılımı (350 °C-500 °C giriş sıcaklığı için)..... | 48 |
| Şekil 4.12: 1800 rpm koşulunda sıcaklık ve yakıt miktarı karşılaştırması..... | 51 |
| Şekil 4.13: 1000 rpm koşulunda sıcaklık ve yakıt miktarı karşılaştırması..... | 52 |

SEMBOL LİSTESİ

| | |
|------------|--|
| ΔR | : dirençteki değişim |
| ΔT | : sıcaklıktaki değişim |
| K | : birinci dereceden direncin sıcaklık katsayısı olmak üzere |
| α_t | : direncin sıcaklık katsayısı |
| I | : elektrik akımı (amper) |
| N | : yük taşıyıcıları yoğunluğu ($1/m^3$) |
| A | : malzemenin kesit alanı (m^2) |
| Y | : yük taşıyıcıların hızı (m/s) |
| E | : bir elektronun yükü ($e = 1.602 \times 10^{-19}$ coulomb) |

EGZOS SİSTEMLERİNDE SICAKLIK SENSÖRÜ ÖLÇÜM DOĞRULUĞUNUN VE KATALİST SICAKLIĞININ İNCELENMESİ

ÖZET

Tez çalışması kapsamında, egzoz sistemlerinde kullanılan sıcaklık sensörünün prob uzunluğunun, belirlenen bir sistem için ölçülen ortalama egzoz boru sıcaklığına etkisi ve motor ile dizel oksidasyon katalisti arasındaki bağlantı borusunun uzunluğunun oksidasyon katalisti giriş ve çıkış sıcaklıklarına olan etkisi irdelenmiş, söz konusu etki yakıt tüketimi ve egzoz zararlı gaz emisyonları ile birlikte değerlendirilmiştir.

Tez çalışmasının birinci bölümünde, otomotiv egzoz sistemlerinde kullanılan emisyon indirgeme ekipmanları ve bu ekipmanların kontrolü amacıyla kullanılan sensörlerin literatür incelemesine, endüstride yaygın olarak kullanılan uygulamalarına ve bu sistemlerde gerçekleşen kimyasal tepkimelere yer verilmiştir.

İkinci bölümde, egzoz sistemlerinde bulunan emisyon indirgeme cihazlarının çalışma verimlerinin egzoz boru içerisindeki sıcaklık ve akış özelliklerine bağlı olarak değişimini inceleyen çalışmalara yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde, testler sırasında kullanılacak olan test düzeneği ve düzenek içerisinde bulunan ekipmanların teknik ve fiziksel özelliklerine yer verilmiştir. Aynı zamanda test düzeneğinde incelenen parametreler açıklanmış ve ölçüm belirsizliği hesaplamaları yapılmıştır.

Dördüncü bölümde, birinci grup testler kapsamında, egzoz sistemlerinde katalist giriş ve çıkış noktalarında bulunan sıcaklık sensörlerinin prob uzunluklarına bağlı olarak alınan ölçüm ile aynı noktanın ortalama egzoz gaz sıcaklığı kıyaslanmıştır. Buna bağlı olarak verilen sistem için incelenen farklı prob uzunluğuna sahip sıcaklık sensörlerinin ortalama egzoz gaz sıcaklığından hangi oranda saptığı hesaplanmış ve verilen sistem için en uygun prob uzunluğu belirlenmiştir. Deneysel çalışmalara ek olarak yapılan sayısal analizler ile ölçüm sonuçları desteklenmiştir. İkinci grup testler kapsamında, motor ile dizel oksidasyon katalisti arasındaki bağlantı borusu boyunun kısaltılması neticesinde ısı kayıplarının düşürülerek katalist giriş sıcaklığının yükseltilmesi hedeflenmiş ve bunun sonucunda katalistte istenilen sıcaklığa ulaşmak için post enjeksiyon sırasında püskürtülen yakıt miktarındaki değişim hesaplanmıştır. Aynı şekilde farklı sürüş karakteristikleri için önerilen değişiklik sonucunda elde edilecek toplam yakıt tasarrufu belirlenmiştir.

Beşinci ve son bölümde yapılan testler ve sayısal analizlerin sonuçları detaylı bir şekilde ortaya konmuş ve gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

TEMPERATURE SENSOR MEASUREMENT ACCURACY AND CATALYST TEMPERATURE INVESTIGATION FOR AUTOMOTIVE EXHAUST SYSTEMS

SUMMARY

In this thesis, for a defined system, temperature sensor tip length effect on temperature measurement results of the average exhaust gas temperature has been evaluated. Also effect of pipe length between engine out and diesel oxidation catalyst on the catalyst temperature as well as resultant fuel consumption and emission effects.

In parallel with increase on population and level of income, exhaust gases output from motor vehicles would become an important factor on air pollution after air pollution caused by industrial effects. This situation makes control of exhaust gas emissions obligatory. Based on the fact that diesel engines has high efficiency, low fuel costs, high robustness and high reliability diesel engines becomes leader on commercial vehicle segment. Recently due to high fares on fuel, diesel engines become important on passenger vehicle segment as well. It is expected that proportion of the diesel engines will become higher in the next years. This growth trend on diesel engine usage creates a need for investigating the effects of exhaust gases and developing new technologies to increase efficiency of diesel combustion.

As part of this thesis, as a result of defining measurement reliability of the temperature sensors based on its tip length, efficiency of diesel oxidation catalyst and diesel particulate filter tried to be increased. Besides based on shortening the connection pipe between engine and exhaust emission reduction components, working efficiency of the emission reduction components tried to be increased and the total exhaust emission tried to be reduced.

First section of thesis includes literature research of emission reduction equipments being used on automotive exhaust system and the sensors being used to control those equipments as well as industrial applications of those components with the chemical reactions takes place in those equipments. All the emission reduction equipments including several catalyst systems and the filter equipment defined, their application on several positions explained. Comparably working principle and fields of application for the sensors defined in the first section.

Second section of thesis includes, studies related with the effects of the exhaust gas flow and temperature properties on working efficiencies of emission reduction components on the exhaust system. Several similar studies including changing the shape and length of selective catalytic reduction inlet pipe and investigating effect of these two cases based on selective catalytic reduction conversion efficiency and the temperature requirement for the diesel particulate filter regeneration process and controlling the diesel oxidation catalyst NO/NO₂ conversion rate based on the fuel

amount injected on post injection process has been summarised and results given as it is defined in the original article.

Third section of thesis includes testing equipments and technical and physical properties of those equipments being used during tests. Thermocouples and the temperature sensors as well as the burner and the compressor defined. System inputs and outputs which are reflecting the real life condition defined. Parameter selection and the range for the selected parameters during testing decided. Uncertainty calculation for each parameter given based on the values given by the manufacturer.

Fourth section of thesis includes, first group of tests completed on the test bench. First group of test aims to investigate coherence between temperature sensor measurements and average temperature value on exhaust cross section area based on tip length. Based on this deviation from the average exhaust gas temperature has been calculated based on tip length and optimum tip length for the given system specified by assuming that the thermocouples are measuring the average exhaust temperature correctly. Addition to those testings, numerical analysis completed with computational fluid dynamics method to support the measurement results. Temperature distribution on the cross section exhaust pipe for the exhaust gas temperature sensor position at the diesel oxidation catalyst inlet is calculated through the computational fluid dynamics program. Results investigated and given for each 50 °C with colour codes. Average velocity value for the whole exhaust inlet pipe is given also. Input values for the numerical analysis taken as average of the temperature measurements of each thermocouples being used on the first group of tests.

As part of second group tests, it has been aimed to reduce heat loss and increase catalyst inlet temperature based on reduction of length of exhaust pipe between engine outlet and diesel oxidation catalyst. Two different connection pipe length between the engine outlet and diesel oxidation catalyst has been used during tests to measure temperature differences and calculate the saving from the heat losses. Second group tests completed on a vehicle which is equipped with an engine and modeling the conditions such as in the real life for an average customer. As a result of this increase on the catalyst inlet temperature, savings of the post injection fuel amount has been calculated and total fuel saving amount calculated during lifetime of a vehicle. Lifetime period of a vehicle has been defined based on assumption of the warranty period given by the car manufacturer companies. Average fuel saving amount calculated for three different usage style including city usage, subway usage and rural usage.

In the final section, summary of results and suggestions are obtained. It is necessary that results sum up;

-Based on recurrent tests for the sensors using 30mm,50mm and 70mm tip length, temperature measurements taken by first exhaust gas temperature sensor and second exhaust gas temperature sensor is proportional to the measurements taken with the first thermocouple and second thermocouple.

-Temperature measurements taken with thermocouple 2 has shown close figures with the temperature measured with the exhaust gas temperature sensor 1 however this is not valid for the temperature measured with the second exhaust gas temperature sensor.

-Based on selecting temperature measurements done by second thermocouple as reference, margin of error has been calculated for the three different sensors using different tip length.

-Based on calculations, margin of error has been calculated as %2.52,%5.52 and %9.85 for the 70 mm,50 mm and 30 mm in the same order.

-At the same time a numerical analysis has been completed to compare the test results and the velocity and temperature distribution of the cross section pipe area defined.

-On the numerical analysis, it has been calculated that the gas velocity mean value is between 5 m/s and 15 m/s for the concave edge. This value increasing by progressing to the convex edge of the pipe and reaching up to 29 m/s.

-After investigating the numerical analysis results, margin of error has been calculated as %5 and %10 for the sensor with 50 mm and 30 mm tip length in the same order based on the assumption that sensor with the 70 mm tip length measuring the average exhaust gas temperature correctly.

-For the given system, sensor having 30 mm probe length will not represent the physical conditions. This situation prevent to reach aimed emission levels. Likewise deviations which will occur on the temperature measured by the second exhaust gas temperature sensor will effect the regeneration period of the vehicle.

-Change on the regeneration period will increase the amount of fuel consumed and negatively effect the comfort of the driver.

-Effect of the connection pipe between the engine and the emission control equipments has been investigated by conducting group of test on the vehicle.

-In regards to the test results, reducing the length of the connection pipe between the engine and emission control equipments results to decrease on the heat loss and increase on the diesel oxidation catalyst temperature. This condition will have a positive effect on the fuel amount to be consumed during post injection process which aims to maintain required temperature limit for the diesel particulate filter regeneration process.

-Within the test completed on the vehicle, based on reducing the length of the connection pipe between the engine and emission control equipments fuel saving amount has been calculated per every stroke of the engine for three different driving operation mode.

-On the basis of those calculations, fuel saving amount for lifetime of a vehicle is found as 0.2304 kg for the city cycle, 0.1536 kg for the rural cycle and 0.1024 for the subway cycle.

-In consequence of the test done during this thesis, along with having quite a little effect on the fuel consumption of a vehicle considering lifetime fuel consumption of a vehicle by reducing the connection pipe length between the engine and the emission reduction components, considering to have positive effect on the exhaust gas emissions, suggested improvement can be implemented by considering the packaging constraints.

For future studies, some suggestions are given below:

-Diesel oxidation catalyst length can be optimized by measuring and analysing the chemical reaction speed taking place inside the catalyst.

-Temperature of the diesel oxidation catalyst can be controlled by adding a heater before the catalyst and the effect of this action to the complete system cost can be investigated.

1. GİRİŞ

Nüfus artışı ve gelir düzeyinin yükselmesine paralel olarak, sayısı hızla artan motorlu taşıtlardan çıkan egzoz gazları, hava kirliliğinde sanayiden kaynaklanan hava kirliliğinden sonra önemli bir faktör oluşturmaktadır. Bu durum emisyon kontrol teknolojilerinin geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir. Dizel motorlarının verimlerinin daha yüksek mertebelerde olması, yakıt maliyetlerinin düşük olması, yüksek dayanımlı ve güvenilirliklerinin daha yüksek düzeyde olması onları ticari araç pazarında lider duruma getirmiştir. Son zamanlarda özellikle yakıt fiyatlarının yüksekliğinden dolayı dizel motorların kişisel araç pazarındaki payı da giderek artmaktadır. Önümüzdeki yıllarda da dizel araçların satışlarının önemli ölçüde artacağı beklenmektedir. Dizel motor pazarının bu büyüme trendi çevreyle ilgili etkilerin dikkatli bir biçimde değerlendirilmesini ve verimin daha fazla artırılması adına yakıt tasarruf teknolojilerinin geliştirilmesini gerektirmektedir.

Tez çalışmaları kapsamında, sıcaklık sensörlerinin, prob uzunluğuna bağlı olarak yapmış olduğu sıcaklık ölçümünün doğruluk oranının belirlenmesi sonucunda katalist ve filtrenin daha verimli çalışması amaçlanmıştır. Ayrıca motor ve egzoz ekipmanları arasındaki bağlantı borusunun boyu kısaltılarak ısı kayıplarının azaltılması neticesinde bu ekipmanların daha verimli çalışması ve tüm sistemin daha az zararlı gaz emisyonu üretmesi amaçlanmıştır.

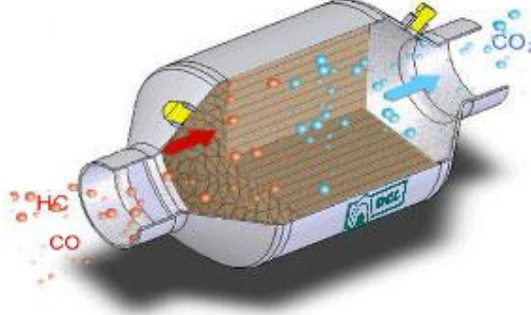
1.1 Dizel Motorlarda Egzoz Sistemleri

Yanma sonucu motor silindirlerinden çıkan gazların atmosfer ile buluşuncaya kadar içerisinden geçtikleri tüm devre ve ekipmanlara egzoz sistemleri adı verilmektedir. Bu sistem genel olarak emisyon kontrol ve indirgeme ekipmanlarından, bu ekipmanlar ve motor arasındaki akışı sağlayan bağlantı borularından ve egzoz sistemlerinin içerisinden geçen gazların sıcaklık, basınç ve oksijen yüzdesi gibi özelliklerinin ölçümünü sağlayan sensörlerden oluşmaktadır.

1.1.1 Egzoz gazı arıtma ekipmanları

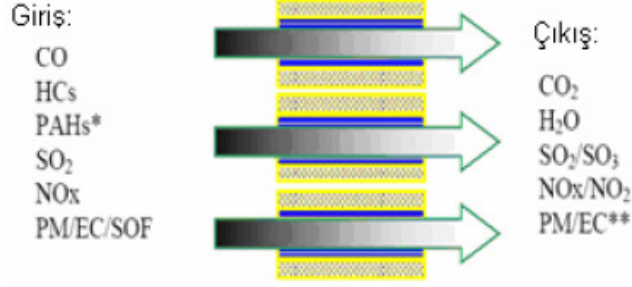
1.1.1.1 Dizel oksidasyon katalisti (DOC)

Dizel motorlarda en yaygın olarak kullanılan katalitik konvertör tipidir. Bir kimyasal reaksiyon yalnızca, aktivasyon enerjisi adını verdiğimiz bir enerji limiti aşıldıktan sonra gerçekleşmektedir. Katalitik konvertörlerin çalışma prensibi bu aktivasyon enerjisinin düşürülmesine, oksidasyon ve indirgeme tepkimelerinin başlatılmasına dayanmaktadır. Bu sayede reaksiyon hızları artmakta, reaksiyonun gerçekleşmesi için gereken sıcaklık değeri düşmektedir. Dizel oksidasyon katalistinin yapısı Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1: Dizel oksidasyon katalisti yapısı.

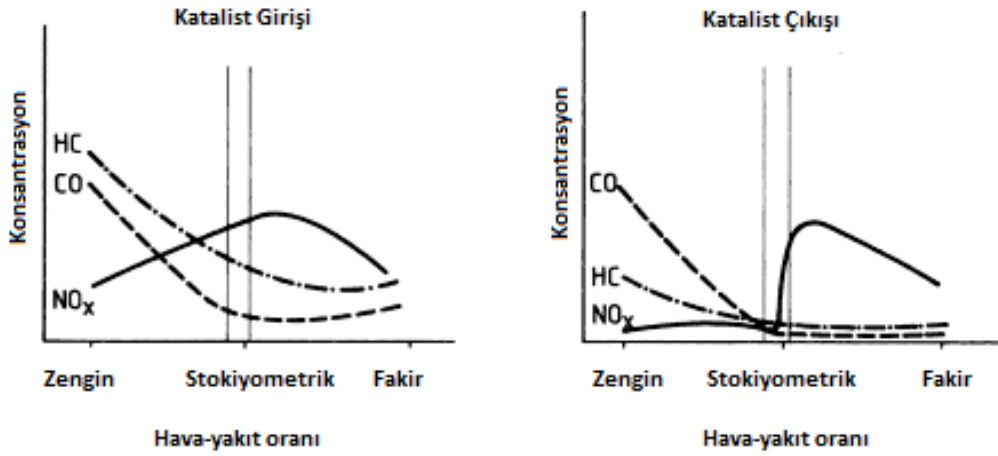
Dizel oksidasyon katalistinin temel kullanım amacı, yanmamış HC ve CO’in O_2 ile tepkimeye sokularak daha zararsız atıklar olan CO_2 ve H_2O ’ya dönüştürülmesine dayanmaktadır. Aynı zamanda partiküllerin çözünebilir organik kısmının da yüksek oranlarda azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Buna ek olarak sülfür içeren yakıtların yanma ürünlerinden olan SO_2 ’yi de oksidize ederek SO_3 ve H_2SO_4 oluşturması sonucu partikül emisyonları ciddi ölçüde artmaktadır. Dizel oksidasyon katalisti genellikle platinyum, rodyum ve/veya palladyumdan oluşan metal kaplı seramik yapıdan meydana gelmektedir. Dizel oksidasyon katalistinin çalışma prensibi Şekil 1.2’de verildiği gibi yanmamış hidrokarbonların ve karbonmonoksitin oksidasyonuna dayanmaktadır.



Şekil 1.2: Dizel oksidasyon katalisti çalışma prensibi.

Dönüşüm verimi egzozdaki zararlı bir bileşenin katalitik konvertör ile indirgenmesi sırasındaki verimliliği ifade etmektedir. %100 dönüşüm verimliliği bir zararlı bileşenin yok olana kadar indirgenmesini ifade etmektedir [1]. Herhangi bir katalitik konvertörde bu dönüşüm verimi iki faktöre bağlıdır;

- Egzoz sıcaklığı
- Hava/Yakıt oranı (Şekil 1.3)



Şekil 1.3: Katalitik konvertörde hava-yakıt oranı [1].

Katalik konvertörün araç üzerindeki pozisyonu aşağıdaki kriterler sağlanacak şekilde seçilmelidir:

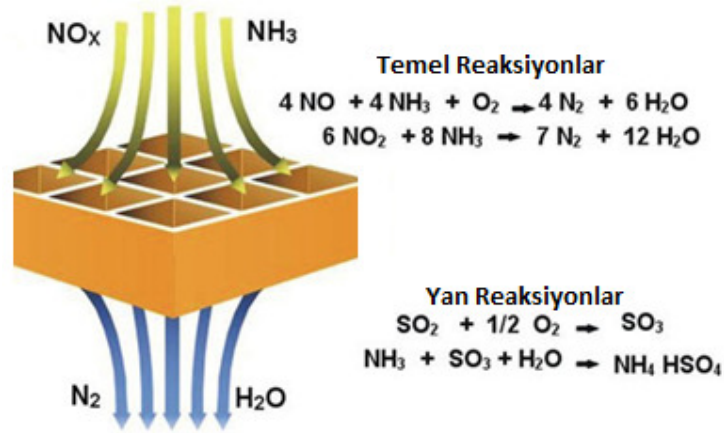
- Basınç kayıplarının mümkün olduğunca az olduğu, akış açısından uygun bir pozisyonda olmalı,
- Konvertör girişinde radyal olarak eşit egzoz gazı bulunmalı,
- Konvertörde yüksek sıcaklıklara ulaşabilmek için, motor ve katalitik konvertör arasındaki ısı kaybı minimuma indirgenmelidir.

Katalitik konvertör motora olabildiğince yakın konumda yerleştirilmelidir. Bu durum, daha düşük ısı depolama kapasitesine sahip olduğu ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı olduğu için metal destekli katalistler için daha önemlidir. Eğer katalitik konvertör motordan çok uzağa yerleştirilirse, düşük yük aralığında gerçekleşen soğuma problemini engellemek için ısı kaybına karşın yalıtım yapılmalıdır. Diğer yandan katalitik konvertörün yapıldığı malzemenin dayanım sıcaklığını geçmemesi de önemli bir faktör olmaktadır [1].

1.1.1.2 Seçici katalitik indirgeme (SCR)

SCR çalışma prensibinde genel olarak, bir indirgeyici, katalizörden egzoz gazına enjekte edilmektedir. Bu indirgeyici bir üre karışımıdır. Bununla birlikte SCR sisteminde hidrokarbon (HC), bakır (Cu) gibi maddeler de indirgeyici olarak kullanılmaktadır [2].

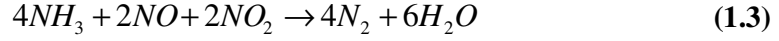
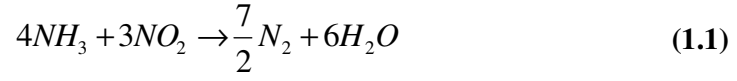
Enjekte edilen indirgeyici tarafından oluşan amonyak (NH₃) ile katalizörde azot oksitler (NO_x), azot (N₂) ve suya (H₂O) indirgenmektedir. NH₃, yüksek sıcaklıklarda hidroliz ile üreden oluşturulmaktadır. Gerçekleşen tepkimeler Şekil 1.4’de verilmiştir.



Şekil 1.4: SCR’ da gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar [2].

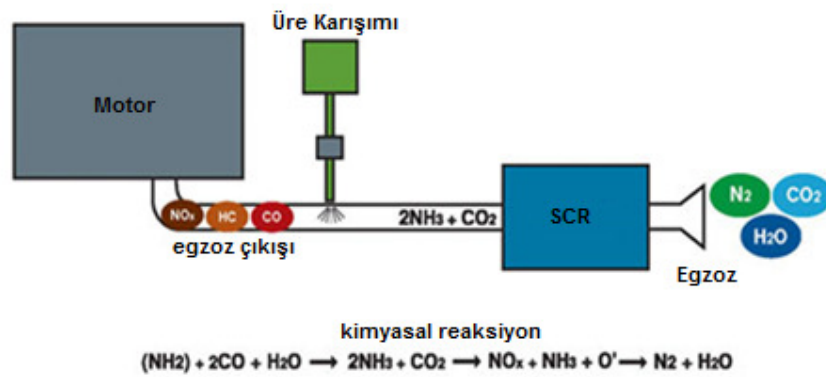
Üre çözeltisi, parçalara bölünerek sıcak egzoz gaz akışına enjekte edildiği zaman damlacıklar ısıtılmakta ve ilk olarak su buharlaştırılmaktadır.

SCR’da gerçekleşen indirgeme tepkimeleri hızlarına bağlı olarak aşağıda verildiği gibi üç farklı kategoride incelenebilir.



Bu üç tepkime içerisinde en yüksek hıza sahip olan ve aynı anda NO ve NO₂ indirgenmesine olanak sağlayan tepkime (1.3)'de verilmiştir ve tepkimenin devamı için NO/NO_x oranının 0,5'de tutulması gerekmektedir. İkinci en hızlı gerçekleşen tepkime ve yalnızca NO'nin indirgenmesine olanak sağlayan tepkime (1.2)'de verilmiştir. En yavaş gerçekleşen ve yalnızca NO₂'in indirgenmesine olanak sağlayan tepkime (1.1)'de verilmiştir. Tepkimelerin hızları karşılaştırıldığında (1.3)'te verilen tepkime (1.2)'de verilen tepkimeye kıyasla 10 kat daha hızlı gerçekleşmekte, yine aynı şekilde (1.2)'de verilen tepkime (1.1)'de verilen tepkimeye göre 10 kat daha hızlı gerçekleşmektedir.

Kullanılan katalizörler SCR prosesinin en önemli elemanlarıdır. Tipik katalizörler titanyum dioksit (TiO₂), vanadyum pentaoksit (V₂O₅) ve tungsten trioksittir (WO₃). SCR sistemi çok az bakım gerektirmesi, taşıt ömrü boyunca kullanılabilir olması, monte edildiği taşıtın bakım ve yağ değiştirme aralıklarını etkilememesi ve yüksek motor gücüne elverişli olması açısından avantajlı; yüksek maliyetli olması, üre karışımının depolanması gerektiğinden dolayı da dezavantajlı bir sistemdir [2].



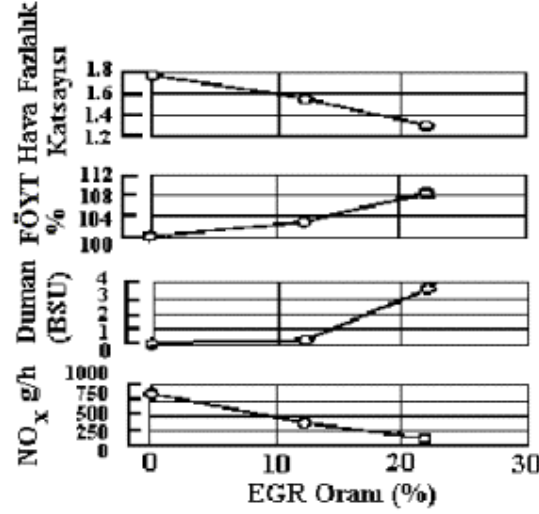
Şekil 1.5: SCR çalışma prensibi [2].

SCR endüstride yaygın olarak öncesinde bir DOC ile kullanılır. Yaygın bir kullanım biçimi Şekil 1.5'de verilmiştir. Bunun amacı DOC ile HC ve CO emisyonlarını azaltıp devamında NO_x'in SCR içerisinde indirgenmesidir. Bu yüzden SCR'da

gerçekleşen indirgeme tepkimelerinin verimini etkileyen en önemli faktörlerden biri de DOC'de gerçekleşen NO'in NO₂'e oksidasyonudur. Çünkü SCR'da gerçekleşen üç tepkime türünden en hızlı tepkime olan ve (1.3)'te verilen tepkimenin yüksek verimde gerçekleşmesi için NO/NO₂ oranının 0,5 olması gerekir. DOC'de gerçekleşen NO oksidasyonu tepkimesinin verimi ve çıkışında oluşan NO/NO₂ oranı DOC'de ulaşılan sıcaklığın bir fonksiyonudur ve uygulamadan uygulamaya değişmekle birlikte ideal sıcaklık değeri 250⁰C civarındadır.

1.1.1.3 Egzoz gaz resirkülasyonu (EGR)

Yanma sırasında oluşan NO_x miktarı büyük ölçüde sıcaklığa bağlı olmaktadır. Yanma odası içindeki karışımın egzoz gazları ile seyreltilmesi sonucu yanma sonu sıcaklıkları, dolayısıyla üretilen NO_x miktarı azalmaktadır. Bu sistemin işlevi, egzoz gazlarını silindirlere geri göndererek karışım içerisindeki oksijen konsantrasyonunu azaltıp, karışım oranını azaltmak ve silindir gazlarının ısı kapasitesini yükselterek maksimum gaz sıcaklığını azaltmaktır. EGR direkt püskürtmeli dizel motorlarında yakıt ekonomisini kötüleştirmeden NO_x emisyonlarını azaltmanın en iyi yollarından birisidir. Uzun zamandır şahsi kullanım tipi dizelerde başarı ile kullanılmasına karşılık, ticari kullanım tipi dizelerde motorun aşınmasını arttırdığından dolayı bazı sorunlar açığa çıkmaktadır. Yanmış gazların sıcaklığı maksimum iken NO_x oluşma ihtimali de artmaktadır. Bu maksimum sıcaklık, yanma başlangıcı ve maksimum silindir basıncı oluşmasından hemen sonra oluşmaktadır. Erken yanmaya başlayan karışımın sıcaklığı, piston sıkıştırmaya devam ettiği için yükselecektir. Dolayısıyla NO_x oluşum hızı da artacaktır. Motorlarda NO_x, son alev cephesindeki sıcak gazlarda oluşmaktadır. NO_x' in başlangıçtaki oluşum hızı kısmen sıcaklığa bağlıdır. Oksijen yoğunluğunun yüksek olması da NO_x oluşum hızını arttırmaktadır. EGR ile silindir içindeki oksijenin bir kısmının yerini atık karbondioksit (CO₂) ve su (H₂O) alacağından lokal oksijen yoğunluğu azalacaktır. Bu durum Şekil 1.6'da verildiği gibi yakıt ve oksijen moleküllerinin buluşup reaksiyona girme ihtimalini azaltmakta, buna bağlı olarak reaksiyon hızı ve lokal alev sıcaklığı düşerek, NO_x oluşumu azalmaktadır [3].



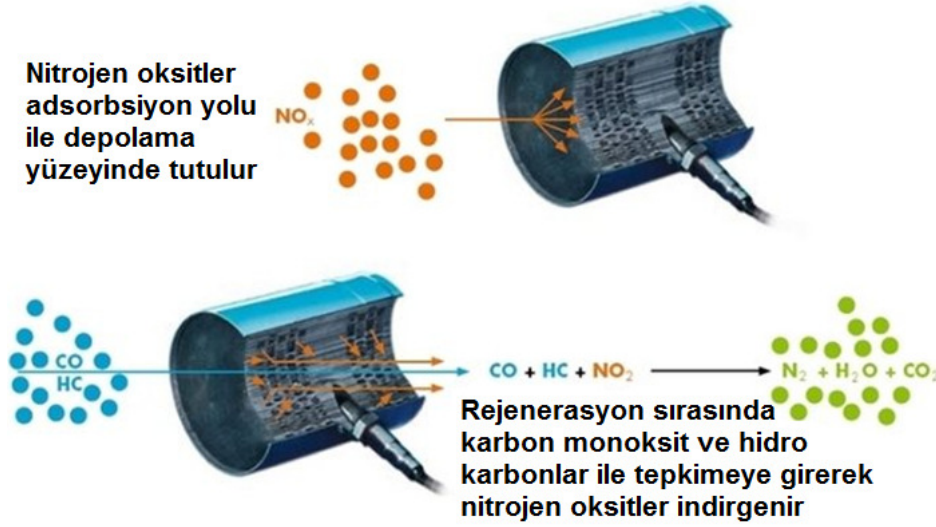
Şekil 1.6: EGR oranına bağlı olarak NO_x değişimi [3].

EGR ile yanma odasının farklı bölgelerindeki lokal sıcaklıklar değiştirilmektedir. Bu da yakıtın buharlaşma hızına ve is oksidasyon hızına etki etmektedir. İs oksidasyon hızı lokal sıcaklığın artması ile kısmen artmaktadır. EGR'nin neden olduğu alev sıcaklığındaki azalma oksidasyon hızının azalmasına ve is oluşumunun artmasına yol açmaktadır. EGR ile silindir giriş sıcaklığı artacağından yanmamış hidrokarbon (HC) emisyonları azalmaktadır. Şekil 1.6'de orta hızda ağır yük altındaki aşırı doldurmalı ve ara soğutuculu bir dizel motoruna EGR uygulandığı zamanki test sonuçları gösterilmiştir. %10 EGR civarında duman ve fren özgül yakıt tüketimi (FÖYT) fazla artmamıştır. EGR oranı arttıkça NO_x azalmakta, fakat hava fazlalık katsayısının (HFK) azalmasından dolayı is miktarı artmakta ve yakıt tüketimi kötüleşmektedir. Dolu havası içindeki oksijen miktarı azaldıkça CO emisyonları artacaktır. Oksijen miktarı çok azalmadıkça EGR yakıt ekonomisini kötüleştirmeyecektir. Aşırı EGR hava yakıt oranını bozacağından PM ve is emisyonları artmakta, silindirlere geri gönderilen egzoz gazları soğutulmuş ya da püskürtme basıncı artırılarak PM ve is oluşumu azaltılabilmektedir [3].

1.1.1.4 Fakir azotoksit tutucu (LNT)

NO_x adsorplayıcı olarak da geçen bu ekipman fakir karışım ile gerçekleşen yanma sonucu oluşan NO ve NO₂ 'in oksidlerinin indirgenmesi suretiyle çalışmaktadır. Fakir yanma gerçekleştiren motorlar, özellikle dizel yakıtlı motorlar, egzoz gaz akışında bulunan yüksek O₂ miktarı sebebiyle emisyon kontrolü oldukça zor olarak

kabul edilmektedir. Dizel motorlardaki NO_x emisyonlarını azaltmaya yönelik regülasyonlarca da artan istek, EGR ve SCR gibi teknolojilerin gelişimini hızlandırmıştır. Fakat EGR'ın düşük verimlilikle çalışması ve SCR'ın da harici bir bileşene ihtiyaç duyması, LNT'lerin tercih edilmesine sebep olmaktadır. Çalışma prensibi Şekil 1.7'de verildiği gibi zeolitin moleküler bir sünger gibi, NO ve NO_2 moleküllerini tutması üzerine kurulmuştur. LNT de zeolit içeren bir kaplamaya sahip katalitik konvertör çeşididir. Tutucu dolduğu zaman daha fazla NO_x adsorbe edilemez hale gelmekte ve egzoz sisteminden doğruca atılmaktadır. Bu durumda bir rejenerasyon ihtiyacı doğmaktadır. Bu rejenerasyon prosesinin çeşitli metodları mevcuttur. Dizel yakıtın veya diğer reaktanların enjekte edilmesi bu yöntemlerden biridir. Kararsız olan NO_2 bileşenleri HC'larla birleşerek H_2O ve N_2 üretilmektedir. Aynı şekilde H_2 kullanımı da denenmiştir fakat saklaması zor olduğu için tercih edilmemektedir.

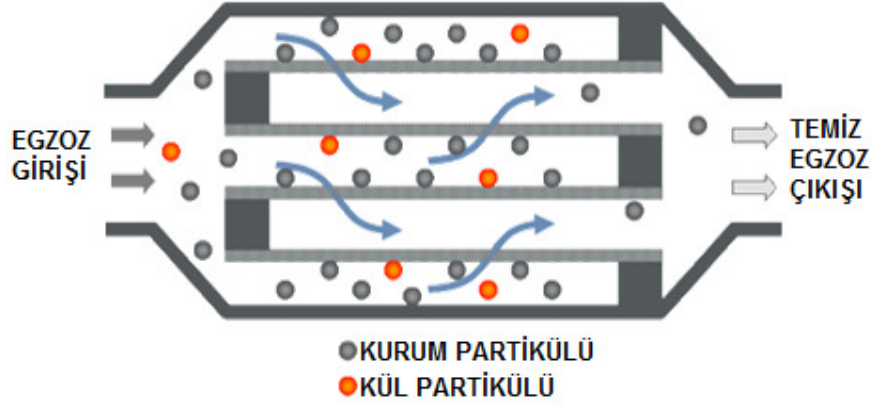


Şekil 1.7: LNT çalışma prensibi.

1.1.1.5 Dizel partikül filtresi (DPF)

Dizel partikül filtreleri egzoz akışında gaz formunda bulunan zararlı atıkların geçişine izin veren fakat bunun yanında sıvı ve katı formda bulunan zararlı atıkların tutulmasını sağlayan filtreleme ekipmanlarıdır. Şekil 1.8'de verildiği gibi PM adıyla da bilinen partikül, kurum ve isi tutabilen gözenekli metal veya seramik bir filtreden oluşmaktadır. Filtrenin tasarımında etkili olan en önemli kriterler, yüksek tutma

kapasitesi ve düşük basınç farkı oluşturmaktadır. Yaygın olarak kullanılan tipleri silikon karbit, kordierit veya metalden yapılmaktadır.



Şekil 1.8: DPF çalışma prensibi [4].

Dizel filtre sistemlerinin çoğu tek kullanımlık değildir. Kendini yenileyebilen filtreler ısı rejenerasyon ile kurumu okside ederek gaz haline dönüştürmekte ve filtrede birikimi engellemektedir. Kendini yenileyebilen partikül filtre sistemlerinin pasif, aktif ve pasif-aktif olmak üzere üç farklı uygulaması bulunmaktadır. Pasif filtre sistemlerinde, özel katkı maddeleri ve katalizör kullanılarak aracın normal çalışması sırasında rejenerasyonun başlayabilmesi için kurumun okside olma sıcaklığı düşürülmektedir. Aktif filtre sistemlerinde, aracın normal çalışması sırasında yakıt katkı maddeleri ya da katalizör kullanılmaması nedeniyle egzoz gazı sıcaklığı rejenerasyonun başlaması için yeterli olmamaktadır. Rejenerasyon işlemi, harici enerji kaynakları kullanarak biriken kurumun sıcaklığının artırılması ile başlatılmaktadır. Bu tür sistemlerde temel olarak yakıt ve elektrik olmak üzere iki harici enerji kaynağı kullanılmaktadır. Örnek olarak, sonradan yakıt enjeksiyonu, ek yakıt brülörleri, elektrik ateşleyici, vb. kullanılabilir. Üçüncü yöntem pasif ve aktif rejenerasyon yöntemlerinin birleşimidir. Aktif rejenerasyon filtre sistemleri pasif olanlara göre çok daha karmaşık olup gerekli rejenerasyon sıcaklığını sağlamak için daha fazla enerji harcamaktadır. Pasif filtreler ise daha basittir. Ancak, pasif sistemlerdeki rejenerasyon aracın kullanım şekline bağlıdır. Pasif filtre sistemlerinde, yakıt katkı maddeleri ve katalizör kullanılarak aracın normal çalışma koşulları altında kurumun okside olması sağlanmaktadır. Eğer araç uzun süreli düşük yüklerde

ya da şehir içinde sık sık rölanti devrine düşerek kullanılırsa dizel partikül filtresinde kurum oksidasyon hızı azalarak aşırı kurum birikmesine neden olmaktadır. Bu da filtrenin ömrünü kısaltmaktadır. Gaz filtre malzemesinin gözeneklerinden sıkışarak geçerken partiküller filtrede toplanmaktadır. Zamanla filtre gözeneklerinde toplanan partiküller gaz geçişinde direnç yaratmaktadır. Partiküllerin filtrede birikip tıkanmayı önlemek için belli periyodlar dahilinde egzoz gazının sıcaklığı 550°C'in üzerine çıkarılarak rejenerasyon işlemi yapılmaktadır. DPF'de biriken kurum partiküllerinin çoğunluğu egzoz gazı sıcaklığının artması ile yakılarak CO₂'ye dönüştürülmektedir. Yanmayan kül DPF'de kalmakta ve zamanla DPF tamamen dolarak değiştirilmesi gerekmektedir [4].

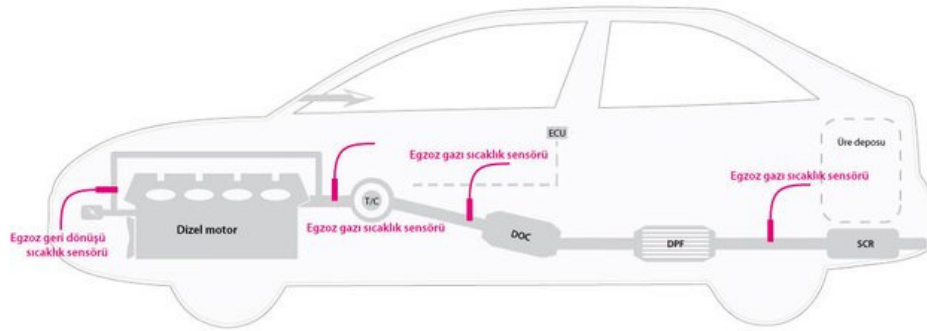
1.1.2 Egzoz sisteminde kullanılan sensörler

Modern egzoz arıtma sistemlerinde kullanılan ekipmanların sayılarının ve çeşitliliklerinin artması bu ekipmanların denetlenmesi ihtiyacını doğurmuştur. Gerek regülasyonların belirlediği limitleri tutturmak adına, egzoz gazı arıtma ekipmanlarının verimlerini belirleme ve kontrol etme ihtiyacı gerekse de bu ekipmanların pahalı olması sebebiyle hasar görmesine sebep olacak etkileri kontrol etme ihtiyacı otomotiv endüstrisi egzoz sistemlerinde sensör kullanımını yaygınlaştırmıştır.

1.1.2.1 Sıcaklık sensörleri

Egzoz gazı sıcaklık sensörü, turbo şarjlı motorların, katalizatörlerin, dizel parçacık filtrelerinin ve azot oksit indirgeme sistemlerinin sıcaklık denetiminde kullanılmaktadır. Sıcaklık sensörü Şekil 1.9'da verildiği gibi çeşitli araç pozisyonlarında optimum çalışma noktasının denetiminde ve ilgili parçaların aşırı ısınmaya karşı korunmasında kullanılmaktadır ve araçların gereksiz zararlı madde emisyonlarının önlenmesi açısından önemli bir parçadır. Buna ek olarak, oksijen sensörlerinin kullanılmadığı uygulamalarda, yanma odasına giren hava yakıt oranının belirlenmesinde de kullanılmaktadır. Yakıt fazlasının olduğu zengin karışımlarda, yanmadan atılan yakıtın soğutucu özelliğinden dolayı, egzoz gazı daha düşük sıcaklıklarda atılmakta ve bu sıcaklıklar sensör yardımıyla ölçülerek hava yakıt oranı hesaplanmaktadır. Sıcaklık sensörleri, egzoz borusundan aldığı ölçümü kablo ve konnektörler yardımı ile motor aktarma organları kontrol ünitesine aktarmakta ve çeşitli

hesaplamalar yardımıyla hava ve yakıt emiş miktarının belirlenmesinde rol oynamaktadırlar [5].



Şekil 1.9: Sıcaklık sensörlerinin araç üzerinde gösterimi [5].

Egzoz sistemlerinde genellikle termistör tip sıcaklık sensörleri kullanılmaktadır. Termistörler ısı ile değerleri değişen bir direnç türüdür. Termistörlerin bazı tipleri ısı ile doğru orantılı, bazı tipleri de ısı ile ters orantılı olmak üzere dirençlerini değiştirmektedirler. Egzoz sistemlerinde NTC tip, yani negatif ısı katsayılı termistörler kullanılmaktadır. Bu tip sensörlerin üzerindeki sıcaklık arttıkça direnci azalmakta, sıcaklık düştükçe direnci artmaktadır. Buna ek olarak pek yaygın olmasa da yine aynı prensibe uygun olarak çalışan RTD tip sensörler de kullanılabilir. RTD tip sensörlerin termistörlerden temel farkı, kullanılan malzemedir. Termistörlerde genellikle seramik ve polimer malzeme kullanılırken, RTD tip sensörlerde ise saf metal kullanılmaktadır.

Sıcaklık ve direnç arasındaki ilişkinin lineer olduğu varsayımına dayanarak, sıcaklık sensörlerinin ölçüm prensibi (1.1) ile açıklanabilmektedir.

$$\Delta R = k\Delta T \quad (1.4)$$

Termistörler k değerinin pozitif ve negatif olmasına göre iki şekilde sınıflandırılabilir. NTC tip sensörler k değerinin negatif olduğu sensörlerdir. Sıcaklık katsayısı k yerine, direncin sıcaklık katsayısı α_t de kullanılmaktadır (1.2).

$$\alpha_t = \frac{1}{R(T)} \frac{dR}{dT} \quad (1.5)$$

Pratikte lineer yaklaşım yalnızca belirli bir sıcaklık aralığı için uygun olmaktadır. Daha doğru bir ölçüm için sensörün direnç-sıcaklık eğrisi detaylı bir şekilde belirlenmelidir. Üçüncü seviyeden yaklaşım için Steinhart-Hart adı verilen ve a, b ve

c katsayılarının her sensör için hesaplanması gerektiği eşitlik yaygın olarak kullanılmaktadır.

$$\frac{1}{T} = a + b \ln(R) + c(\ln(R))^3 \quad (1.6)$$

NTC tip termistörler genellikle sinterlenmiş metal oksit malzemeden yapılan bir yarı iletken den oluşmaktadır. Yarı iletkenin sıcaklığın artışına bağı olarak aktif yük taşıyıcıların sayısı artmakta ve elektrik iletimi kolaylaşmaktadır. Bunun sonucunda iletilen elektrik akımı miktarı arttığı için direnç düşmüş olmaktadır. Yük taşıyıcılar ne kadar artarsa malzeminin aktaracağı akım miktarı da artmaktadır. Titanyum (Ti) ve ferrik oksid (FE_2O_3) gibi malzemeler n tipi yarı iletkenler ile desteklenmektedir, yük taşıyıcılar elektronlardır. Nikel oksit (NiO) ve lityum (Li) malzemeler p tipi yarı iletkenler ile desteklenmekte, yük taşıyıcılar deliklerdir. Söz konusu prensip (1.4) denklemi ile açıklanmaktadır.

$$I = nAve \quad (1.7)$$

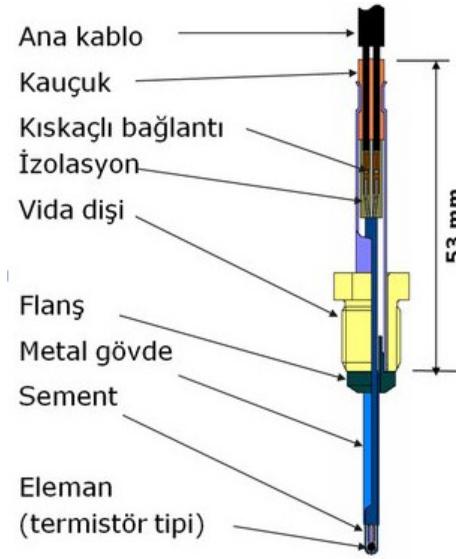
Otomotiv egzoz sistemlerinde kullanılan sıcaklık sensörleri Şekil 1.10'da verildiği gibi genellikle ölçümü sağlayan elemanların bulunduğu bir gövdeden ve sinyal aktarımını sağlayan kablodan oluşmaktadır.



Şekil 1.10: Sıcaklık sensörü probu.

Aynı zamanda prob ismi de verilen ölçümü yapan eleman bir egzoz borusunun üzerine açılan bir delik içerisine yerleştirilmekte ve sızdırmazlık sağlanması açısından dişli bir mekanizma ile egzozla monte edilmektedir. Sensör gövdesinin alt kısmında ölçümü yapan termistor adındaki eleman bulunmakta ve üst kısımda sinyal

iletimini sağlayan ana kablo bulunmaktadır. Sensöre ait alt elemanlar Şekil 1.11’de verilmiştir.



Şekil 1.11: Sensör yapısı.

1.1.2.2 Oksijen (lambda) sensörleri

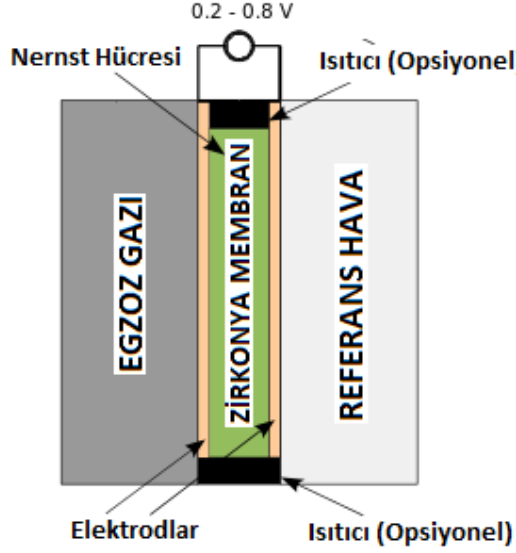
Egzozdan atılan gazdaki oksijen oranını ölçerek yanma odasına yani silindirlere giren hava-yakıt oranını belirlemekte ve bu oranın tam yanmanın gerçekleşeceği stokiometrik orana çekilmesi amacıyla kontrol mekanizmasına geribildirim yapmaktadır. Katalistlerin ve filtreleme ekipmanlarının giriş ve çıkışlarında oksijen sensörleri yardımı ile ölçülen oksijen oranı kıyaslanarak katalistlerin ve filtreleme ekipmanlarının çalışma verimleri hesaplanmaktadır. Buna bağlı olarak katalistlerde oluşacak bir arıza durumunun belirlenmesinde de rol almaktadır. Egzoz borusundan aldığı ölçümü kablo ve konnektörler yardımı ile motor aktarma organları kontrol ünitesine aktararak çeşitli hesaplamalar yardımıyla hava ve yakıt emiş miktarının belirlenmesinde rol oynamaktadırlar. Lambda sensörlerinin iki farklı tipi bulunmaktadır. Zirkonyum dioksit ve titanyum dioksit lambda sensörlerine, dar aralıklı ya da "ikili" lambda sensörü adı da verilmektedir, çünkü bu tipte sensör sinyali iki değer arasında gidip gelmektedir. Böylece, ölçülen egzoz gazı belirlenen bir referans hava-yakıt oranı (stokiometrik oran) ile kıyaslanarak, atılan egzoz gazının yakıt açısından zengin veya fakir bir karışım olduğu belirlenmektedir. Bu grup sensörlere HEGO adı verilmektedir. Diğer grup ise geniş aralıklı lambda sensörleridir. Farklı karışım durumları arasındaki kademesiz geçişleri ölçebildikleri

ve tanımlayabildikleri için bunlara "lineer" (doğrusal) lambda sensörleri de denmektedir. Bu grupta yer alan sensörlere UHEGO adı verilmekte ve bu tip sensörler diğerlerinin aksine, lambda oranını doğrudan rakamsal olarak belirleyebilmekte ve bu bilgiyi kontrol modüllerine aktarmaktadırlar [6].



Şekil 1.12: Oksijen sensörü.

Sensör elemanı Şekil 1.12’de verildiği gibi boşluklu platinyum elektrodların içerisine ve dışarısına yerleştirilen seramik silindirden ve tüm mekanizmayı koruyan metal bir kutudan oluşmaktadır. Oksijen sensörleri, Şekil 1.13’de verildiği gibi egzoz gazı ve içerisinde bulunan hava arasındaki oksijen miktarı farkını ölçerek ve bu farka bağlı olarak direncini değiştirirerek veya voltaj üreterek çalışmaktadır. Sensörün yüksek verimle çalıştığı bir sıcaklık değeri vardır ve bunu sağlayabilmek adına yeni tip sensörlerde ölçümün alındığı seramik elemanı hızlıca ısıtmaya yarayan bir ısıtıcı ünite mevcuttur. Isıtıcı üniteye sahip olmayan eski tip problemler egzoz sıcaklığı ile birlikte ısınıp yüksek verimde ölçüm almaya başlarlar fakat motorun yanma işlemine başlaması ve seramik elemanın ısınması arasında belirli bir süre geçtiği için ölçümde de birtakım gecikmeler yaşanmaktadır. Motorun çalışması ve sensörün verimli ölçüm alması arasında geçen süre egzozun geometrisine ve dış ortam sıcaklığına bağlıdır. Isıtıcı olmadığı durumlarda, proses birkaç dakika sürebilmektedir. Bu süreçte oksijen sensörü doğru ölçüm alamadığı için katalist verimi ölçülememekte ve egzozdan atılan gaz içerisindeki zararlı atıkların miktarı kontrol edilememektedir [7].



Şekil 1.13: Oksijen sensörü iç yapısı [7].

Zirkonyum dioksit veya zirkonya olarak adlandırılan lambda sensörü Nernst hücresi adı verilen, katı fazda elektrokimyasal yakıt hücresine dayalıdır. İki elektrodu arasında egzoz gazındaki oksijen oranı ve referans havadaki oksijen oranı farkına bağlı olarak bir voltaj oluşmaktadır. 0,2 V'luk bir voltaj çıkışı silindirlere giren oksijen miktarının yakıtta bulunan CO'yi tamamen oksidize ederek CO₂'ye dönüştürebildiği fakir bir hava yakıt karışımını ifade etmektedir. 0,8 V'luk bir çıkış voltajı, az miktarda oksijen emiliminin gerçekleştiği ve yakıtın tam verimle yanmadığı zengin bir hava-yakıt karışımını ifade etmektedir. İdeal voltaj çıkış değeri 0,45 V'dur. Bu değer hava-yakıt karışımının tam yanmayı sağlayacak stokiometrik dengede olduğunu ifade etmektedir. Sensör stokiometrik oran civarında oldukça hassas bir ölçüm sağlamaktadır. Sensör iç ve dış kısmında paslanmaz çelik ile kaplı olduğu için korozyona karşı oldukça dayanıklıdır ve bu sayede korozyon açısından zor olarak tanımlanabilecek egzoz ortamında kullanılabilir [7].

1.1.2.3 Basınç sensörleri

Egzoz gazı arıtım ekipmanlarından oluşan partikül filtrelerinin doluluk oranlarını ve egzoz gazının debisini ölçmek amacıyla kullanılan sensörlerdir. Şekil 1.14'de verildiği gibi önceden belirlenmiş bir referans değer ile aldığı ölçümü veya iki ayrı noktadan aldığı ölçümleri kıyaslamak suretiyle bir sonuca ulaşmaktadır. Egzoz üzerinde kullanılanları piezoelektrik tipidir. Egzoz üzerinde DPF girişi, çıkışı veya hem girişi ve hem çıkışından çıkarılan metal bir boru yardımıyla kauçuk borusu

içerisine hava akışı sağlanmaktadır. Hava akışı ile ölçüm ünitesinde meydana gelen basınç neticesinde hareket eden devre, bir voltaj farkı oluşturmaktadır. Bu voltaj farkı daha önceden belirlenen eğriler ile basınç birimine çevrilmekte ve ölçüm sağlanmaktadır.



Şekil 1.14: Basınç sensörü.

1.1.2.4 Azotoksit sensörleri

Oksijen sensörleri ile aynı prensipte çalışan fakat oksijen sensörlerinin aksine iki adet odacıktan oluşan egzoz gazından geçen havanın içerisinde bulunan ve insan sağlığı için de zararlı olan azotoksitlerin ölçümünü amaçlayan sensörlerdir. Şekil 1.15’de verildiği gibi oksijen sensörlerine benzer şekilde referans hava ve egzoz gazının farkından dolayı zirkonyum vb. elemanların oksijen ile bağ yapıp bağ bırakarak voltaj farkı oluşturmalarına dayalı olarak ölçüm yapmaktadırlar. Doğrudan emisyon azaltımı amacı ile kullanılmaktadır. Egzoz emisyonu regülasyonları neticesinde oksijen sensörünün azotoksit ölçümünü sağlayamaması ve azotoksit emisyonlarının azaltımı gereksinimi sebebiyle dizel araçlarda kullanımına başlanmıştır. Ana amacına ek olarak azotoksit tutucuların veriminin ölçümünde de faydalanılmaktadır.



Şekil 1.15: Azotoksit sensörü.

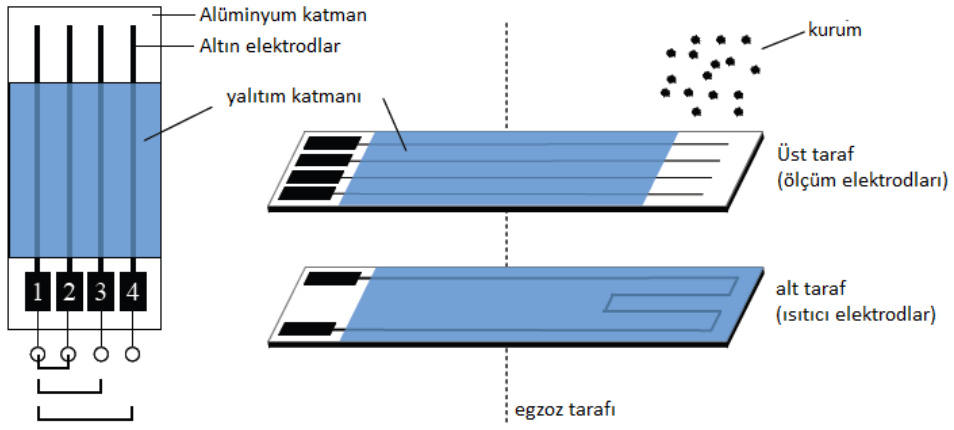
1.1.2.5 Partikül (PM) sensörü

Dizel motorunda gerçekleşen yanma sonucu oluşan partiküller hidrokarbon gibi bağlı organik bileşenlerden, karbon partiküllerinden (kurum) ve düşük oranda sülfat ve kül gibi inorganik bileşenlerden oluşur. Bu partiküller boyutuna bağlı olarak insan sağlığına zararlı olabilmektedir. Bu sebepten ötürü dizel araçlardaki partikül emisyonu regülasyonlarca limitlenmiştir. Egzoz sistemlerinde atık havada bulunan partiküller %95 oranında partikül filtrelerce tutulur fakat bu ekipmanda olası bir arıza veya verim düşüşü yalnızca basınç değeri ölçülerek belirlenmektedir. Yenilenen regülasyonlarda izin verilen partikül emisyon sınırlarının azaltılması partikül filtrelerinin verim ölçümü ve diagnostik ihtiyaçlarını artırmıştır.



Şekil 1.16: Partikül sensörü.

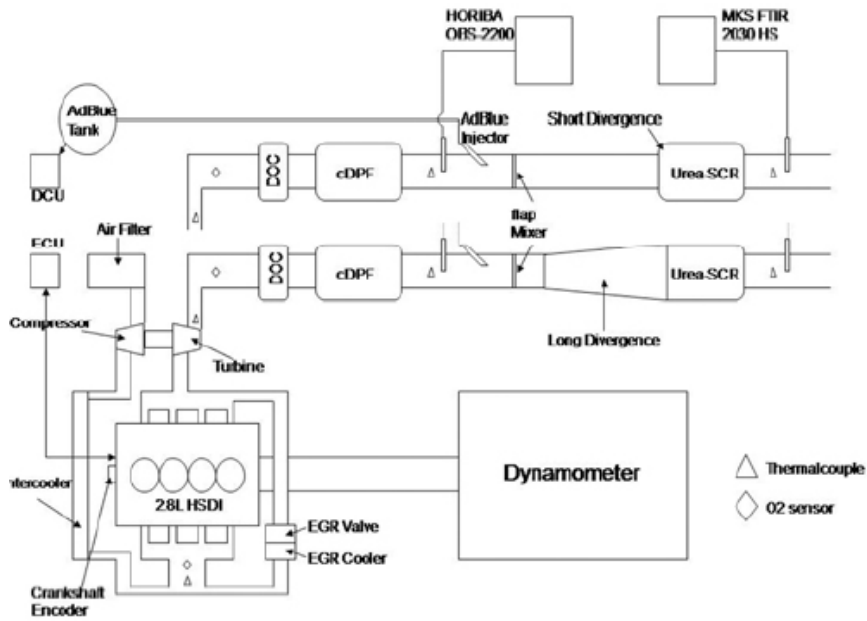
Sensör elektrodları arasındaki oluşan kurum partiküllerinin etkisini ölçmeyi amaçlamaktadır. Şekil 1.16’de verildiği gibi içerisinde platinyum rezistanstan oluşan bir ısıtıcı bulunmaktadır. Isıtıcı, ölçüm kanallarının kurum giderilmesi sırasında zarar görmesini engellemek adına elektriksel olarak yalıtılmış cam seramik bir film ile kaplanmıştır. Şekil 1.17’de verildiği gibi ölçüm elemanının diğer tarafında yine seramik cam film ile kaplı dört adet altın elektrod bulunmaktadır. Önceden tanımlanmış bir alan kurum birikimi amacıyla boş bırakılmaktadır. Partikül sensörü yine diğer sensörler gibi dişli mekanizma ile egzoz hattına bağlanır [8].



Şekil 1.17: Partikül sensörü yapısı.

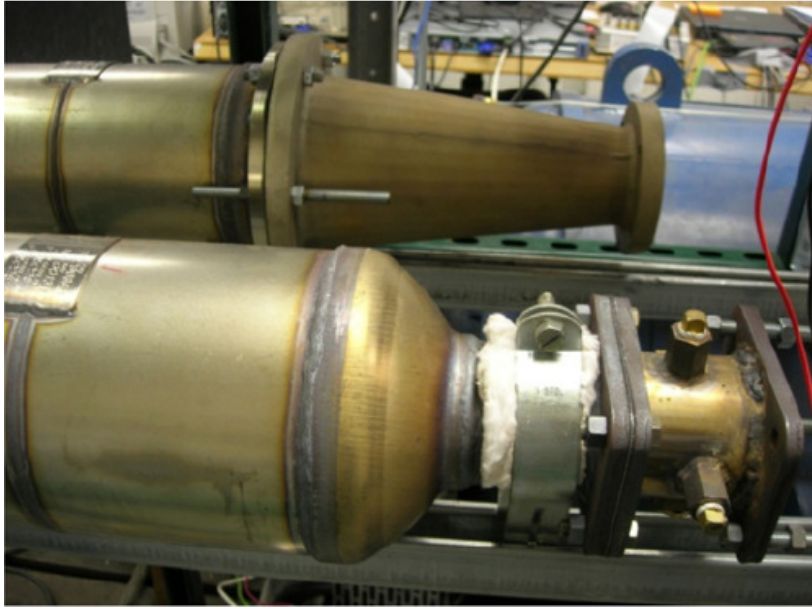
2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

Casarella ve diğ. tarafından yapılan çalışmada, farklı egzoz sıcaklıklarında 2.8L'lik dört silindirli dizel motora sahip hafif ticari bir araçta B20 yakıt (%20 soya fasülyesi içeren biyodizel) kullanımının ve SCR giriş borusunun şeklinin SCR verimliliğine olan etkisi incelenmiştir. Çalışmada DEF dozlama sistemi ile bakır-zeolit esaslı SCR kullanımına odaklanılmıştır. Şekil 2.1'de şematik olarak ve Şekil 2.2'de fiziksel olarak gösterildiği gibi İki farklı SCR giriş borusu ve iki farklı yakıt tipi incelenmiştir. Deney sırasında kullanılan yakıt tipleri ultra düşük sülfür içeren dizel yakıtı ve soya fasülyesi içeren biyodizeldir. Şekil de görüldüğü üzere sistem dinamometreye bağlı dört silindirli 2.8L'lik bir motordan, egzoz hattında bulunan dizel oksidasyon katalisti, dizel partikül filtresi ve üre indirgeme katalistinden oluşmaktadır. Sistemde resimde de görüldüğü üzere SCR öncesinde iki farklı bağlantı borusu kullanılarak deneyler yapılmıştır. Motor hızı, çıkış gücü ve bunların sonucunda oluşan egzoz gaz sıcaklığını bağlı olarak ultra düşük sülfürlü dizel ile test edilen dört farklı test aşaması belirlenmiştir.



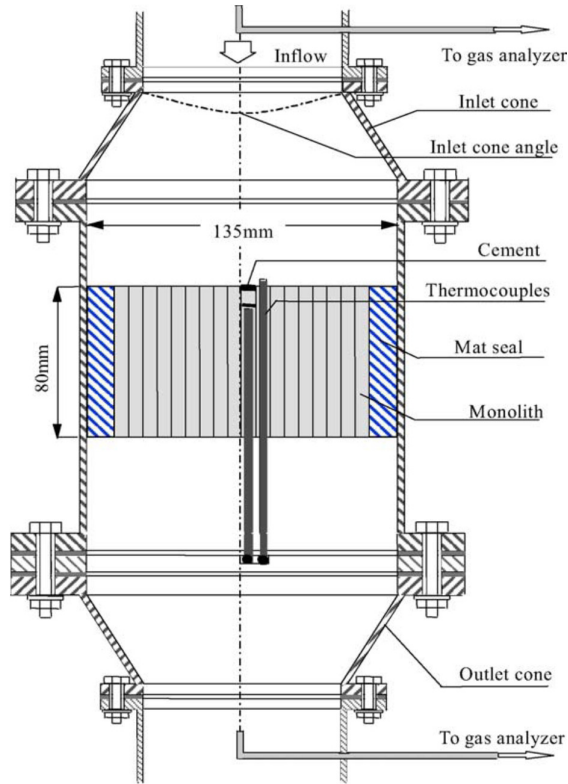
Şekil 2.1: Test düzeneği şematik gösterimi [9].

SCR giriş ve çıkış sıcaklıkları yaklaşık olarak 225, 250, 300 ve 400 °C olarak ölçülmüştür. SCR verimi üzerindeki sıcaklık etkisini ölçmek adına deneyde motordan alınan güç vb. diğer verilerden bağımsız olarak SCR sıcaklığı sabit olarak kabul edilmiştir. Yapılan testler sonucu elde edilen sonuçlar SCR öncesi ve SCR sonrası olmak üzere iki kısımda verilmiştir. İlk kısımda SCR öncesine yerleştirilen probtan alınan DOC ve DPF'ten geçen egzoz gazı üzerinden ölçüm alınmıştır. İkinci kısımda ise SCR çıkışına yerleştirilen probtan aynı zamanda SCR'dan da geçmiş egzoz gazı üzerinden ölçüm alınmıştır. Düşük sıcaklıklarda B20 yakıtı ULSD yakıtı kıyasla oldukça düşük NO_x indirgeme verimine ulaşabilmiştir. Bu durumu uzun SCR bağlantı borusu az da olsa kompanse edebilmiştir. SCR öncesinde bulunan DOC ve DPF NO_x oranlarına ciddi etkide bulunmuştur. Ek olarak NO₂'nin NH₃ ile indirgeme tepkisine girmesinin NO'ye kıyasla sıcaklıktan bağımsız olarak daha zor olduğu çıkarımına varılmıştır. Mevcut çalışma EGR sisteminin dikkatli bir şekilde tasarlanmasını ve motor performansının etkisinden bağımsız olarak düzgün kalibre edilmiş emisyon test ekipmanları ile test edilmesi gerektiğini önermektedir. Aksi takdirde yapılan test sonuçları gerçeği yansıtmayacaktır. Test sonuçlarına göre soya fasülyesi içeren biyodizel SCR öncesi NO_x emisyonlarını yükseltmemektedir. Düşük sıcaklıklarda uzun SCR giriş borusu verimi düşük oranlarda artırmıştır. Ayrıca sıcaklık değişiminin SCR verimine NO/NO₂ oranından çok daha fazla etki ettiği görülmüştür.



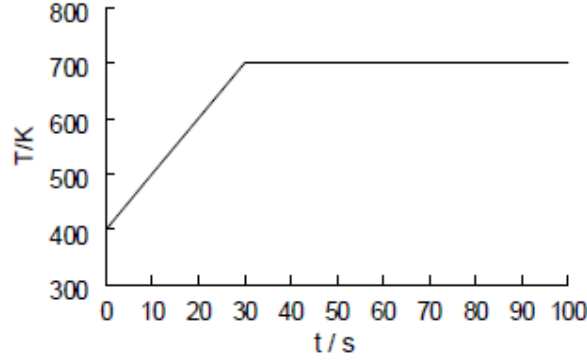
Şekil 2.2: Test düzeneği SCR bağlantı borusu [9].

Shuai ve diğ. tarafından yapılan çalışmada kaplamasız monolit ve katalitik monolitte, gerçek motor çalışma koşullarında termoelemanlar kullanılarak değişken sıcaklık alan ölçülmüştür. Şekil 2.3’de verilen düzenek kurulmuştur. Monolitte çok boyutlu türbülans akış modeli, ısı ve kütle transferi, kimyasal reaksiyon modeli kurulmuş ve katalitik konvertörde akış alanı nümerik olarak ölçülmüştür. Çalışmanın temel amacı, monolitte değişken ısınma karakteristiklerini ortaya koymak ve katalitik konvertörün giriş koni yapısının sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisini incelemektir. Kaplamasız monolit ve katalitik monolit arasındaki ısınma davranışlarının oldukça farklı olduğu deneysel olarak ortaya konmuştur. Koni açısının artırılması katalistin eşik değeri karakteristiklerini geliştireceğinden monolitin merkezinde yüksek akış hızları ve yüksek sıcaklık sağlayacağı belirtilmiştir.



Şekil 2.3: Test düzeneği şematik gösterimi [10].

Katalitik konvertörde, giriş hızı düzgün ve sabit kabul edilmiştir. Giriş sıcaklığının zamana bağlı değişimi Şekil 2.4’ te verilmiştir.

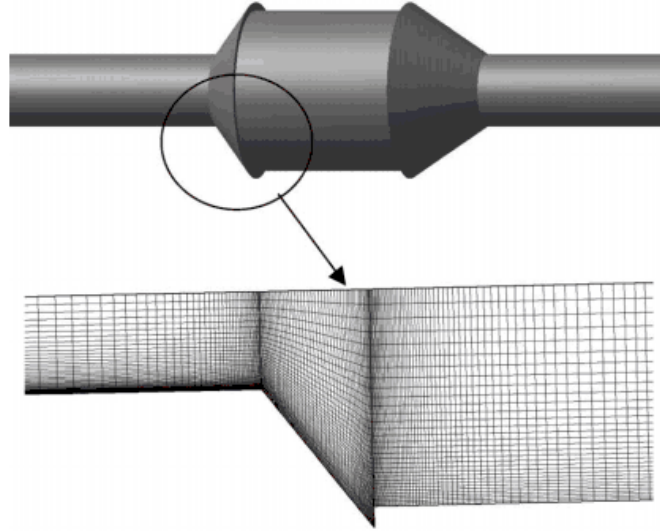


Şekil 2.4: Konvertörde giriş sıcaklığının zamana bağlı değişimi [10].

Konvertör çıkışında akış tam gelişmiş olarak, basınç dışında tüm değişkenlerin gradyanları sıfır olarak kabul edilmiştir. Katalitik konvertörde sıcaklık dağılımının deneysel ve sayısal simülasyonunda, sıcaklık dağılımı ve ısınma karakteristiklerini etkileyen temel faktörlerin egzoz gazı ve monolit arasındaki taşınımsal ısı transferi, monolitteki ısı iletimi, kimyasal reaksiyon ısısı ve akış hız dağılımı olduğu belirtilmiştir. Katalitik monolitte, katalist aktif değil iken, sıcaklık dağılımı ve ısınma karakteristiklerinin kaplamasız monolit ile benzer olduğu ortaya konmuştur. Simülasyon sonucunda 120^0 koni açısına sahip katalitik konvertörün 40^0 koni açısına sahip katalitik konvertöre göre daha iyi eşik performansına sahip olduğu belirtilmiştir [10].

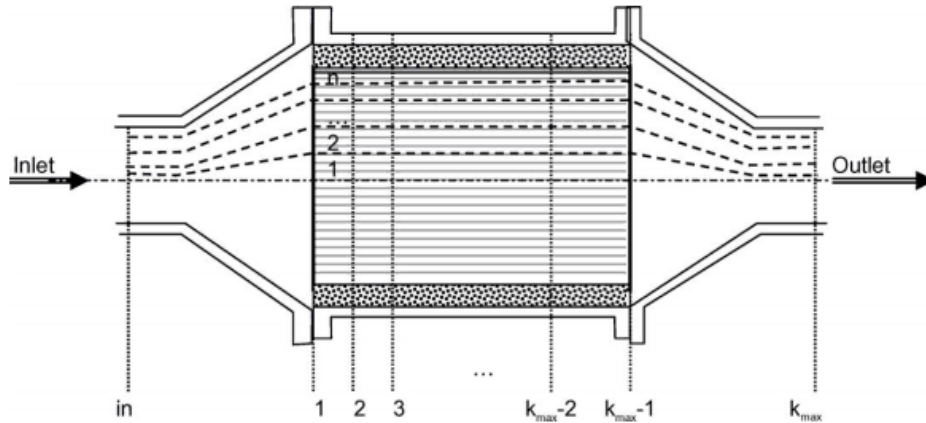
Tsinoglou ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada simetrik eksenli konvertörlerin geçici akış alanları için alternatif bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodu önerilmektedir. Metod, katalist giriş ve çıkışındaki akışı modellemek için eşit akış dirençleri oluşturma temeline dayanmaktadır. Tavsiye edilen akış dirençleri modelleme metodu geniş aralıklı çalışma şartlarına ilişkin CFD ile valide edilmektedir. Katalist için mevcut olan kimyasal reaksiyon modelleri ile birlikte kullanılabilir olması üretilen metodolojinin en önemli avantajlarından biridir. Monolit içerisinde ısı transferine istinaden Şekil 2.5’de verilen geçici bir model sunulmuştur. Konvertör içerisindeki ısı transferi ile üretilen akış dirençleri modelleme metodunun birlikte kullanıldığı bir örnekten de bahsedilmektedir. Bu örnek katalitik konvertörün en kritik fazı olan ısınma aşamasında geçici ısı transferine etkisi altında akış dağılımını göstermektedir. Katalist giriş ve çıkış borusundaki basınç ve hız dağılımını belirlemek için hesaplamalı akışkanlar dinamiği

kullanılmaktadır. Bu analizler sonucunda simetrik eksenli kesit alanında kütleli debi 0.021 kg/s olarak belirlenmektedir.



Şekil 2.5: Kanal yapısının analiz için bölünmüş durumu [11].

Daha sonra akış katalist giriş ve çıkış borularındaki akış dağılımını belirleyebilmek için basitleştirilmiş bir hesaplama yöntemi kullanılmaktadır. Bu yarı ampirik yaklaşım giriş ve çıkış borularındaki bir boyutlu akış geçitlerinde iki boyutlu akış analizi yapılarak eşit akış dirençleri oluşturmayı esas almaktadır. Kullanılan akış modeli Şekil 2.6'da verilmiştir.

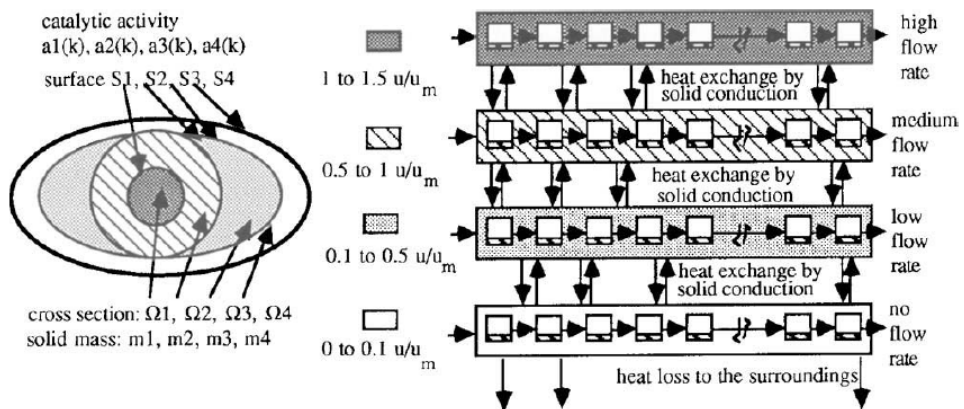


Şekil 2.6: Akış modeli [11].

Geçici katalitik konvertör performansı egzoz gaz akışı ve monolit yapılı katalitik konvertör arasındaki kompleks etkileşimlere bağlı olarak değişmektedir. Tipik

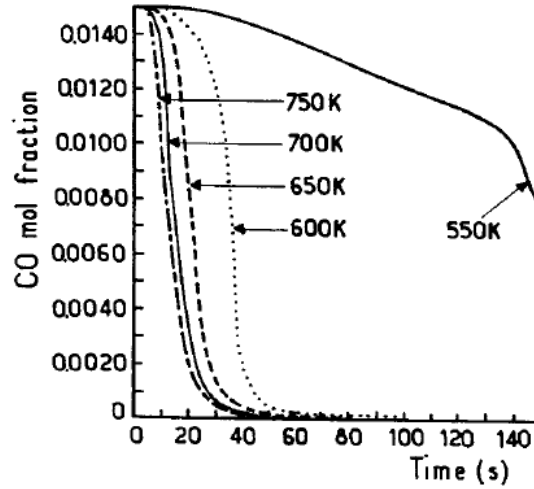
operasyon şartlarında giriş difüzörünün akış karakteristiğine karşın katalistte oluşan termal etkinin hesaba katılması gerekmektedir. CFD giriş ve çıkış giriş ve çıkış borularındaki akışı modellemek adına kullanılan oldukça güçlü bir metod olarak yer almakta ve yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Fakat CFD anlık şartları hesaplamakta çok uzun zaman harcadığı için yalnızca sabit koşulları modellemekle sınırlı olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada eş eksenli katalitik konvertörün giriş yüzündeki akış alanlarını belirlemek için bir metodoloji geliştirilmekte ve CFD ile doğrulanmaktadır. Bu akış direnci modelleme yaklaşımının avantajları, matematiksel olarak basit olması, anlık katalitik konvertör modellemesi için kullanılan mevcut modeller ile uyumlu olabilmesi ve değişken parametrelerin çalışma şartlarına bağlı olarak değil konvertör geometrisine bağlı olarak değişmesi ve deneysel ya da CFD simülasyonları sonucu oluşturulan hız profillerine bağlı olarak tanımlanabilir olması olarak verilmektedir.

Leclerc ve diğ. tarafından yapılan çalışmada, katalitik konvertör için akış dağılımı, gaz-katı ısı ve kütle transferi, kimyasal reaksiyonlar ve ısı kayıplarının hesaba katıldığı teorik analiz geliştirilmiştir. Konvertör verimliliğinin, sıcaklık değişimi ve bununla ilgili olarak değişen ısı-kütle transfer katsayıları ile ilişkili olduğu belirtilmiştir. Çalışmada, besleme sıcaklığı ve bileşim gibi çalışma koşulları ile kanallardaki hız profili çalışılmıştır. Sıcaklık profili ve katalist dizaynı gibi parametrelerin belirlenmesi ile katalistte kirlenici bileşenlerin dönüşümü ve katalistin termal açıdan zarar görmesinin engellenmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen modelde Şekil 2.7’de verildiği gibi monolit makro kanallara ayrılmış ve kanallar için giriş hız değerleri belirlenmiştir.



Şekil 2.7: Monolit yapısı [12].

Susturucunun motora göre konumu önemli bir dizayn parametresi olarak belirtilmiştir. Ezgoz kanalında, gaz sıcaklığının metrede 100 K düştüğü belirtilmiş ve susturucunun konumu farklı besleme sıcaklıkları kullanılarak simule edilmiştir. CO mol oranının giriş sıcaklığına bağlı değişimi Şekil 2.8’de verilmiştir. Buna göre 600 K nin altındaki sıcaklıklarda eşik değerinin geciktiği belirtilmiştir.



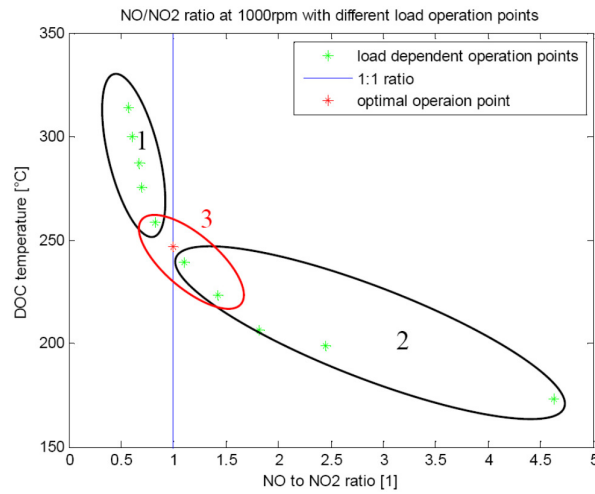
Şekil 2.8: CO mol oranının giriş sıcaklığına ve zamana bağlı değişimi [12].

İlk hücredeki katı sıcaklığının, ısı transfer direnci nedeniyle, gaz sıcaklığından 100 K daha yüksek olduğu, son hücrede ise sıcaklık değerlerinin yaklaşık benzer mertebelerine geldiği belirtilmiştir. Bununla birlikte, çok yüksek giriş sıcaklıkları sonucunda katalistin ilk bölümünde termal zarar görebileceği belirtilmiştir. Model sonuçları ile, erken aktivasyon sıcaklığı ve termal hasar arasında optimum nokta bulunabileceği belirtilmiştir.

Besleme sıcaklığına ek olarak akış dağılımı ve oksijen konsantrasyonu da dizayn parametresi olarak ele alınarak incelenmiştir. Çalışmada, sözkonusu parametrelere ek olarak, katalist miktarı ve katalist dağılımının etkileri de incelenmiştir. Simulasyon sonuçları, eşik değere ulaşma performansının ısı ve kütle transferine duyarlı olduğunu ortaya koymuştur.

Stadlbauer ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada düşük sıcaklıkta çalışma koşulları için DOC sıcaklığının ana ve post enjeksiyon prosesleri ile kontrol edilmesi incelenmiştir. SCR’da gerçekleşen NO_x indirgeme tepkimelerinin hız ve veriminin doğrudan SCR’a giren havadaki NO/NO_2 oranına bağlı olduğu belirtilmiş ve bu oran

mevcut yanma prosesi sonucunda oluşan gaz karışımında 0,95 olarak ölçülmüştür ve SCR’da hızlı indirgeme tepkimesinin verimli gerçekleşmesi için bu oranın 0,5 olması gerektiği belirtilmiştir. İncelenen uygulamada SCR DOC’den sonra yerleştirilmiş olması ve SCR’a giren havadaki NO/NO₂ oranının DOC’de gerçekleşen NO oksidasyonu tepkimesinin verimine bağlı olması sebebiyle çalışmalarda DOC çıkışında NO/NO₂ oranını 0,5 değerinde tutmak amaçlanmıştır. DOC reaksiyon mekanizmasındaki sıcaklık değişimleri sebebiyle, NO’in NO₂’e oksitlenmesi reaksiyonu yalnızca DOC sıcaklığının 200⁰C’nin üzerinde olduğu durumlarda yeterli bir şekilde gerçekleşmekte olduğu fakat DOC’nin sıcaklığı düşük yük ve düşük motor hızı koşullarında DOC’de bu sıcaklık sağlanamamakta olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak motorun doğal kullanım koşullarında tüm indirgeme sistemi verimsiz çalışacağı ve daha da önemlisi bu çalışma aralığında yüksek NO_x emisyonları üretileceği belirtilmiştir. Tüm bu bilgilere dayanarak yapılan çalışmada düşük yük koşullarında DOC sıcaklığını istenilen sıcaklık aralığına getirebilmek için en verimli yöntemin enjeksiyon yöntemi olduğu belirtilmiş ve bu amaca yönelik testler gerçekleştirilmiştir. Test sonucu Şekil 2.9’da verilmiştir.



Şekil 2.9: NO/NO₂ oranının DOC sıcaklığına bağlı olarak değişimi [13].

Yapılan testler sonucunda NO/NO₂ oranını 1 değerinde tutmak için gerekli DOC sıcaklığı yaklaşık 250⁰C olarak belirlenmiştir. Bu değer motor özelliklerine ve motor çalışma koşullarına bağlı olarak değişebileceği fakat genellikle 250⁰C ile 270⁰C arasında olacağı belirtilmiştir. Yapılan testler sırasında farklı post enjeksiyon miktarlarına bağlı olarak DOC sıcaklığının değişimi, üretilen tork değerinin değişimi, üretilen toplam NO_x miktarı ve NO/NO₂ oranı incelenmiştir.

Daha sonra toplam maliyeti etkileyecek tüm parametrelerin kıyaslanması ve toplam maliyetin minimum düzeyde olduğu optimum noktanın bulunması adına (1.8)'de verilen denklem geliştirilmiştir. Denklemin geliştirilmesindeki temel prensip NO/NO₂ oranının 1 olduğu optimum çalışma noktası ile toplam maliyetin minimum olduğu nokta arasında maliyete etki edecek parametrelerdeki değişimin etkisini incelemek olduğu belirtilmiştir.

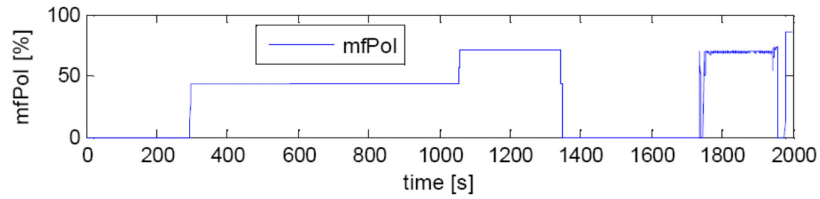
$$f(x) = -a_1 \cdot (T_{DOC} - T_{DOC,nom}) + a_2 \cdot (mf - mf_{nom}) + a_3 \cdot (NO_x - NO_{x,nom}) - a_4 \cdot (T - T_{nom}) + a_5 \cdot (ratio - ratio_{nom}) \quad (1.8)$$

Verilen denklemde parametrelerin toplam maliyete etkisinin belirlenmesi için ağırlık katsayıları seçilmiş ve Çizelge 2.1'de verilmiştir. Seçilen ağırlık katsayıları, parametrenin önemine göre ve diğer parametreler ile olan etkileşimine bağlı olarak belirlenmiştir.

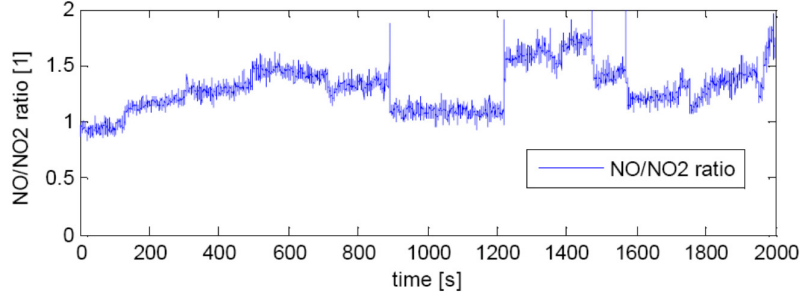
Çizelge 2.1: Toplam maliyete etki eden parametreler için belirlenen ağırlık katsayıları [13].

| a1 | a2 | a3 | a4 | a5 |
|----|-----|----|-----|-----|
| 10 | 0,5 | 1 | 0,2 | 100 |

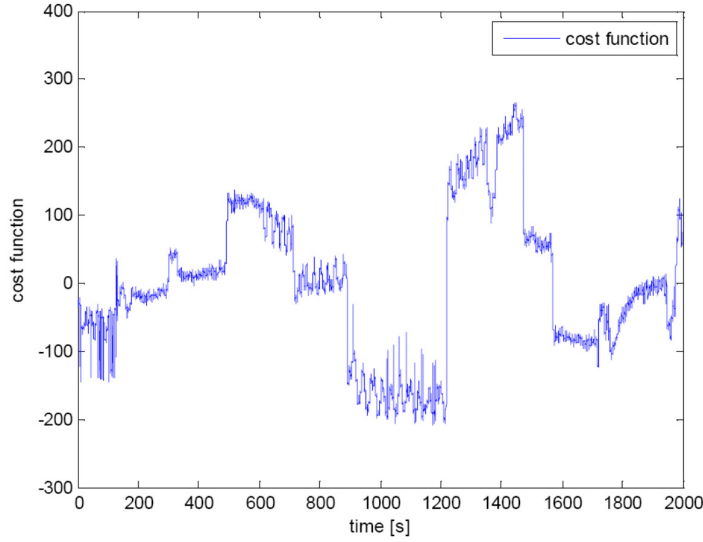
Buna göre yapılan testler sonucunda post enjeksiyon prosesi sırasında enjekte edilen yakıt miktarının değişimi Şekil 2.10'da, buna bağlı olarak NO/NO₂ oranının değişimi Şekil 2.11'de ve verilen eşitlik baz alınarak hesaplanan toplam maliyetin değişimi Şekil 2.12'de verilmiştir.



Şekil 2.10: Post enjeksiyon yakıt miktarı değişimi [13].



Şekil 2.11: NO/NO₂ oranının değişimi [13].



Şekil 2.12: Toplam maliyetin değişimi [13].

Test sonuçları incelendiğinde, NO/NO₂ oranının ve toplam maliyetin değişiminin post enjeksiyon sırasında enjekte edilen yakıt ile doğrudan ilişkili olduğu ve enjekte edilen yakıt miktarının maksimum olduğu 1000-1200 saniye aralığında NO/NO₂ oranının ideal değer olan 1'e yaklaştığı ve toplam maliyetin test süresince ulaşabildiği minimum değerde olduğu görülmüştür.

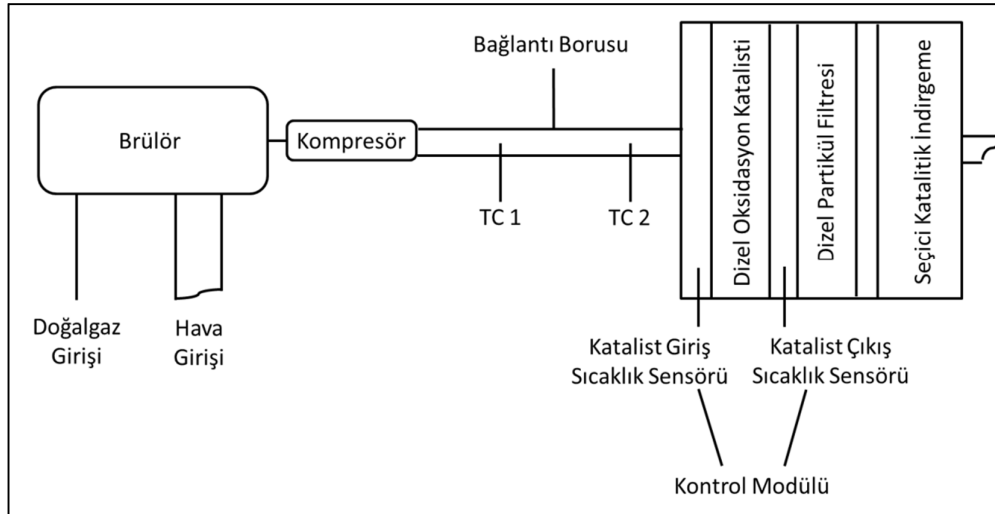
Çizelge 2.2: Toplam maliyete ve çalışma performansına etki eden parametrelerin kıyaslanması [13].

| Değişkenler | Optimum Nokta/Nominal Çalışma Noktası |
|---|---------------------------------------|
| Motor Hızı | +/-%0 |
| Enjekte Edilen Yakıt Miktarı | +%10 |
| Tork | -%5 |
| DOC Sıcaklığı | +%4 |
| Motor Çıkışında NO _x miktarı | -%23 |
| DOC Çıkışında NO/NO ₂ Oranı | 1.35/1.02 |

Toplam maliyete verilen tüm faktörlerin etki oranlarını özetlemek amacıyla 1000 saniye noktası için Çizelge 2.2'de verilmiştir. Verilen sonuçlar incelendiğinde enjekte edilen toplam yakıt miktarındaki %10'luk bir artış sonucunda elde edilen torkta %5'lik bir düşüş gözlemlenmiş fakat bunun karşılığında DOC sıcaklığında %4'lük bir artış ve buna bağlı olarak motor çıkışındaki NOx miktarında ciddi bir düşüş ve yine aynı şekilde DOC çıkışında NO/NO2 oranının ideal değer olan 1'e yaklaştığı gözlemlenmiştir.

3. TEST DÜZENEĞİ

Tez çalışmaları kapsamında, otomotiv egzoz sistemlerinde kullanılan sıcaklık sensörlerinin prob uzunluğuna bağlı olarak yapmış olduğu sıcaklık ölçümünün doğruluk oranının belirlenmesi neticesinde, emisyon azaltım ekipmanlarından katalist ve filtrenin daha verimli çalışması amaçlanmıştır. Buna ek olarak motor ve dizel oksidasyon katalisti arasındaki bağlantı borusunun boyu kısaltılarak ısı kayplarının azaltılması neticesinde emisyon azaltım ekipmanlarından dizel oksidasyon katalistinde, daha yüksek sıcaklıklara ulaşılması ile katalistin daha verimli çalışması ve tüm sistemin daha az zararlı gaz emisyonu üretmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, sıcaklık sensörlerinin prob uzunluğu ile motor ve dizel oksidasyon katalisti arasındaki bağlantı borusunun uzunluğunun etkisinin ortaya konması amacıyla akış test düzeneğinde (Şekil 3.1) testler yapılmıştır.



Şekil 3.1: Akış test düzeneği şematik gösterimi.

Akış test düzeneği temelde üç farklı kısımdan oluşmaktadır. Bunlar, brülör ve kompresörün oluşturduğu birinci kısım, bağlantı borusunun ve termoelemanların oluşturduğu ikinci kısım ve egzoz emisyon azaltım ekipmanlarının ve sıcaklık sensörlerinin oluşturduğu üçüncü kısımdır.

Birinci kısımda, yanmanın gerçekleştiği brülör ve yanma sonucu şartlandırılan havanın basıldığı kompresör bulunmaktadır. Bir adet doğalgaz girişi ve bir adet hava girişine sahip brülörde, doğalgaz yakılarak içeri alınan hava istenilen sıcaklık değerine ulaştırılmaktadır. Bu işlem yanma odasında gerçekleşmektedir. Yanma odasında ısıtılan hava, buradan kompresöre aktarılmakta ve kompresör yardımı ile istenilen debiye ulaşmaktadır. Akış test düzeneğinde kullanılan brülörün sıcak hava üretme kapasitesi 50-1200 °C arasındadır. Bu aralıkta istenilen sıcaklıkta istenilen süre boyunca sıcak hava üretimi sağlanmaktadır. Akış test düzeneğinde kullanılan kompresörün maksimum sağlayabileceği hava debisi 2200 kg/hr'tir. Söz konusu kompresör, bu limit değere kadar belirlenen debide hava sağlayabilmektedir. Bu iki ekipmanın birleşimi ile sistemde istenilen sıcaklık ve debide hava üretilerek araç koşullarının modellenmesi amaçlanmaktadır. Araç üzerinde egzoz sistemine beslenen havanın sıcaklık ve debisi motorda gerçekleşen yanma tepkimesinin ve emilen hava miktarının bir fonksiyonu olmasına rağmen, akış test düzeneğinde bu iki parametrenin brülör ve kompresör yardımıyla kontrol edilebiliyor olması, yapılan testlerin motor yerine bu düzenek ile yapılabilmesini sağlamaktadır. Bu sayede, motor ile test yapılırken mümkün olmayan sıcaklık ve debi kontrolü test edilebilmektedir.

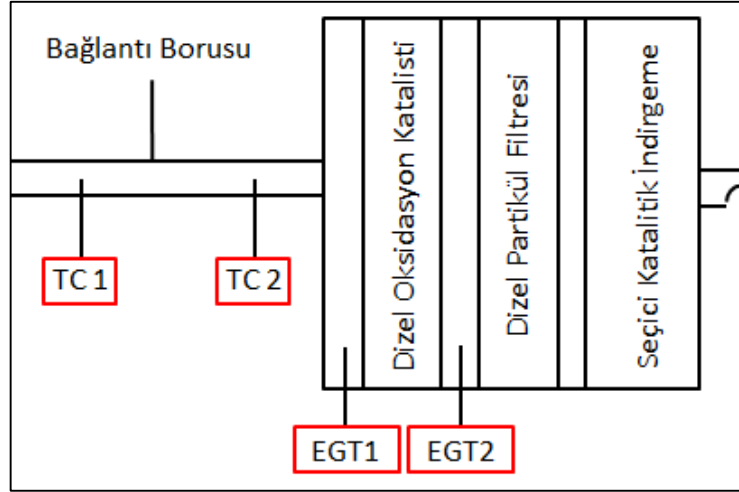
İkinci kısımda, brülör ve kompresörün etkisi ile belirlenen sıcaklık ve debiye ulaşan havanın, egzoz emisyonu azaltım ekipmanları olan katalist ve filtreleme komponentlerine ulaştırılması amacıyla araçta da aynı şekilde kullanılan bağlantı borusu ve üzerinde içinden geçen havanın sıcaklığını belirlemek amacıyla yerleştirilmiş termoelemanlar bulunmaktadır. Bağlantı borusunun asıl işlevi, motordan çıkan gazı, araç içerisinde alan darlığı sebebiyle motorun çıkışına yerleştirilemeyen egzoz emisyon azaltım komponentlerine iletmektir. Bu iletim işlemi sırasında en önemli değişkenler gazın sıcaklığı ve basıncıdır. Düşük motor devri ve düşük araç hızı koşullarında motordan çıkan yanma atığı havanın sıcaklığı oldukça düşük olduğundan, egzoz emisyon azaltım komponentlerinden dizel oksidasyon katalistinde, indirgeme tepkimeleri sırasında, verimin yüksek olmasını sağlayan en önemli etken olan sıcaklık, istenilen düzeylere ulaşamamaktadır. Bu gibi durumlarda, motor ve emisyon azaltım komponentleri arası akışı sağlayan bağlantı borusunda gerçekleşen ısı kayıpları oldukça büyük bir önem arz etmektedir. Isı kayıplarından sağlanabilecek herhangi bir kazanç, kataliste ulaşacak gaz sıcaklığının

daha yüksek olmasına yardımcı olacağı için katalistte gerçekleşen indirgeme tepkimelerinin verimi artmakta ve sonuç olarak atılan gazdaki zararlı emisyonlarda azalma gerçekleşmektedir.

Sistemde en önemli parametre sıcaklık olduğu ve sıcaklığın sürekli kontrolü amaçlandığı için bağlantı borusu üzerinde de iki noktaya termoeleman yerleştirilerek bu noktaların sıcaklıklarının bilinmesi amaçlanmıştır. Bu noktalardan ölçülen sıcaklık değeri ile brülör sisteminden çıkan hava sıcaklığı ve katalist giriş ve çıkış noktalarından ölçülen hava sıcaklığı ile kıyaslanarak, yapılan ölçümlerin doğruluğunun artırılması ve bağlantı borusu üzerinde gerçekleşen ısı kaybının belirlenmesi amaçlanmıştır.

Üçüncü kısımda, motorda yanma sonucu oluşan egzoz gazının içerisindeki partiküllerin ve zararlı emisyonların azaltılması ve indirgenmesi amacıyla kullanılan dizel oksidasyon katalisti, dizel partikül filtresi ve seçici katalitik indirgeme komponentlerinin oluşturduğu grup ve dizel oksidasyon katalistinin giriş ve çıkış sıcaklıklarının belirlenmesine yardımcı olan egzoz gazı sıcaklık ölçüm sensörleri (Şekil 3.2) ve ayrıca bu sensörlerden alınan direnç değeri bilgisinin sıcaklık değerine dönüşümünü sağlayan kontrol modülü bulunmaktadır.

Egzoz emisyonu azaltım komponentlerine beslenen gazın sıcaklığının bu komponentlerin verimi açısından büyük önem taşıması, bu sıcaklığın doğru ölçülmesi gereksinimini doğurduğundan endüstride yaygın olarak bu komponentlerin giriş ve çıkışlarından $-40-1000^{\circ}\text{C}$ ölçüm yeterliliğine sahip sensörler (Şekil 3.3) ile sıcaklık ölçümü alınmaktadır. Bu ölçümlerin doğruluğu bir çok faktöre bağlı olmakla birlikte, en önemlisi ölçüm alınan noktanın egzoz borusu içerisindeki konumu ve bu konumdaki sıcaklığın ortalama sıcaklığa olan yakınlığıdır. Bu durumun kontrol edilmesi amacıyla, test sırasında üç farklı prob uzunluğuna sahip sensör kullanılmış ve içlerinden hangisinin belirlenen sıcaklık koşulunu daha yüksek doğrulukla ölçtüğü belirlenmeye çalışılmıştır. Kullanılan sensörlerin çalışma prensibi, sıcaklık farkına bağlı olarak oluşan direnç sonucu üretilen akım değerinin belirlenerek, daha önce ampirik olarak belirlenmiş transfer eğrisi ile sıcaklığa dönüştürülmesine dayanmaktadır. Bu sebeple sistemde bu dönüşümü sağlayacak bir kontrol modülü de kullanılmıştır.



Şekil 3.2: Sıcaklık ölçüm noktalarının sistem üzerinde gösterimi.

3.1 Belirsizlik Analizi

Deney düzeneğinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda ölçüm belirsizliklerinin belirlenmesi ölçüm sistemi ve sonuçlarının güvenilirliği açısından önem taşımaktadır. Bu sebeple, ölçüm elemanları için belirsizlik hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

Ölçüm belirsizliği hesabında Kline ve McClintock tarafından ileri sürülen yöntem kullanılmıştır [14]. Bu yöntemle göre, sistemde ölçülmesi gereken büyüklük R , ve bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişkenler ise $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ olsun. Bu durumda R büyüklüğü (3.1) eşitliğinde görüldüğü gibi ifade edilir. Her bir bağımsız değişkene ait belirsizlik değerleri $(w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)$ ve R büyüklüğünün toplam belirsizliği w_R ise R büyüklüğünün belirsizliği (3.2) eşitliğinde sunulduğu gibi hesaplanmaktadır [14].

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (3.1)$$

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.2)$$

Akış test düzeneğinde, termoeleman ve sıcaklık sensörü ile sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilerek, bulunan sıcaklıklar, parametrelerin yorumlanmasında

kullanılmıştır. Bu doğrultuda termoeleman ve sıcaklık sensörü için ayrı ayrı ölçüm belirsizlikleri hesaplanmıştır.

Termoeleman sıcaklık ölçüm belirsizliği; üretim ve bağlantıdan gelen belirsizlik $\pm 0,12$ °C, kalibrasyondan gelen belirsizlik $\pm 0,06$ °C ve ölçümden gelen belirsizlik $\pm 0,1$ °C olmak üzere;

$$w_T = \left[(\pm 0,12)^2 + (\pm 0,06)^2 + (\pm 0,1)^2 \right]^{1/2} \quad (3.3)$$

$$w_T = 0,17 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.4)$$

Sıcaklık sensörü sıcaklık ölçüm belirsizliği; sensör üreticisi tarafından -40-0 °C arasında $\pm \%2,5$, 0-550 °C arasında $\pm \%1,1$ ve 550-1000 °C arasında $\pm \%1,25$ olarak verilmektedir. Akış test düzeneği belirsizlik hesabında, sıcaklık sensörünün ölçüm belirsizliği $w_{EGT} = \%1,1$ olarak alınmıştır. Sistem debisi belirsizliği için kompresör üretici firma tarafından verilen $w_{Debi} = \%0,1$ değeri alınmıştır.

3.2 Akış Test Düzeninde İncelenen Parametreler

Akış test düzeneğinde, testler iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, prob uzunluğunun katalist giriş ve çıkış sıcaklığının ölçüm doğruluğuna etkisi belirlenmiştir. Bu amaçla, sabit bağlantı borusu ve debi için 3 farklı prob uzunluğuna sahip sensör için testler gerçekleştirilmiştir. Ek olarak, her prob uzunluğu için 100°C ile 550 °C sıcaklık aralığında her 50°C'de bir sıcaklık sabitlenerek taranacak şekilde brülör çıkış sıcaklığının farklı değerlerinde ölçümler alınmıştır. Söz konusu değişken ve sabit parametreler Çizelge 3.1' de verilmiştir. Test sırasında kullanılan sensörler temsili olarak Şekil 3.3'de verilmiştir.

İkinci aşamada ise, ölçüm doğruluğunun görece yüksek olduğu prob uzunluğu için brülör ve katalist arasındaki bağlantı borusunun uzunluğu farklılaştırılarak ısı kaybı açısından incelenmiştir.

Çizelge 3.1: Akış test düzeneğinde incelenen parametreler.

| Değişken Parametre | Prob Uzunluğu [mm] | | |
|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|----------------|
| | 30 | 50 | 70 |
| Sabit Parametreler | Brülör Çıkış Sıcaklığı [°C] | Bağlantı Borusu Uzunluğu [cm] | Debi [kg/h] |
| | 100-150 | 90 | 1200 |
| | 150-200 | 90 | 1200 |
| | 200-250 | 90 | 1200 |
| | 250-300 | 90 | 1200 |
| | 300-350 | 90 | 1200 |
| | 350-400 | 90 | 1200 |
| | 400-450 | 90 | 1200 |
| | 450-500 | 90 | 1200 |
| | 500-550 | 90 | 1200 |



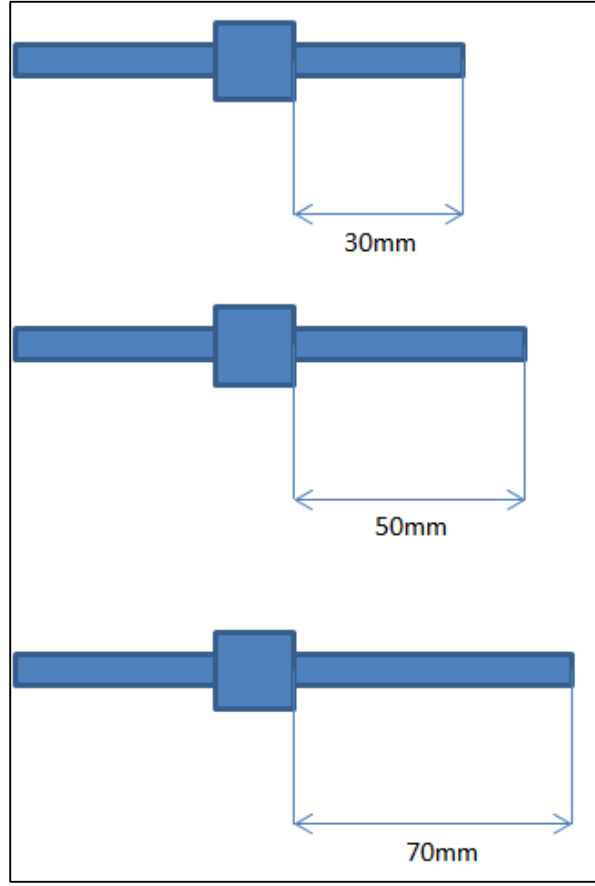
Şekil 3.3 Testte kullanılan sıcaklık sensörleri.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tez çalışmaları kapsamında yapılan birinci grup testlerde, otomotiv egzoz sistemlerinde kullanılan sıcaklık sensörlerinin, prob uzunluğunu değiştirmek suretiyle egzoz boru çapına girişim oranında gerçekleşen değişime bağlı olarak sıcaklık değerleri ölçülmüş ve prob uzunluğunun ölçüm doğruluğuna etkisi belirlenmiştir. İkinci grup testler kapsamında, motor ve egzoz emisyon azaltım ekipmanları arasındaki bağlantı borusunun boyu kısaltılarak aynı koşullarda katalist giriş sıcaklıkları ölçülmüş ve boru boyunun katalistin çalışma verimine etkisi incelenmiştir.

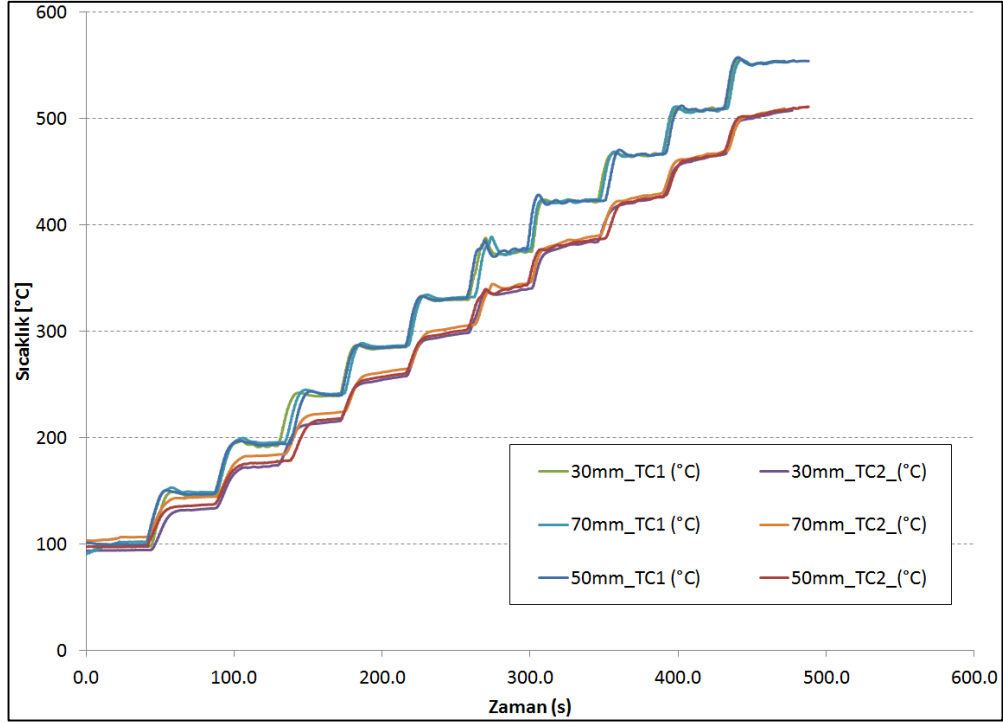
4.1 Sensör Prob Uzunluğunun Ölçüm Doğruluğuna Etkisi

Akış test düzeneğinde yanma odasına alınan hava, brülör yardımı ile ısıtılmıştır. Isınan hava daha sonra kompresör yardımı ile istenilen debiye ulaştırılmış ve egzoz sistemine beslenmiştir. Sisteme beslenen hava önce 90 cm uzunluğunda ve 140 mm çapında bir bağlantı borusu içerisinden geçirilmiştir. Bu bağlantı borusu üzerinde iki farklı noktadan termoeleman yardımı ile sıcaklık değeri ölçümü alınmıştır. Bu noktalardan ikincisi (TC2), birinci sıcaklık sensörü (EGT1) ile ölçüm yapılan noktaya yani dizel oksidasyon katalistinin girişine 10 cm mesafede bulunmaktadır. Termoeleman elemanının EGT1'e bu mesafede olması sebebi ile yapılan birinci grup testlerde 10cm'lik bağlantı borusunda gerçekleşen ısı kayıpları ihmal edilerek Şekil 3.2 'de "TC2" olarak verilen ikinci termoeleman ile ölçülen sıcaklık değerleri referans olarak kullanılmıştır. Ek olarak "EGT2" den okunan sıcaklık değerinin de "TC2" ve "EGT1" ile orantılı olması beklenmektedir. Bu kapsamda üç farklı prob uzunluğuna sahip sıcaklık sensörü ile belirtilen test koşulları üç farklı kez tekrarlanmıştır. Kullanılan prob uzunlukları 30mm, 50 mm ve 70mm olarak Şekil 4.1'de temsili olarak verilmiştir.



Şekil 4.1: Testte kullanılan farklı prob uzunluğuna sahip sıcaklık sensörlerinin temsili gösterimi.

Farklı prob uzunluğuna sahip sıcaklık sensörlerinin aynı anda test düzeneğinde kullanılması ve bu sensörlerden ölçüm alınması fiziksel olarak mümkün olmadığı için aynı test koşulları üç farklı kez tekrarlanmıştır. Üç farklı prob uzunluğu için yapılan testlerde termoelemanlardan alınan sıcaklık değerleri Şekil 4.2’de verilmiştir. Şekilde 30mm, 50mm ve 70mm olmak üzere üç farklı prob uzunluğu için gerçekleştirilen testlerde termoelemanla alınan ölçümlerin eş olduğu görülmektedir. Bu durum üç farklı prob uzunluğunun test edildiği koşulların eş olduğunu göstermektedir.



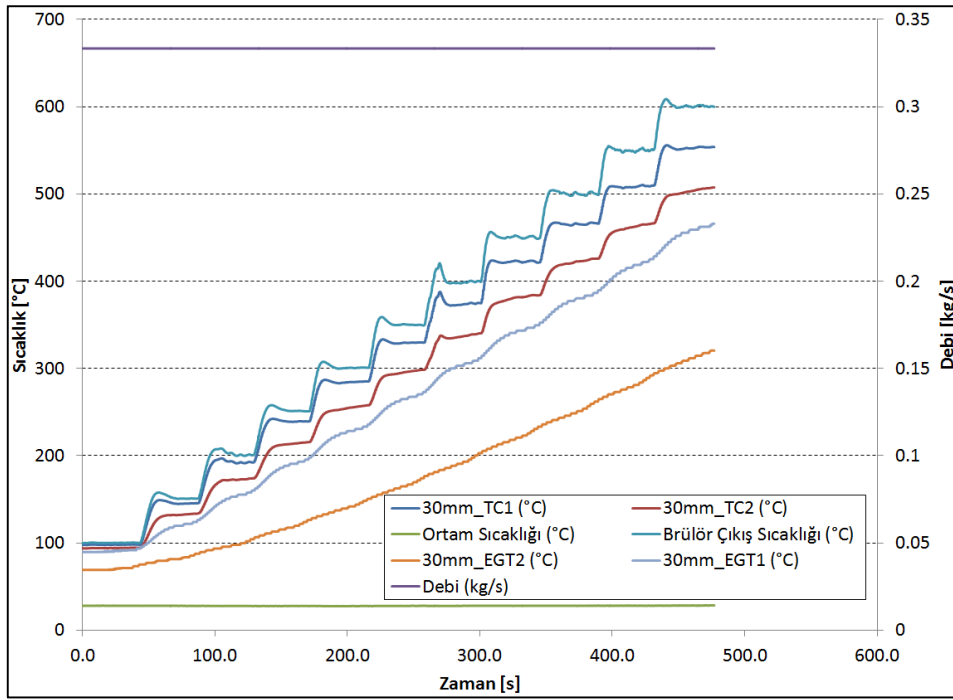
Şekil 4.2: Üç farklı prob uzunluğu için gerçekleştirilen testlerde termoelemanlardan alınan sıcaklıklar.

Sıcaklık sensörlerinin prob uzunluğunun ölçüm doğruluğuna etkisinin ortaya konduğu testlerde üç farklı koşul için ortam sıcaklığı, hava besleme debisi ve uygulama sıcaklıkları sabit tutulmuştur. Buna göre, hava besleme debisi gerçek çalışma koşullarını yansıtacak şekilde 1200 kg/h, uygulama sıcaklıkları motor çıkış sıcaklıklarını yansıtacak şekilde 100 °C ile 550 °C arasında seçilmiştir. Testler sırasında ortam sıcaklığı 25 °C'de sabit tutulacak şekilde ortam şartlandırılmıştır. 30mm, 50mm ve 70 mm prob uzunluğu için gerçekleştirilen testler sonucunda yapılan ölçümler sırasıyla Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5'te verilmiştir.

Test sonuçlarına göre TC1 ve TC2'den ölçülen sıcaklık değerlerinin test başlangıç koşulu olan brülör sıcaklığı ile doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Fakat TC1,TC2 ve brülör sıcaklığının ölçüldüğü noktalarda, ısı kayıplar sebebi ile brülörden beslenen havanın sıcaklığı brülörden uzaklaştıkça azalması sebebiyle, sıcaklık farkları görülmüştür.

Şekil 4.3'de verilen sonuçlar incelendiğinde, 30mm prob uzunluğuna sahip olan sensörün EGT1 noktasında yaptığı ölçümlerin, referans değer olan TC2 ile orantılı olarak arttığı görülmektedir. Ancak ölçülen değerler arasında, test başlangıcında,

yani egzoz hattına beslenen havanın yaklaşık 100 °C olduğu durumda, sıcaklık farkı yaklaşık 3 °C olarak gözlemlenmiş ve bu sıcaklık farkının egzoz hattına beslenen havanın sıcaklığı ile doğru orantılı olarak test sonlarına doğru yaklaşık 45 °C'ye ulaştığı görülmüştür. Benzer şekilde 30 mm prob uzunluğuna sahip olan sensörün EGT2 noktasında yaptığı ölçümlerin TC2 ve EGT1 ölçüm değerleri ile doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir. Fakat test başlangıcında yaklaşık 100 °C olarak beslenen havanın sıcaklığı, EGT2' de yaklaşık 20 °C, yüksek hava sıcaklıklarında ise 140 °C kadar düşük olarak okunduğu görülmektedir.

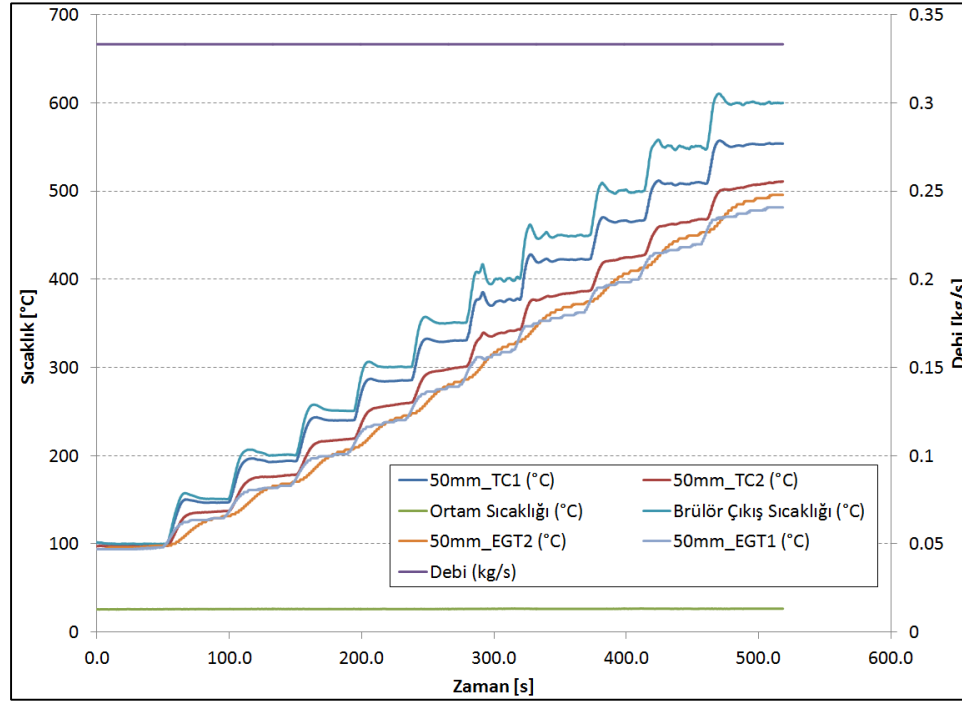


Şekil 4.3: 30mm prob uzunluğu için test sonuçları.

50mm prob uzunluğu durumunda elde edilen test sonuçları Şekil 4.4'de verilmiştir. Buna göre sensörün EGT1 noktasında yaptığı ölçümlerin, referans değer olan TC2 ile orantılı olarak arttığı görülmektedir. Ölçülen iki değer arasında test başlangıcında, yani egzoz hattına beslenen havanın yaklaşık 100 °C olduğu durumda, sıcaklık farkı yaklaşık 2 °C olarak gözlemlenmiş ve bu sıcaklık farkının egzoz hattına beslenen havanın sıcaklığı ile doğru orantılı olarak test sonlarına doğru yaklaşık 30 °C'ye ulaştığı görülmüştür.

Benzer şekilde 50 mm prob uzunluğuna sahip olan sensörün EGT2 noktasında yaptığı ölçümlerin TC2 ve EGT1 ölçüm değerleri ile doğru orantılı olarak arttığı

görülmektedir. 50mm prob uzunluğuna sahip EGT2 sensöründen alınan ölçümlerin 30mm proba sahip sensörden alınan ölçümlerin aksine yüksek sıcaklık koşullarında çok fazla sapma göstermediği görülmüştür.

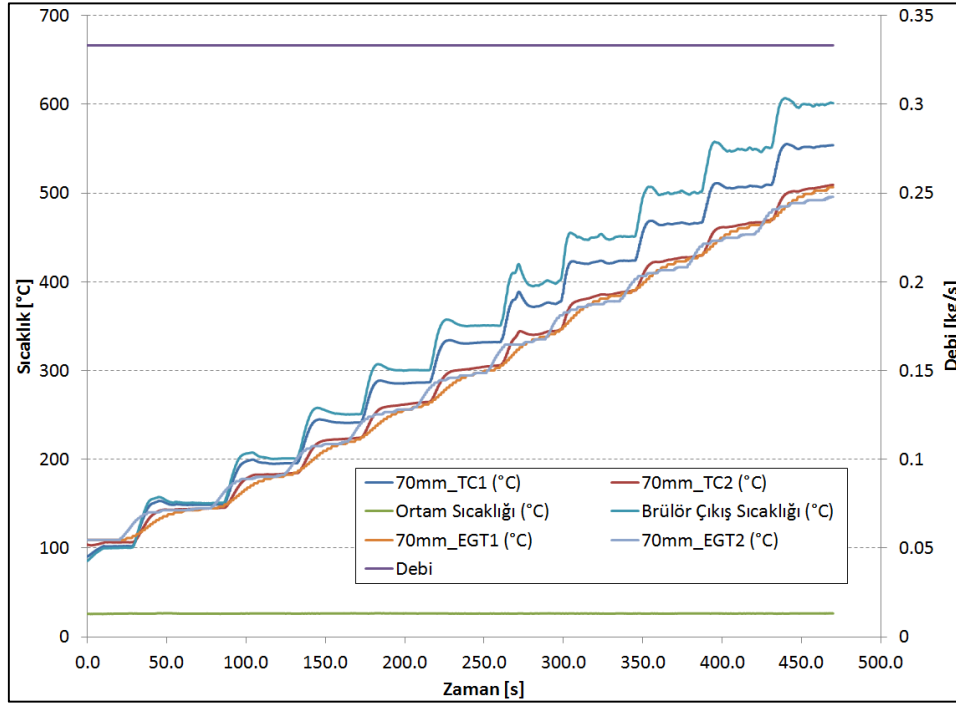


Şekil 4.4: 50mm prob uzunluğu için test sonuçları.

70mm prob uzunluğunun test edildiği durumda elde edilen sonuçlar Şekil 4.5’de verilmiştir. Buna göre diğer iki testte olduğu gibi sensörün EGT1 noktasında yaptığı ölçümlerin, referans değer olan TC2 ile orantılı olarak arttığı görülmektedir. Fakat bu prob uzunluğunda diğer iki teste nazaran sapma oranının oldukça düşük olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlar detaylı olarak incelendiğinde EGT1 noktasından yapılan ölçümlerin TC2 ile neredeyse aynı değerde olduğu ve bu durumun neticesinde yapılan kabullere istinaden hata payının oldukça düşük olduğu görülmektedir. Ölçülen iki değer arasında farklı sıcaklık aralıklarında yaklaşık olarak aynı oranda fark görülmüş, yani hata payının egzoz hava sıcaklığına bağlı olarak değişmediği gözlemlenmiştir.

EGT1 noktasından yapılan ölçümler ile TC2’den alınan ölçüm değerlerinin birbirinden saptığı noktaların özellikle sıcaklığın pik yaptığı noktalar olması egzoz emisyon ekipmanları sisteminin rejime gecikmeli girmesi ile açıklanmaktadır. Benzer şekilde 70 mm prob uzunluğuna sahip olan sensörün EGT2 noktasında

yaptığı ölçümlerin TC2 ve EGT1 ölçüm değerleri ile doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir. Diğer iki testin aksine 70 mm prob kullanıldığında EGT1 ve EGT2 değerleri oldukça yakın olarak okunmuştur.



Şekil 4.5: 70mm prob uzunluğu için test sonuçları.

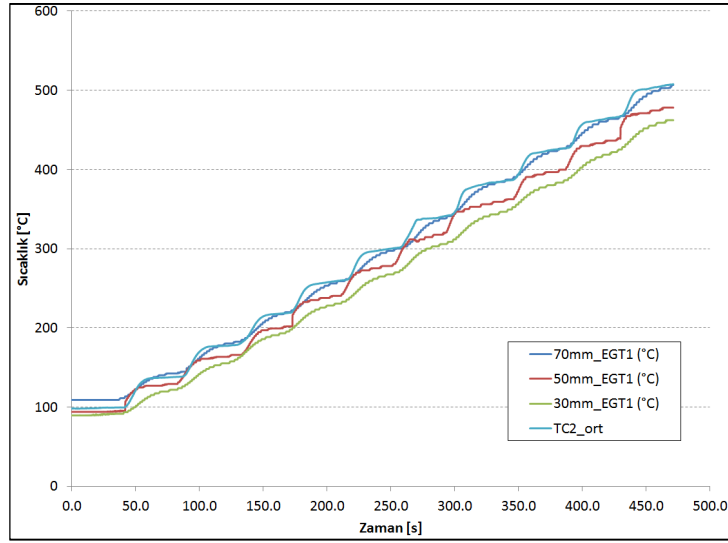
Belirlenen referans değere göre hesaplanan sapma payları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Her bir prob uzunluğu için hata payları, referans değer TC2 ile EGT1 arasındaki sıcaklık farkı alınarak referans değer TC2’ ye bölünmesi ile hesaplanmıştır.

Test süresi boyunca her bir ölçüm zamanında hesaplanan hata paylarının ortalaması alınarak, söz konusu uzunluk için ortalama hata payı olarak ifade edilmiş ve Çizelge 4.1’de verilmiştir. Buna göre 70mm, 50mm ve 30 mm prob uzunluğunda gerçekleştirilen sıcaklık ölçümleri için hesaplanan hata payları sırasıyla %2,52, %5,52, %9,85’ tir.

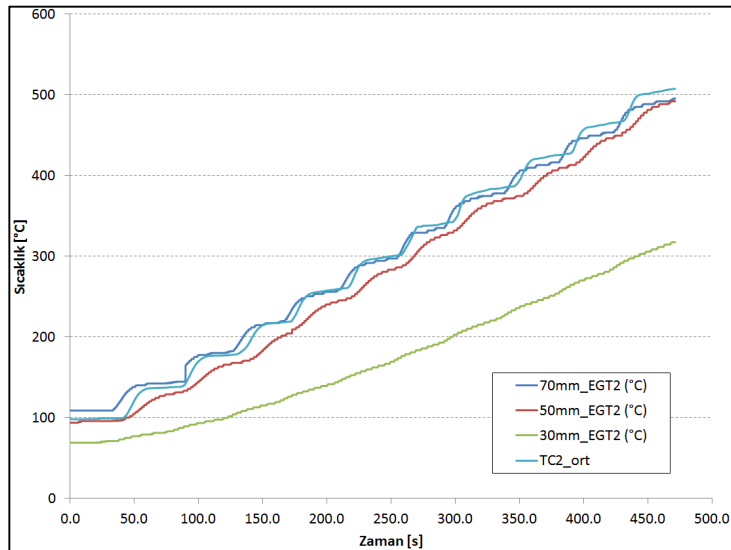
Çizelge 4.1: Prob uzunluğuna bağlı olarak ortalama hata payları.

| Prob Uzunluğu (mm) | Ortalama Hata Payı (%) |
|-----------------------|---------------------------|
| 70 | 2,52 |
| 50 | 5,52 |
| 30 | 9,85 |

Üç farklı prob uzunluğuna ait testler göz önüne alındığında ve sıcaklık değerleri incelendiğinde, 70mm proba sahip olan sensörlerden alınan sıcaklık ölçümlerinin diğer sensörlere kıyasla TC2 termoelemanından alınan sıcaklık ölçümleri ile daha uyumlu olduğu ve belirlenen pozisyonda ortalama boru içi gaz sıcaklıklarını daha doğru belirlediği sonucuna ulaşılmıştır. Üç farklı prob uzunluğuna sahip sensörler ile tekrarlanan testlerin sonucu iki farklı pozisyondan sensör ile yapılan ölçümler göz önüne alınarak Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 'de verilmiştir.



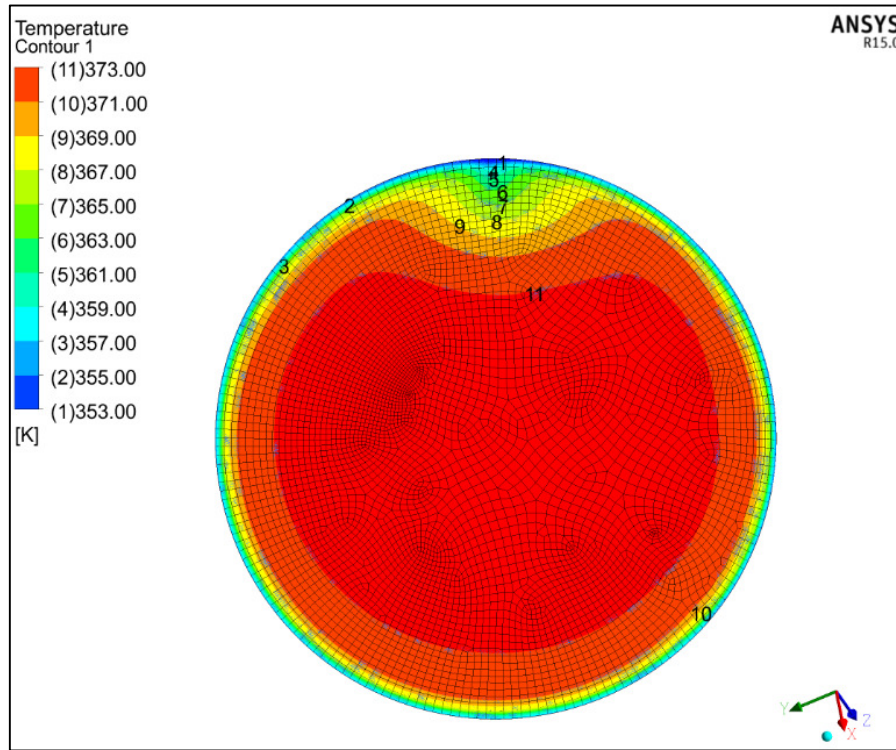
Şekil 4.6: TC2 ve EGT1 sıcaklıklarının karşılaştırılması.



Şekil 4.7: TC2 ve EGT2 sıcaklıklarının karşılaştırılması.

Akış test düzeneğinde gerçekleştirilen testler ile eş zamanlı olarak Ansys Fluent programı yardımıyla CFD analizleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizlerde, test düzeneğinde incelendiği gibi giriş sıcaklığı 100 °C ile 500 °C arası 50 °C lik aralıklarla modellenmiş ve EGT1 noktasında dairesel kesit içerisinde oluşacak sıcaklık dağılımı ortaya konmuştur.

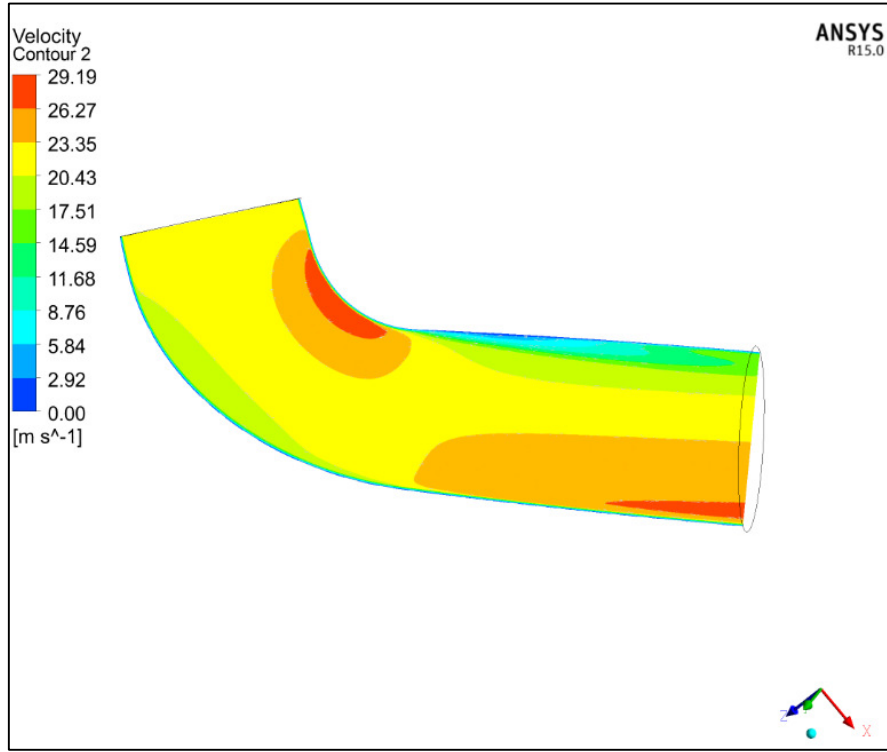
Tez çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen sayısal analizlerde, egzoz bağlantı borusu üzerinde termoeleman ile ölçüm alınan ikinci nokta olan “TC2” ile Dizel Oksidasyon Katalisti girişinde bulunan EGT1 sensörünün ölçüm yaptığı nokta arası modellenmiştir. Sayısal analizlerde fiziksel koşulları yansıtacak şekilde atmosfere açık düz boru çıkış koşulu olarak tanımlanmıştır. Sayısal analizler 3D olarak yapılmış ve analizlerde k-ε modeli kullanılmıştır. Analizlerin gerçekleştirildiği, elemanlara bölünüş hali ile sayısal model Şekil 4.8’ de verilmiştir.



Şekil 4.8: Dairesel kesitin elemanlara bölünmüş gösterimi.

Sayısal analizler ile ilk olarak söz konusu bağlantı borusundaki hız dağılımı çıkartılmıştır. Bağlantı borusunun dirsekli yapısı dolayısıyla her yerde eşit hız

dağılımı elde edilememektedir, bunun soruncunda boru cidarlarından merkeze doğru değişen hız dağılımı sebebi ile farklı sıcaklıklar görülmektedir.

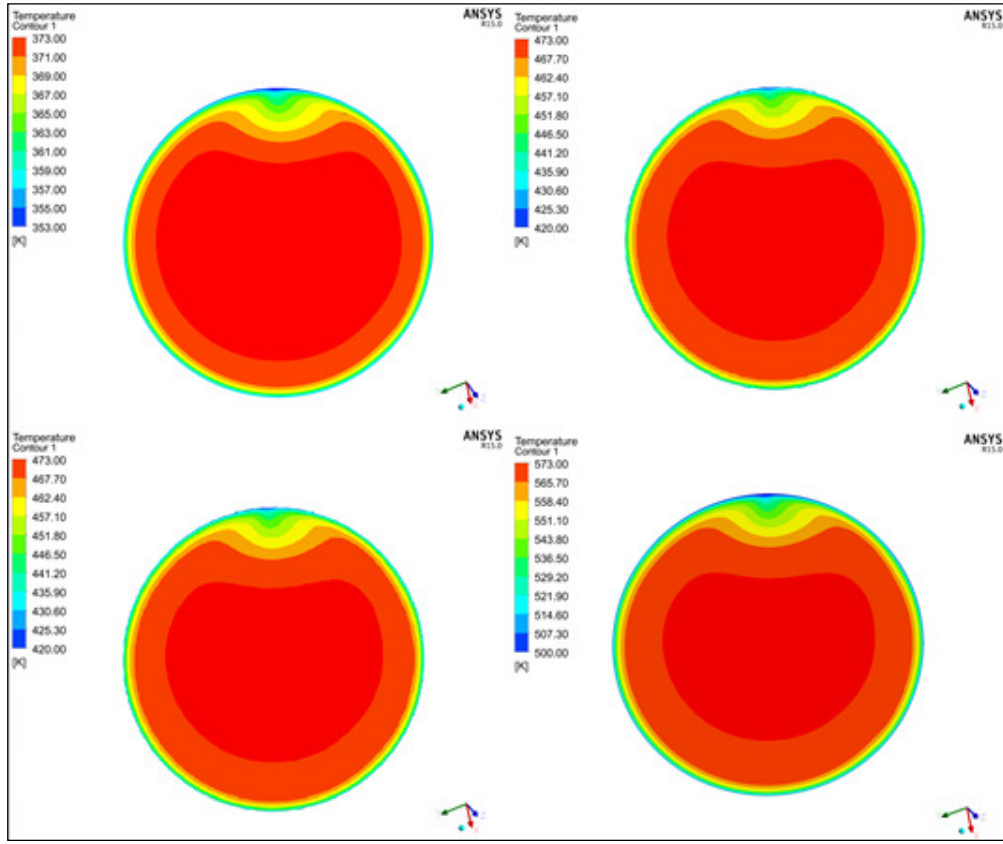


Şekil 4.9: Bağlantı borusunda hız dağılımı.

Termoeleman ile ölçüm alınan ikinci nokta “TC2” ile Dizel Oksidasyon Katalisti girişinde bulunan EGT1 sensörünün ölçüm yaptığı nokta arasında bulunan bağlantı borusu dirsekli bir yapıya sahip olduğundan sıcaklık sensörü ile ölçüm alınan noktanın dairesel kesiti incelendiğinde ortalama hız değerinin borunun içbükey (konkav) kenarından dışbükey (konveks) kenarına doğru arttığı görülmektedir (Şekil 4.9). Borunun içbükey (konkav) noktalarında ortalama hız değeri 5 m/s ile 15 m/s mertebelerinde iken, aşağıya doğru inildikçe bu değerler borunun orta noktalarında yaklaşık 23 m/s ve dışbükey(konveks) noktalarında yaklaşık 29 m/s değerlerine ulaşmaktadır.

Yapılan sayısal analiz sonuçları, akış deney düzeneğinde gerçekleştirilmiş olan testlerde EGT1 sensöründen alınmış olan sıcaklık ölçümleri baz alınarak 100⁰C ve 500⁰C arasında incelenmiş ve EGT1'in yerleştirildiği noktadaki dairesel kesitte sıcaklık dağılımı Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde,

bağlantı borusunun şekline bağlı olarak akışın uniform olmaması neticesinde dairesel kesitteki her noktada eşit sıcaklık oluşmadığı görülmüştür.



Şekil 4.10: EGT1 konumunda dairesel kesitteki sıcaklık dağılımı (100 °C-300 °C giriş sıcaklığı için).

EGT1'in, paket sınırlamaları sebebiyle ve egzoz borusu içindeki yoğuşan sıvılardan etkilenerek zarar görmemesi gerektiği için egzoz borusunun üst tarafına yerleştirilmesi gerekliliği göz önüne alındığında, prob boyuna bağlı olarak sıcaklıklarda ciddi oranda farklılıklar oluştuğu ve buna istinaden farklı prob uzunluklarındaki sensörlerin o noktadaki ortalama sıcaklığı farklı değerler şeklinde ölçeceği ve sisteme bu şekilde geribildirim sağlayacağı görülmüştür. Söz konusu sıcaklık farkları, boru cidar sıcaklıkları ve egzoz içerisinden geçen gazın en sıcak noktası kıyaslandığında 100°C ile 300°C aralığında ortalama 50 °C olarak hesaplanmıştır. Bu fark yapılan sayısal analizler neticesinde EGT1'in bulunduğu noktanın dairesel kesitinde ölçülen en düşük ve en yüksek sıcaklıkların farkıdır. Aynı şekilde testler sırasında kullanılan 30 mm, 50 mm ve 70 mm'lik sıcaklık sensörlerinin boru içerisinde yerleşeceği ve ölçüm alacağı noktalar göz önüne

alınarak dairesel kesitte yer alacağı noktalar belirlenip analiz sonuçlarına göre kıyaslama yapıldığında; 30 mm ve 70 mm'lik sensörlerin yapacağı ölçümler arasında yaklaşık 20 °C'lik bir farkın oluşacağı, yine aynı şekilde 50 mm ve 70 mm'lik sensörlerin yapacağı ölçümler arasında yaklaşık 10 °C'lik bir farkın oluşacağı, son olarak 30 mm ve 50 mm'lik sensörlerin yapacağı ölçümlerin arasında yaklaşık 10 °C'lik bir farkın oluşacağı görülmüştür.

Boru kesitinin büyük bir alanından geçen havanın sıcaklığı TC2'de ölçülen ve sayısal analizler sırasında giriş koşulu olarak verilen sıcaklık değeri olduğu göz önüne alınarak ortalama sıcaklığın bu değere eşit olduğu ve 70 mm'lik prob uzunluğuna sahip olan sensörün bu ortalama değeri doğru olarak ölçtüğü kabul edilirse, sırasıyla 30 mm ve 50 mm'lik proba sahip sıcaklık sensörlerinin %10 ve %5 hata payına sahip olduğu hesaplanmıştır.

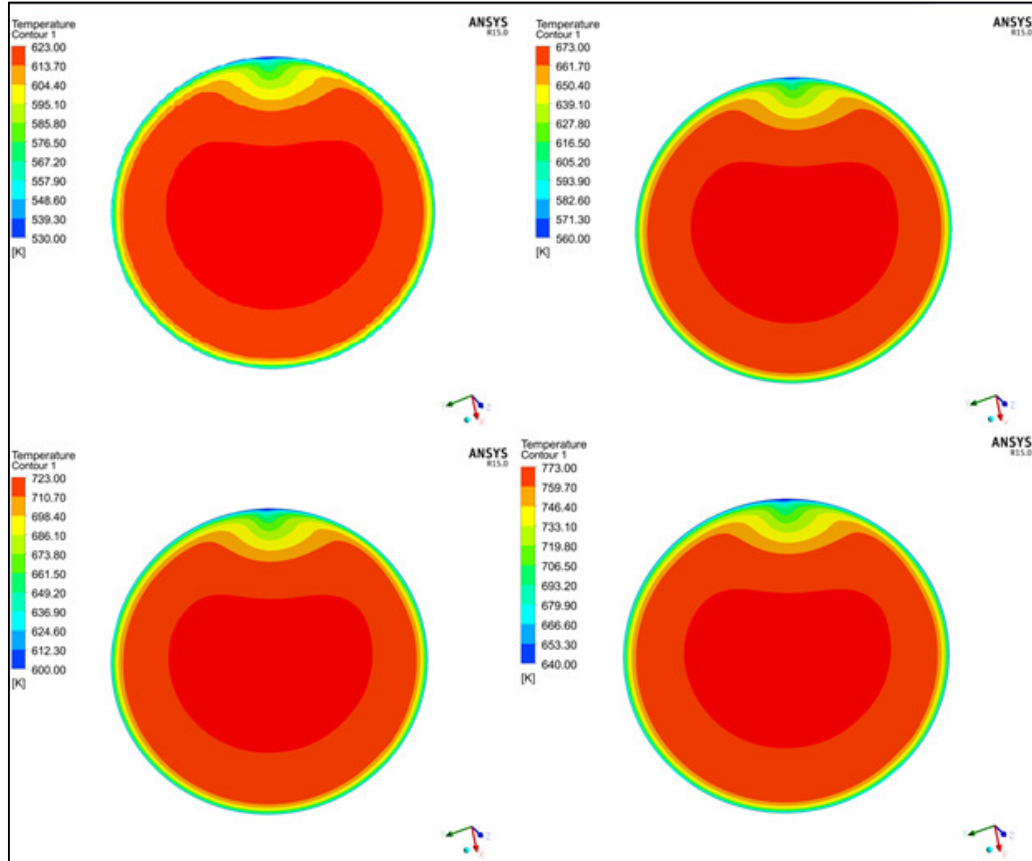
350 °C ile 500°C sıcaklık aralığında da sonuçlar diğer sıcaklık aralığında olduğu gibi akışa bağlı olarak dairesel kesitte sıcaklık dağılımının her bir noktada farklı olduğunu göstermektedir. Giriş sıcaklık değeri mertebesinin yükselmesine bağlı olarak ısı kayıpları arttığından dairesel kesitte gözlemlenen en düşük ve en yüksek sıcaklık arasındaki farkın da arttığı görülmüştür. Buna göre sonuçlar incelendiğinde boru cidar sıcaklığı ile dairesel kesitte bulunan gazın en yüksek sıcaklığı arasındaki fark 115 °C olarak hesaplanmıştır.

Sayısal analiz sonuçları incelendiğinde, 350 °C ile 500°C sıcaklık aralığında 30 mm ve 70 mm'lik sensörlerin yapacağı ölçümler arasında yaklaşık 40 °C'lik bir farkın oluşacağı, yine aynı şekilde 50 mm ve 70 mm'lik sensörlerin yapacağı ölçümler arasında yaklaşık 20 °C'lik bir farkın oluşacağı, son olarak 30 mm ve 50 mm'lik sensörlerin yapacağı ölçümlerin arasında yaklaşık 20 °C'lik bir farkın oluşacağı görülmüştür.

100 °C ile 300°C sıcaklık aralığı ile benzer şekilde değerlendirme yapıldığında 350 °C-500 °C aralığında sırasıyla 30mm ve 50mm'lik proba sahip sıcaklık sensörlerinin %10 ve %5 hata payına sahip olduğu hesaplanmıştır.

DeneySEL ve sayısal analizler birlikte incelendiğinde, özellikle 30 mm proba sahip sensörde ciddi oranda sapmalar görülmüştür. Sıcaklığın, sensör ile olduğundan daha farklı okunması, atılan emisyonun hesaplanması ve kontrol edilmesi amacıyla kullanılan dizel oksidasyon katalisti giriş sıcaklığı değerinde ciddi oranda sapmaya

sebeptir. Dizel oksidasyon katalisti giriş sıcaklığı değerindeki sapmalar ise hedeflenen emisyon değerlerinin tutturulmasını engellemektedir. Ayrıca dizel partikül filtresinin partikül tutma kapasitesi dolduğu zaman yenilenmesi amacıyla gerçekleşen rejenerasyon prosesinin sıklığı da araç tipine bağlı olarak farklılık göstermekle birlikte EGT2'den yani dizel partikül filtresinin girişinden alınan sıcaklık değerine bağlı olarak belirlenmektedir. Buna bağlı olarak bu sıcaklığın gerçeği yansıtmaması veya gerçek değerden ciddi bir oranda sapması rejenerasyon için egzoz sistemine püskürtülen yanmamış yakıtın miktarının gerekenden az olarak belirlenmesine neden olmaktadır. Bunun neticesinde rejenerasyon sıklığı artacaktır. Bu durumun araç kullanıcılarına etkisi, sarfedilen yakıt miktarının ciddi oranda artması ve rejenerasyon süreci gürültülü bir süreç olduğu için araç kullanıcılarının konforunun kötü anlamda etkilenmesi şeklinde ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.11: EGT1 konumunda dairesel kesitteki sıcaklık dağılımı (350 °C-500 °C giriş sıcaklığı için).

4.2 Motor ve Dizel Oksidasyon Katalisti Arasındaki Bağlantı Borusunun Uzunluğunun Dizel Oksidasyon Katalisti Giriş Sıcaklığına Etkisi

Birinci grup testlerde DOC girişinde ve çıkışında bulunan ve sırasıyla EGT1 ve EGT2 adı verilen sıcaklık sensörlerinin ölçüm doğruluğuna etki eden en önemli faktörlerden biri olan prob uzunluğu incelenmiş ve verilen sistem için en uygun ve ölçüm doğruluğu en yüksek sensörün 70mm'lik prob uzunluğuna sahip sensör olduğu sonucuna varılmıştır.

Birinci grup testler, brülör yardımı ile havanın istenilen sıcaklık değerine getirildiği ve kompresör yardımı ile istenilen debi değerinin ayarlandığı bir test düzeneği üzerinde yapılmıştır. İkinci grup testler birinci grup testlerin aksine araç üzerinde gerçekleştirilmiş ve motor ile dizel oksidasyon katalisti arasındaki egzoz bağlantı borusunun uzunluğunun, EGT1 sensörü ile ölçülen DOC giriş sıcaklığına olan etkisi ölçülmüştür. İkinci grup testlerde, motor ile DOC arasında bulunan egzoz bağlantı boru uzunluğunun kısaltılması neticesinde bu bölgede gerçekleşen ısı kayıplarının azaltılması ve bu sayede DOC giriş sıcaklığının yükseltilmesi amaçlanmıştır.

Günümüzde dizel araçların tümünde partikül emisyonlarının regülasyonlara uygun hale gelmesi amacıyla dizel partikül filtresi kullanılmaktadır. Bu filtre, yapısı gereği belirli bir kapasiteye sahiptir ve kapasitesini doldurduğunda üzerinde biriken partiküllerin giderilmesi gerekmektedir. Mevcut filtre sistemlerinin kapasitesi, motor ve kullanım koşullarına bağlı olmakla birlikte maksimum 1000 km'lik bir kullanım sonucunda dolmaktadır. Filtrenin yenilenmesi maliyet açısından pahalı bir çözüm olduğundan, filtre üzerinde biriken partiküller giderilerek filtrenin tekrar kullanımı sağlanmaktadır. Bu işlem, aracın kullanımı sırasında filtre üzerine gaz fazında yanmamış yakıt gönderilip, yüksek sıcaklıkta egzoz gazının etkisiyle söz konusu yakıtın yanma işlemi sırasında biriken partikülleri yakması ile gerçekleşir. Bu prosese, rejenerasyon adı verilmektedir.

Yanmamış yakıtın filtre üzerinde yakılması ve bu sırada kendisi ile birlikte birikmiş olan partikülleri de yakması işlemi için, egzoz gazının sıcaklığının yine motor ve araca bağlı olarak değişmekle birlikte ~600 °C'nin üzerinde olması gerekmektedir. Motorda gerçekleşen yanma tepkimesi sonucunda yanma atıklarından olan gazın sıcaklığı bu mertebelere ulaşmamaktadır. Bu sebeple, egzoz gazını bu sıcaklığa ulaştırmak amacıyla farklı prosesler uygulanmaktadır. Bu proseslerden birincisi, post

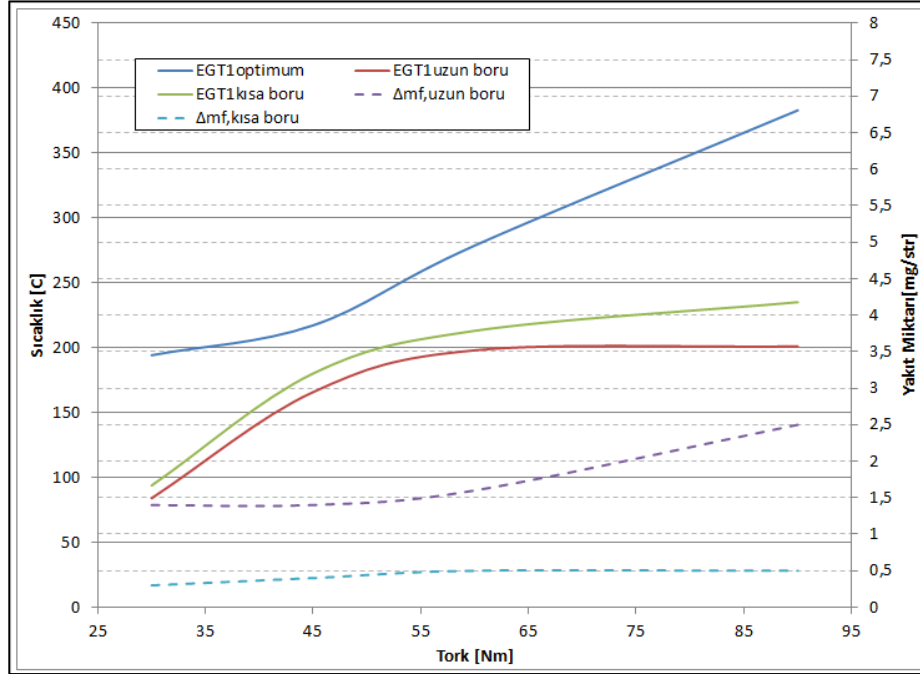
enjeksiyon adı verilen, yanma odasına yanma prosesi tamamlandıktan sonra yakıt püskürtülmesidir. Bu uygulama yakıt tüketimini arttıran bir işlemdir. Aynı zamanda egzoz sistemine doğrudan yanmamış yakıt püskürtüldüğü için egzoz emisyonlarında artışa sebep olmaktadır. İkinci proses ise, DOC'da egzotermik olarak gerçekleşen oksidasyon tepkimeleri sonrasında üretilen ısı ile egzoz gazının ısıtılmasıdır. Egzoz gazının filtre rejenerasyonu için gereken sıcaklığa ulaşması amacıyla uygulanan mevcut prosesler göz önüne alındığında, EGT1 ile ölçülen DOC giriş sıcaklığı oldukça önem kazanmaktadır ve bu sıcaklığın artırılması amacıyla yapılan çalışmanın rejenerasyon sırasında gerçekleşen yakıt tüketimine doğrudan etkisi bulunmaktadır.

Tez çalışması kapsamında yapılan ikinci grup testlerde, DOC giriş sıcaklığının artırılması amacıyla motor ve DOC arasındaki bağlantı borusunun boyu kısaltılarak ısı kayıplarının azaltılması amaçlanmıştır. Bunun sonucunda, filtre rejenerasyonu için gereken eşik sıcaklığın aşılması için post enjeksiyon prosesinde kullanılan yakıt miktarında tasarruf sağlanması beklenmektedir. Bu testlerde, birinci grup testler sonucunda belirlenen minimum hata payına sahip 70 mm'lik prob uzunluğundaki EGT1 ve EGT2 sensörleri kullanılmıştır.

İkinci grup testlerde, motorun minimum ve maksimum yük koşullarını modellemeyi amaçlayan 1000 rpm ve 1800 rpm koşullarında, 30, 45, 60 ve 90 Nm olmak üzere farklı tork üretimleri sağlanarak sekiz farklı koşul için testler gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde, motor ve DOC bağlantı borusu uzunluğunun iki farklı değeri için EGT1 sensörü ile DOC giriş sıcaklıkları ölçülmüştür. Aynı şekilde EGT2 sensörü yardımı ile DOC çıkış yani filtre giriş sıcaklığı ölçülmüştür ve bu değer rejenerasyon için gereken eşik değere yükseltilmesi amacıyla post enjeksiyon sırasında püskürtülen yakıt miktarı artırılarak püskürtülmesi gereken yakıt miktarı belirlenmiştir. Bu koşul, egzoz bağlantı boru boyunun iki farklı değeri için tekrarlanmıştır. Uzunlukları açısından uzun boru ve kısa boru olarak ifade edilen boru boyları sırasıyla; 90 cm ve 45 cm'dir.

Tez çalışmaları kapsamında yapılan testlerde, öncelikli olarak kullanılan sistemin filtre rejenerasyonu için filtre girişinde gereken 620 °C eşik sıcaklığına ulaşmak amacıyla, post enjeksiyon sırasında püskürtülen yakıt miktarı sürekli arttırılarak, DOC giriş sıcaklıkları EGT1 sensörü ile ölçülmüştür. Her bir tork değeri için filtre girişinde 620 °C sıcaklığa ulaşılan noktadaki püskürtülen yakıt miktarı değeri ve

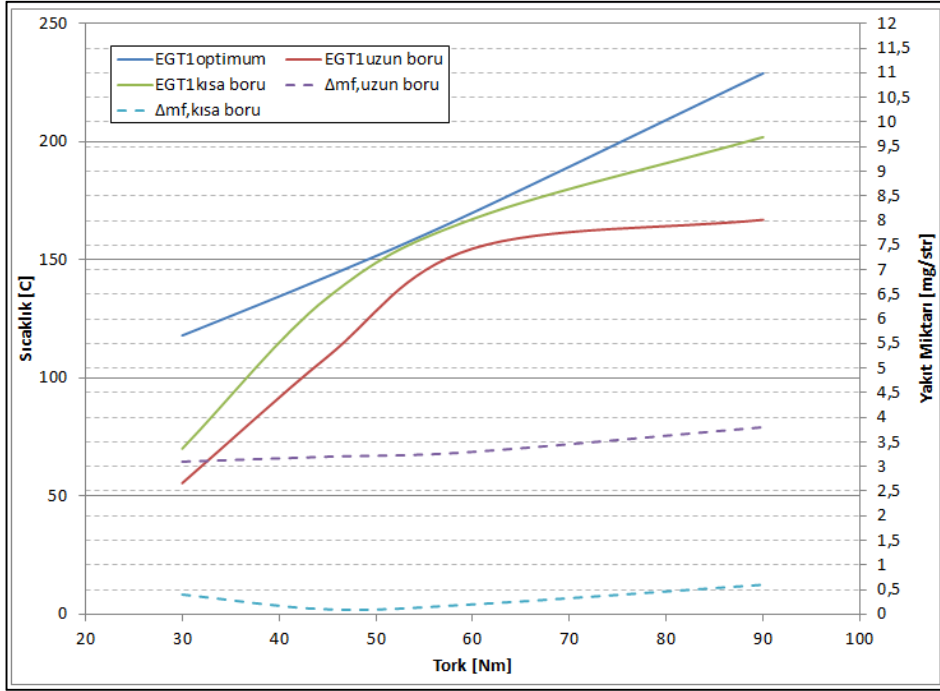
DOC giriş sıcaklığı değeri ölçülmüştür. Filtre girişinde eşik sıcaklık değerinin üzerinde olunan ve egzoz emisyonların regülasyon limitlerinin üstünde olmadığı optimum noktalar belirlenmiş ve yapılan hesaplamalarda kullanılmıştır.



Şekil 4.12: 1800 rpm koşulunda sıcaklık ve yakıt miktarı karşılaştırması.

1800 rpm koşulunda, kısa ve uzun bağlantı borusuna sahip testlerde ölçülen EGT1 sıcaklıkları kıyaslandığında, aralarında ortalama olarak 18°C fark görülmüştür (Şekil 4.12). Kısa boru boyuna sahip uygulamada EGT1 sıcaklığının daha yüksek olmasının sebebi, sıcak havanın geçtiği mesafenin kısalması neticesinde ısı kayıplarının azalmasıdır.

Motorun yüksek devirde çalıştığı koşullarda düşük devirlere kıyasla, yanma tepkimesi sonucunda oluşan egzoz gazı sıcaklığı da yüksek olmaktadır. Bu koşulda, optimum DOC giriş sıcaklığı ile üretilen gazın sıcaklığı arasındaki fark görece daha az olduğundan, post enjeksiyon sırasında püskürtülmesi gereken yakıt miktarı, düşük devir koşullarına kıyasla daha azdır.



Şekil 4.13: 1000 rpm koşulunda sıcaklık ve yakıt miktarı karşılaştırması.

1000 rpm koşulunda, kısa ve uzun bağlantı borusuna sahip testlerde ölçülen EGT1 sıcaklıkları kıyaslandığında, aralarında ortalama olarak 22°C fark görülmüştür (Şekil 4.13). Kısa boru boyunda ısıl kayıpların azalması neticesinde sıcaklıklar daha yüksek mertebelerde kalmaktadır. 1800 rpm test koşuluna kıyasla 1000 rpm'de sıcaklık farkının göreceli olarak daha yüksek olması, üretilen gazın sıcaklığının daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Benzer şekilde, motorun düşük devirde çalıştığı durumda üretilen gazın sıcaklığının daha düşük olması sebebiyle, bu gaz sıcaklığını optimum sıcaklığa yükseltmek amacıyla püskürtülmesi gereken yakıt miktarı artacaktır.

Tez kapsamında yapılan ikinci grup testler sonucunda dizel partikül filtresinde filtre rejenerasyonu için gerekli olan eşik sıcaklık değeri ve yanmamış yakıt püskürtülmesi sonucunda artan egzoz emisyonları göz önüne alınarak belirlenen optimum noktalara ait toplam yakıt miktarı ($m_{f, \text{optimum}}$) Çizelge 2.1'de verilmiştir. Aynı şekilde, DOC giriş sıcaklıklarının optimize edilmediği normal koşullarda kısa ve uzun boru boyu için püskürtülen yakıt miktarları ($m_{f, \text{uzun boru}}$, $m_{f, \text{kısa boru}}$) da verilmiştir. Buna göre optimum koşul için belirlenen yakıt miktarı ile bu değerlerin farkı alınarak mevcut uygulamaları optimum koşullarda çalıştırabilmek için ekstra püskürtülmesi gereken yakıt miktarı ($\Delta m_{f, \text{uzun boru}}$, $\Delta m_{f, \text{kısa boru}}$) belirlenmiş ve bu değerlerin farkı da egzoz

bağlantı borusunun boyunun kısaltılması neticesinde yakıttan yakılan tasarruf ($\Delta m_{f, \text{tasarruf}}$) olarak Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.2: Yakıt tüketim miktarları.

| 1000 rpm | | | | |
|----------|-------------------------------------|--|--|---|
| Tork | $m_{f, \text{optimum}}$ [mg/str] | $\Delta m_{f, \text{uzun boru}}$ [mg/str] | $\Delta m_{f, \text{kısa boru}}$ [mg/str] | $\Delta m_{f, \text{tasarruf}}$ [mg/str] |
| 30 | 9,5 | 3,1 | 0,4 | 2,7 |
| 45 | 11,3 | 3,2 | 0,1 | 3,1 |
| 60 | 12,9 | 3,3 | 0,2 | 3,1 |
| 90 | 17,9 | 3,8 | 0,6 | 3,2 |
| 1800 rpm | | | | |
| Tork | $m_{f, \text{optimum}}$ [mg/str] | $\Delta m_{f, \text{uzun boru}}$ [mg/str] | $\Delta m_{f, \text{kısa boru}}$ [mg/str] | $\Delta m_{f, \text{tasarruf}}$ [mg/str] |
| 30 | 9,5 | 1,4 | 0,3 | 1,1 |
| 45 | 11,2 | 1,4 | 0,4 | 1,0 |
| 60 | 12,9 | 1,6 | 0,5 | 1,1 |
| 90 | 17,9 | 2,5 | 0,5 | 2,0 |

Yakıt tasarrufundan yola çıkılarak ortalama bir kullanıcının üç farklı kullanım koşulu için aracın ömrü boyunca yapılacak toplam kazanç hesaplanacaktır. Bu doğrultuda ilk olarak, Çizelge 2.1’de mg/str olarak verilen yakıt tüketim değeri kg/h birimine çevrilmiştir.

$$\frac{mg}{str} \times \frac{2str}{1rev} \times rpm \times \frac{60 \text{ min}}{h} \times \frac{1kg}{10^6 mg} = \frac{mg}{str} \times \frac{2str}{1rev} \times \frac{rev}{\text{min}} \times \frac{60 \text{ min}}{h} \times \frac{1kg}{10^6 mg} \quad (4.1)$$

$$\frac{mg}{str} \times \frac{120}{10^6} = \frac{kg}{h} \quad (4.2)$$

Denklem (4.2)’de verilen eşitlik ile ölçülen yakıt miktarı değerleri kg/h birimine çevrilmiş ve hesaplamalarda kullanılmıştır. Toplam yakıt tasarruf miktarı, üç farklı kullanım koşulu için 4.3 denklemi ile hesaplanmıştır.

$$TYT(kg) = YT \left(\frac{kg}{h} \right) \times RS(dk) \times \frac{AÖ(km)}{RP(km)} \quad (4.3)$$

Kırsal bölgelerde kullanım koşullarını modelleyen “Common Artemis Driving Cycle” çevrimi dahilinde tanımlanan “Rural Cycle” çevrimine göre, araç maksimum hızı yaklaşık 112 km/h olmak üzere ortalama 55 km/h hızında kullanılmaktadır [16] ve yapılan testlerde bu çevrim sırasında yaklaşık 120 km’de bir filtrenin kapasitesinin dolduğu ve rejenerasyon prosesinin gerçekleştiği belirlenmiştir.

Ortalama bir rejenerasyon prosesinin 12 dk sürdüğü ve araç ömrünün 240000 km olduğu kabulü ile hesaplamalar yapıldığında bu koşullarda kullanılan bir araçta yapılan tasarruf değeri 0,1536 kg olarak hesaplanmıştır.

Şehir içi kullanım koşullarını modelleyen ve “New European Drive Cycle” çevrimi dahilinde tanımlanan “City Cycle” çevrimine göre, araç maksimum hızı 50 km/h olmak üzere ortalama 26 km/h hızında kullanılmaktadır [15] ve yapılan testlerde bu çevrim sırasında yaklaşık 80 km’de bir filtrenin kapasitesinin dolduğu ve rejenerasyon prosesinin gerçekleştiği belirlenmiştir. Ortalama bir rejenerasyon prosesinin 12 dk sürdüğü ve araç ömrünün 240000 km olduğu kabulü ile hesaplamalar yapıldığında bu koşullarda kullanılan bir araçta yapılan tasarruf değeri 0,2304 kg olarak hesaplanmıştır.

Otoyol kullanım koşullarını modelleyen ve “Common Artemis Driving Cycle” çevrimi dahilinde tanımlanan “Motorway Cycle” çevrimine göre, araç maksimum hızı yaklaşık 132 km/h olmak üzere ortalama 100 km/h hızında kullanılmaktadır [16] ve yapılan testlerde bu çevrim sırasında yaklaşık 180 km’de bir filtrenin kapasitesinin dolduğu ve rejenerasyon prosesinin gerçekleştiği belirlenmiştir. Ortalama bir rejenerasyon prosesinin 12 dk sürdüğü ve araç ömrünün 240000 km olduğu kabulü ile hesaplamalar yapıldığında bu koşullarda kullanılan bir araçta yapılan tasarruf değeri 0,1024 kg olarak hesaplanmıştır.

Yapılan hesaplamalar neticesinde, egzoz boru boyunda önerilen değişimin aracın yalnızca filtre rejenerasyonu prosesindeki yakıt tasarrufuna etki etmesi nedeniyle, toplam yakıt tasarrufunda ciddi bir farklılık oluşturmadığı görülmüştür. Fakat bunun yanında egzoz borusunun boyunun kısaltılmasının yanma sonucunda motor çıkışında oluşan toplam NO_x miktarına olan etkisi ve buna bağlı olarak DOC çıkışındaki NO/NO₂ oranına ve toplam egzoz emisyonuna olan etkisi de düşünüldüğünde, sistem ve tasarım kısıtları göz önünde bulundurularak DOC’nin motora mümkün olduğunca yakın yerleştirilmesi avantaj sağlayacaktır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında, egzoz sistemlerinde kullanılan sıcaklık sensörünün prob uzunluğunun, belirlenen bir sistem için ölçülen ortalama egzoz boru sıcaklığına etkisi ve motor ile dizel oksidasyon katalisti arasındaki bağlantı borusunun uzunluğunun oksidasyon katalisti giriş ve çıkış sıcaklıklarına olan etkisi irdelenmiş, söz konusu etki yakıt tüketimi ve egzoz zararlı gaz emisyonları ile birlikte değerlendirilmiştir.

Literatürde bulunan çalışmalar ve üretim kabiliyetleri göz önünde bulundurularak testler sırasında incelenecek değişken parametreler ve bu parametrelerin alacağı değerler belirlenmiştir. Buna göre egzoz sistemlerinde kullanılan sıcaklık sensörü prob uzunluğunun, ölçülen ortalama egzoz gaz sıcaklığının doğruluğuna etkisinin incelendiği birinci grup testlerde, mevcut araç sistemlerini modelleyecek şekilde egzoz sistemleri kullanılmış ve aracın sürüş sırasında egzoz sistemlerinde oluşacak fiziksel özelliklerin modellenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, akış sırasında gerçekleşecek olan ısı kayıplarına etkisi olan en önemli parametrelerden motor çıkış sıcaklığı ve gaz akış debisi; test düzeneğinde kullanılan bir brülör ve kompresör yardımı ile istenilen değerde tutulmuş ve araç ortamında karşılaşılabilecek koşullar modellenecek şekilde kontrol edilmiştir. Buna göre birinci grup testlerde, hava akış debisi 1200 kg/h saat olarak belirlenmiş ve testler sırasında kompresör yardımıyla bu değerde sabit tutulmuştur. Aynı şekilde brülör çıkış sıcaklığı araç koşullarını simüle edecek şekilde 100 °C ile 550 °C arasında kontrol edilmiş ve her 50 °C'de bir, yaklaşık 1 dakika sabit tutulacak şekilde düzenli olarak artırılmıştır. Aynı test koşulları, mevcut üretim kabiliyetleri ve mevcut araç uygulamaları göz önüne alınarak 30 mm, 50 mm ve 70 mm prob uzunluğuna sahip üç farklı sensör ile tekrarlanmıştır. İstenilen sıcaklık ve kütleli debide hava üretimini sağlayan düzener ile egzoz emisyon indirgeme ekipmanlarından dizel oksidasyon katalisti, dizel partikül filtresi ve seçici katalitik indirgeme ekipmanlarının bulunduğu ve endüstride susturucu adı verilen komponent arasına araç uygulamaları ile aynı koşulları simüle etmek adına 90 cm uzunluğunda egzoz bağlantı borusu yerleştirilmiştir. Bu boru içerisindeki akışın kontrol edilmesi ve

gerçekleşen ısı kayıplarının belirlenmesi adına boru üzerine iki adet termoeleman yerleştirilmiş ve sıcaklık sensörleri ile eş zamanlı sıcaklık ölçümü alınmıştır. Aynı şekilde emisyon indirgeme ekipmanlarından olan ve çalışma kapsamında incelenen dizel oksidasyon katalistinin giriş ve çıkışında olmak üzere iki adet sıcaklık sensörü ile sıcaklık ölçümü alınmıştır.

Birinci grup testler tamamlandıktan sonra, öncelikle testler sırasında termoelemanlar ile alınan sıcaklık ölçüm sonuçları; sıcaklık sensörlerinden alınan ölçümler ile kıyaslanmış ve testin tutarlılığı belirlenmeye çalışılmıştır. Daha sonra üç farklı prob uzunluğu için üç tekrarlı olarak gerçekleştirilen testler sonucunda, termoelemanlar ile alınan sıcaklık ölçümleri kıyaslanmış ve sonuçların uyuşmasına istinaden yapılan testlerde aynı şartların modellendiği varsayımı yapılmıştır. Üç farklı prob uzunluğu için tekrarlanan testlerde TC2 termoelemanı ile yapılan ölçümlerin ortalaması alınarak referans sıcaklık değeri belirlenmiştir. Belirlenen referans sıcaklık değeri ile her bir sensörün aldığı ölçümler kıyaslanarak, sensörlerin referans değerden olan sapma değerleri belirlenmiştir. Buna göre, başta 70 mm prob uzunluğuna sahip sensör olmak üzere, 70 mm ve 50 mm prob uzunluğuna sahip sensörlerin ölçüm sonuçlarının TC2 termoelemanından alınan ölçümler ile 30 mm prob uzunluğuna sahip sensöre kıyasla daha uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Belirlenen sapma oranlarının sayısal olarak ifade edilmesi amacıyla ve TC2'den alınan ölçümlerin referans olarak belirlenmesi varsayımıyla, her bir prob uzunluğu için hata payları hesaplanmış ve 70 mm, 50 mm ve 30 mm'lik sensörler için sırasıyla %2,52, %5,52, %9,85 olarak hesaplanmıştır.

Akış test düzeneğinde gerçekleştirilen testler ile eş zamanlı olarak Ansys Fluent programı yardımıyla CFD analizleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizler, 3D olarak yapılmış ve analizlerde k-ε modeli kullanılmıştır. Yapılan analizlerde, TC2 termoelemanının bulunduğu nokta başlangıç noktası ve EGT1 sensörünün bulunduğu DOC girişi bitiş noktası olarak ve TC2 termoelemanı ile yapılan ölçümler giriş şartları olarak belirlenmiştir. Sayısal analizler ile yapılan testlerde alınan ölçüm sonuçlarının tutarlılığının belirlenmesi amacıyla EGT1 sensörünün bulunduğu noktadaki dairesel kesitte sıcaklık dağılımı modellenmiştir. Bu sebeple, sayısal analizler, tanımlanan test koşullarına paralel olarak TC2 ölçüm sonuçlarına istinaden 100 °C ile 500 °C arasında her 50 °C için yapılmıştır.

Sayısal analiz sonuçları incelendiğinde, bağlantı borusunun dirsekli yapısından kaynaklanmak üzere EGT1 ile ölçüm alınan noktada, ortalama hız değerinin borunun içbükey (konkav) kenarından dışbükey (konveks) kenarına doğru arttığı görülmektedir. Borunun içbükey (konkav) noktalarında ortalama hız değeri 5 m/s ile 15 m/s mertebelerinde iken, aşağıya doğru inildikçe bu değerler borunun orta noktalarında yaklaşık 23 m/s ve dışbükey(konveks) noktalarında yaklaşık 29 m/s değerlerine ulaşmaktadır. Dairesel kesitteki sıcaklık dağılım sonuçları incelendiğinde, bağlantı borusunun şekline bağlı olarak akışın uniform olmaması neticesinde her noktada eşit sıcaklık oluşmadığı görülmüştür. Yapılan sayısal analiz sonuçları incelendiğinde boru kesitindeki minimum ve maksimum sıcaklık arasındaki fark $100^{\circ}\text{C} - 300^{\circ}\text{C}$ aralığında ortalama 50°C olarak ve $350^{\circ}\text{C} - 500^{\circ}\text{C}$ aralığında ortalama 115°C olarak gözlemlenmiştir. Bu değer boru cidarında belirlenen en düşük sıcaklık ile boru merkezinde belirlenen en yüksek sıcaklık arasındaki farktır.

Yapılan sayısal analizler sonucunda EGT1 noktasında dairesel kesit içerisinde oluşacak ısı dağılımı incelendiğinde $100^{\circ}\text{C} - 300^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında 30 mm'lik ve 50 mm'lik sensörlerin ölçüm aldığı noktalar arasında yaklaşık 10°C 'lik ve aynı şekilde 50 mm'lik ve 70 mm'lik sensörlerin ölçüm aldığı noktalar arasında yaklaşık 10°C 'lik bir fark oluşacağı belirlenmiştir. Bu değerler göz önüne alındığında ve 70 mm prob uzunluğuna sahip sensörün bulunduğu noktadaki ortalama gaz sıcaklığını doğru ölçtüğü varsayımı ile hata payları 50 mm prob uzunluğuna sahip sensör için %5 ve 30 mm prob uzunluğuna sahip sensör için %10 olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde sıcaklık dağılım sonuçları incelendiğinde $350^{\circ}\text{C} - 500^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında 30 mm'lik ve 50 mm'lik sensörlerin ölçüm aldığı noktalar arasında yaklaşık 20°C 'lik ve aynı şekilde 50 mm'lik ve 70 mm'lik sensörlerin ölçüm aldığı noktalar arasında yaklaşık 20°C 'lik bir fark oluşacağı belirlenmiştir. Bu değerler göz önüne alındığında ve aynı varsayım bu sıcaklık aralığı için de yapıldığında, hata payları 50 mm prob uzunluğuna sahip sensör için %5 ve 30 mm prob uzunluğuna sahip sensör için %10 olarak hesaplanmıştır. Yapılan sayısal analizler incelendiğinde testler ile örtüştüğü ve sonuç olarak 30 mm proba sahip sensörün yaptığı ölçümlerin boru içi ortalama gaz sıcaklığından ciddi oranda saptığı görülmüştür. Verilen sistem için 30 mm prob uzunluğuna sahip sensör kullanıldığında, yapılacak ölçümlerin boru içi fiziksel koşulları yansıtmayacağını ve dizel oksidasyon katalisti giriş sıcaklığında

sapmalar oluşturacağı belirlenmiştir. Bu durum, hedeflenen emisyon değerlerinin tutturulmasını engellemektedir. Aynı şekilde katalist çıkışında yer alan ve aynı zamanda dizel partikül filtresi giriş sıcaklığını ölçmeyi amaçlayan EGT2 sensöründen alınan değerlerde meydana gelecek olası sapmalar, aracın rejenerasyon sıklığına etki edecektir. Uygulamaya bağlı olarak değişmekle birlikte, aracın rejenerasyon sıklığı EGT2 sensörü ile ölçülen sıcaklık değerine bağlı olarak belirlenmektedir. Buna göre bu sıcaklığın boru içi ortalama gaz sıcaklığını yansıtmaması veya ciddi bir oranda sapması rejenerasyon için egzoz sistemine püskürtülen yanmamış yakıt miktarının gerekenden az olarak belirlenmesine neden olmaktadır. Bunun neticesinde rejenerasyon sıklığı artacaktır. Bu durumun araç kullanıcısına etkisi, sarfedilen yakıt miktarının artması ve rejenerasyon süreci gürültülü bir süreç olduğu için araç kullanıcısının konforunun kötü anlamda etkilenmesi şeklinde ortaya çıkmaktadır.

Tez kapsamında tamamlanan ikinci grup testlerde, motor ile dizel oksidasyon katalisti arasında bulunan bağlantı borusunun uzunluğunun değiştirilmesine bağlı olarak bu boru üzerindeki ısı kayıplarının değişimi incelenmiştir. Bu testler ile dizel oksidasyon katalisti girişindeki sıcaklığın değişiminin aracın yakıt tüketimine ve egzoz zararlı gaz emisyonuna etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, diğer parametreler ve test koşulları sabit kalmak üzere 90 cm ve 45 cm'lik egzoz bağlantı borusu uzunluğu için iki farklı test gerçekleştirilmiştir. Dizel oksidasyon katalistinde gerçekleşen NO'in NO₂'e oksitlenmesi tepkimesi belirli bir sıcaklık eşiğinin üzerinde gerçekleşmesi sebebiyle, katalist giriş sıcaklığı post enjeksiyon prosesi ile kontrol edilmektedir. Temel prensip yanma gerçekleştikten sonra yanma odasına son strok sırasında yanmamış yakıt püskürtülmesi ve bu yakıtın motor çıkış gaz sıcaklığını artırmasıdır. Mevcut uygulama göz önüne alındığında egzoz boru boyu uzunluğunda gerçekleşecek olan kısalma ve buna bağlı olarak ısı kayıplarda gerçekleşecek olan düşüş göz önüne alındığında, katalist giriş sıcaklığının yükselmesi post enjeksiyon sırasında enjekte edilecek yakıt miktarını doğrudan etkilemektedir. Yapılan ikinci grup testler sırasında, 1000 rpm ve 1800 rpm olmak üzere iki farklı motor hızı için 30 Nm, 45 Nm, 60 Nm ve 90 Nm'lik tork çıkışları belirlenerek katalist giriş sıcaklıkları ölçülmüş ve daha sonra dizel oksidasyon katalistinde gerçekleşen oksidasyon tepkimeleri göz önüne alınarak bu değer

optimum değerde tutulmaya çalışılmış ve bu amaçla post enjeksiyon sırasında enjekte edilen yakıt miktarı ölçülmüştür.

Ölçüm sonuçları incelendiğinde, iki farklı bağlantı borusu uzunluğu için gerçekleşen ısı kayıplarına bağlı olarak 1800 rpm motor hızı koşulunda yaklaşık 10 °C'lik ve 1000 rpm motor hızı koşulunda yaklaşık 20 °C'lik bir fark görülmüştür. Katalist giriş sıcaklığının katalistte gerçekleşen kimyasal tepkimeler ve egzoz emisyonları göz önüne alınarak belirlenen optimum değere getirilmesi için fazladan enjekte edilmesi gereken yakıt miktarları da aynı Şekilde iki farklı motor hızı ve dört farklı tork değeri için belirlenmiştir. Yapılan ölçüm sonuçları kıyaslanarak iki farklı bağlantı borusu uzunluğu için fazladan enjekte edilen yakıt miktarları arasındaki fark belirlenmiş ve bu değer egzoz borusunda yapılacak kısaltma işlemi sonucunda elde edilecek yakıt tasarrufu olarak ele alınmıştır. Buna göre, her bir koşul için bu değer hesaplanmış ve 1000 rpm'lik motor çıkış hızı için ortalama 3 mg/str ve 1800 rpm'lik motor çıkış hızı için ortalama 1 mg/str olduğu görülmüştür. Buna göre mg/str olarak verilen yakıt tüketim değeri kg/h birimine çevrilmiştir. Daha sonra testler sırasında belirlenen ortalama rejenerasyon süresi, araç üretici firmalar tarafından belirlenen ortalama araç ömrü ve verilen sistem için belirlenen rejenerasyon periyodu faktörleri hesaba katılarak, araç ömrü boyunca gerçekleşecek olan toplam yakıt tasarrufu değeri üç farklı kullanım koşulu için hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sırasında dünya genelinde homologasyon testleri sırasında kullanılan ve bilinirliği yüksek olan sürüş çevrimleri baz alınarak belirlenen koşullarda aracın rejenerasyon periyodu belirlenmiştir. Buna göre aracın egzoz boru boyunda önerilen değişiklik sonucunda, Şehir koşullarında ömrü boyunca 0,2304 kg, kırsal kullanım koşullarında ömrü boyunca 0,1536 kg ve otoyol kullanım koşullarında ömrü boyunca 0,1024 kg yakıt tasarrufu sağlayacağı hesaplanmıştır. Bu değer aracın toplam yakıt tüketimi göz önüne aldığında ciddi bir önem teşkil etmemekle beraber, önerilen değişikliğin egzoz emisyonlarına sağlayacağı olumlu etki göz önüne alınarak dizel oksidasyon katalistinin paketleme sınırları göz önünde bulundurularak motora mümkün olduğunca yakın yerleştirilmesinin faydalı olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Bu tez çalışmasının devamı olarak aşağıda sunulan önerilerin yararlı olabileceği düşünülmektedir:

Dizel oksidasyon katalisti sıcaklığının katalistte gerçekleşen kimyasal tepkimelerin hızına etkisi ölçülerek, katalist boyu optimize edilebilir.

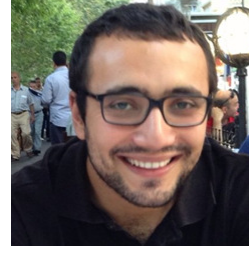
Dizel oksidasyon katalisti sıcaklığı katalist öncesine yerleştirilecek ek bir ısıtıcı ile kontrol edilerek bu prosesin toplam maliyete olan etkisi incelenebilir.

Dizel oksidasyon katalisti çıkış sıcaklığının kontrol edecek bir sistem geliştirilerek seçici katalitik indirgeme komponenti giriş sıcaklığının bu komponent içerisinde gerçekleşen kimyasal tepkimelere olan etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Schäfer, F., Basshuysen, R. (1995). Reduced Emissions and Fuel Consumption in Automobile Engines. *Society of Automotive Engineers*, 197 p.
- [2] Sakarya Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü Taşıt Emisyonları Dersi Notları (2008)
- [3] Haşımoğlu, C., İcingür, Y. (2010) Dizel Motorlarda Azot Oksit Kontrol Yöntemleri.
- [4] Balkan, T., Konukseven, E. İ., Akkök, M. (2014). Dizel Partikül Filtre Rejenerasyonu Ve Motor Yağının Seyrelmesi. *Otomotiv Teknolojileri Kongresi, Bursa*.
- [5] Url <<http://www.ngk.de/tr/en/ueruenler-ve-teknolojiler/sicaklik-sensoerleri/>>, alındığı tarih:19.10.2014.
- [6] Url <<http://www.ngk.de/tr/ueruenler-ve-teknolojiler/lambda-sensoerleri/lambda-sensoerue-teknolojileri/>>, alındığı tarih:19.10.2014.
- [7] Url <http://en.wikipedia.org/wiki/Oxygen_sensor>, alındığı tarih:19.10.2014.
- [8] Feistkorn, C., Hagen, G. (2010). Conductometric soot sensor for automotive exhausts: initial studies
- [9] Casarella, M., Lee P. (2010). Effects of B20 fuel and catalyst entrance section length on the performance of urea scr in a light-duty diesel engine, *SAE International*.
- [10] Shuai, S., Wang, J. (2004). Unsteady temperature fields of monoliths in catalytic converters, *Elsevier*, Vol100, p95-107.
- [11] Tsinoglou, D., Koldsakis, G. (2003). Transient modelling of flow distribution in automotive catalytic converters, *Elsevier*, Vol28, p775-794.
- [12] Leclerch, J.P., Schweich, D. (1991). A new theoretical approach to catalytic converters, *Elsevier*, Vol71, p465-479.
- [13] Stadlbauer, S., Waschl, H. (2013). DOC temperature control for low temperature operating ranges with post and main injection actuation, *SAE International*.
- [14] Genceli, O.F. (2005). *Ölçme Tekniği*, (1. Sürüm) (Sf. 30-60), Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [15] Url <https://www.dieselnets.com/standards/cycles/ece_eudc.php>,alındığı tarih: 05.12.2014.
- [16] Url <<https://www.dieselnets.com/standards/cycles/artemis.php>>,alındığı tarih: 05.12.2014.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Mustafa Bahadır Hergence

Doğum Yeri ve Tarihi : Adana / 02.02.1990

E-Posta : mustafahergence@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2011, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

2011 -... Ürge Mühendisi, Ford Otomotiv San. A.Ş.

2010-2011 Satış ve Pazarlama Mühendisi, Atson Mühendislik Ltd. Şti.