

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OTOMOBİL EGZOZ SİSTEMLERİNDE KULLANILAN KATALİTİK
KONVERTÖRLERİN ISIL ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÖRKEM TAŞ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı-Akışkan Programı

OCAK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OTOMOBİL EGZOZ SİSTEMLERİNDE KULLANILAN KATALİTİK
KONVERTÖRLERİN ISIL ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**GÖRKEM TAŞ
(503111112)**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Isı-Akışkan Programı**

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mustafa ÖZDEMİR

OCAK 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503111112 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Görkem TAŞ.**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**OTOMOBİL EGZOZ SİSTEMLERİNDE KULLANILAN KATALİTİK KONVERTÖRLERİN ISIL ANALİZİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. MUSTAFA ÖZDEMİR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof.Dr. MUSTAFA ÖZDEMİR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof.Dr. ALİ FERİDUN ÖZGÜÇ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ş. ÖZGÜR ATAYILMAZ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **01 Aralık 2014**
Savunma Tarihi : **14 Ocak 2015**

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmamda desteğini hiç esirgemeyen, geniş bilgi ve tecrübeleri sayesinde mesleki olarak gelişmemde büyük katkısı olan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mustafa ÖZDEMİR'E sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tez çalışmam süresince her zaman yanımda olan, sıkıntı ve mutluluklarımı birlikte paylaştığım sevgili aileme ve değerli dostlarıma teşekkür ederim.

Aralık 2014

Görkem Taş
Makine Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Kaynak Araştırması.....	3
1.2 Tezin Amacı.....	4
2. OTOMOBİL KATALİTİK KONVERTÖRÜ ve MATEMATİK FORMÜLASYON	5
2.1 Otomobil Katalitik Konvertör Sisteminin Tanıtılması.....	5
2.2 Otomotiv Sektöründeki Düzenlemeler.....	8
2.3 Matematik Formülasyon	11
2.3.1 Katalitik reaksiyonlar ve kütle geçişi.....	11
2.4 Katalitik Reaksiyon Sonucu Isı Üretimi	16
2.5 Katalitik Konvertörde Gözenekli Ortam Modeli	17
2.6 Katalitik Konvertörden Çevreye Isı Geçişi	28
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	31
3.1 Deney Tesisatının Tanıtılması ve Deneylerin Yapılışı	31
3.2 Deney Sonuçları	35
3.3 Deney sonuçlarının değerlendirilmesi.....	38
4. MATEMATİK MODELİN PARAMETRİK ÇÖZÜMÜ	41
4.1 Katalitik Konvertör Geometrik Özellikleri	41
4.2 Katalitik Reaksiyon Gaz Bileşimi	42
4.3 Egzoz Gazının Gözenekli Ortam İçerisindeki Özellikleri	43
4.4 Çözümün Algoritması	44
4.5 Deney Sonuçları ile Matematik Modelin Karşılaştırılması.....	46
5. SONUÇ.....	51
KAYNAKLAR.....	53
EKLER.....	55
ÖZGEÇMİŞ.....	57

KISALTMALAR

A_{kat}	: Konvertör tuğlasının gaz ile temas eden yüzeyininalanı
c_g	: Egzoz gazının öz ısısı (sabit basınçta)
d_m	: Tuğla içerisindeki 1 kanalın hidrolik çapı
D_j	: Kütle difüzyon katsayısı
D	: Katalitik konvertör çapı
D_{1m}	: CO Gazının Difüzyon Katsayısı
D_h	: Tuğlanın 1 Kanalının Hidrolik Çapı
E_a	: Aktivasyon enerjisi
F	: Şekil faktörü
G	: Kütle iletkenliği
g	: Yer çekimi ivmesi
h	: Havanın ısı taşınım katsayısı
$h_{göz}$	: Gözenekli ortamın ortalama ısı geçiş katsayısı
h_i	: Gazın enthalpi değeri
J	: Giden ışıyım gücü
$j_{1,s}$	: s yüzeyinden 1 yüzeyine kütle geçişi
k''	: Reaksiyon Katsayısı
k_g	: Egzoz Gazının ısı iletim katsayısı
k_T	: Tuğlanın ısı iletim katsayısı
k_e	: Gözenekli ortamın ortalama ısı iletim katsayısı
L	: Tuğla uzunluğu
M_m	: Karışımın birim mol kütlesi
$\dot{m}$	: Egzoz gazı kütledebisi
P	: Ortam basıncı
R_0	: Katalitik konvertör yarıçapı
q''	: Isı akısı
Q	: Isı miktarı
p	: Tuğladaki 1 Kanalın Çevresi
T_m	: Katalitik Konvertörün merkezindeki gaz sıcaklığı

T_w	: Katalitik Konvertörün yüzey sıcaklığı
T_{kat}	: Katalitik konvertör ısı kalkanı dış yüzey sıcaklığı
$\langle T \rangle$	: Gözenekli ortam içerisinde ortalama sıcaklık
T_∞	: Ortam sıcaklığı
$\langle u \rangle$	: Gözenekli ortam içerisindeki ortalama hız
u'''	: Birim hacim başına ısı üretimi
V	: Tuğla Hacmi
V_b	: Tuğla içindeki boşluğun hacmi
V_k	: Tuğlanın boşluksuz kısmının hacmi
$w_{1,s}$	: Tuğla yüzeyindeki kütleli derişiklik
$w_{1,e}$	: Egzoz gazı içindeki kütleli derişiklik
v	: Egzoz gazının hızı
y	: Mol Sayısı
α	: Isıl difüzyon [m^2/s]
ϵ	: Katalitik konvertörde gözeneklilik
ϵ_r	: Çeliğin ısıtım yayma katsayısı
ρ_g	: Egzoz gazının yoğunluğu
ρ	: Yoğunluk [kg/m^3]
ρ_g	: Gazın yoğunluğu
ρ_k	: Katının yoğunluğu
ν	: Dinamik viskozite [m^2/s]
Pr	: Prandtl sayısı
Nu	: Nusselt sayısı
Sh	: Sherwood sayısı
Re	: Reynoldssayısı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Avrupa’da egzoz emisyon seviyelerinin yıllara göre değişimi[15].....	10
Çizelge 2.2: 2.50 numaralı denklemin kökleri.....	25
Çizelge 2.3: Incropera Sayfa 396 Tablo 7.2 deki çaprak akış için verilen değerler ..	28
Çizelge 2.4: Işınımına ait veriler.....	29
Çizelge 3.1: Yüzey sıcaklığının gaz sıcaklığı ile değişimi	36
Çizelge 3.2: Motor devir sayısına bağlı olarak yüzey sıcaklığı ve gaz sıcaklığının değişimi	36
Çizelge 3.3: Egzoz gaz debisine bağlı olarak yüzey sıcaklığı ve gaz sıcaklığının değişimi	36
Çizelge 4.1: Egzoz gazının bileşimi ve hacimsel oranlar	43

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Otomobil egzoz sistemi ana elemanları [11].	5
Şekil 2.2: Katalitik konvertör.	6
Şekil 2.3: Egzoz katalitik konvertör iç yüzeyi [13].	7
Şekil 2.4: Reaksiyon aktivasyon enerjisinin katalizör kullanımı ile değişimi [14].	8
Şekil 2.5: Katalitik konvertör içerisinde 1 kanalda kütle korunumu.	12
Şekil 2.6: Katalizör yüzeyden egzoz gazına kütle geçiş adımları.	14
Şekil 2.7: Katalitik konvertöre gaz giriş-çıkışı.	16
Şekil 2.8: Gözenekli ortamın temsili görünümü.	17
Şekil 2.9: Bessel fonksiyonlarının grafiği.	25
Şekil 3.1: Örnek bir şasi dinamometresi.	32
Şekil 3.2: Test sırasında aracın hız döngüsü.	33
Şekil 3.3: Katalitik Konvertör Üzerindeki Sıcaklık Ölçülen Noktalar.	34
Şekil 3.4: Katalitik konvertör üzerinden sıcaklık ölçülen noktalar.	34
Şekil 3.5: Test odasında katalitik konvertör-motor bağlantısı.	37
Şekil 3.6: Egzoz gaz debisi-gaz sıcaklığı değişimi.	37
Şekil 3.7: Çeşitli koşullarda egzoz gaz sıcaklığının değişimi.	38
Şekil 4.1: Katalitik konvertör boyutları önden görünüş.	41
Şekil 4.2: Detay A.	42
Şekil 4.3: Birinci ölçüm sonucu bulunan değerler ve hesaplanan değerler.	47
Şekil 4.4: İkinci ölçüm sonucu bulunan ve hesaplanan değerler.	48
Şekil 4.5: Üçüncü ölçüm sonucu bulunan ve hesaplanan değerler.	48
Şekil 4.6: Dördüncü ölçüm sonucu bulunan ve hesaplanan değerler.	49
Şekil 4.7: Beşinci ölçüm sonucu bulunan ve hesaplanan değerler.	49
Şekil A.1: Conduction Heat Transfer Tablo 3-1 (Vedat ARPACI).	56

OTOMOBİL EGZOZ SİSTEMLERİNDE KULLANILAN KATALİTİK KONVERTÖRLERİN ISIL ANALİZİ

ÖZET

İçten yanmalı motorlar özellikle ikinci dünya savaşından beri oldukça yaygın bir kullanım alanı bulmaktadırlar. Performans ve verim değerlerinin artırılması için yapılan birçok çalışmanın yanı sıra atmosfere saldıkları zararlı gazlar nedeniyle de birçok çalışmaya konu olmaktadır. Bunun nedeni motordan salınan egzoz gazlarının insan sağlığı ve çevreye zararlarının oldukça fazla olması ve her geçen gün küresel ısınma ve çevre kirliliği gibi etmenler dolayısıyla daha fazla fark edilmesidir. İçten yanmalı motorların en yaygın kullanıldığı alan otomobil endüstrisidir. Dünyada bugün yaklaşık 700 milyon otomobil olduğu ve 2030 yılında bu sayının 1,3 milyara çıkacağı da düşünüldüğünde yapılan bu çalışmaların gerekliliği görülmektedir[5]. Otomobillerin çevresel etkilerini azaltmak için kullanılan teknolojilerden birisi egzoz sistemine entegre edilen katalitik konvertörlerdir. Bu çalışmada içten yanmalı motorlardan salınan zararlı gazları dönüştürerek çevre ortama zararsız bir şekilde atılmasını sağlayan katalitik konvertörlerin ısı davranışları incelenmektedir. Çalışmaya konu olan katalitik konvertör Ford marka bir ticari araçta kullanılmaktadır. Katalitik konvertör içerisinde oluşan kimyasal tepkimeler incelenerek bir boyutlu ve heterojen tepkime kabulü aracılığıyla yeni bir matematiksel model önerilmektedir. Bu model oluşturulurken literatürde daha önce yapılan çalışmalardan yararlanılmaktadır.

Çalışmada 2 aşama bulunmaktadır. İlk aşamada katalitik konvertörde üretilen ısı miktarı hesaplanmaktadır. Bunun için literatürde daha önce yapılmış çalışmalar incelenmiştir. Bir boyutlu matematiksel model kurularak bu modelin değişen koşullar için ürettiği ısı miktarlarını ortaya çıkarması hedeflenmiştir.

İkinci aşamada ise katalitik konvertör içerisindeki sıcaklık değişimini radyal ve eksenel olarak hesaplayan bir matematiksel model önerilmektedir. Matematiksel model ortaya çıkarılırken Bessel denklemleri kullanılmaktadır ve sonuç olarak bu model verilen her koordinatta istenen sıcaklık değerini hesaplamaktadır.

Çalışmanın daha sonraki kısmında daha önce matematiksel model kullanılarak yapılan hesaplamaların Ford laboratuvarlarında alınan ölçümler ile karşılaştırılması ve hesaplanan değerlerin ne ölçüde gerçeğe uygun olduğu yorumlanmaktadır.

Sonuç olarak bu matematiksel modeller kullanılarak yapılacak yeni tasarımların test yapılmadan önce istenilen sıcaklıklara çıkıp çıkmayacağının kullanışlı bir yoldan anlaşılması amaçlanmaktadır.

THERMAL ANALYSIS OF CATALYTIC CONVERTERS USED ON AUTOMOBILES

SUMMARY

Today the world's one of biggest problem is environmental pollution. There is huge variety of pollutants caused by men-kind inventions such as ships, factories, passcars, commercial vehicles and they became a must for the daily life. In order to eliminate these pollutants from the nature, a lot of research centers and universities are making studies on those fields.

Since automobiles are one of the biggest pollutant factor, there are also many researches and studies going on. Especially in big cities, exhaust gases released by automobiles are crucial for human health. There are millions of vehicles in most of the big cities and those exhaust gases are causing brutal health problems including cancer and premature deaths because the gas is stuck in a small area and recirculation of air is most of the time quite limited.

The exhaust gases released from the internal combustion vehicles are also causing environmental damage. NO_x is harmful for ozone layer reducing the thickness of it. Also CO₂ is the roots cause of green gas effect hence the global warming.

Wide use of internal combustion engines was started at early 19th century but those harmful effects were realized by the society after 1950. Some organizations and environmental foundations started to complain about the pollution caused by the vehicles. Therefore those actions pushed governments to act against the pollution from automobiles.

Starting from 1950's, emission levels of exhaust gases were decreased. Car manufacturers were requested to produce vehicles which produce less pollution. Therefore car manufacturers started to study on emission reducing systems.

First studies were done by US manufacturing companies because US government was the first to release the regulations for emission levels. There was different type of technologies studied to reduce the emissions. However the catalytic converter technology was only started to implement after 1970's because until that time, other technologies were sufficient to comply the emission requirements.

What catalytic converters do is to converter the pollutant gases into nonpolluting ones. This is happening by reducing the required activation energy of reactive gases and making them react with O₂ at lower temperatures. The effect of activation energy reduction comes from the precious metals on the substrate surface inside catalytic converter.

After 1970's, with more restricted emissions, catalytic convertors were started to be used at most of the vehicles. Because catalytic convertors have many advantages

compared to other emission control systems. They are not requiring additional energy input, not moving physically and quite effective to remove the pollutants. The disadvantages are there is need space to fit the converter to the vehicle and metals inside the catalytic converter are even more expensive than gold.

Of course there are other technologies used as integrated with catalytic converters. The on-board diagnostic systems which is checking and monitoring pollution in exhaust gas, exhaust recirculation system and some others are also used in automotive industry. Therefore while studying the exhaust gases, all those systems are being considered. The performances of catalytic converters also depend on those other parameters.

One of the most important parameter for catalytic converters is the catalytic reactions. The efficiency of the reaction taking place in the catalytic converter is a matter of temperature. The more efficient reaction occurs, the more pollutant gas is converted to the non-pollutants therefore this is one of the biggest area for the studies.

Another parameter for catalytic converter is to take a place under the vehicle as small as possible. This is because of limited space under the car due to other required components such as fuel system, driveline components and body components. Therefore it is also aimed to make them smaller and in convenient shape to fit the vehicle.

Also due to chemical reactions in high temperatures inside catalytic converters, they are harmful for the components around. They can heat up the components over their material design temperature and hence make them nonfunctional. This point is also taken into account during the design phase of catalytic converters.

In this study, heat production and heat transfer behavior of a commercial catalytic converter is being investigated. The vehicle is one of Ford light commercial vehicle.

First a mathematical model is being investigated to define heat production and heat transfer inside the catalytic converter. After that, temperatures at some points are being compared with some test results and the success of mathematical model is being evaluated.

In order to find the heat production inside catalyst, some other studies were investigated. There are other studies which developed the heat produced based on temperature, pressure and mass flow of exhaust gas. The studies are showing that there are many ways to solve the heat transfer equations inside catalytic converter such as 1 dimensional, 3dimensional equations and even numerical methods. What we use is a 1d model to have a convenient way for solution.

The heat transfer in radial and longitudinal direction is another matter of study. Temperature is changing at both directions and this is most of the time important for efficiency of chemical reactions inside catalytic converter. In order to have the model, a porous media approximation is being used. The substrate inside the catalytic converter is assumed as a porous media and average heat transfer coefficient and velocity is used to define and solve the equation. This way the central temperature of catalytic converter is used as an input to the model and surface temperature is determined. Then this value is compared with the measured value on the vehicle to define how correct the model is.

The last study in the thesis's content is the change of temperature depending on the radial and axial dimensions. In order to find this, Bessel equations are being used. This way the mathematical model is computing the temperature at every point of catalytic converter when radial and axial coordinates are entered.

To sum up, a detailed behavior of heat production, heat transfer and temperature distribution for a specific catalytic converter is being investigated. This investigation is a step to provide a convenient way to predict some parameters without doing any tests hence saving time and resources.

1. GİRİŞ

Günümüzde büyük şehirlerde yaşanan hava kirliliği insan sağlığını tehlikeye sokan en önemli unsurlardan birisidir. Dünya sağlık örgütü (WHO) verilerine göre 2012 yılında 7 milyon insan hava kirliliği yüzünden hayatını kaybetmiştir [1]. Özellikle artan nüfus ve beraberinde gerçekleşen hızlı şehirleşme ile şehirler nefes alınamaz hale gelmektedir. Böyle bir durumda otomobil motorundan çıkan ve egzoz sistemi aracılığıyla havaya salınan bir takım zararlı gazlar insan sağlığını tehdit eden en önemli unsurlardan biri olmaktadır.

Otomobil egzoz sisteminden salınan gazların diğer bir zararlı etkisi de ozon tabakası üzerinde görülmektedir. Salınan CO₂ gazı atmosferdeki sera etkisini artırırken NO_x gazı ozon tabakasının delinmesine neden olmaktadır.

Tüm bu nedenlerden dolayı özellikle son 30 yılda artan duyarlılıkla birlikte ülkeler otomobillerden salınan egzoz gazlarını kontrol altına almak için çeşitli yasal düzenlemeler oluşturmaya başlamışlardır. İlk olarak CO ve H_xC_x gazlarının azaltılması için çalışmalar yapılmış, günümüzde bu gazların yanı sıra NO_x ve CO₂ gazlarının da emisyon seviyelerinin aşağı çekilmesi için çalışmalar yapılmaktadır.

Otomobil egzoz emisyon seviyelerini azaltmak için çeşitli yöntemler araştırılmaktadır. Bu çalışmaların başlıcaları hibrit yakıt veya alternatif yakıt kullanan sistemler, emisyon kontrol sistemleri, daha az yakıt tüketen motorlar ve daha yaygın toplu ulaşım sistemleridir. İncelenen bu çalışmada konu emisyon kontrol sistemlerinin bir alt parçası olan egzoz katalitik konvertörlerdir.

Egzoz katalitik konvertörün görevi motordan çıkan egzoz gazının içerisinde bulunan tepkimeye girmemiş ve insan sağlığına dolaylı veya dolaysız yoldan zararlı olan gazları katalizör görevi gören bir yüzey aracılığıyla tepkimeye sokup zararsız gazlar haline getirmektir.

Otomobil emisyon sistemleri üzerine çalışmalar 1960'lı yılların başından beri yapılmaktadır [2]. İlk olarak yasal düzenleme 1965 yılında ABD'nin Kalifornia

eyaletinde hayata geçirilmiştir. O zamandan beri her yıl emisyon değerleri gittikçe azaltılmakta ve otomobil şirketleri bu alanda çalışma yapmaya teşvik edilmektedir.

Katalitik konvertör ilk olarak Amerika Birleşik Devletlerinde Eugene Houdry tarafından 1950 yılında icat edilmiştir. İlk katalitik konvertörler başka endüstriyel alanlarda kullanılmış ancak 1950'li yılların ortalarına doğru benzinli otomobillerde de kullanılmaya başlanmıştır.

İlk seri üretim katalitik konvertörler 1973 yılında Engelhard Corporation şirketi tarafından üretilmeye başlanmıştır.

1992 yılında katalitik konvertörler bütün otomobiller için zorunlu hale gelmiştir. Euro 1 olarak adlandırılan ve CO, H_xC_x ve NO_x salınım değerlerini belirleyen emisyon standardı da bu yıl başlatılmıştır. Yıllar geçtikçe bu standartlar daha da artırılmaktadır. 1998 yılında Euro 2, 2001 yılında Euro 3 emisyon standartları zorunlu hale getirilmiştir[3]. Euro 4 emisyon seviyesi 2006 yılında getirilirken dramatik bir şekilde emisyonların düşürülmesini sağlamıştır. Günümüzde Avrupa da 2010 yılından beri Türkiye'de de 2012 yılından beri Euro 5 emisyon seviyesine geçilmiştir. 2015 yılından itibaren de Euro 6 emisyon seviyesine geçiş yapılması planlanmaktadır [3].

Çalışmanın 1. bölümünde çeşitli makale ve kitaplarda yapılan çalışmalardan söz edilmektedir. Katalitik reaksiyonların farklı çözümlemelerinden bahsedilmekte ve bu tezde kullanılan çalışmaların detayları açıklanmaktadır.

Bölüm 2 de katalitik konvertörler tanıtılmakta, geçmişten günümüze gelişim aşamaları ve içerisinde gerçekleşen reaksiyonlar açıklanmaktadır. Son olarak da kullanılan matematiksel yaklaşımlar ve oluşturulan model anlatılmaktadır.

Bölüm 3'te yapılan deneylere ilişkin bilgiler verilmektedir. Deneylerin içeriği, ölçüm alınan noktalar ve kullanılan değişkenler açıklanmaktadır.

Bölüm 4'te kullanılan matematiksel model sonucu ortaya çıkan değerler ve bunların ölçüm değerleri ile karşılaştırılmasından bahsedilmektedir.

Son olarak bölüm 5'teyapılan bu çalışma sonucu ortaya çıkan veriler yorumlanmakta ve ileride tezin devamı olarak yapılabilecek çalışmalar önerilmektedir

1.1 Kaynak Araştırması

Bu çalışmada daha önce yapılmış çalışmalar sonucu yayımlanmış makaleler ile literatürde sıkça kullanılan kitaplar kullanılarak ölçüm alınan sisteme en uygun olabilecek matematiksel modellere ulaşılmaya çalışılmaktadır. Aşağıda incelenen ve referans alınan makalelerin kısaca içeriklerine ve yapılan çalışma ile benzerlik/farklılıklarına değinilmektedir.

İlk olarak Chan ve Hoang [4], çalışmalarında katalitik konvertörde hem radyal hem de eksenel yönde ısı geçişini 1 boyutlu olarak modellemeye çalışmaktadırlar. Daha sonra bu sonuçları yaptıkları çeşitli testler ile karşılaştırmakta ve yorumlamaktadırlar.

Hayes ve Kolaczowski yaptıkları çalışmada 2 boyutlu bir matematiksel model kullanmaktadırlar [5]. Bu model aracılığı ile katalitik konvertör içerisindeki akışa ait Sherwood ve Nusselt sayılarını hesaplamakta ve yapılan ölçümler sonucu ortaya çıkan değerlerle karşılaştırmaktadırlar. Ayrıca reaksiyon katsayısı bulurken Voltz tarafından belirlenen denkleme kendi belirledikleri katsayılar aracılığıyla ulaşılmaktadır.

Balakotaiah, Gupta ve West [6] ise yaptıkları çalışmada 1 boyutlu matematiksel model ile 2 boyutlu matematiksel modeli birbirleriyle kıyaslamaktadırlar. Bu yolla kendi oluşturdukları sınır koşulları sonucu açığa çıkan reaksiyon enerjisine ulaşılmakta ve iki yöntemin arasında farklılıklar gösterilmektedir.

Katalitik reaksiyonlarda en önemli parametre aktivasyon enerjisidir. Aktivasyon enerjisi konusunda Depcik ve Assanis'in kullandığı 1 boyutlu çözüm yöntemi farklı çalışmalarda kavramları bir araya getirerek oluşturulmuş en idal çalışmalardan biridir [7]. Buna göre katalitik reaksiyona giren CO, H_xC_x ve NO_x gazları için aktivasyon enerjisi hesabı

$$k_{mj} = \frac{Sh_{\infty} D_j}{d_m} \quad (1.1)$$

modeliyle ele alınmaktadır. Burada yer alan Sh, D_j ve d_m sayıları için literatürde farklı yaklaşımlar yer almaktadır. Depcik ve Assanis [7], k ve Sh değerleri konusunda kapsamlı çalışmalar yapmışlardır ve bu çalışmada da aynı yaklaşımlar

kullanılmaktadır. D_j değeri için de Hayes ve Kolaczowski'nin yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlar sayesinde katalitik konvertör içerisinde oluşan reaksiyonların hesaplamaları gerçekleştirilmektedir.

Katalitik reaksiyon modeli kütle geçişini içermektedir. Mills [8] katalitik konvertör hesabı ile ilgili modelleme ve örnek çözümlere yer vermektedir.

Bunun dışında daha pratik uygulamalara yönelik SAE dokümanları da literatürde mevcuttur. Bunlar özellikle egzoz imalatçıların yaptıkları AR-GE çalışmaları sonucu yayınladıkları yayınlardır.

Eberspächer şirketinden Braun ve Zacke ile Heidelberg Üniversitesinden Tischer ve Warnatz yaptıkları çalışmada 3 boyutlu bir sayısal analiz aracılığıyla egzoz gazı hız dağılımının katalitik reaksiyon üzerindeki etkisi üzerine eğilmektedirler [9]. Reaksiyon katsayısını saptarken de Depcik ve Assanis'in kullandığı yaklaşıma benzer bir yaklaşım kullanılmaktadır. Sonuç olarak da dönüştürülen CO miktarını kendi yaptıkları testler ve hesaplarla karşılaştırmakta ve korelasyonu ortaya çıkarmaktadırlar.

Ford şirketinden Otto ve LeGray de kurdukları matematiksel model aracılığıyla gerçekleşen kimyasal reaksiyonların verimini hesaplamaya çalışmaktadırlar [10]. Bu amaçla kurdukları modelin sonucunda elde ettikleri değerleri ölçüm değerleriyle karşılaştırıp modelin ne derece doğru sonuçlar verdiğini göstermektedirler.

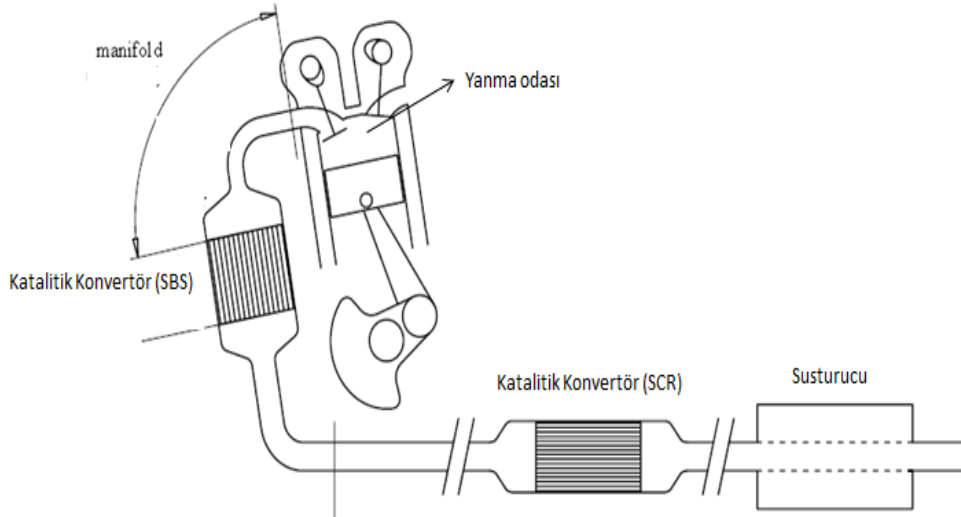
1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı egzoz katalitik konvertörü içerisinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonları karakterize ederek konvertör içerisinde ve yüzeyinde istenen herhangi bir noktada sıcaklık değerlerinin kolayca hesaplanmasını sağlayacak bir matematik model oluşturulmasıdır.

2. OTOMOBİL KATALİTİK KONVERTÖRÜ VE MATEMATİK FORMÜLASYON

2.1 Otomobil Katalitik Konvertör Sisteminin Tanıtılması

Otomobil katalitik konvertörü motorla susturucu arasında, genelde aracın altında bulunan bir parçadır. Ana görevi motordan çıkan ve insan sağlığına zararlı gazları dışarıdan ek bir enerji gereksinimi olmadan zararsız hale getirmektir. Bu çalışmada kullanılan egzoz sistemi şematik olarak Şekil 3.1’de gösterilmektedir [11].



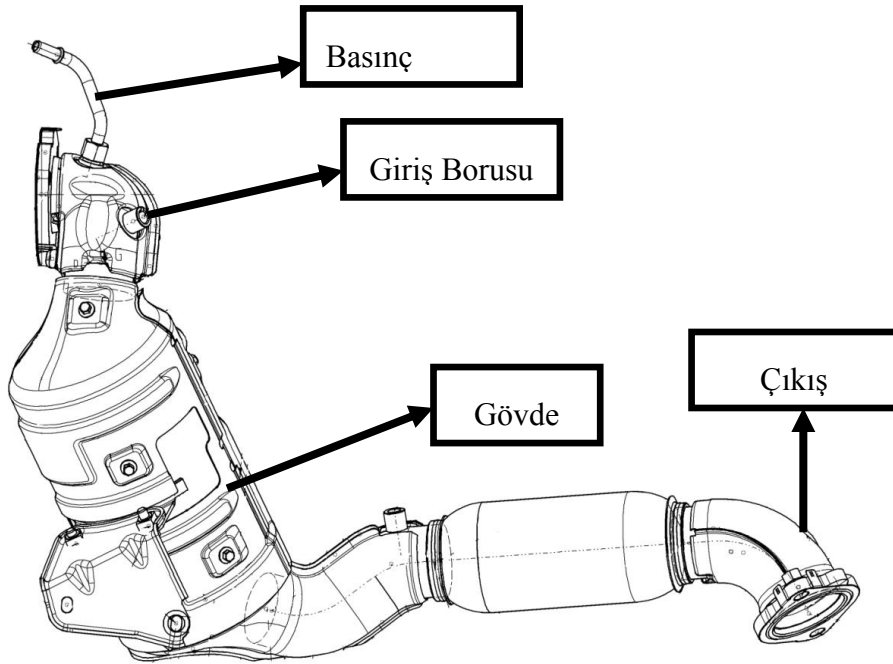
Şekil 2.1: Otomobil egzoz sistemi ana elemanları [11].

Egzoz sistemi silindir üzerindeki supap çıkışından kuyruk borusunun sonuna olan kısımdır. Bu sistem egzoz manifoldu, katalitik konvertör, bağlantı boruları ve sesi sönmölemeye yarayan susturucudan oluşmaktadır. Bu çalışmada egzoz sistemin katalitik konvertör ünitesi ele alınmakta ve bu ünite için kimyasal reaksiyon, ısı geçişi matematik modeli üzerinde çalışılmaktadır.

Katalitik konvertör birkaç bölümden oluşmaktadır. Bunlar basınç borusu, konvertör giriş borusu, tuğlanın bulunduğu gövde ve gazın katalitik konvertörden çıktığı çıkış borusudur. Şekil 2.2’de bu bölümler görölmektedir.

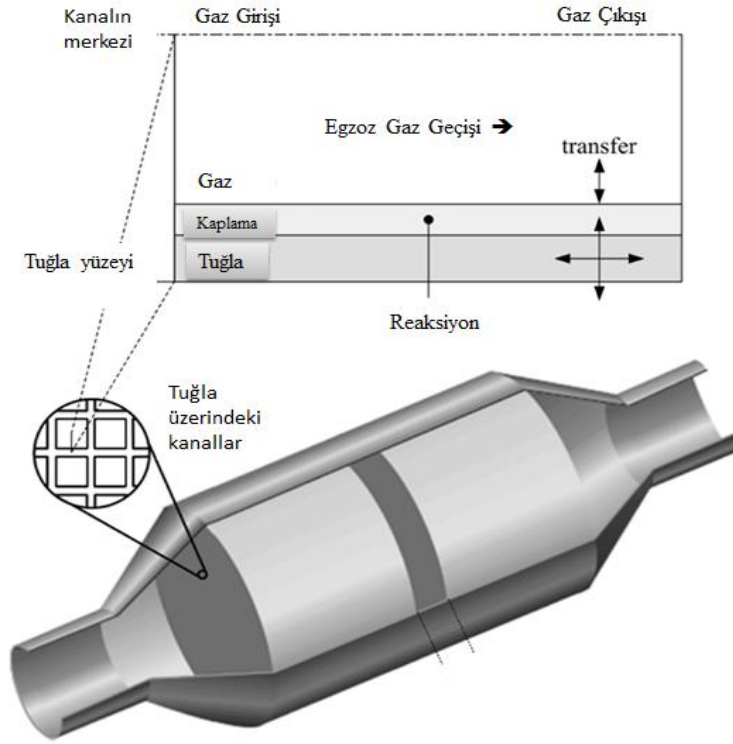
Basınç borusu motordan çıkan gazların katalitik konvertöre giriş basıncını ölçmek kullanılmaktadır. Bu borunun ucunda basınç sensörü bulunmaktadır. Katalitik konvertör geçen egzoz gazı zamanla konvertörü tıkamaktadır. Konvertörün tıkanmasıyla giriş basıncında artış meydana gelir. Giriş basıncı yükselerek belirli bir değere ulaştığında katalitik konvertörün üzerinde bulunan rejenerasyon sistemi çalıştırılır. Bu sayede seramik tuğla içinde birikmiş olan kurum tanecikleri yakılarak temizlenir.

Egzoz gazının motordan çıkıp katalitik konvertöre girdiği boruya giriş borusu denir. Katalitik konvertörde katalitik reaksiyonların gerçekleştiği tuğlanın bulunduğu bölüme ise gövde denir. Egzoz gazının katalitik konvertörü terk ettiği boru da çıkış borusudur. Bütün bu kısımlar Şekil 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2.2: Katalitik konvertör.

Katalitik konvertör içerisindeki tuğlanın yüzeyi reaksiyonun gerçekleşmesi için katalizör görevi gören değerli metaller (PGM, precious grade metal) ile kaplıdır. Bunlar Platinyum (Pt), Paladyum (Pd) ve Rodyum (Rd) metalleridir. Bu metaller gerekli miktarlarda yüzeye kaplanarak hedeflenen emisyon değerlerine erişilmesini sağlar. Katalitik konvertörün iç yapısının temsili resmi Şekil 2.3’de görülmektedir.

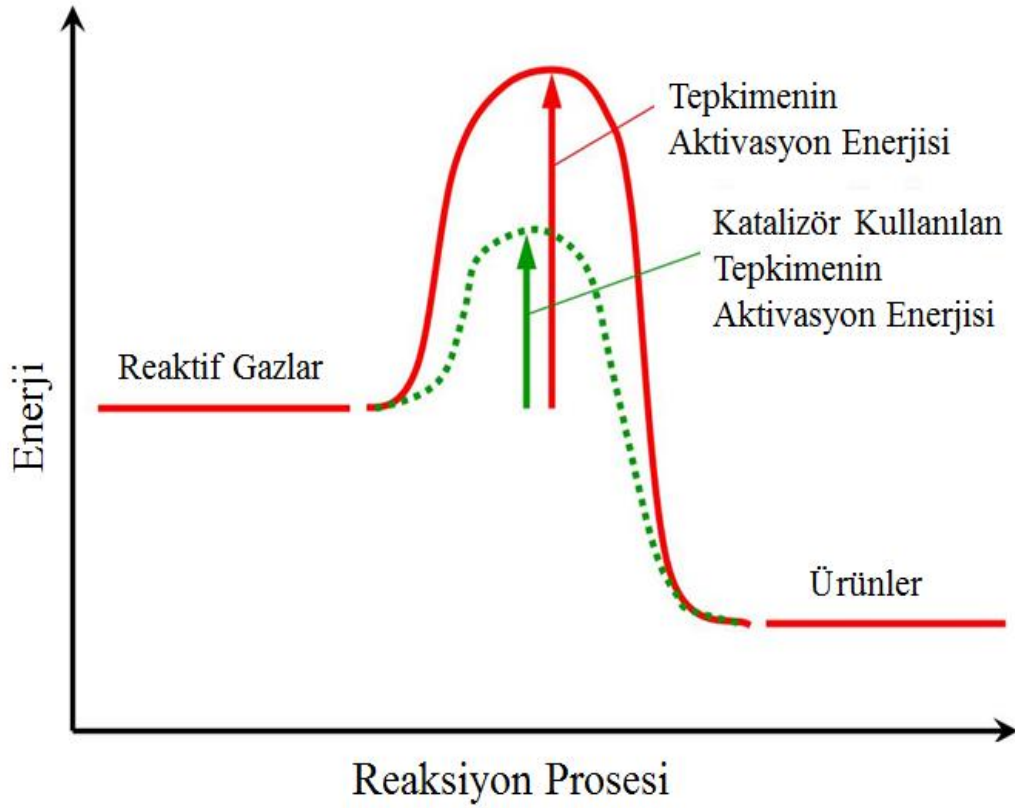


Şekil 2.3: Egzoz katalitik konvertör iç yüzeyi [13].

Katalitik reaksiyonların dışarıdan bir etki olmadan kendiliğinden oluşabilmesi için karışımın yeterli aktivasyon enerjisine ulaşması gerekmektedir. Motorda yanma odasında patlama sırasında bu aktivasyon enerjisine ulaşamayan gazlar tepkimeye giremez ve atık gaz olarak motordan çıkar. Zararlı egzoz emisyonlarını oluşturan ana etmenler de bu gazlardır.

Katalitik konvertördeki kimyasal reaksiyonların temeli Şekil 2.4'te de görüldüğü üzere yeterli aktivasyon enerjisine ulaşamamış ve tepkimeye girememiş gazların kimyasal tepkimeye girebilmesi için gerekli aktivasyon enerjisi seviyesinin azaltılması prensibine dayanmaktadır. Bu sayede dışarıdan ek bir enerji ihtiyacı olmadan gazların tepkimeye sokularak zararsız gazlar halinde araçtan atılması sağlanmaktadır.

Tuğlanın içerisinden geçen egzoz gazı tuğla yüzeyindeki değerli metallerle temas ettiği zaman ilgili gazın diğer gazlarla bileşik oluşturması için gerekli enerji miktarı katalizör etkisi ile azaltılmaktadır. Bu sayede, egzoz gaz karışımının iç enerjisi katalitik reaksiyonun başlaması için yeterli olmaktadır.



Şekil 2.4: Reaksiyon aktivasyon enerjisinin katalizör kullanımı ile değişimi [14].

Katalitik konvertör içerisinde bulunan tuğlanın iç yüzeyi yüzlerce kanala bölünmüştür. Bu sayede hem akışın laminar olması sağlanarak yüzeyle egzoz gazının temas etme süresi artırılmakta, hem de daha fazla miktarda egzoz gazının yüzeyle teması gerçekleşmektedir.

2.2 Otomotiv Sektöründeki Düzenlemeler

Otomobil egzoz emisyonlarının azaltılması için çalışmalar ilk olarak Amerika Birleşik Devleti'nde yapılmaya başlanmıştır. Otomobillerin motor hacimlerinin ve gücünün artmaya başlaması ve yollardaki otomobil sayısının artması ile çeşitli sağlık otoriteleri ve özellikle şehirlerde yaşayan insanlar otomobillerden salınan egzoz gazlarından rahatsız olmaya başlamış ve bu yönde yasal düzenlemeler yapmak üzere hükümeti harekete geçirmişlerdir.

Özellikle 1950'li yıllarda başlayan bu düzenlemelere uymak amacıyla dönemin büyük otomobil firmaları olan GM, Ford, Chrysler gibi firmalar çeşitli teknolojiler geliştirme gayreti içine girmiştir. Bu yolda geliştirilen teknolojilerin çoğu genel

olarak motor verimini artırmak veya motordan çıkan gazların tekrar motora verilerek tekrar kimyasal tepkimeye girmesini sağlamak yönündedir.

1975 yılına gelindiğinde yasal düzenlemeler oldukça keskin bir şekilde değiştirilmiş ve otomobil üreticilerinden emisyon seviyelerinin yarı yarıya azaltılması talep edilmiştir. Yapılan değişiklikle HC emisyon değerinin 3 mg/mil değerinden 1,5 g/mil değerine, CO değerinin de 28 g/mil'den 15 g/mil [9] değerine inmesi istenmiştir. Bu zamana kadar kullanılan teknolojilerin yüksek emisyon seviyelerini yakalamaya yeterli olmayacağını gören otomobil üreticileri 1950 yılından beri çalışılan ancak henüz seri üretimde kullanılmamış bir teknoloji olan katalitik konvertör teknolojisine daha yakından eğilme kararı almıştır.

Katalitik konvertörler diğer emisyon azaltma sistemlerine göre oldukça avantajlıdır. Motorun yanma sürecine etkileri oldukça azdır, dışarıdan enerji girişine ve hareketli parçalara ihtiyacı yoktur. Motordan çıkan gazları dışarı veren egzoz manifoldundan sonra bulunan katalitik konvertörler bu sağlığa ve çevreye zararlı gazların tekrar yanma tepkimesine sokularak zararsız gazlara dönüşmesini sağlamaktadır. Tek dezavantajları motora bir karşı basınç uygulamaları ve aracın alt kısmında yer kaplamalarıdır. Tabi bunun yanı sıra katalitik konvertör içerisindeki tuğlanın üzerine kaplanan pahalı metaller de maliyet anlamında önemli bir dezavantajdır.

Katalitik konvertörler üzerinde ilk olarak çalışan otomobil üreticilerinden birisi GM firmasıdır. İlk olarak 1959 yılında geliştirdikleri katalitik konvertörü duyurmuştur. Boyutları günümüzdeki katalitik konvertöre göre oldukça büyük olan bu tasarım ilk başta HC ve CO emisyonlarını %70 oranında düşürmeyi başarmıştır. Daha sonra 5000 millik bir test yapılarak bu konvertör denenmiş ve testin sonunda konvertörün egzoz gaz emisyonlarını %30 verimle düşürmekte olduğu görülmüştür. Ayrıca konvertörün içerisinde çok yüksek sıcaklıklar meydana gelmekte bu da araca ve konvertöre zarar vermektedir. Bu nedenle bu tasarım daha fazla geliştirilmek üzere kullanıma sokulmamıştır.

1975 yılına kadar katalitik konvertör takılmadan otomobiller emisyon gerekliliklerini sağlayabildikleri için bu süreçte katalitik konvertörlerin geliştirilmesine devam edilmiş ancak katalitik konvertörler kullanılmamıştır. 1975 yılından itibaren ise bütün otomobil üreticileri yasal zorunlulukları yerine getirebilmek için katalitik konvertör

kullanmaya başlamışlardır. Bu yıldan sonra katalitik konvertörlerde teknolojik gelişmeler çok daha hızlı bir oranda artmaya başlamıştır.

Katalitik konvertörler temel olarak içerisindeki değerli metaller, değerli metalleri taşıyan tuğla ve tuğlanın etrafını saran metal sac kısımdan oluşmaktadırlar. Bu 3 ana parça da üzerinde oldukça fazla çalışılan ve hem kimya hem de ağır sanayi üreticilerini oldukça fazla ilgilendiren parçalardır.

Katalitik konvertörün içerisinde kullanılan değerli metaller oldukça pahalı metallerdir ve 1g bile azaltılması sistemi gözle görülür şekilde ucuzlatmaktadır. Bu nedenle hem bu metallerin olabilecek en düşük toleransla kaplanması hem de kaplandıkları malzemenin (tuğlanın) özellikleri kimya şirketleri için oldukça geniş bir çalışma alanıdır.

Kaplanan tuğlaların aracın altında uzun yıllar zarar görmeden, fonksiyonunu kaybetmeden ve müşteriye rahatsızlık vermeden kalabilmesi için yan sanayi üreticilerine oldukça büyük bir sorumluluk düşmektedir. Bu kıstaslara uyacak yönde kalıp ve parça üretimi yapılması ve hurda miktarının olabilecek en az düzeye indirilmesi gerekmektedir.

Günümüzde emisyon değerleri Eu6 emisyon sistemi ile oldukça azaltılmış ve katalitik konvertör teknolojisi de oldukça fazla ilerleme kaydetmiştir. Bugün egzoz sisteminden çıkan zararlı gazların büyük bir kısmı zararsız hale dönüştürülebilmekte ve katalitik konvertörler uzun yıllar aracın üzerinde görevini yerine getirebilmektedir.

Günümüzde otomobil katalitik konvertör sistemi için uyulması gereken kısıtlar Çizelge 2.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 2.1: Avrupa’da egzoz emisyon seviyelerinin yıllara göre değişimi[15].

	Zaman	CO		HC		NOx		HC+NOx		PM	
		Dizel	Benzin	Dizel	Benzin	Dizel	Benzin	Dizel	Benzin	Dizel	Benzin
Euro1	1994	5.17	5.17	-	-	-	-	1.40	1.40	0.19	-
Euro2	1998	1.25	4.00	-	-	-	-	1.00	0.65	0.12	-
Euro3	2001	0.80	4.17	-	0.25	0.650	0.180	0.720	-	0.07	-
Euro4	2006	0.63	1.81	-	0.13	0.330	0.100	0.390	-	0.04	-
Euro5	2010	0.63	1.81	-	0.13	0.235	0.075	0.295	-	0.005	0.005
Euro6	2015	0.63	1.81	-	0.13	0.105	0.075	0.195	-	0.005	0.005

İleride CO₂ gazının da miktarının azaltılması ve diğer zararlı gazların emisyon değerlerin daha da aşağıya çekilmesi planlanmaktadır.

2.3 Matematik Formülasyon

Katalitik konvertör içerisinde gaz, tuğlanın deliklerinden geçerken katalizör madde ile kaplı yüzey ile temas eder. Egzoz gazının içerisindeki reaktif bileşenler (CO, H_xC_x vb.) bu esnada reaksiyona girer ve yüzeyde kütle geçişi meydana gelir. Tuğla kanalı içinden geçen egzoz gazlarının kanal içindeki akışı, ısı ve kütle geçişi en genelde üç boyutludur. Bununla birlikte gaz debisi, gaz derişikliği, motor devir sayısı, araca binen yüke de bağılı olarak periyodik olarak değişmektedir. Diğer taraftan araç hızının değişmesi de katalitik konvertördeki ısı geçişini etkilemektedir. Katalitik konvertörün bütün parametrelerin de gözönüne alındığı üç boyutlu tam bir matematik modelini kurmak mümkün olsa da ortaya çıkacak diferansiyel denklemlerin, reaksiyon denklemleri ile birlikte çözümü çok zordur. Literatürde bazı kabuller altında iki ve üç boyutlu çözümler yapılmıştır.

Bu çalışmada iki boyutlu, basit ve kullanımı kolay bir matematik modelleme hedeflenmektedir. Bu açıdan modelleme çalışmasında yapılan bazı temel kabuller aşağıda belirtilmektedir.

Genel kabuller

Egzoz gaz debisi zamanla değişmemektedir. Gerçekte periyodik olarak değişen debinin ortalaması alınarak sürekli akan bir egzoz debisi olduğu kabul edilmektedir.

Egzoz gazları içinde zararlı olan konvertörde reaksiyona girmesi istenen gazlar genellikle CO, HC ve NO_x olup ayrıca kurum parçacıklarıdır. Bu gazlar egzoz girişinde ölçülmektedir. Modelde ise bu gazların tamamının CO olduğu ve karışım içinde kurum olmadığı kabul edilmektedir.

Bu kabuller dışında yapılan diğer kabuller yeri geldikçe belirtilmektedir.

2.3.1 Katalitik reaksiyonlar ve kütle geçişi

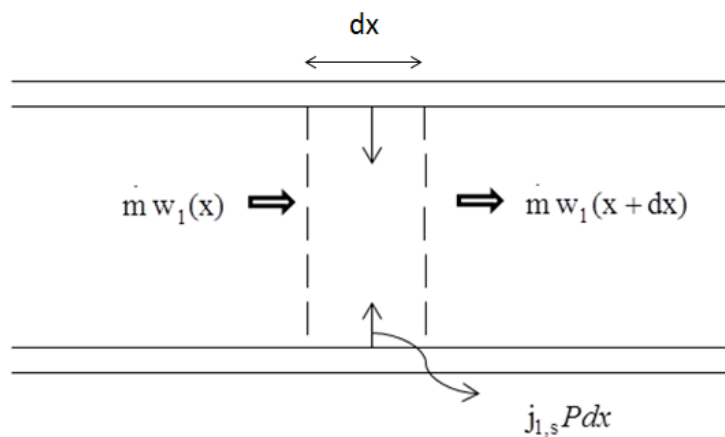
Şekil 2.3'de görüldüğü gibi seramik tuğla kanallarının kesiti karedir. Genellikle kesit ölçüleri 1x1 mm civarındadır. Bu çalışmada göz önüne alınan konvertördeki kanal sayısı 6370 adettir. Tuğlanın kesit görünüşü üzerinde bir deliğin bulunduğu

gözenekli bir yapıyı andırmaktadır. Egzoz gazı bu kanallara dağılarak akarken kanal yüzeyine kaplı değerli metaller sayesinde aktivasyon enerjisi düştüğü için kendi kendine yüzeyde oksijenle reaksiyona girmektedir. Bu O_2 miktarı egzoz gazları içinde hava fazlalık katsayısı sebebiyle zaten mevcuttur. Katı akışkan arayüzeyinde CO gazının CO_2 gazına dönüşmesi gerçekleşir. Bu sayede CO_2 gazı yüzeyden egzoz gazına ve CO ile O_2 gazları da egzoz gazından yüzeye doğru kütleli olarak (difüzyon ve taşınım) hareket etmeye başlar. Kütle geçişinde üçlü ve daha fazla karışanlı olarak kurulan modellerin çözümlemeleri çok zordur. Bu sebeple katalitik tepkime ve kütle geçişi için bazı kabuller yapmak gerekmektedir. Bunlar ;

- Gaz karışımı CO ve diğer gazlar olarak gözönüne alınabilir.
- Yüzeyde tepkime sebebiyle CO miktarının azalması karışım içinde CO gazının yüzeye doğru hareket etmesine sebep olmaktadır.
- Kanal içinde akış ve kütle geçişi tam gelişmiştir. Giriş etkileri ihmal edilebilir.
- Kanal kesitinde CO derişikliğinin ortalama değeri alınarak formülasyon yapılabilir. Diğer bir deyişle kesit boyunca CO değışimi ihmal edilebilir.

Tek bir kanaldaki kütle geçişinin kesit boyunca ortalama (lumped) formülasyonu için Şekil 2.5’de görülen dx diferansiyel uzunluğundaki $A dx$ hacmi kontrol hacmi olarak seçilebilir.

$A dx$ hacmi için CO kütlesinin korunumu:



Şekil 2.5: Katalitik konvertör içerisinde 1 kanalda kütle korunumu.

$$\dot{m}(w_1 + \frac{dw_1}{dx} dx) - \dot{m}w_1 - j_{1,s}pdx = 0 \quad (2.1)$$

Burada w_1 CO'nun kütle derişikliği olup CO kütlesinin toplam karışım kütlesine oranıdır (veya CO yoğunluğunun karışımın ortalama yoğunluğuna oranı). $j_{1,s}$ yüzeydeki taşınım ile birim zamanda birim alandan geçen geçen kütle akısı ve p kanalın çevre uzunluğudur. Yüzeydeki kütle geçişı

$$j_{1,s} = g_{m1}(w_{1,s} - w_1) \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada g_{m1} CO'nun yüzeyle kesitteki ortalama CO derişikliği arasındaki kütle geçiş katsayısıdır. $w_{1,s}$ katı-gaz arayüzeyindeki CO derişikliği ve w_1 ise Adx hacmi içindeki ortalama CO derişikliğidir. Bu kütle akısı aynı zamanda yüzeyde katalitik tepkime ile birim zamanda birim alanda oluşan ve Denklem (2.3) ile gösterilen CO kütlesine eşittir.

$$j_{1,s} = -k''(\rho_{1,s})^n = -k''(\rho''_{1,s})^n \quad (2.3)$$

Burada $\rho_{1,s}$ yüzeydeki CO yoğunluğudur. ρ ise karışımın ortalama yoğunluğudur. k'' ise

$$k'' = A \exp \left(\frac{-E_a}{RT} \right) \quad (2.4)$$

şeklinde verilen Arrhenius bağıntısıdır. Burada E_a aktivasyon enerjisi, n reaksiyon mertebesi ve A 'da Arrhenius katsayısıdır. Reaksiyon mertebesi n 1 olarak kabul edilir çünkü reaksiyon oksijen zengin bir ortamda gerçekleşmektedir. CO gazının yanması için gerekli oksijen gazı ortamda doğrudan mevcuttur [8].

Denklem (2.1) ve Denklem (2.2)'den

$$\frac{dw_1}{dx} - \frac{p}{\dot{m}} g_{m1}(w_{1,s} - w_1) = 0 \quad (2.5)$$

şeklinde w_1 'e bağlı birinci mertebe diferansiyel denklem elde edilir.

Denklem 2.2 ve Denklem 2.3 kullanılarak elde edilen

$$w_{1,s} = \frac{g_{m1} w_1}{g_{m1} + k'' \rho} \quad (2.6)$$

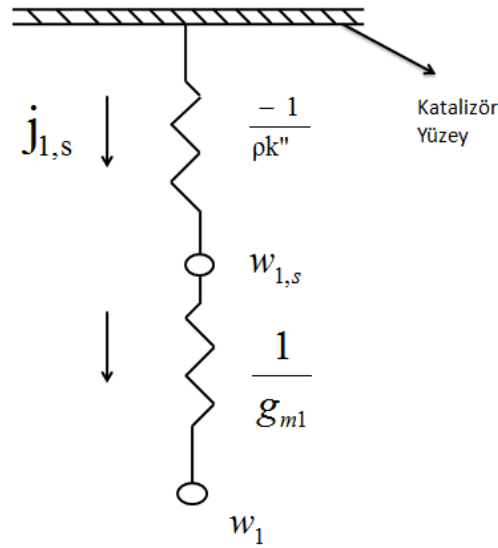
ifadesi denklem 2.5'de yerine yazılır ve düzenlenirse yalnız w_1 değişkenine bağlı

$$\frac{dw_1}{dx} + \frac{p}{\dot{m}} G w_1 = 0 \quad (2.7)$$

diferansiyel denklemi elde edilir. Burada

$$G = \frac{1}{\rho_g k''} + \frac{1}{g_{m1}} \quad (2.8)$$

Kütle geçişi kanal içindeki akışta ısı geçişine benzetilerek aşağıda görülen sembolik direnç devresi ile ifade edilebilir.



Şekil 2.6: Katalizör yüzeyden egzoz gazına kütle geçiş adımları.

Burada ilk direnç reaksiyon sebebiyle yüzeyde oluşan direnci, ikincisi ise yüzeyle karışımın ortalama derişikliği arasındaki direnci göstermektedir.

Denklem 2.7 için bir adet sınır şartına ihtiyaç vardır. Bu sınır şartı için girişteki CO derişikliğinin bilindiği gözönüne alınarak

$$w_1(0) = w_{1,i} \quad (2.9)$$

Denklem (2.7)'nin denklem (2.9) sınır şartı altında çözümünden

$$w_1(x) = w_{1,i} \exp\left(-\frac{pG}{\dot{m}}x\right) \quad (2.10)$$

kolayca elde edilir. Bu denklem bir adet kanaldaki ortalama CO derişikliğinin akış eksenini boyunca değişimini göstermektedir. Kanal çıkışındaki CO derişikliği ise bu denklemde $x=L$ yazılarak

$$w_1(L) = w_{1,0} = w_{1,i} \exp\left(-\frac{pG}{\dot{m}}L\right) \quad (2.11)$$

elde edilir. Bu çözümün kullanılabilmesi için Denklem (2.8)'de geçen reaksiyon katsayısı ve kütle geçiş katsayısının bilinmesi gereklidir.

Reaksiyon katsayısı Denklem (2.4)'den hesaplanabilir ancak bu hesaplamada aktivasyon enerjilerinde ihtiyaç olduğundan kullanımı pratik değildir. Aktivasyon enerjisi her sıcaklığa, gazın çeşidine ve tuğla kanallarındaki kaplamanın cinsine bağlı olarak değiştiği için Depcik ve Assanis tarafından önerilen[7] aşağıdaki denklem kullanılmıştır:

$$k'' = \frac{Sh_{\infty} D_j}{d_m} \quad (2.12)$$

Burada Sh_{∞} sayısı akışın kanala giriş kısmındaki etkileri ihmal edildiği için Sh sayısına eşit kabul edilmektedir. Sh_{∞} sayısının bulunması için Depcik ve Assanis yüzeyde sabit ısı akısı durumdan aşağıdaki denklemi ortaya çıkarmıştır.

$$Sh_{\infty} = \frac{g_{m1} d_h}{\rho D_{1,m}} = 3,655 + 6,874 \left(\frac{4x}{d_m \text{ Re Pr}} \right)^{-0,488} \exp \left[-0,0572 \left(\frac{4x}{d_m \text{ Re Pr}} \right) \right] \quad (2.13)$$

Ayrıca kütle geçiş katsayısı için Hayes ve Kolaczowski'nin yaptığı çalışmada ortaya atılan difüzyon katsayısı terimi kullanılmaktadır:

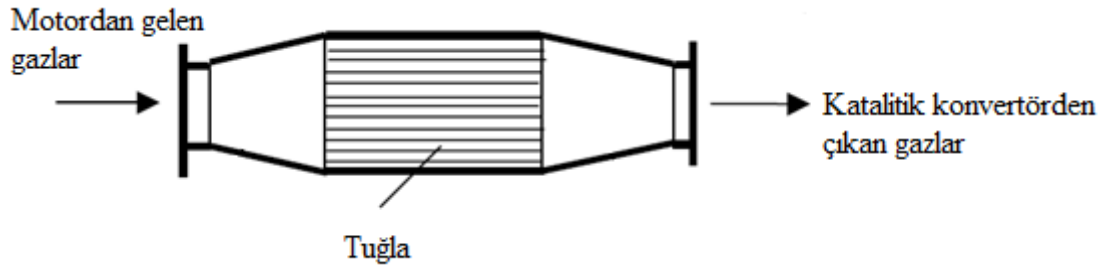
$$D_j = D_{CO} = 9,263510^{-5} \frac{T^{1,75}}{P} \quad (2.14)$$

2.4 Katalitik Reaksiyon Sonucu Isı Üretimi

Katalitik konvertörde üretilen ısı miktarı $CO \rightarrow CO_2$ tepkimesinde tepkimeye giren CO miktarı ile birim kütlenin tepkime entalpisi çarpılarak bulunur.

Reaksiyon sırasında entalpi değişimi

Katalitik konvertörde tepkimenin gerçekleştiği bölge Şekil 2.7’de gösterilmektedir.



Şekil 2.7: Katalitik konvertöre gaz giriş-çıkışı.



Denklem 2.15’te gösterilen birim kütledeki CO gazının yanma reaksiyonu sonucu CO_2 gazına dönüşmesi sırasında ortaya çıkan ısı miktarı denklem aşağıda gösterilen şekilde hesaplanmaktadır:

$$\sum H_{CO_2} - \sum H_{CO} = (h_f + h_{T_0} - h_{298}) - (h_f + h_{T_i} - h_{298}) \quad (2.16)$$

Katalitik reaksiyon sonucu toplam üretilen ısı miktarı

Toplam Üretilen Isı = Birim zamanda üretilen kütle miktarı x birim kütlede üretilen ısı miktarı hesaplaması sonucu bulunmaktadır.

$$Q_{\text{üretilen}} = (w_{1,i} - w_{1,o}) \dot{m} h_{CO} \quad (2.17)$$

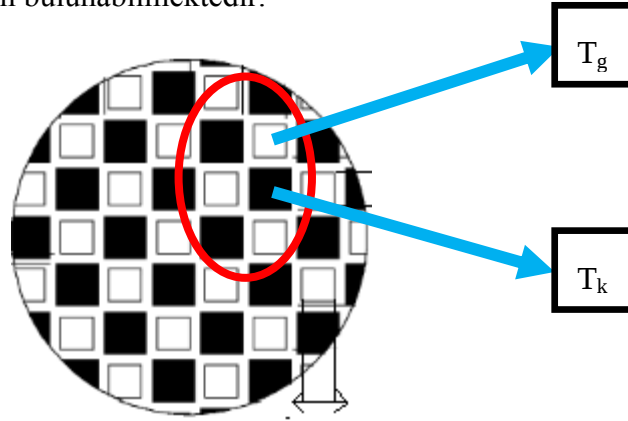
2.5 Katalitik Konvertörde Gözenekli Ortam Modeli

Gözenekli ortamlar günlük hayatta sıkça karşılaştığımız odun, kireçtaşı, akciğer, ekmek gibi cisimlerin iç kısmında görülen yapıya verilen isimdir. Bir ortamın gözenekli ortam olarak adlandırılması için;

- Katı matris olarak adlandırılan sürekli bir faz bulundurması
- Katı olmayan kısımların akışkan faz tarafından doldurulması
- Katı ve boşluğun ortamın her tarafına yayılı olması

gerekmektedir. Bu özelliklerden de çıkarılabileceği gibi gözenekli ortama sahip cisimler aynı zamanda çok fazlı maddesel cisim olarak da adlandırılmaktadır.

Gözenekli ortamda, çözüm yapılırken ortamın her noktasında olabilecek temsili bir hacim seçilerek içindeki fiziksel büyüklüklerin bu hacme göre ortalamaları alınmakta ve gözenekli ortamın tamamında benzer şekilde ortalama değerler hesaplanarak ortam tek bir fazdan oluşuyormuş gibi değerlendirilmektedir. Buna aynı zamanda gözenekli ortamın süreklilik modeli de denmektedir. Bu model yardımıyla çok küçük ölçekte (gözeneklerin içerisinde) gerçekleşen olaylara dair hesaplamalar yapılamamakla birlikte sistemin tamamının karakteristiğine dair veriler fazla karmaşık olmayan bir yoldan bulunabilmektedir.



Şekil 2.8: Gözenekli ortamın temsili görünümü.

Gözenekli ortamda yukarıda belirtildiği gibi tüm fiziksel özellikler tek bir faz varmış gibi kabul edilerek kullanılır.

Bizim incelediğimiz katalitik konvertörde Şekil 2.8’de görüldüğü gibi bir gözenekli yapı mevcuttur. 1 mm kenar uzunluğuna sahip kare prizma şeklindeki delikler tuğlanın içerisinde petek cinsi bir yapı oluşturmaktadırlar. Burada T_g ve T_k gaz ve katı fazın sıcaklıklarını temsil etmektedir.

Süreklilik denklemi, momentum denklemi ve enerjinin korunumu denklemlerinin temsili birim hacim (REV=Representative Elementary Volume) ortalamaları alınarak gözenekli ortama ait genel korunum denklemleri elde edilmektedir [18, 20]. Gözenekli ortamın katı matrisi ve akışkan fazı için ayrı ayrı ortalama denklemler kullanılan modeller iki denklemlilik gözenekli ortam modeli yanında, katı ve akışkan fazının bir arada göz önüne alındığı tek denklemlilik gözenekli ortam modelleri de mevcuttur. Bu çalışmada katalitik konvertör için tek denklemlilik gözenekli ortam modeli ele alınmaktadır. Bu modelin genel korunum denklemleri aşağıda verilmektedir [19, 20].

$$\frac{\partial \langle \rho_g \rangle}{\partial t} + \nabla \cdot \langle \rho_g \mathbf{v} \rangle = 0 \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle \rho_g \mathbf{v} \rangle}{\partial t} + \nabla \cdot \langle \rho_g \mathbf{w} \rangle = & -\nabla \langle P \rangle + \mu_g \nabla^2 \langle \mathbf{v} \rangle + \langle \rho_g \mathbf{b}_f \rangle \\ & - \frac{\mu_g \varepsilon}{K} \langle \mathbf{v} \rangle - \frac{F}{\sqrt{\varepsilon K}} |\langle \mathbf{v} \rangle| \langle \mathbf{v} \rangle \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$\rho_o c_o \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial t} + \rho_g c_g \nabla \cdot \langle T \mathbf{v} \rangle = \nabla \cdot (k_e + k_d) \nabla \langle T \rangle + u''' \quad (2.20)$$

Akışkan sıkıştırılmaz olduğunda

$$\nabla \cdot \langle \mathbf{v} \rangle = 0 \quad (2.21)$$

ve sürekli rejim hali için yukarıdaki denklemler (hacim kuvvetleri hariç)

$$\rho_g \langle \mathbf{v} \rangle \cdot \nabla \cdot \langle \mathbf{v} \rangle = -\nabla \cdot \langle P \rangle + \mu_g \nabla^2 \langle \mathbf{v} \rangle - \frac{\mu_g \varepsilon}{K} \langle \mathbf{v} \rangle - \frac{F}{\sqrt{\varepsilon K}} |\langle \mathbf{v} \rangle| \langle \mathbf{v} \rangle \quad (2.22)$$

$$\rho_g c_g \langle \mathbf{v} \rangle \cdot \nabla \langle T \rangle = \nabla \cdot (k_e + k_d) \nabla \langle T \rangle + u''' \quad (2.23)$$

elde edilir. Burada k_e efektif ısı iletim katsayısı iken k_d gözenekli ortamın dispersiyon katsayısıdır. $\varepsilon = V_g / V_{TBH}$ şeklinde tanımlanan ortamın gözenekliliğidir.

Katalitik konvertörün gözenekli ortam olarak kabul edilen seramik tuğlası silindirik yapıdadır. Eksenel olarak simetrik ve hidrodinamik ve ısıl olarak tam gelişmiş olduğu kabul edildiğinde akış tek boyutlu olmaktadır. Yani hız vektörünün yalnız akış doğrultusundaki bileşeni mevcuttur. Bu bileşen yalnız radyal doğrultunun fonksiyonudur. Bu durumda momentum denklemi

$$0 = -\frac{d \langle P \rangle}{dz} + \mu_g \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \langle v \rangle}{\partial r} \right) - \frac{\mu_g \varepsilon}{K} \langle v \rangle - \frac{F}{\sqrt{\varepsilon K}} |\langle v \rangle| \langle v \rangle \quad (2.24)$$

Tuğla birçok kare kanaldan meydana geldiği için şekil sürüklenmesi söz konusu değildir. Duvarların sürtünme etkisi de geçirgenlik terimi yanında çok küçüktür. Bu sebeple gözenekli ortam içindeki momentum denklemi

$$0 = -\frac{d \langle P \rangle}{dz} - \frac{\mu_g \varepsilon}{K} \langle v \rangle \quad (2.25)$$

şeklinde göz önüne alınabilir. Bu durumda ortalama hız

$$\langle v \rangle = -\frac{K}{\mu_g \varepsilon} \frac{d \langle P \rangle}{dz} \quad (2.26)$$

Bu ortalama hız Darcy hızı olarak da bilinir.

Enerji denkleminde görülen k_d dispersiyon iletim katsayısı karmaşık gözenekli ortamlardaki tortusiteden (eğri-büğürlük) kaynaklanmaktadır. Katalitik konvertör

mikro kanalları ise düzgün kare kanal şeklinde olduklarından bu terimin etkisi ihmal edilebilir. Bu durumda enerji denklemi

$$\rho_g c_g \langle v \rangle \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k_e \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial r} \right) + u''' \quad (2.27)$$

şekline dönüşür.

Tam gelişmiş akış için denklem 2.26'da verilen hız sabittir. Bu değer kesitteki ortalama hızı göstermekte olup kütle debisi bu hıza göre

$$\dot{m} = \rho_g A v \quad (2.28)$$

Burada ortalamaları gösteren tırnak işareti kaldırılmıştır. Bu durumda enerji denklemi de efektif ısı iletim katsayısı sabit kabul edilerek

$$\frac{\rho_g c_g}{k_e} v \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{u'''}{k_e} \quad (2.29)$$

yazılır. Sınır şartları ise

$$\frac{\partial T(0, z)}{\partial r} = 0 \quad (2.30)$$

$$-k_e \frac{\partial T(R_o, z)}{\partial r} = h[T(R_o, z) - T_\infty] \quad (2.31)$$

$$T(r, 0) = T_{mi} \quad (2.32)$$

$\theta(r, z) = T(r, z) - T_\infty$ dönüşümü ile

$$\frac{\rho_g c_g}{k_e} v \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{u'''}{k_e} \quad (2.33)$$

yazılır. Sınır şartları ise

$$\frac{\partial \theta(0, z)}{\partial r} = 0 \quad (2.34)$$

$$-k_e \frac{\partial \theta(R_o, z)}{\partial r} = h \theta(R_o, z) \quad (2.35)$$

$$\theta(r, 0) = T(r, 0) - T_\infty = T_{mi} - T_\infty = \theta_{mi} \quad (2.36)$$

olur.

2.33 denkleminin analitik çözümü mümkündür. Radyal doğrultuda karakteristik değer problemine dönüştürülerek denklem değişkenlere ayırma yöntemi ile çözülebilir. Radyal doğrultudaki iki adet sınır şartı homojen iken 2.33 denklemi ise homojen değildir. Bu sıkıntı

$$\theta(r, 0) = \psi(r, z) + \varphi(r) \quad (2.37)$$

şeklinde süperpozisyonla giderilebilir. Bu durumda diferansiyel denklem iki farklı çözümün süperpozisyonu olarak yazılabilir. Bunlardan ilki

$$\frac{\rho_g c_g}{k_e} v \frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) \quad (2.38)$$

şeklinde yazılır. Sınır şartları ise

$$\dot{m}(w_1 + \frac{dw_1}{dx} dx) - \dot{m}w_1 - j_{1,s} p dx = 0 \quad (2.39)$$

$$\frac{\partial \psi(0, z)}{\partial r} = 0 \quad (2.40)$$

$$-k_e \frac{\partial \psi(R_o, z)}{\partial r} = h \psi(R_o, z) \quad (2.41)$$

$$\psi(r, 0) + \varphi(r) = \theta_{mi} \quad (2.42)$$

Ve ikincisi

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\varphi}{dr} \right) + \frac{u'''}{k_e} = 0 \quad (2.43)$$

şeklinde yazılır. Sınır şartları ise

$$\frac{d\varphi(0)}{dr} = 0 \quad (2.44)$$

$$-k_e \frac{d\varphi(R_o)}{dr} = h\varphi(R_o) \quad (2.45)$$

olmaktadır. Denklem 2.38 deki ψ çözümü

$$\psi = Z(z)R(r) \quad (2.46)$$

şeklinde aranırsa Denklem 2.38

$$\frac{v}{\alpha Z} \frac{dZ}{dz} = \frac{1}{rR} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dR}{dr} \right) = -\lambda^2 \quad (2.47)$$

halini alır. Burada

$$\alpha = \frac{k_e}{\rho_g c_g} \quad (2.48)$$

olur.

Bunun sağ ve sol tarafındaki terimler yalnız z ve yalnız r 'nin fonksiyonları olduğu için eşitlik ancak bir sabite eşit olması durumunda sağlanır. Burada radyal doğrultuda karakteristik değer problemine dönüştürebilmek için bu sabit $-\lambda^2$ olarak seçilmelidir. Böylece 2.47 denklemi

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dR}{dr} \right) + \lambda^2 r R_0 = 0 \quad (2.49)$$

ve

$$\frac{dZ}{dz} + \frac{\alpha \lambda^2}{\nu} Z = 0 \quad (2.50)$$

halini alır.

Bulunan diferansiyel denklem aşağıdaki Arpacının conduction heat transfer [17] kitabındaki Tablo 3-1(sayfa 138)yardımıyla aşağıdaki şekilde çözülür: Tablo 3.1'e göre

$$\beta = 1, \alpha = 1, \gamma = \lambda^2, \gamma = \pm \lambda \text{ ve}$$

$$\nu = \frac{1-\alpha}{\beta-\alpha+2} = 0, \beta-\alpha+2 = 2 \neq 0$$

$$\mu = \frac{2}{\beta-\alpha+2} = 1, \frac{\nu}{\mu} = \frac{1-\alpha}{2} = 0$$

olup diferansiyel denklemin çözümü

$$R(r) = C_1 J_0(\lambda r) + C_2 Y_0(\lambda r) \quad (2.51)$$

olarak elde edilir. Burada J_0 ve Y_0 birinci ve ikinci tür Bessel fonksiyonlarıdır.

Denklem 2.41'le gösterilen sınır şartından

$$\frac{dR(0)}{dr} = 0 \quad (2.52)$$

olacağı için 2.41'in türevi

$$R'(r) = -C_1 \lambda J_1(\lambda r) - C_2 \lambda Y_1(\lambda r) \quad (2.53)$$

ifadesinin 2.51'i sağlaması için C_2 'nin sıfıra eşit olması gerekir. $Y_1(x)$ değişimi yine arpacı sayfa 143'de görüldüğü gibi $Y_1(0)$ 'da fonksiyon $-\infty$ 'a gitmektedir. Bu durumda R 'nin çözümü

$$R(r) = C_1 J_0(\lambda r) \quad (2.54)$$

şeklinde olmaktadır.

Şimdi 2.41 denklemiyle verilen sınır şartı kullanılırsa

$$-k_e \frac{dR(R_o)}{dr} = hR(R_o) \quad (2.55)$$

olup buradan

$$k_e C_1 \lambda J_1(\lambda R_o) = h C_1 J_o(\lambda R_o) \quad (2.56)$$

bulunur. Buradan elde edilen

$$J_1(\lambda R_o) = \frac{h}{k_e \lambda} J_o(\lambda R_o) \quad (2.57)$$

ifadesinden λ_n karakteristik değerleri elde edilir.

Burada λ serisinin kökleri Bessel fonksiyonlarının grafiği yardımıyla bulunur.

Burada köklerin bulunması sırasında kullanılan alt eşitlikler aşağıda gösterilmektedir.

Öncelikle J_1 ve J_o Bessel fonksiyonlarının değişkenini tek bir sayı ile göstermek için λR_o değeri yerine x değeri kullanılır.

Bu durumda $\lambda = \frac{x}{R_o}$ olur ve 2.58 denklemini

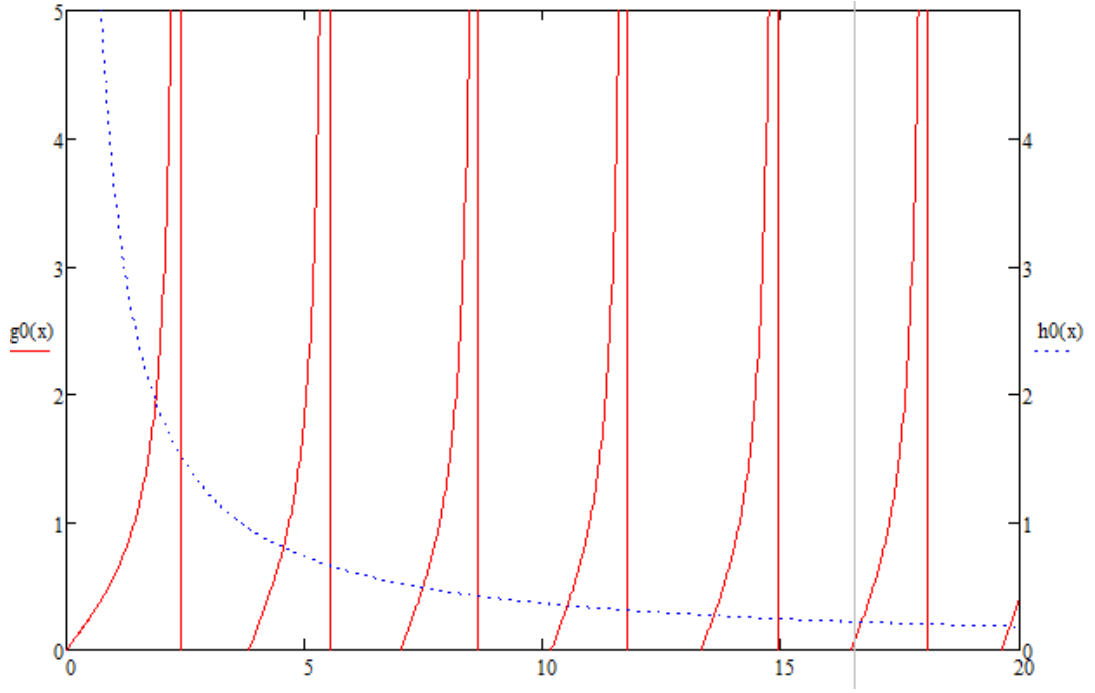
$$J_1(x) = \frac{h R_o}{k_e x} J_o(x) \quad (2.58)$$

ve grafik üzerinde göstermek için alt denklemler

$$g_0(x) = \frac{J_1(x)}{J_o(x)} \quad (2.59)$$

$$h_0(x) = h \frac{R_o}{k_e x} \quad (2.60)$$

olmaktadır. 2.59 ve 2.60 numaralı denklemler kullanılarak Şekil 2.9'daki grafik çizilmektedir.



Şekil 2.9: Bessel fonksiyonlarının grafiği.

Grafikten de görüldüğü gibi $g_0(x)$ ve $h_0(x)$ denklemlerinin birbirine eşit olduğu noktalarda Bessel denkleminin kökleri bulunmaktadır. Mathcad programının yardımı ile bulunan bu kökler aşağıda Çizelge 2.2de görülmektedir.

Çizelge 2.2: 2.50 numaralı denklemin kökleri.

λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
23.387	56,95	93,529	131,405

Çizelgeden de görüldüğü üzere çözüm sırasında bulunan ilk 4 kök kullanılmaktadır. Böylece radyal doğrultuda

$$R_n(r) = C_n J_0(\lambda_n r) \quad (2.61)$$

şeklinde sonsuz sayıda çözüm elde edilmiş olur.

Denklem 2.50'nin çözümü ise kolayca

$$Z(z) = C_3 \exp\left(\frac{-\alpha \lambda^2}{v} z\right) \quad (2.62)$$

şeklinde bulunur. Buradan

$$\psi(r, z) = \sum_0^{\infty} b_n e^{\frac{-\alpha \lambda_n^2 z}{v}} J_0(\lambda_n r) \quad (2.63)$$

şeklinde ilk kısmın çözümü elde edilir. Denklem 2.43'in 2.44 ve 2.45 sınır şartları altında çözümü ise

$$\varphi(r) = \frac{u''' R_0^2}{4k_e} \left(1 - \frac{r^2}{R_0^2}\right) + \frac{u''' R_0}{2h} \quad (2.64)$$

şeklinde kolayca bulunur. Buradan 2.37 denklemine göre sıcaklık dağılımı

$$\theta(r, z) = \frac{u''' R_0^2}{4k_e} \left(1 - \frac{r^2}{R_0^2}\right) + \frac{u''' R_0}{2h} + \sum_0^{\infty} b_n e^{\frac{-\alpha \lambda_n^2 z}{v}} J_0(\lambda_n r) \quad (2.65)$$

şeklini alır.

Buradaki b_n katsayısının bulunması için denklem 2.36 ile verilen sınır şartı kullanılırsa

$$f(r) = \theta_{mi} - \frac{u''' R_0^2}{4k_e} \left(1 - \frac{r^2}{R_0^2}\right) - \frac{u''' R_0}{2h} = \sum_0^{\infty} b_n J_0(\lambda_n r) \quad (2.66)$$

ortogonal serisi elde edilir. Bu seri denkleminde b_n

$$b_n = \frac{\int_0^{R_0} f(r) r J_0(\lambda_n r) dr}{\int_0^{R_0} r J_0^2(\lambda_n r) dr} \quad (2.67)$$

şeklinde hesaplanır. Bu integralin çözümü

$$b_n = \frac{\int_0^{R_0} (A - B r^2) r J_0(\lambda r) dr}{\frac{R_0^2 [\lambda^2 + (\frac{h}{k_e \lambda_n})^2]}{2\lambda^2} j_0^2(\lambda R_0)} \quad (2.68)$$

$$A = (T_{mg} - T_{\infty}) - \frac{u''' R_0}{2h} - \frac{u''' R_0^2}{4k_e} \quad (2.69)$$

$$B = \frac{u'''}{4k_e} \quad (2.70)$$

b_n seri denkleminin pay kısmındaki integralin çözümü

$$\int_0^{R_0} r J_0(\lambda r) dr = \frac{R_0}{\lambda_n} J_1(\lambda_n R_0) \quad (2.71)$$

$$\int_0^{R_0} r^3 J_0(\lambda r) dr = \frac{1}{\lambda_n^3} \left[R_0 (2\lambda_n R_0 J_0 + (\lambda_n^2 R_0^2 - 4) J_1) \right] \quad (2.72)$$

şeklindedir.

Sonuç olarak b_n aşağıdaki gibi bulunur:

$$b_n = \frac{\left[\frac{A}{\lambda_n} R_0 J_1(\lambda_n R_0) - \frac{BR_0}{\lambda^3} \left[2\lambda_n R_0 J_0(\lambda_n R_0) + [(\lambda_n R_0)^2 - 4] J_1(\lambda_n R_0) \right] \right]}{\frac{R_0^2 [\lambda^2 + (\frac{h}{k_e \lambda_n})^2]}{2\lambda^2} J_0^2(\lambda R_0)} \quad (2.73)$$

2.65 denkleminde λ kökleri ve istenen koordinatlar yerleştirilerek sıcaklık değerleri bulunmaktadır.

Açıklanan bu denklemlerde geçen k_e değeri katalitik konvertörün içerisindeki gaz ve katı parçaların bir çeşit ortalama ısı geçiş katsayısıdır ve Eberspacher şirketinin [9] çalışmasında deneysel hesaplarla karşılaştırılarak bulunan bir çözümlemedir.

$$k_e = \varepsilon k_g + (1 - \varepsilon) k_T \quad (2.74)$$

Denklemde k_T olarak geçen değer tuğlanın ısı iletim katsayısıdır ve bilinen bir değerdir. k_g değeri ise aşağıda yine Eberspacher firması tarafından önerilen başka bir korelasyon aracılığı ile bulunmaktadır.

$$k_g = -0,0003933 + 0,0010184T - 4,8574 \cdot 10^{-8} T^2 + 1,5207 \cdot 10^{-11} T^3 \quad (2.75)$$

Önerilen bu korelasyona göre gazın ısı iletim katsayısı sıcaklığın bir fonksiyonu olarak görülmektedir ve oldukça kullanışlı bir denklemdir.

Sonuç olarak denklem 2.65 aracılığıyla katalitik konvertör üzerinde 2 boyutlu olarak istenen her noktada sıcaklık değeri hesaplanabilmektedir.

2.6 Katalitik Konvertörden Çevreye Isı Geçişi

Katalitik konvertörde 2 yolla çevre ortama ısı geçişi gerçekleşir:

Taşınım yoluyla ısı kaybı

Konvertörün etrafındaki taşınım katsayısı hesaplanarak konvertörden havaya geçen ısı miktarı ortaya çıkartılır.

$$Q_{\text{taş}} = hA(T_{\text{kat}} - T_{\infty}) \quad (2.76)$$

h taşınım katsayısını bulmak için öncelikle Nu sayısının bulunması gerekir.

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (2.77)$$

Silindir üzerinde çapraz akışta Nu sayısı

$$Nu = C.Re_D^m Pr^{1/3} \quad (2.78)$$

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (2.79)$$

yardımı ve Çizelge 2.3 deki değerler kullanılarak bulunmaktadır.

Çizelge 2.3: Incropera Sayfa 396 Tablo 7.2 deki çapraz akış için verilen değerler.

C	0,27
Pr	0,7

Işınım yoluyla ısı kaybı

Kabuller:

- Dış hava ortamı siyah cisim ve sıcaklık sabit
- Katalistin dış yüzeyi sabit sıcaklıkta ve yüzeyin her yerinde aynı
- Zamandan bağımsız

Dış ortam siyah cisim olduğu için ısı geçişi katalist yüzeyinden dış ortama doğru katalistin ışınlımla ısı yayması sonucu olur.

$$Q_{\text{ışınım}} = F \varepsilon_r \sigma A (T_{\text{kat}}^4 - T_{\infty}^4) \quad (2.80)$$

Denklem 3.47’de kullanılan bazı katsayılar Çizelge 2.4’de gösterilmektedir.

Çizelge 2.4: Işınlıma ait veriler.

F(katalistten dış çevreye şekil faktörü)	1
ε_r	0,2
$\sigma(\text{W/m}^2 \text{K}^4)$	5.67×10^{-8}

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Deney Tesisatının Tanıtılması ve Deneylerin Yapılışı

Bu çalışmada kullanılan ölçümler Ford laboratuvarlarında yapılmıştır. Ölçüm alınırken kullanılan araç koşullandırılabilir rüzgâr tüneline şasi dinamometresine bağlanarak çalıştırılmıştır. Bu laboratuvarlarda hem çevre hava sıcaklığı, hem rüzgâr hızı ve sıcaklığı kontrol edilebilmektedir. Ayrıca aracın tekerlekleri dinamometreye bağlanarak yük binmesi sağlanmakta ve rüzgâr tüneli tarafından oluşturulan hava akımı sayesinde de aracın yolda ilerlerken etrafında gerçekleşen koşullar oluşturulmaktadır. Şasi dinamometresinin bir örneği şekil 3.1’de gösterilmektedir. Bağlantı aracın çekiş sağlayan tekerleklerinin motorda üretilen enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren bir çeşit dinamometreye bağlanması yoluyla gerçekleştirilir. Dinamometreye bağlanan tekerlekler döndükçe dinamometre içerisindeki elektrik motoru manyetik alan yardımıyla elektrik üretmeye başlar. Üretilen bu elektrik enerjisi kayıplarla birlikte motorda tüketilen enerjiye denk olmaktadır. Bu sayede motorun her an ne kadar bir güç ve tork ürettiğini de görmek mümkün olmaktadır. Test odası koşullandırılıp Ford deney standartlarına uygun koşullar oluşturulduktan sonra test başlatılmaktadır. Test sırasında hava basıncı, hava hızı ve sıcaklığı, aracın devir sayısı ve aracın üzerinde istenen noktalardaki sıcaklıklar kaydedilerek gerekli bilgiler elde edilmektedir.



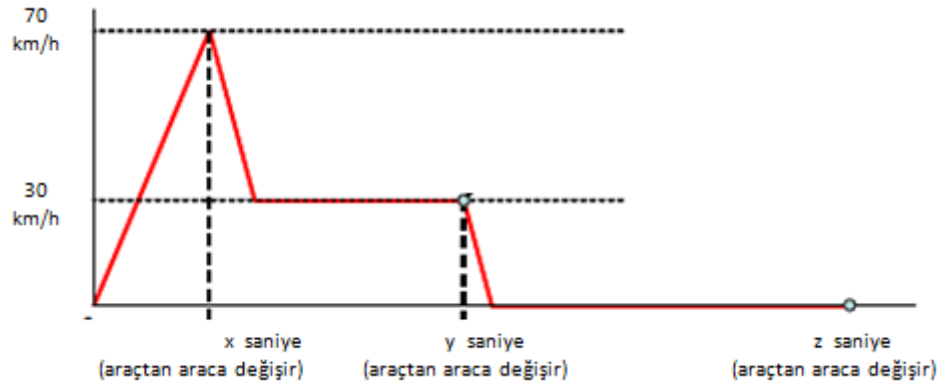
Şekil 3.1: Örnek bir şasi dinamometresi.

Bu deneylerin yapılmasındaki amaç, araç üzerindeki sıcaklıkları belirleyerek egzoz sistemi veya çevresindeki parçaların maruz kaldıkları yüksek sıcaklıklarda çalışıp çalışmayacağını belirlemesidir. Hem egzoz sistemi hem de etrafındaki parçalar üzerinden alınan ölçümler bu parçaların üreticileri tarafından garanti edilen en yüksek çalışma sıcaklıkları ile karşılaştırılmakta ve bu sayede bir değerlendirme yapılarak sistemin güvenli bir şekilde çalışıp çalışmayacağı belirlenmektedir.

Yapılan bu testlerin Ford şirketi içerisinde belirli prosedürleri vardır. Araç tipine, hedeflenen pazarın iklim koşullarına ve araç kullanıcılarının özelliklerine bağlı olarak pek çok test prosedürü oluşturulmuştur. Deney yapılmadan önce hangi deneylerin yapılması gerektiği teknik ekip tarafından kararlaştırılır. Testlerin aşağıda belirtilen şekilde çeşitlendirilmektedir:

- Düşük hızda yapılan testler (hava akışının az olduğu ve aracın soğumakta zorlandığı iklim koşulları)
- Yüksek hızda yapılan testler (otoban testleri)
- Yüklü ve yüksüz halde yapılan testler
- Rampa testleri (dağ ve rampa çıkarken oluşabilecek en kötü koşulların testi)

Bu testler sırasında Şekil 3.2’de görülen hız döngüsüne benzer bir döngü ile yapılmaktadır. Öncelikle aracın motorunun ısıtılması için ön hazırlık prosedürü uygulanmaktadır. Bu süreçte araç belli bir süre sabit ivme ile hızlandırılarak sürülmektedir. Daha sonra aracın test edilmek istenen hız ve devir sayısına gelmesi sağlanarak bu hızda yine araca ve prosedüre göre değişen zamanlarda belli bir süre test gerçekleştirilmektedir.

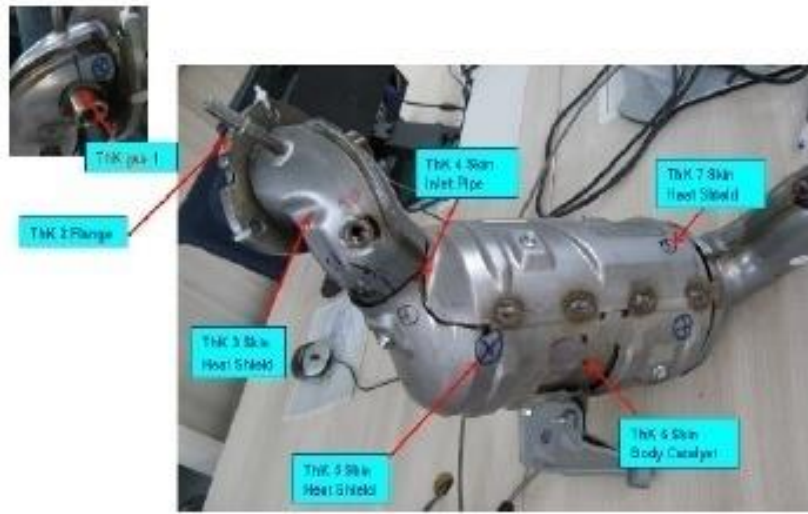


Şekil 3.2: Test sırasında aracın hız döngüsü.

Test devam ederken araç üzerinden sabit zaman aralıklarında belli noktalardan sıcaklık ölçümleri alınır. Bu ölçümler hem aracın ilk çalıştırma koşullarında, hem testin yapıldığı hızlarda hem de motor kapatıldıktan sonra alınarak aracın her

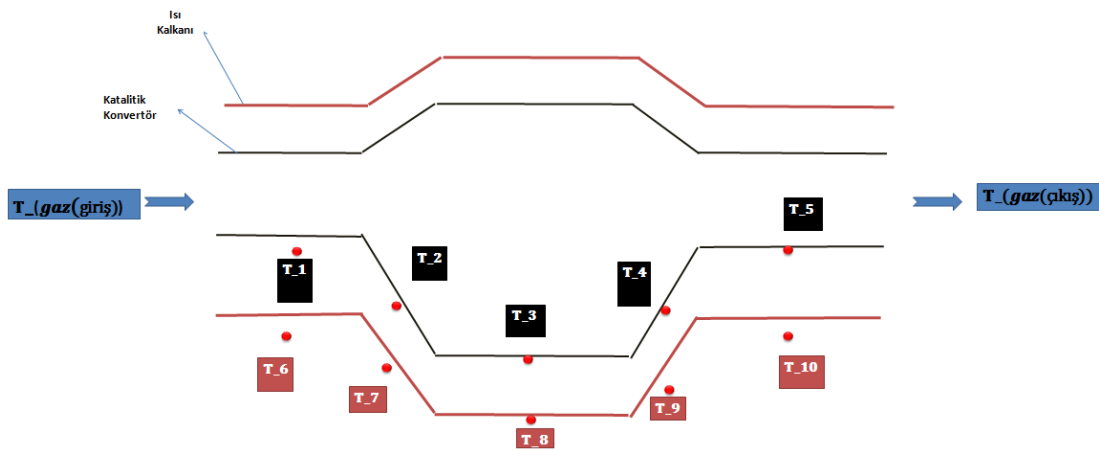
durumdaki sıcaklık bilgileri kaydedilmiş olunur. Bu bilgiler aracılığıyla sıcaklığı artan parçaların riskli durumda olup olmadıkları anlaşılmaya çalışılmaktadır.

Test sırasında egzoz sisteminden ölçüm almak için kullanılan sensörler ve pozisyonlarının bir örneği Şekil 3.3’de gösterilmektedir.



Şekil 3.3: Katalitik Konvertör Üzerindeki Sıcaklık Ölçülen Noktalar.

Bizim incelediğimiz katalitik konvertörde Şekil 3.4’de gösterilen noktalarda ölçüm alınmıştır:



Şekil 3.4: Katalitik konvertör üzerinden sıcaklık ölçülen noktalar.

Testler sırasında çeşitli parametreler değiştirilerek araç üzerindeki sıcaklıklara etkileri gözlemlenmektedir. Bu parametreler aşağıda gösterilmektedir.

Deneylerdeki değişkenler;

- Hava hızı
- Devir sayısı
- Ortam sıcaklığı
- Egzoz gaz sıcaklığı
- Egzoz gazı kütleli debisi

Bu değişkenler aracın hızı, gaz kelebek açıklığı ve rüzgâr tünelineki hava hızının/sıcaklığının değiştirilmesi sonucu değişmektedir. Hangi testte hangi koşulun gerçekleştirileceği Ford şirketi içerisinde yıllardır oluşan bilgi birikimi ve deneyim sonucu belirlenmektedir.

3.2 Deney Sonuçları

Deneyler sonucu kaydedilen verilerin bir kısmı Çizelge 3.1, 3.2ve 3.3’de görülmektedir. Burada $T_{w(1/2)}$ değeri konvertörün orta noktasının yüzey sıcaklığını, $T_{m(1/2)}$ değeri de konvertör merkezindeki sıcaklığını belirtmektedir. Konvertör merkez sıcaklığı direk gaz akışı ile temas ettiği için yüzeye göre oldukça yüksektir. Çeşitli ölçümler sırasında konvertör merkez ve yüzey sıcaklıklarının değişimi birbiriyle doğru orantılıdır.

Çizelge 3.1: Yüzey sıcaklığının gaz sıcaklığı ile değişimi.

Ölçüm No	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 4	Ölçüm 5	Ölçüm 6
$T_{w(l/2)} (C^{\circ})$	337	368	321	356	391	417
$T_{m(l/2)} (C^{\circ})$	500	585	485	690	670	695

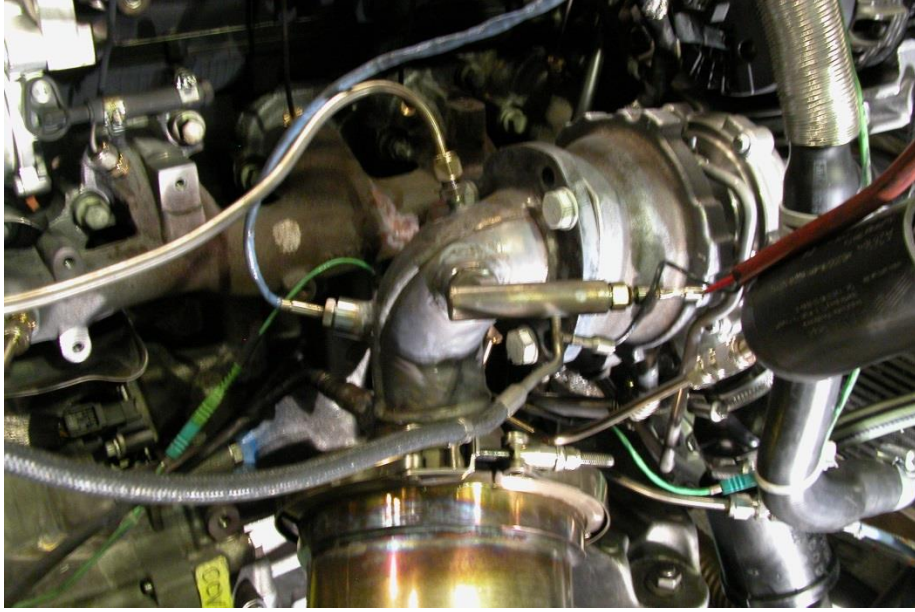
Çizelge 3.2: Motor devir sayısına bağlı olarak yüzey sıcaklığı ve gaz sıcaklığının değişimi.

Motor Devir Sayısı (d/d)	2254,0	2568,0	2516,0	5614,0	3156,0	3512,0
$T_{w(l/2)} (C^{\circ})$	337	368	321	356	391	417
$T_{m(l/2)} (C^{\circ})$	500	585	485	690	670	695

Çizelge 3.3: Egzoz gaz debisine bağlı olarak yüzey sıcaklığı ve gaz sıcaklığının değişimi.

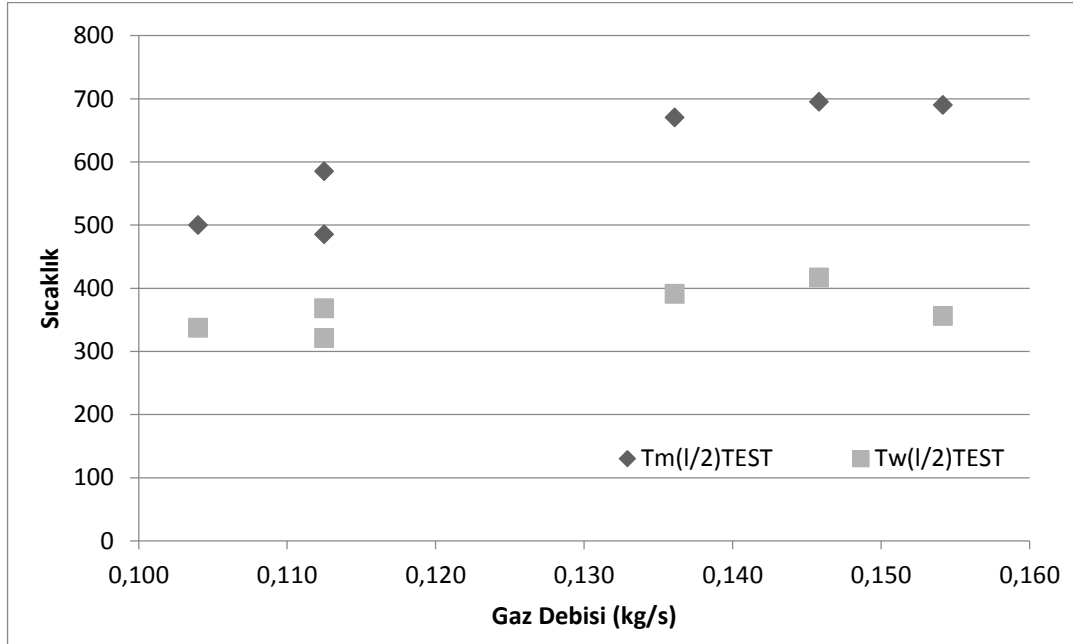
Egzoz Gazı Kütleli Debi (kg/s)	0,104	0,113	0,113	0,154	0,136	0,146
$T_{w(l/2)} (C^{\circ})$	337	368	321	356	391	417
$T_{m(l/2)} (C^{\circ})$	500	585	485	690	670	695

Egzoz sisteminin test sırasında araca monte edilmiş hali şekil 3.5’te görülmektedir. Burada görüldüğü üzere egzoz sistemi üzerine bir takım termo kulpllar takılmak suretiyle üzerinden sıcaklık ve pitot tüpleri ile basınç ölçümleri alınmaktadır. Yapılan bu testler yalnız egzoz sistemi için değil, motor, turbo ve diğer aktarma organları bileşenlerinin çeşitli parametrelerinin kontrolü içinde kullanılmaktadır. Motorun ve diğer motor parçalarının birçok bölgesinden ölçüm alınmaktadır.



Şekil 3.5: Test odasında katalitik konvertör-motor bağlantısı.

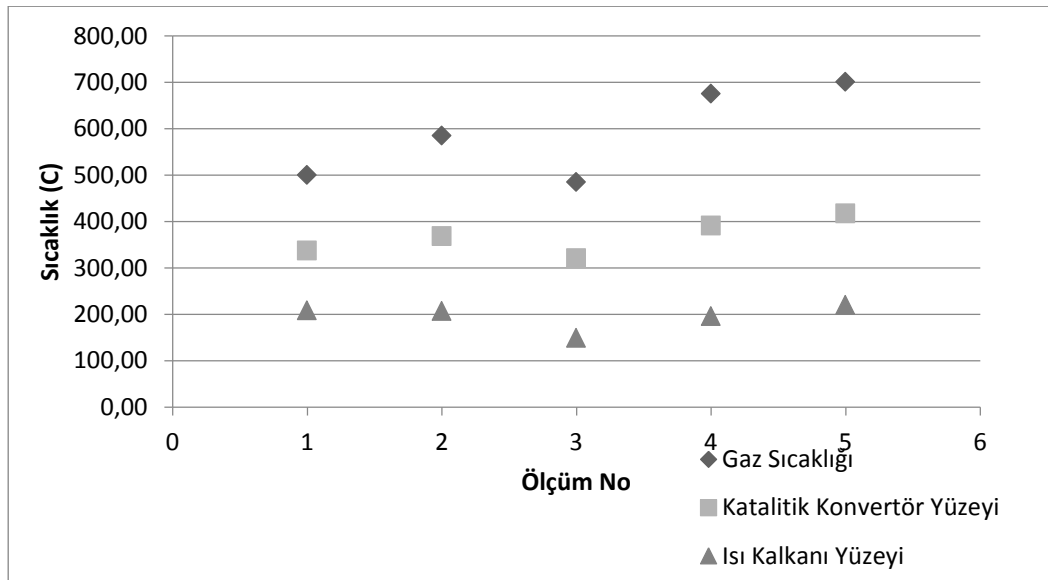
Şekil 3.6 ve 3.7’de ise yukarıdaki çizelgelerde gösterilen değerlerin grafik üzerinde değişimi gösterilmektedir. Çeşitli ölçüm sonuçlarının gaz debisine göre yüzey ve merkezde değişiminin görüldüğü bu grafik sayesinde katalitik konvertörün üzerindeki sıcaklık dağılımının karakteristiği hakkında bilgi sahibi olmak mümkün olmaktadır. Burada T_m katalitik konvertörün merkezindeki sıcaklığı, T_w ise yüzeydeki sıcaklığı temsil etmektedir.



Şekil 3.6: Egzoz gaz debisi-gaz sıcaklığı değişimi.

Şekil 3.6'deki grafiğe göre gaz debisi yükseldikçe hem motordaki yanma sıcaklıklarının yükseldiği, hem de katalitik konvertör içerisinde tepkimeye giren gaz miktarının artışıyla sıcaklıkların yükseldiği görülmektedir.

Şekil 3.7'da ise gaz sıcaklığına bağlı olarak katalitik konvertör yüzey sıcaklığı ve ısı kalkanı yüzey sıcaklığını görmekteyiz. Görüldüğü gibi konvertör etrafına 0,8 mm sac metalden yapılmış olan ısı kalkanı yerleştirildiği durumda en dış yüzey sıcaklığı ciddi şekilde düşüyor. Bu sayede katalitik konvertörden etraftaki parçalara daha az ısı geçişi gerçekleşmesi sağlanmış oluyor.



Şekil 3.7: Çeşitli koşullarda egzoz gaz sıcaklığının değişimi.

3.3 Deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Araç üzerinde yapılan bu deneylerde çeşitli parametrelerin değişimi sonucu ortaya çıkan sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Bunlar egzoz katalitik konvertörüne giren ve çıkan gaz sıcaklıkları, katalitik konvertör yüzey sıcaklığı ve ısı kalkanı yüzey sıcaklığı ile çevredeki parçaların sıcaklıklarıdır. Deneyler sonucunda katalitik

konvertör dış yüzey sıcaklıklarında ciddi düşüşler olduğu görülmüştür. Bu sayede etraftaki parçaların birçoğunun sıcaklıkları dayanabilecekleri sıcaklık değerlerinin altına çekilebilmiştir.

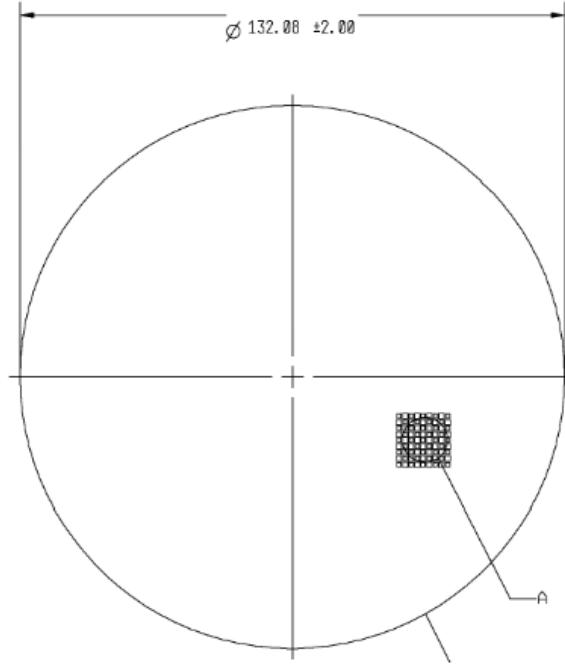
Ölçümler sonucunda anlaşılan diğer bir konuda katalitik konvertör içerisindeki sıcaklık değerlerinin istenen değerlerin altına inmediği ve bu sayede içeride oluşan katalitik reaksiyonların tehlikede olmadığıdır. Çünkü her ne kadar katalitik konvertörler egzoz gazlarının normalde olduğundan daha düşük sıcaklıklarda tepkimeye girmelerini sağlasa da bunun da bir alt sıcaklık limiti vardır. Bu değer altına inildiği takdirde katalitik reaksiyonlar gerçekleşmez ve kirletici gazlar çevre ortama salınır. Ancak ölçüm sonuçları bu konuda bir sıkıntı olmadığını ortaya koymuştur.

Bu yapılan ölçümlerin diğer bir yararı ise aracın yazılımının belirlenmesine katkı sağlamasıdır. Aracın yazılımı motorun çalışma karakteristiğini (devir sayısı, gaz kelebek açıklığı, hava yakıt karışım oranları vb.)belirlediği için ölçümler sonrasında ortaya çıkan sıcaklıklar değerlendirilip yazılımda yapılması gereken muhtemel değişiklikler ortaya çıkarılmaktadır. Örneğin egzoz gaz sıcaklığının türbodan çıkarken olması gereken bir üst limiti vardır. Bu değer aşılsa motor ve turbo zarar görebilir, ayrıca egzoz kuyruk borusundan çıkan gaz karşısında bulunan insana zarar verebilir. Ölçüm sonucuna göre bu değer aracın yazılımı ile oynanarak düşürülebilir.

4. MATEMATİK MODELİN PARAMETRİK ÇÖZÜMÜ

4.1 Katalitik Konvertör Geometrik Özellikleri

Katalitik konvertörün geometrik özellikleri Şekil 4.1 ve 4.2’de gösterilmektedir. Şekil 4.1’de parçanın önden görünümü verilmiştir. Burada egzoz gazının geçtiği ve reaksiyona girdiği ufak kanalların giriş kısmı görülmektedir. Bunun daha detaylı hali A kesitinde Şekil 4.2’de gösterilmektedir.

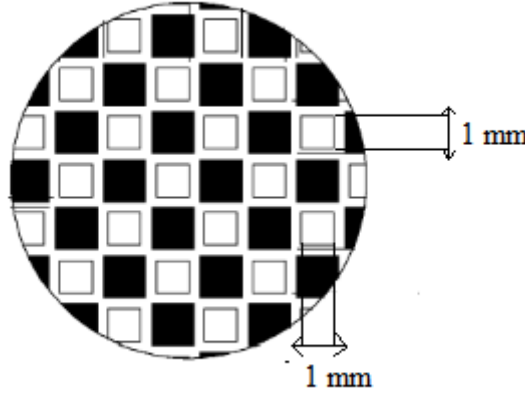


Şekil 4.1: Katalitik konvertör boyutları önden görünüşü.

İncelediğimiz katalitik konvertör silindir şeklindedir. Bu şekil endüstride genelde kullanılan tasarımlardandır ve yine silindir şekle sahip egzoz boruları ile de uyumludur. Ayrıca silindir şekil hem aracın altında kapladığı alan bakımından hem de akışın ani şekil değişimine bağlı olarak karakteristik değişmesi gibi etkilerin oluşmaması açısından avantajlıdır.

Silindir tuğlanın malzemesi Aluminum Titanate (Al_2TiO_5) dir ve bu malzemenin en önemli özelliği hem ısı şoka karşı dirençli olması hem de ısı genleşmenin çok düşük

olmasıdır. Bu özellik egzoz katalitik konvertör tuğlası için oldukça önemlidir çünkü aracın bu bölgesi sık sık ani sıcaklık değişimlerine maruz kalmaktadır. Eğer şekil değişimi fazla olursa uzun vadede yorulmaya dayalı çatlaklar ve sonuçta parçada deformasyon meydana gelebilmektedir. Ayrıca malzemenin düşük ısı iletim katsayısı ısının içeride tutularak kimyasal reaksiyonun gerçekleşebilecek en yüksek verimle gerçekleşmesini sağlamaktadır.



Şekil 4.2: Detay A.

Şekil 4.2’den de görüldüğü gibi konvertör içerisindeki tuğlanın üzerinde 1mm boyutlarında kare prizma şeklinde kanallar bulunmaktadır. Bizim kullandığımız katalitik konvertörde bu kanallardan 6370 adet vardır. Bu kanallar daha önce de belirtildiği üzere egzoz gazının değerli metallerle temas alanını artırarak daha fazla miktarda tepkime gerçekleşmesi sağlanmaktadır.

Bu kanalların diğer bir özelliği de gaz akışının laminar karakteristikte tutulmasını sağlamalarıdır. Giriş etkilerinin çok sınırlı olduğu bu tasarımda akış laminar olduğu için katalitik yüzey ile egzoz gazının teması maksimum seviyeye çıkarılmaktadır. Bu durum da tepkimeye giren gaz miktarını artırarak katalitik konvertörlerin verimini artırmaktadır.

4.2 Katalitik Reaksiyon Gaz Bileşimi

Dizel motorlardan çıkan egzoz gazının bileşimi Çizelge 4.1’de gösterildiği gibidir.

Egzoz gazının önemli bir kısmını N_2 , CO_2 , H_2O ve O_2 oluşturmaktadır ve bu gazlar insan sağlığına zararlı değildir. Asıl zararlı gazların egzoz gazı içerisindeki oranı

oldukça düşüktür ancak yinede dünya üzerinde milyonlarca otomobil olduğu düşünülürse bu gazların insan sağlığı için ne kadar büyük bir etkisi olduğu anlaşılabilir.

Çizelge 4.1: Egzoz gazının bileşimi ve hacimsel oranlar.

Bileşik	Egzoz Gazı İçerisindeki Hacimsel Oranı (%)
N ₂	67
CO ₂	12
H ₂ O	11
O ₂	10
NO _x	0,15
CO	0,045
PM	0,045
C _x H _x	0,035
SO ₂	0,03

Be değerler ortalama bir dizel motorun verileridir. Özellikle kirletici gazların oranı oldukça düşük olduğu için bu oranlar her motorda eşit kabul edilebilmektedir.

İncelenen katalitik konvertörde bu tabloda gösterilen gazlardan yalnızca CO ve H_xC_x gazları dönüştürülmektedir. PM, NO_x gibi gazlar için farklı teknolojiler kullanılmaktadır. Ayrıca CO₂ gazı insan sağlığına zararlı olmamakla birlikte atmosferdeki miktarının artması sera gazı etkisi yaparak küresel ısınmaya neden olmaktadır. Ancak bu gaz şimdilik yalnızca yakıt tüketimi azaltılarak azaltılabilmektedir.

4.3 Egzoz Gazının Gözenekli Ortam İçerisindeki Özellikleri

Egzoz gazının ortalama yoğunluğu aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

Gazın birim mol kütlesi denklem 4.1 ile bulunur. Burada her bir gazın molar oranı ile mol kütlesi çarpılarak birim gazın mol kütlesi hesaplanmaktadır.

$$M_m = y_{N_2} M_{N_2} + y_{CO_2} M_{CO_2} + y_{H_2O} M_{H_2O} + y_{O_2} M_{O_2} \quad (4.1)$$

Kütlesel gaz sabiti denklem 4.2’de gösterildiği gibi üniversal gaz sabitinin gazın mol kütlesine bölünmesi yoluyla bulunmaktadır:

$$R_m = \frac{R_u}{M_m} \quad (4.2)$$

Denklem 4.2’de bulunan değer denklem 4.3’de gösterildiği gibi ideal gaz denkleminde yerine konularak denklem 4.4’teki gaz yoğunluğu hesaplanmış olur.

$$PV = mR_m T \quad (4.3)$$

$$\frac{m}{V} = \frac{P}{R_m T} = \rho \quad (4.4)$$

Burada bulunan gaz yoğunluğu değeri daha sonra yapılacak ısı geçişi ve kimyasal reaksiyonda ısı üretimi hesaplamalarında kullanılmaktadır.

4.4 Çözümün Algoritması

Bu çalışmada kullanılan matematiksel model oluşturulurken öncelikle egzoz gazının akış ve ısı geçişi parametreleri üzerinde etkili özellikleri hesaplanmaktadır. Bunun için denklem 4,4 kullanılarak gazın yoğunluğu, denklem 2.12 yardımıyla reaksiyon katsayısı, denklem 2.13 ve 2.14 ile de Sh ve kütlesel difüzyon katsayıları hesaplanmaktadır. Bu değerler denklem 2.8 de yerine konularak kütlesel geçirgenlik değeri (G_{m1}) hesaplanmaktadır. Bu sayede girişteki ve çıkıştaki kütlesel oranları hesaplamamızı sağlayacak olan 2.10 denklemini elde edilmektedir.

$$w_1(x) = w_{1,i} \exp \left(-\frac{pG}{\dot{m}} x \right) \quad (4.5)$$

Kimyasal reaksiyon sonucu tüketilen CO miktarı hesaplandıktan sonra reaksiyon sonucu üretilen ısı miktarını hesaplamak için gereken diğer bir bilgi de birim kütlede gaz ile gerçekleşen kimyasal tepkimenin ne kadar ısı açığa çıkardığıdır. Bu değer de 4.6 denklemini kullanılarak bulunmaktadır.

$$\sum H_{CO_2} - \sum H_{CO} = (h_f + h_{T_0} - h_{298}) - (h_f + h_{T_i} - h_{298}) \quad (4.6)$$

Hem reaksiyona giren kütle miktarı hem de birim kütle ile üretilen ısı miktarı belirlendikten sonra bu 2 değer 4.7 denkleminde kullanılarak katalitik konvertörde üretilen ısı miktarı bulunmaktadır.

$$Q_{\text{üretilen}} = (w_{1,i} - w_{1,o}) \dot{m} h_{CO} \quad (4.7)$$

Konvertörde üretilen ısı radyal yönde ilerleyerek konvertör yüzeyine geçmektedir. Bu ısı geçişini modellemek için 2.5 numaralı bölümde gözenekli ortam modeli kullanılmaktadır. Bu modelde yoğunluk, hız gibi bir takım temel değişkenlerin ortalama değerleri hesaplanarak iç yüzeydeki egzoz gazından katalitik konvertör yüzeyine aktarılan ısı miktarı sonucu dış yüzeyde oluşan sıcaklık değeri hesaplanmaktadır. Denklem 4.8 bu amaçla geliştirilmiştir. Burada T değeri katalitik konvertör içerisindeki herhangi bir koordinatta oluşan sıcaklık değerini belirtmektedir.

$$\bar{T} = \frac{u''' R_0^2}{4k_{eff}} \left(1 - \frac{r^2}{R_0^2} \right) + \frac{u''' R_0}{2h} + \sum_0^{\infty} b_n e^{\frac{-\alpha \lambda_n z}{v}} j_0(\lambda_n r) \quad (4.8)$$

Katalitik konvertöre giren ve konvertörden çıkan egzoz gazı sıcaklıkları ölçüm sonuçlarında birbirine çok yakın olarak görülmektedir. Buradan üretilen ısıнын büyük bir kısmının egzoz sisteminden ışıınım ve taşınım yoluyla atıldığını göstermektedir.. Bu hesaplamalar da 2.6 numaralı bölümde gösterilmektedir. 2.76 numaralı denklem ile taşınım, 2.80 numaralı denklem ile de ışıınım ile ısı geçişı sonucu sistemden uzaklaşan ısı miktarı hesaplanmaktadır.

Sonuç olarak tüm bu hesaplamalar sonucu hem katalitik konvertörde üretilen ısı miktarı, hem de katalitik konvertörün yüzeyindeki sıcaklıklar bulunabilmektedir.

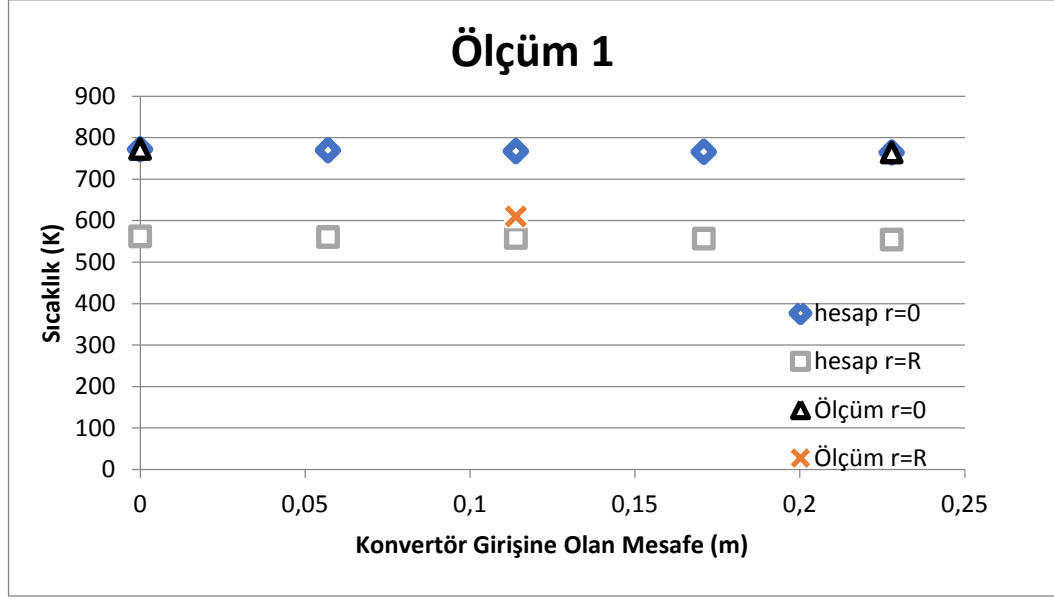
4.5 Deney Sonuçları ile Matematik Modelin Karşılaştırılması

Bu bölümde araç üzerinden alınan ölçümlerin yapılan hesaplama sonuçları ile karşılaştırılması gösterilmektedir. Yapılan farklı ölçümler kullanılan matematiksel model sonucu ortaya çıkan değerlerle karşılaştırılmakta ve grafikler halinde aşağıda gösterilmektedir.

Grafiklerde X ekseninde katalitik konvertörün giriş bölümünden çıkış bölümüne doğru olan alanda girişe olan uzaklık gösterilmektedir. Y ekseninde ise bu noktalara ait sıcaklık değerleri gösterilmektedir.

Gösterilen bu grafiklerde matematiksel model sonucu bulunan birçok değer gösterilmesine karşın ölçüm değerlerinden yalnızca 3 adet nokta gösterilmektedir. Bunun nedeni her bir ölçüm sırasında katalitik konvertör üzerinden 3 noktada ölçüm alınmasıdır. Bu noktalar konvertör giriş ve çıkış gaz sıcaklıkları ile konvertör yüzeyinin orta noktasıdır. Ancak aynı noktalar üzerine bakıldığında ölçüm ve matematiksel model sonucu çıkan değerlerin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu da matematiksel modelin doğruluğunu kanıtlamaktadır.

Şekil 4.3'te ilk yapılan ölçüm sonucu ortaya çıkan değerler ve hesaplamalar gösterilmektedir. Konvertör yüzeyinde sıcaklıklar 600 K civarında olurken merkezde yaklaşık 800 K'e kadar çıkmaktadır. Ayrıca sıcaklıklar giriş kısmından çıkış kısmına doğru gidildikçe azalmaktadır. Bunun nedeni de konvertörün çevreyle olan ısı alış verişinin üretilenden daha fazla olmasıdır.



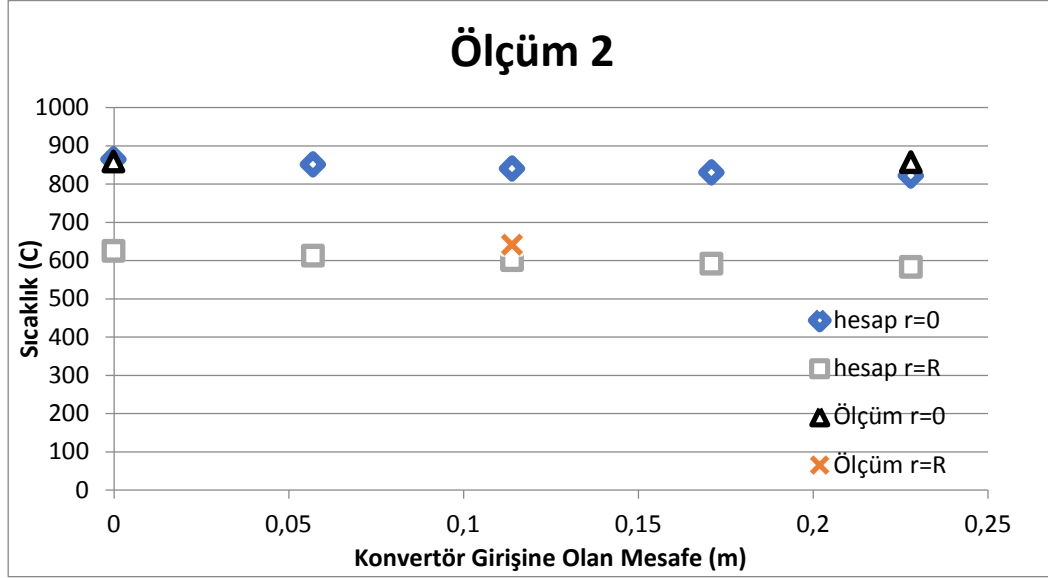
Şekil 4.3: Birinci ölçüm sonucu bulunan değerler ve hesaplanan değerler.

Şekil 4.4'te ikinci ölçüm sonuçları ve hesaplanan değerler gösterilmektedir. Bu ölçüm sırasında ölçülen değerler ölçüm 1'e göre daha yüksektir ancak sıcaklık değişiminin eğilimi benzerdir.

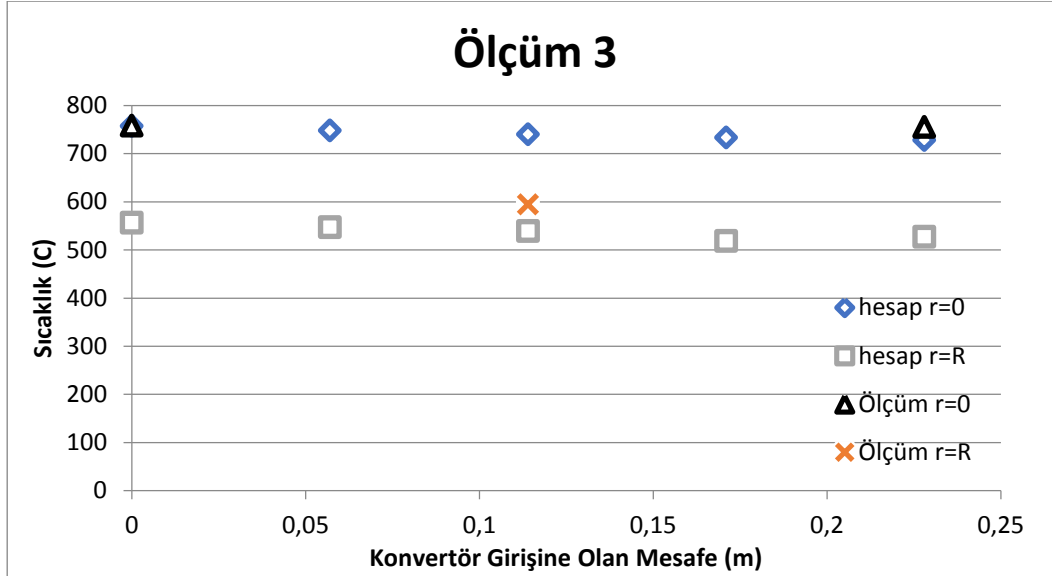
Şekil 4.5, d.6 ve 4.7'de de diğer alınan ölçümler ve matematiksel model sonucu ile karşılaştırılmalı görülebilir.

Bütün bu ölçüm ve hesaplama sonucu çıkan değerler karşılaştırıldığında konvertör yüzeyinde ($r=R_0$) hesaplanan sıcaklıklar ölçülen değerler ile ufak bir farklılık göstermektedir. Bunun temel nedenleri efektif ısı iletim katsayısı hesaplanırken kullanılan formülün hata payı ve yüzeyden çevre ortama ısı geçişi hesaplanırken katalitik konvertör etrafındaki hava akışının çok ufak da olsa araç altındaki diğer

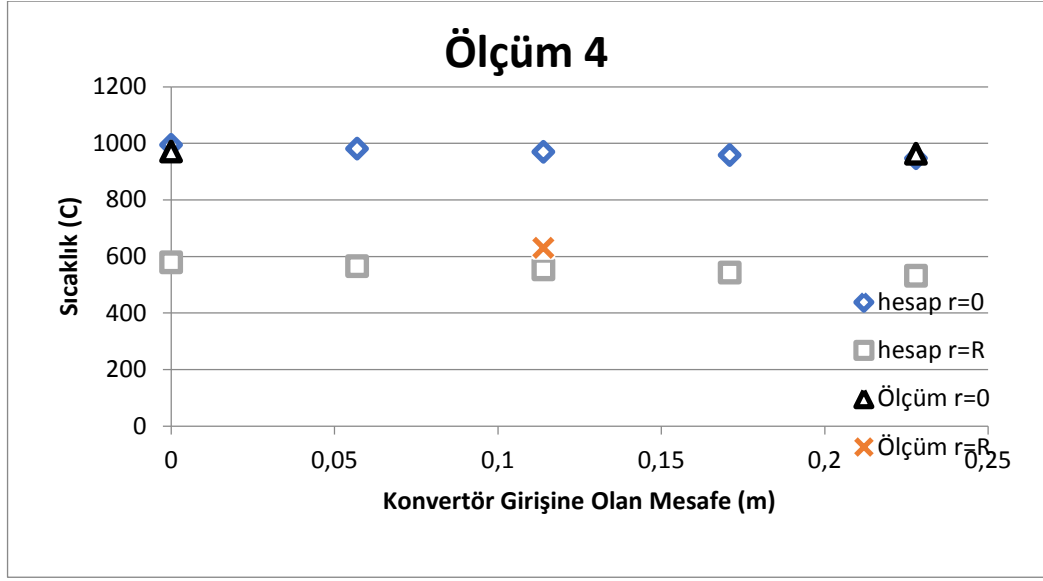
parçalardan etkilenmesinin hesaplamalarda gözönüne alınmamasıdır. Ancak bu farklılık oldukça küçük olduğu için (yaklaşık %5) hesaplama sonuçlarının doğru olduğu kabul edilmektedir.



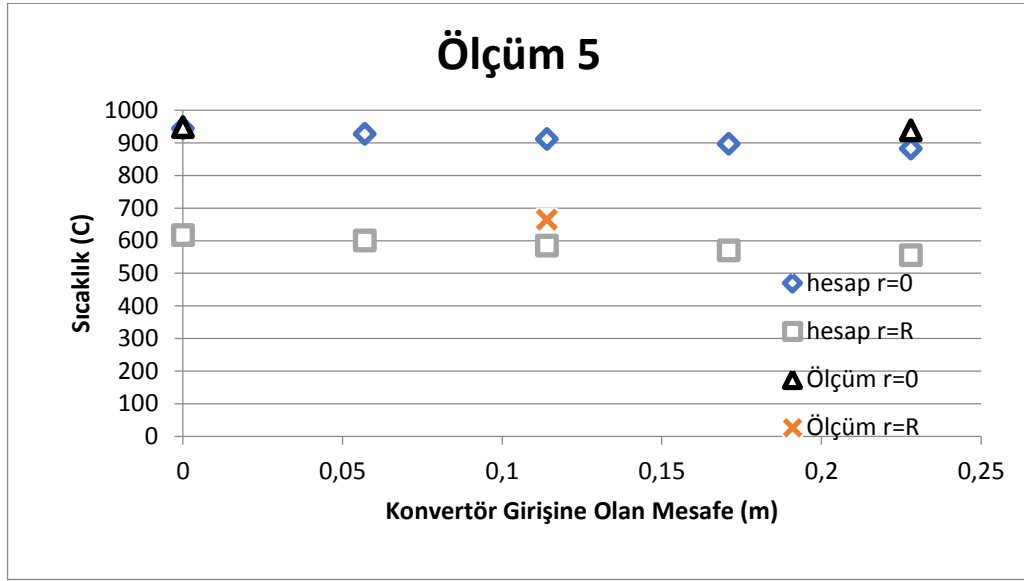
Şekil 4.4: İkinci ölçüm sonucu bulunan ve hesaplanan değerler.



Şekil 4.5: Üçüncü ölçüm sonucu bulunan ve hesaplanan değerler.



Şekil 4.6: Dördüncü ölçüm sonucu bulunan ve hesaplanan değerler.



Şekil 4.7: Beşinci ölçüm sonucu bulunan ve hesaplanan değerler

5. SONUÇ

Bu çalışmada hafif ticari bir araç üzerindeki egzoz sisteminde kullanılan katalitik konvertörün içerisinde oluşan kimyasal reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan ısıнын çözümlemesi ele alınmaktadır. Ortaya çıkan ısıнын miktarı, kütsel debi ve gaz sıcaklığına bağılı değışimi ve çevre ile olan ısı alışverişı hesaplamalarda ortaya çıkarılmaktadır. Alınan tüm ölçümler Ford laboratuvarlarında alınmıştır. Tezde bir genel bir matematik model ortaya konulmaktadır. Bu modelde öncelikle kimyasal reaksiyon modellenerek ısı üretimi hesaplanmakta, sonrasında da gözenekli ortam modeli kullanılarak ısı geğışi modellenmektedir.

Katalitik konvertör için tek denklemlı bir gözenekli ortam modeli kurulmaktadır. Gözenekli ortam modelinin katalitik konvertöre uygulanmasına incelenen önceki çalışmalarda rastlanmamıştır. Kurulan bu model sayesinde katalitik konvertörün iç kısmından yüzeyine doğıru gerçekleşmekte olan ısı geğışi hesabı yapılmakta ve bu yolla konvertörün her bir bölgesinde ortaya çıkan sıcaklıklar bulunmaktadır.

Daha sonra gözenekli ortam modeli kullanılarak elde edilen sonuçlar ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmakta ve birbiriyle uyumlu oldukları görölmektedir.

Literatürde çok boyutlu ve karmaşık çözümler mevcuttur. Ancak bunların pratik olarak kullanımı kolay değıldir. Bu çalışmada önerilen model analitik olarak çözülebildiğı için uygulamada kullanımı kolaydır. Ayrıca karşılaştırılan sonuçlar da çözümün gerçeğe oldukça yakın olduğunu göstermektedir.

Bu noktadan sonra gerçekleştirilen çalışma ile konvertörün boyutları değiştirilerek ısı geçişinin değişimi incelenebilir. Bu sayede dış yüzeye daha az ısı geçmesi sağlanarak çevredeki diğer parçaların yüksek ısıdan olabilecek en az seviyede etkilenmeleri sağlanabilir. Ayrıca katalitik konvertör içerisindeki sıcaklıklar artırılarak reaksiyon verimi ve dönüştürülen zararlı gaz miktarı artırılabilir ve çevreye daha az zehirli gaz salınımı yapılabilir.

Başka bir çalışma da katalitik konvertör içerisindeki tuğlanın kanal sayısı ve ölçüleri üzerine yapılabilir. Buradaki kanal sayısı ve boyutları kimyasal reaksiyonu ciddi şekilde etkilemektedir. Bu değerlerin değiştirilmesi ile yapılacak hesaplar üretilen ve atılan ısı miktarlarının hangi mertebelerde olacağına dair bilgi verecektir. Bu sayede herhangi bir test yapılmadan önce doğru tasarıma ulaştırabilecek en yakın taslak tasarım hesaplama yolu ile elde edilebilmekte ve sadece bu parçalar test edilerek zaman ve maliyet olabilecek en alt düzeye indirilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Url-1** <<http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/en/>>, alındığı tarih: 30.07.2014.
- [2] **Heywood, J.B.** (1998). Motor Vehicle Emissions Control: Past Achievements, Future Prospects. In *Handbook of Air Pollution From Internal Combustion Engines* (1. sürüm) (Cilt 1, Sf. 5-6). Cambridge, MA.
- [3] **Url-2** <http://www.tenneco.com/catalytic_converters/>, alındığı tarih: 29.08.2014
- [4] **Chan, S. H. ve Hoang, D.L.** (1999). *Heat transfer and chemical reactions in exhaust system of a cold-start engine*. Nanyang, Singapore.
- [5] **Hayes, R. E., ve Kolaczkowski, S. T.** (1994). *Mass and heat transfer effects in catalytic monolith reactors*. Alberta, Canada,
- [6] **Balakotaiah, V. Gupta, N. Ve West, H. D.** (2000). *A simplified model for analyzing catalytic reactions in short monoliths*. Houston, TX.
- [7] **Depcik, C. ve Assanis, D.** (2005). *One-dimensional automotive catalyst modeling*. Ann Arbor, MI.
- [8] **Mills, A. F.** (2001). *Mass Transfer: Single-Stream Mass Exchangers* (2. sürüm) (Cilt 1, Sf. 260-265). Los Angeles, CA.
- [9] **Zhang, X. Meda, L. ve Keck, M.** (2005). *Numerical study on skin temperature and heat loss of vehicle exhaust system*, Eberspaecher North America, MI.
- [10] **Otto, C. N. ve LeGray W. J.** (1980). *Mathematical models for catalytic converter performance*, Ford Motor Company, MI.
- [11] **Persoons, T.** (2006). *Experimental flow dynamics in automotive exhaust systems with close-coupled catalyst*, (yüksek lisans tezi), Katholieke Universiteit, Leuven, Belçika.
- [12] **Mondt, J. R.** (2000). *Cleaner Cars: The history and technology of Emission Control Since the 1960* (1. sürüm) (Cilt 1, Sf. 80-120). Warrendale, PA.
- [13] **Kim, Y. Jeong, S. ve Kim, W** (2008). *Influence of Spacing on the Thermal Efficiency of a Dual-Monolithic Catalytic Converter During Warmup*, Seoul, Korea
- [14] **Url-3** <[http://academygenbioii.pbworks.com/w/page/70219744/Enzymes%20Lab%20\(Team%206\)](http://academygenbioii.pbworks.com/w/page/70219744/Enzymes%20Lab%20(Team%206))>, alındığı tarih: 01.12.2014,
- [15] **525MT0300** (2011). Motorlu araçlar teknolojisi: *Egzoz emisyon kontrolü*, Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara.

- [16] **Combustion-engine exhaust gases.** (t.y.). *Wikipedia*. Alındığı tarih: 07.08.2014, adres: http://http://en.wikipedia.org/wiki/Exhaust_gas
- [17] **Arpacı, V** (1966). *Conduction Heat Transferby* (1. sürüm) (Cilt 1, Sf. 142).Michigan, USA.
- [18] **Kaviany, M.**(1991). *Principles of Heat Transfer in Porous Media* (Mechanical Engineering Series) Ann Arbor, MI.
- [19] **Özdemir, M.** (1996). *Tel örgü katmanlardan oluşan gözenekli ortamda zorlanmış ısı geçişi* (doktora tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- [20] **Slattery, J. C.,** (2004).Single-phase flow through porous media,TAMU, TX.
- [21] **Url-4** < www.vehicular.isy.liu.se/Lab/VehicleLab/Images/rototest.jpg>, alındığı tarih: 01.11.2014.

EKLER

EK A: Conduction Heat Transfer Tablo 3-1 (Vedat Arpacı)

TABLE 3-1

$$\text{SOLUTION OF } \frac{d}{dx} \left(x^\alpha \frac{dy}{dx} \right) + \gamma^2 x^\beta y = 0$$

Case (i): $\beta - \alpha + 2 \neq 0$. The general solution is

$$y(x) = x^{\nu/\mu} Z_\nu(|\gamma| \mu x^{1/\mu}),$$

where

$$\nu = (1 - \alpha)/(\beta - \alpha + 2), \quad \mu = 2/(\beta - \alpha + 2), \quad \nu/\mu = (1 - \alpha)/2;$$

two particular solutions, corresponding to Z_ν and to be selected according to γ and ν , are shown below.

γ	ν	Particular solutions	
Real	Fractional	J_ν	$J_{-\nu}$ (or Y_ν)
	Zero or integer	J_n	Y_n
Imaginary	Fractional	I_ν	$I_{-\nu}$ (or K_ν)
	Zero or integer	I_n	K_n

Case (ii): $\beta - \alpha + 2 = 0$. The general solution is

$$y(x) = x^r;$$

two particular solutions, to be determined according to the roots of

$$r^2 + (\alpha - 1)r + \gamma^2 = 0,$$

are shown below.

$(\alpha - 1)^2 - 4\gamma^2$	Particular solutions	
Positive	x^{r_1}	x^{r_2}
Zero	x^δ	$x^\delta \ln x$
Negative	$x^\delta \cos(\epsilon \ln x)$	$x^\delta \sin(\epsilon \ln x)$

Here

$$r_{1,2} = \frac{1}{2} \{ (1 - \alpha) \pm [(\alpha - 1)^2 - 4\gamma^2]^{1/2} \},$$

$$\delta = \frac{1}{2}(1 - \alpha), \quad \epsilon = \frac{1}{2}[4\gamma^2 - (\alpha - 1)^2]^{1/2}.$$

Şekil A.1: Conduction Heat Transfer Tablo 3-1 (Vedat ARPACI)

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Görkem Taş

Doğum Yeri ve Tarihi: 09.01.1988 / VAN

Adres: Site Mah. Karay Sok. No:5 Ümraniye/İstanbul

E-Posta: gorkemtas9@gmail.com

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü

Mesleki Deneyim: 3 yıl Ford Otosan'da Ar-Ge Mühendisi