İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AŞIRI DOLDURMALI AĞIR HİZMET MOTORUNUN HAVA YOLU KONTROLÜ VE UYGULAMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Osman UYGUR

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AŞIRI DOLDURMALI AĞIR HİZMET MOTORUNUN HAVA YOLU KONTROLÜ VE UYGULAMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Osman UYGUR
(518091057)

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Levent GÜVENÇ

HAZİRAN 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 518091057 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Osman UYGUR**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"AŞIRI DOLDURMALI AĞIR HİZMET MOTORUNUN HAVA YOLU KONTROLÜ VE UYGULAMASI"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Levent GÜVENÇ** Okan Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Yrd. Doç. Dr. Erdinç ALTUĞ** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Doç. Dr. Bilin Aksun GÜVENÇ Okan Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : **4 Mayıs 2012**
Savunma Tarihi : **8 Haziran 2012**

Aileme,

ÖNSÖZ

Ağır ticari araç ve motor üretim faaliyetleri gösteren Ford Otosan A.Ş.'nin Euro VI çalışmalarının ilk safhasında, daha önce kullanılmayan EGR valfi ve hava kelebeği motora entegre edilerek bu komponentlerin ve hava yolunun kontrolcüsü tasarlanmış, emisyon açısından sonuçlar incelenmiştir. Bu çalışma sonucunda Euro VI çalışmalarının devamı için izlenecek yol tartışılmıştır.

Yüksek lisans eğitimim sırasında tanıştığım, bana güvenen ve destekleyen, danışmanım ve hocam Levent Güvenç'e teşekkürlerimi sunuyorum.

Çalışmam sırasında deneysel test imkanlarını ve ekipmanlarını kullandığım Ford Otosan firmasına, yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen Kazi Adil, Didem Aydın, Serhan Turp ve Can Işıl'a teşekkür ederim.

Haziran, 2012

Osman Uygur
Makina Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

1. GİRİŞ 1
1.1 Tezin Konusu ve Amacı 1
1.2 Tezin Kapsamı 2
2. HAVA YOLUNA GENEL BİR BAKIŞ VE ÖN DENEYLER 9
2.1 Aşırı Doldurma 9
2.2 Aşırı Doldurmalı Ağır Hizmet Motorunda Hava Yolu ve Komponentleri 9
2.2.1 EGR sistemi 11
2.2.2 Hava kelebeği 12
2.3 Euro VI Emisyon Yönetmeliği ve Getirdiği Zorunluluklar 13
2.3.1 Euro VI Emisyon Testleri 15
2.3.1.1 WHSC 15
2.3.1.2 WHTC 16
2.4 Ağır Hizmet Motorunda Hava Yolu ve Emisyon İlişkisi 19
2.4.1 EGR oranının hesaplanması 21
2.4.2 EGR oranı ve kütle hava akışı kontrolünün önemi 23
2.5 Hava Kelebeğinin Hava Yoluna Eklenmesi 25
3. HAVA YOLU KONTROLÜ 27
3.1 Kapalı Çevrim Komponent Kontrolü 27
3.2 EGR Valf kontrolü 28
3.3 Hava Kelebeği Kontrolü 30
3.3.1 Hava kelebeği elemanları 30
3.3.1.1 Sensör 30
3.3.1.2 DC motor 31
3.3.2 Kontrolcü yapısı 31
3.4 Kütle Hava Akışı Kontrolü 35
3.4.1 Kontrolcü Tasarımı 35
3.4.1.1 Kütle hava akışı sensörü 36
3.4.1.2 Filtreleme 36
3.4.1.3 İleri besleme 37
3.4.1.4 PI kontrolcü 37
3.4.1.5 Saturasyon 38
3.4.1.6 Hava kelebeğinin kontrolcüye eklenmesi 38
4. KÜTLE HAVA AKIŞI KONTROLÜ UYGULAMASI 41
4.1 Cihazlar Arası Haberleşme 41
4.2 Kontrolcünün MicroAutoBox ile Çalıştırılması 42
4.3 PI ve İleri Besleme Parametrelerinin Belirlenmesi 44
4.4 Kontrolcü Uygulaması 45
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 49
5.1 Mekanik 49
5.2 Elektronik 49
5.3 Kalibrasyon ve Kontrol 50

5.4 Sensörler ve Analizörler 50
KAYNAKLAR 51
ÖZGEÇMİŞ 53

KISALTMALAR

AIRFLOW : Kütle hava akışı
Analog Output : Analog çıkış
CAN : Controller Area Network
CH4 : Metan
CO : Karbon monoksit
CO2 : Karbondioksit
ECU : Engine Control Unit
EGR : Egzoz Gazı Resirkülasyonu
EGR_RATE : EGR oranı
EGRvlv_DMD : Hedeflenen EGR valf pozisyonu
EGRvlv_pos : Ölçülen EGR valf pozisyonu
Engine Speed : Motor devri
Engine Torque : Motor torku
ESC : European Stationary Cycle
ETC : European Transient Cycle
LPFi : Alçak geçirgen filtre parametresi
MAF_Error : Kütle hava akışı hatası
MAF_Feedforward : Kütle hava akışı ileri besleme parametresi
MAF_Filtered_Error : Filtrelenmiş kütle hava akışı hatası
MAF_Setpoint : Hedeflenen kütle hava akışı
NH3 : Amonyak
NMHC : non-methane Hydrocarbons
NO2 : Nitrojendioksit
NonFilteredMAFError : Filtrelenmemiş kütle hava akışı
NOx : Azot Gazları
NOX_EX_CONTI : Egzozdan ölçülen NOx miktarı
O2_IN_CONTI : Emme manifoldundan ölçülen O2 miktarı
P_Diff : Basınç farkı
PM : Particulate Matter
PN : Particul Number
PWM : Pulse-width modulation
SCR : Selective Catalytic Reduction
SFC : Ölgül yakıt tüketimi
SPEED : Motor devri
THC : Total Hydrocarbon
THRvlv_DMD : Hedeflenen hava emiş valf pozisyonu
THRvlv_pos : Ölçülen hava emiş valf pozisyonu
Time : Zaman
Voltage : Voltaj
WHSC : World Harmonized Stationary Cycle
WHTC : World Harmonized Transient Cycle

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Dizel ağır hizmet motorları için emisyon limitleri ve değişimler..... 14
Çizelge 2.2 : WHSC noktalarını hesaplama çizelgesi..... 15
Çizelge 3.1 : Hava kelebeği elektriksel bağlantı çizelgesi. 31
Çizelge 3.2 : PID denklemleri açıklama çizelgesi. 32

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Bu çalışmada kullanılan Ford Otosan firmasına ait 9L motor. 2
Şekil 1.2 : Prototip EGR sistemi ve hava kelebeği ile donatılmış 9L ağır hizmet motoru. 3
Şekil 1.3 : Hava yolunda kullanılan EGR ile alakalı basınç ölçüm noktaları. 4
Şekil 1.4 : İstenen kütle hava akışına göre kapalı çevrim EGR ve hava kelebeği kontrolü. 6
Şekil 2.1 : Aşırı doldurmalı dizel motorlarda kullanılan turboşarj sistemi. 9
Şekil 2.2 : 6 silindirli 9L ağır hizmet motorunun hava yolu ve gaz akış diagramı. 10
Şekil 2.3 : EGR sistemi ve komponentleri. 11
Şekil 2.4 : Kelebek EGR valf.. 12
Şekil 2.5 : Hava kelebeği. 13
Şekil 2.6 : Hava kelebeği pozisyonuna göre emme manifoldu basınç değişimi. 13
Şekil 2.7 : Euro VI emisyon limitlerini sağlayabilecek örnek bir sistem 14
Şekil 2.8 : Örnek güç eğrisi için WHSC noktalarının motor haritasındaki yeri. 15
Şekil 2.9 : Örnek güç eğrisi için WHTC noktalarının motor haritasındaki yeri. 16
Şekil 2.10 : Örnek bir güç eğrisi için ETC ve WHTC testinin karşılaştırılması. 17
Şekil 2.11 : Örnek güç eğrisi için simülasyonu koşulmuş olan WHTC testinde motor hızı. 18
Şekil 2.12 : Örnek güç eğrisi için simülasyonu koşulmuş olan WHTC testinde motor torku. 19
Şekil 2.13 : Hava kelebeği pozisyonuna göre emme manifoldu ve EGR soğutucusu arasındaki basınç farkı. 20
Şekil 2.14 : EGR oranına göre motor çıkışı NOx emisyonlarındaki değişim. 21
Şekil 2.15 : EGR Oranı hesaplaması için oksijen yüzdesinin ölçüldüğü noktalar. 22
Şekil 2.16 : Temiz havadaki oksijen değerinin sensör ile okunması. 23
Şekil 2.17 : EGR valfinin tam açık pozisyonunda motor haritasındaki EGR oranları. 23
Şekil 2.18 : EGR valfinin tam açık pozisyonunda motor çıkışı NOx miktarları, [g/kWh]. 24
Şekil 2.19 : WHTC testi sonucunda EGR oranına ve motor çıkışı NOx emisyonuna göre kritik bölgeler. 25
Şekil 2.20 : Hava kelebeği pozisyonunun motor çıkış NOx emisyonlarına etkisi. 25
Şekil 2.21 : Hava kelebeği pozisyonuna göre EGR oranı ve özgül yakıt tüketimi değişimi. 26
Şekil 3.1 : CANalyzer programında EGR valfi pozisyon tepkisi grafiği. 28
Şekil 3.2 : 1500 RPM'de EGR valf pozisyonunun egzoz akışına etkisi. 29
Şekil 3.3 : 2000 RPM'de EGR valf pozisyonunun egzoz akışına etkisi. 29
Şekil 3.4 : Hava kelebeği pozisyon sensörü voltaj değerleri. 30
Şekil 3.5 : Hava kelebeği kontrolcü yapısı. 31
Şekil 3.6 : Hava kelebeği kontrolcüsünün denenmesi. 33
Şekil 3.7 : PI parametrelerinin optimize edilmesi. 33

Şekil 3.8 : Hava kelebeği kontrolcüsünde PID parametrelerinin optimize edilmiş hali. 34
Şekil 3.9 : Optimize edilmiş parametrelerle hava kelebeği kontrolcüsünün cevabı. . 34
Şekil 3.10 : 1200 RPM'de hava kelebeği kontrolcüsünün denenmesi ve kütle hava akışına etkisi. 35
Şekil 3.11 : EGR valf pozisyonu kontrol edilerek tasarlanan kütle hava akışı kontrolcüsü. 36
Şekil 3.12 : Alçak geçirgen filtre tasarımı. 37
Şekil 3.13 : Alçak geçirgen filtre testi. 37
Şekil 3.14 : Motor hızı ve hataya bağlı PI kontrolcü yapısı. 38
Şekil 3.15 : Kütle hava yolu kontrolcüsü. 39
Şekil 4.1 : Cihazlar arası haberleşme. 42
Şekil 4.2 : CAN veri tabanının oluşturulması. 42
Şekil 4.3 : Kontrolcünün dSpace MicroAutoBox ile kullanılması. 43
Şekil 4.4 : Simulink CAN haberleşme blokları. 43
Şekil 4.5 : Sistem çalışır haldeyken dSpace ControlDesk görüntüsü. 44
Şekil 4.6 : 1275RPM 600Nm'de sistem cevabı. 45
Şekil 4.7 : 1275RPM ve 600Nm'de EGR valfi ve hava kelebeği pozisyonları. 46
Şekil 4.8 : Sabit olmayan motor hareketinde kontrolcünün denenmesi. 46
Şekil 4.9 : Sabit olmayan motor hareketinde EGR valfi ve hava kelebeği cevabı. ... 47

AŞIRI DOLDURMALI AĞIR HİZMET MOTORUNUN HAVA YOLU KONTROLÜ VE UYGULAMASI

ÖZET

2016 yılından itibaren ülkemizde de uygulanacak olan Euro VI emisyon regülasyonunun gerektirdiği NOx limitleri, sadece yakıt sisteminde yapılacak zamanlama ve basınç gibi parametre optimizasyonları ile sağlanamayıp, aynı zamanda EGR, DPF ve SCR gibi farklı uygulamaların kullanılmasını zorunlu hale getirmektedir.

Bu çalışma kapsamında hali hazırda Euro I-III-IV-V emisyon regülasyonlarını sağlayan aşırı doldurmalı bir ağır hizmet motoru, Euro VI emisyon regülasyonunu sağlaması için prototip parçalar kullanarak EGR sistemi ve hava kelebeği ile donatılmış, NOx emisyonlarının düşürülmesi amacıyla kütle hava akışı kontrolü yapılmıştır.

Birinci bölümde, tezin konusu, kapsamı ve amacı hakkında genel bilgiler verilip, kullanılan motor tanıtılmıştır. Kütle hava yolu kontrolü yapılacak prototip motor üzerindeki ölçüm noktaları gösterilerek kütle hava akışı kontrolünde nelerin kritik olduğu anlatılıp, EGR sistemi ve hava kelebeği hakkında bilgiler verilmiştir. Literatürde kütle hava akışı kontrolü metodları üzerine araştırma sonuçları paylaşılıp, kontrolcü hakkında genel bilgiler verilmiştir.

İkinci bölümde, bu çalışma kapsamında kullanılan motorun hava yolu tanıtılmıştır. Motor üzerindeki aşırı doldurma sistemi ile birlikte prototip parçalar kullanılarak motor üzerine takılan EGR sistemi ve hava kelebeği komponentleri tanıtılarak karakteristikleri hakkında bilgi verilmiştir. Bu komponenetler kullanılarak gerçekleştirilen test sonuçları paylaşılmış, hava yolundaki basınç değişimleri ve NOx emisyonlarına etkileri gösterilmiştir. Ayrıca, Euro VI emisyon regülasyonu testleri hakkında bilgi verilerek, motor haritası üzerinde gösterilip yorumlanmıştır.

Üçüncü bölümde hava yolu kontrolü yapmak için gerekli olan EGR valfi ve hava kelebeğinin kapalı çevrim kontrolü kullanılan metodlar ve haberleşme yapıları ile anlatılmıştır. Hedeflenen ve ulaşılan değerler arasındaki farklar incelenip, kütle hava akışı kontrolcüsünün genel yapısı hakkında bilgi verilmiştir.

Dördüncü bölümde, hava yolu kontrolü yapmak için kullandığımız cihazların ve sensörlerin birbirleri ile olan iletişimi anlatılarak, birbirinden farklı yapıda olan bu cihazların nasıl bir arada çalıştırıldığı anlatılmıştır. Bu sistem ile koşulan test sonuçları paylaşılarak, tasarlanan kontrolcünün nasıl çalıştığı gözlenip, EGR valfinin ve hava kelebeğinin pozisyonları gösterilmiştir.

Son bölümde ise mekanik, elektronik, kalibrasyon ve kontrol, sensörler ve analizörler açısından sonuçlara ve önerilere yer verilmiştir.

MASS AIR FLOW CONTROL AND APPLICATION OF A TURBOCHARGED HEAVY DUTY DIESEL ENGINE

SUMMARY

With increasingly stringent emissions regulations, especially for nitrogen oxides, emission control using only injection parameters has become insufficient and application of additional technologies and new technologies for engine development has become necessary.

European emission regulations standardize the applicable limits for carbon monoxide, hydrocarbon, nitrogen oxide, particulate matters and smoke. These limits were first introduced as Euro I levels in 1992 where the NOx, PM, CO and HC limits were implemented. Since then, emission limits have been updated every 3-5 years. Currently, Turkey enforces Euro V limits where the emission limit is 2 g/kWh for NOx. In 2014, Euro VI emissions will be introduced for the first time across Europe and some of the neighbouring countries. In Turkey, these limits will come into effect in 2016. These limits, compared to those of Euro I, represent a 95% reduction in NOx. Heavy-duty Euro VI emission levels, tests and other diagnostic information are based on 595/2009/EC directives. Most challenging emission level is nitrogen oxides, which is regulated as 0.4 g/kWh, previously 2 g/kWh at Euro V emissions.

Emission regulations depends on vehicles tonnage and reference weights greater than 2610 kg classified as heavy duty vehicles. Heavy duty emission regulations are stricter than light duty and passenger can emission regulations, because of this situation diesel engine and emission technologies focus on heavy duty engines within last years. There are many ways to reduce nitrogen oxides emissions, which is the most challenging one. Using injection timing optimization, using higher rail pressure and exhaust gas recirculation is the main parameters for engine out nitrogen oxides emissions. Using exhaust gas recirculation system can cause high particulate matter. To avoid of this situation, high rail pressure is required for better combustion for engines with EGR system.

Aftertreatment technology is also very important to achieve Euro VI emission limits. Aftertreatment components are Diesel Oxidation Catalyst (DOC), Diesel Particulate Filter (DPF), and Selective Catalytic Reduction (SCR). DOC is required for burning fuel at the exhaust to start regeneration at the DPF. DPF is mendatory to achive particulate matter limits, which is 0.01 g/kWh and particul number limits, which is 6×10^{11} #/kWh. Using selective catalytic reduction and exhaust gas recirculation technology together is a way to achieve nitrogen oxides limit.

In the scope of this project, a turbocharged engine, which is compatible with Euro I-III-IV-V regulations, is equipped with air intake throttle valve and EGR system in order to make it suitable to engine out Euro VI emissions. By positioning EGR valve and air intake throttle valve, mass airflow can be controlled and required EGR rate satisfied.

In Heavy Duty trucks with fixed geometry turbochargers, it has been shown that even with the EGR valve fully open, EGR may not flow under all circumstances to ensure compatibility with Euro VI emissions standards, thus requiring the use of an air intake throttle valve to further assist EGR flow. Basic principle of a high pressure EGR system is letting exhaust gas in to cylinders. This condition needs pressure difference between intake and exhaust manifolds. Negative pressure difference of boost pressure and EGR cooler outlet pressure satisfies the EGR flow, else is not possible. Because of turbo characteristics, this difference may not big enough for some points at engine map to flow enough exhaust gas in to the cylinders; even reverse flow could be possible.

At normal condition using an air intake throttle valve is not expected at diesel engines, if used, general usage area is increasing temperature at engine out gas temperatures for regeneration. In this study, throttling used for additional pressure drop at the intake system. This condition generates pressure difference across the exhaust and intake manifolds so that, exhaust gas flow can flow in to cylinders. However, this condition increases specific fuel consumption. Thus, air intake throttle valve should not be used unnecessarily.

There are of course other technologies which can be used to get a similar result as using air intake throttle valve. An example of such a technology is Variable Geometry Turbocharging (VGT) wherein the same boost pressures required and attained by a Fixed Geometry Turbo (FGT) can be achieved by a smaller turbo, resulting in a higher delta pressure across the EGR system. As it is this pressure difference which drives the EGR flow, a similar result to throttling can be realized in terms of the increase in EGR flow. However, the VGT technology has a large cost penalty and in light of the importance of cost effective engines and due to competition, this is an on-cost which is usually not acceptable.

In the first part, the purpose of thesis and topic are provided and engine that is used for the project is explained. Measurement points on the prototype engine are shown and what is critical in mass airflow control is clarified. Air path control is mandatory to achieve Euro VI emissions and EGR system is one of the key components for this. Typical systems for airflow control are Exhaust Gas Recirculation (EGR), air intake throttle valve and variable geometry turbocharger. In this thesis, fixed geometry charged turbo is used, EGR valve and air intake throttle valve is used for air path control. EGR rate measurement principle is explained for understanding exhaust gas flow rate in to the cylinders. Besides, EGR system and throttle valve are defined, the results of different researches on mass airflow control and general information about controller are shared. Various tests are performed to understand the characteristics of the air path of the engine. These tests performed by using high precision sensors and analyzers.

In the second part, air-path of the engine is described. Turbocharged engine with prototype EGR system and throttle valve and its characteristic are explained. Test results of these experiments are shared and pressure change in air path and its effects on nitrogen oxides emissions are depicted. EGR rate, which is critical for nitrogen oxides emissions, calculation and characteristics with respect to throttle valve position described. Furthermore, European Emissions Regulations are explained, including details about the Euro VI emissions regulation, the drive cycle used to evaluate the emissions and its general residency areas, followed by pre-experiments. Euro V emission cycles and Euro VI emission compared and it is shown that Euro VI

transient emission cycle is more aggressive. The relationship between nitrogen oxides emissions and mass airflow is further explained, and data at various engine rpms is shared. Measurement instrumentation points used in these tests and the formulation to calculate EGR rate from these is also detailed. This prototype engine is equipped with various sensors and analyzers. Measuring pressures and temperatures at the air path is important to understand EGR flow characteristics. For this reason, intercooler outlet pressure, boost pressure, EGR cooler outlet pressure, intake and exhaut manifold oxygen and nitrogen oxides levels online monitored and recorded.

In the third part of this thesis, steps for the design of closed loop controllers for the EGR and intake air throttle valves is detailed, followed by a controller for closed loop mass air flow control. CAN communication and database explained for EGR valve and closed loop actuator control performed for air intake throttle valve. Air intake throttle valve controlled via H-Bridge DC motor driver and PID controller. Setpoint and measured position of the actuator recorded and compared. Mass airflow control, which is the main part of this thesis, is also described in this section. PID controller used and this block is the fundamental control logic. The input to the controller is the error signal, which is the difference between demand and measured mass air flow. PID controller outpus is generated by summing the outputs and the error signal, which is fed to proportional, integral and sometimes derivative terms, which is not used in this study. Not only calibrating mass airflow controller, proportional, integral and derivative terms correctly, but also closed loop EGR position control and air intake throttle valve control has to be working correctly for mass airflow control. Air intake throttle valve should only be used when EGR rate is not enough to meet nitrogen oxides emissions while the EGR valve is fully open. Minimum and maximum functions used for activating air intake throttle valve only if the EGR valve position is fully opened. Air intake throttle valve should have a maximum position to avoid of smoke at exhaust because of less air.

In the fourth part of this thesis, application of the mass airflow control performed and results are shared. One steady state and one transient test performed and EGR valve position, air intake throttle valve position, mass airflow, error and emission results observed. Communication structure of different kind of devices is also detailly explained. AVL Puma system is used for controlling speed, torque, EGR valve and air intake throttle valve positions, sensors and analyzers. However, EGR valve and intake air throttle valve setpoints are calculated by controller, which runs at dSpace MicroAutoBox, and feed directly to AVL Puma system. PI and feed forward parameters can be calibratible via dSpace ControlDesk and observing system response online is possible. These parametres also determined in this section. Determining PI parameters for the points at engine map could cause a high calibration effort due to engine characteristics difference at the engine map. Thus, only a few important points at the engine map calibrated and tested due to engine and the parts are prototype. However, same steps can be followed for entire engine map.

In the final part, results in the respect of mechanical, electronical, calibration and control, and sensor and analyzer are provided and suggestions are presented. Dynamometer tests shows that, turbo charged system that used on standard diesel engines cause high intake manifold pressure on some WHSC and WHTC points, and this situation effect EGR flow negatively. Using air intake throttle valve solves this problem with fuel economy penalty.

1. GİRİŞ

1.1 Tezin Konusu ve Amacı

Yasal emisyon limitlerinin gittikçe sıkılaşması ve otomotiv sektöründeki rekabet motor geliştirme teknolojilerinde yeni stratejilerin oluşmasına yol açmıştır. Kullanılan sistemler temelde çok yeni olmasa da hem emisyon limitlerini sağlamak hem de sürücü beklentilerini karşılamak adına bu sistemlerin daha verimli kullanılmasını zorunlu kılmıştır.

Hava ve yakıt sistemindeki büyük değişim daha iyi yakıt ekonomisi sağlamak adına motorun mekanik limitlerinde çalıştırılmasına sebep olmakta, aynı zamanda emisyon limitleri dahilinde kalınması zorunluluğu bir çok motor ekipmanının kontrol ve kalibrasyonun sistematik bir şekilde ilerlemesini gerektirmektedir.

Bu gelişme ve değişimler ağır hizmet motorlarında da değişikliklere sebep olmuş, günümüzde özellikle Euro VI emisyon regülasyonunun getirdiği limitleri sağlamak adına birçok farklı teknoloji ve elektro-mekanik parça kullanılmasına sebep olmuştur. Dizel motorların güç üretmesine bir katkıda bulunmayan, emisyon amaçlı kullanılan EGR ve SCR gibi sistemler aktüatörler içermekte, bununla birlikte ECU içerisinde bu konu ile alakalı bir çok algoritma koşmasına sebep olmakta, ciddi bir kalibrasyon ve kontrol yükü getirmektedir.

Emisyon regülasyonları araç tonajına göre belirlenmekte olup, referans kütlesi 2610 kg'ı aşan araçlar ağır hizmet aracı olarak sınıflandırılmaktadır [1]. Euro VI regülasyonun hafif ticari araçlar ve yolcu araçları için geçerli olan regülasyondan çok daha sıkı olması sebebiyle dizel motor ve emisyonu geliştirme çalıştırmaları son dönemde ağır hizmet motorlarına odaklanmış durumdadır.

Dizel motorlardan yayılan ve zararlı etkileri son derece büyük olan nitrojen oksit NOx gazını azaltmak için farklı yöntemler mevcuttur. Motor çıkışı emisyonlarında enjeksiyon zamanlaması yapılarak emisyon ve özgül yakıt tüketimi optimizasyonu yapılabilir, enjeksiyon zamanlaması dışındaki en temel teknik ise egzoz gazı devridaimi kullanmaktır (EGR). Euro IV ve Euro V emisyon limitlerini sağlamak

için yalnız SCR teknolojisi kullanılabilirken, Euro VI emisyon limitleri dahilinde kalabilmek için EGR ve SCR teknolojilerinin bir arada kullanılması ile daha stabil bir sistem sağlanabileceği düşünülmüştür. Bununla birlikte, normal şartlar altında dizel motorlarda kullanımına gerek olmayan hava kelebeğinin Euro VI çalışmaları için kullanım amacı anlatılmıştır.

Bu çalışmada, sabit geometrili turbo kullanan bir ağır hizmet motorunun, motor çıkışı NOx emisyonlarının istenen miktara düşürülmesi için EGR valfi ve hava kelebeği pozisyonları kontrol edilerek kapalı çevrim kütle hava akışı kontrolcüsü tasarlanmış ve dinamometrede gerçeklenmiştir. Uygulama kapsamında kapalı çevrim EGR ve hava kelebeği pozisyon kontrolü yapılıp deneysel sonuçlar paylaşılmıştır.

1.2 Tezin Kapsamı

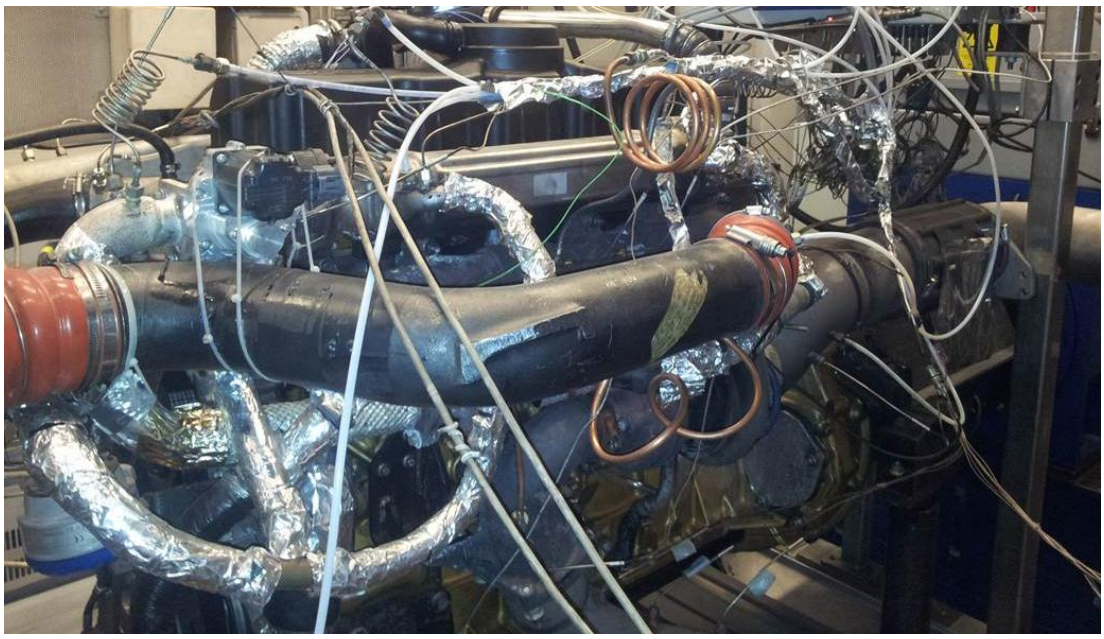
Tez kapsamında Şekil 1.1'de gösterilen Ford Otosan firmasına ait ve şu an üretimde olan normalde EGR sistemi ve hava kelebeği içermeyen 6 silindirli, 9 litre bir motor kullanılmıştır.



Şekil 1.1 : Bu çalışmada kullanılan Ford Otosan firmasına ait 9L motor [2].

Sabit geometrili turbo kullanan bu motora, prototip parçalar kullanılarak EGR sistemi takılmış ve hava kelebeği eklenmiştir. Şekil 1.2'de görülebileceği gibi motor enstrümante edilerek dinamometreye bağlanmış ve çalışmalara bu haliyle devam edilmiştir. Sonradan eklenen bu komponentlerin kontrolü motorun kendi elektronik

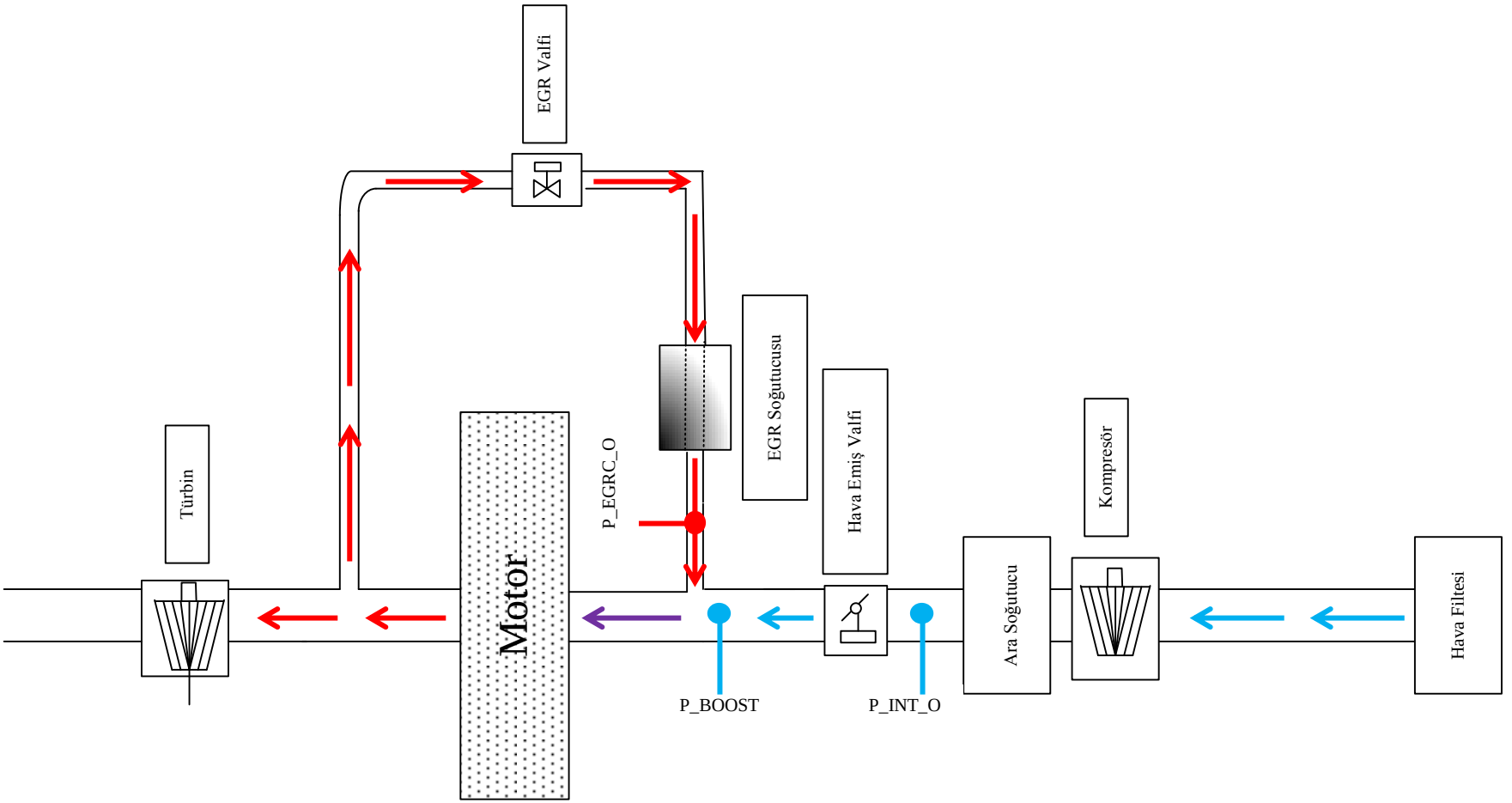
kontrol ünitesi tarafından desteklenmediği için bu çalışma kapsamında kurulan sistemlerle dışarıdan kontrol edilip detaylı şekilde anlatılmıştır.



Şekil 1.2 : Prototip EGR sistemi ve hava kelebeği ile donatılmış 9L ağır hizmet motoru.

EGR sistemi ile donatılmış sabit geometrili turbo kullanan ağır hizmet motorunda yeterli EGR oranı elde etmek için EGR valfi açılarak egzoz gazının emme manifolduna akışı sağlanır ve istenen orana ulaşıncaya kadar bu devam eder. Fakat sabit turbonun getirdiği dezavantaj ile emme manifoldu basıncı kontrol edilememekte, bu sebeple emme manifoldu basıncı EGR soğutucusu çıkış basıncından büyük olduğu durumlarda EGR valfi ne kadar açılırsa açılsın EGR akışı elde edilememekte olup basınç ölçüm noktaları Şekil 1.3'te gösterilmiştir. EGR soğutucusu basıncının emme manifoldu basıncından düşük olmasının sebepleri ise EGR valfinin, EGR soğutucusunun ve boruların getirdiği basınç düşüşleri ve turboşarj karakteristiğidir. Bu sebeple emme manifoldu girişine hava kelebeği eklenerek istenen emme manifoldu basıncı sağlanır ve istenen EGR gaz akışına ve oranına ulaşılır.

Euro VI emisyon regülasyonunun sağlanabilmesi amacıyla Bölüm 3'te egzoz gaz resirkülasyon oranının belirli bir seviyede tutulması için Matlab – Simulink ortamında hava yolu kontrolcüsü tasarlanmış ve motor haritasında istenen bölgede istenen EGR oranının elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu kontrolcü ile hava yolu aktüatörleri olan EGR ve hava kelebeği pozisyon kontrolü yapılmıştır.



Şekil 1.3 : Hava yolunda kullanılan EGR ile alakalı basınç ölçüm noktaları.

Normal şartlarda bir dizel motorda hava kelebeği kullanılması beklenmez, kullanıldığında ise genel kullanım amacı motor sonrası emisyon düşürme komponentlerinin yüksek sıcaklık gereksinimi duyduğunda hava kelebeğinin kapatılarak giren oksijenin azaltılması ve zengin veya zengine yakın yanma sağlanarak yüksek sıcaklığa ulaşmasının sağlanmasıdır (Şenoğuz, 2008). Bu şekildeki bir yanma yüksek yakıt tüketimine sebep olmaktadır. Bu çalışmada motor sonrası istenen emisyon düzeyine ulaşılması için belli bir EGR oranının gerekliliği gösterilmiş, bunun için ise EGR valfinin tam olarak açılması durumunda dahi EGR akışına ulaşılamadığı deneylerle anlatılmıştır. EGR valfinin tam açık olduğu noktalarda EGR akışı elde edilemediğinde hava kelebeği devreye girerek emme manifoldu basıncını düşürüp istenen kütle hava akışı sağlanabilir. Burada kritik olan nokta yakıt ekonomisinin en az seviyede etkilenmesi için hava kelebeğinin sadece tam açık EGR valf pozisyonunda devreye girmesidir. EGR akışının sağlanabileceği basınç durumlarını;

P_EGRC_O : Ara soğutucu çıkış basıncı,

P_BOOST : Emme manifoldu basıncı,

P_INT_O : Ara soğutucu çıkış basıncı ise,

Yalnız EGR valfi kullanılması durumunda,

$$P_EGRC_O > P_INT_O \cong P_BOOST$$

EGR ve hava kelebeği birlikte kullanıldığında,

$$P_EGRC_O > P_INT_O > P_BOOST$$

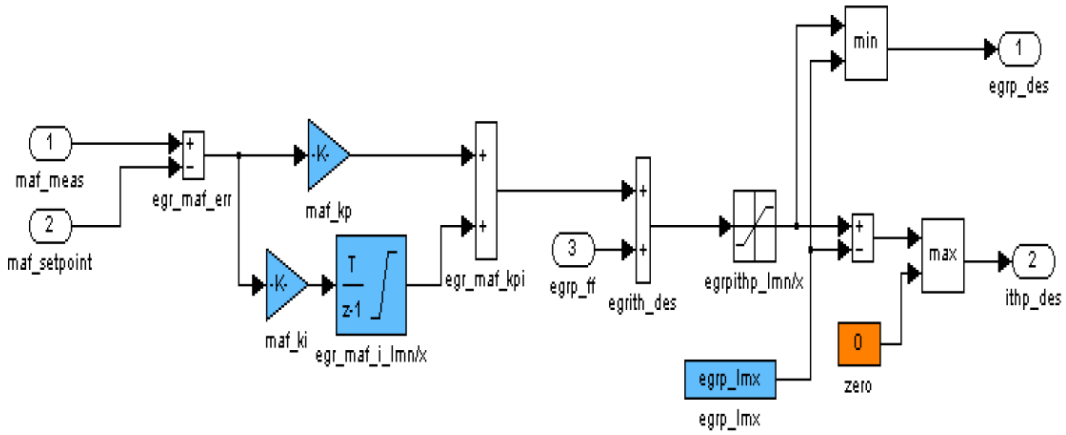
şeklinde özetlenebilir.

Bu çalışma kapsamındaki amaç, istenen EGR oranına ulaşmak için gerekli emme manifoldu basıncına ulaşmak, bir anlamda bu noktadaki kütle hava akışını kontrol etmektir. Kütle hava akışı kontrol edilerek basınçlar istenilen seviyelere ayarlanabilir.

EGR valfi tam kapalı pozisyonda (%0 pozisyonu), hava kelebeği ise tam açık pozisyonda (%0 pozisyonu) iken motorun alabileceği hava maksimumdur. Tasarlanan kontrolcü istenen kütle hava akışı miktarına göre önce EGR valfi, EGR valfin tam açık pozisyonda olmasına rağmen istenen kütle akışına ulaşılamadığı

durumda ise hava kelebeği pozisyonunu kontrol etmektedir. Hava kelebeğinin yalnız EGR valf pozisyonunun tam açık durumundayken devreye girmesi, özgül yakıt tüketimine negatif etkisinin azaltılması hedeflendiğindendir.

Nieuwstadt (2003), kütle hava akışı kontrolü için PI kontrolcü tasarlayarak ölçülen (maf_meas) ve istenen (maf_setpoint) kütle hava akışı arasındaki farkı (egr_maf_err) oransal ve integral etki ile kullanarak kontrolcü çıkışını EGR valf pozisyonuna (egrp_des) bağlamış, EGR valfin tam açık pozisyonunda yeterli olmaması durumunda ise hava kelebeği valf pozisyonunu (ithp_des) kontrol etmiştir. Kontrolcüde egrp_lmx maksimum EGR valf pozisyonunu ifade etmektedir. Kütle hava yolu kontrolcüsü bu şekliyle tek girişli ve tek çıkışlı bir sistem halini almaktadır.



Şekil 1.4 : İstenen kütle hava akışına göre kapalı çevrim EGR ve hava kelebeği kontrolü [3].

Bu sistemde kontrolcü çıkışı,

$$ControllerOutput = \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right)\left(maf_{meas} - maf_{setpoint}\right) + Feedforward$$

EGR valf pozisyonu,

$$egrv_des = \min(ControllerOutput, egrp_lmx)$$

Hava kelebeği pozisyonu ise,

$$THRV_{pos} = \max(0, ControllerOutput - \text{egrp_lmx})$$

şeklinde ifade edilebilir.

Max fonksiyonu içerisinde 0 kullanılmasının sebebi ise hava kelebeğine negatif pozisyon isteği gitmemesi içindir. Hava kelebeğinin sadece kontrolcü çıkışı ile

maksimum EGR valf pozisyonu arasındaki farkın 0'dan büyük olması durumunda çalışmasını sağlar, bu da EGR valfinin tam açık pozisyonunda istenen kütle hava akışının hala sağlanamadığı durumda mümkün olur.

Dinamik bir sistem olan motor hava yolu, her devirde ve yükte farklı karakteristik gösterir. Bu sebeple bu çalışmada tasarlanan kontrolcüde oransal ve integral etki parametreleri için haritalar kullanılarak motor haritasındaki her noktada kontrolcünün çalışması düşünülmüştür.

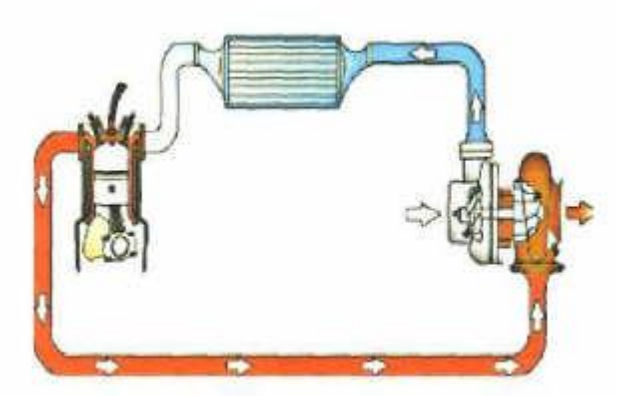
Tezin son kısmında sonuçlar paylaşılmış, bu çalışma sonucundaki tavsiyelere yer verilmiştir.

2. HAVA YOLUNA GENEL BİR BAKIŞ VE ÖN DENEYLER

2.1 Aşırı Doldurma

Dizel motorlarda motorun gücü silindir içerisine püskürtülen yakıt ve bu yakıtın yanmasını sağlayacak hava miktarı ile orantılıdır. Aynı silindir hacmine sahip bir motordan daha fazla güç alınması için, püskürtülen yakıt miktarının kontrol edilebildiği düşünülürse, silindir içerisine alınacak hava miktarının artırılması gerekir. Doğal emişli bir motorda bu sağlanamaz. Silindir içerisine daha fazla hava almanın tek yolu harici bir kompresör ile hava vermektir.

Kullanılan en yaygın sistem türbo şarj sistemidir. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi bu sistemde türbin egzoz manifoldu sonrasına bağlanarak egzoz gazları ile döner, kompresöre bir mil ile bağlı olan türbin silindir içine daha fazla hava girmesini sağlar. Bu sayede volümetrik verim artmakta, aynı hacme sahip bir motordan daha fazla güç elde edilmektedir.

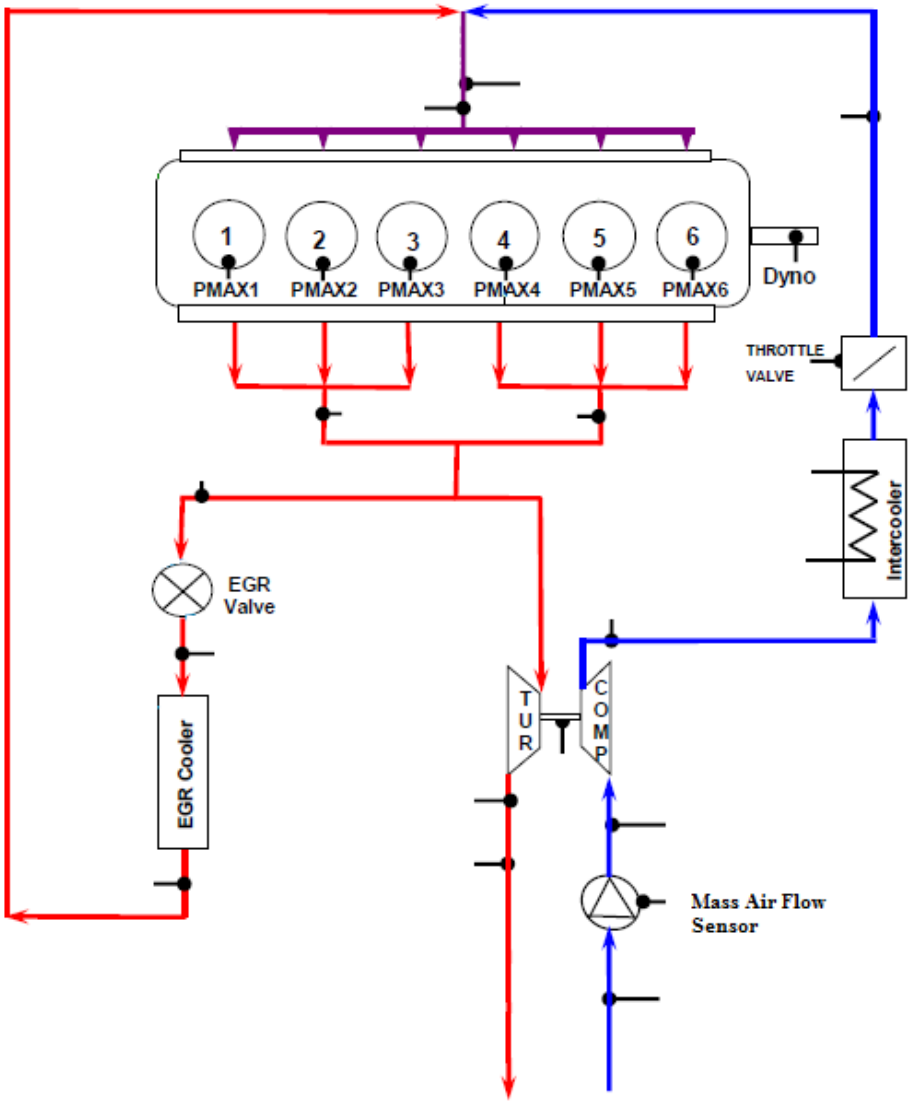


Şekil 2.1 : Aşırı doldurmalı dizel motorlarda kullanılan turboşarj sistemi [4].

2.2 Aşırı Doldurmalı Ağır Hizmet Motorunda Hava Yolu ve Komponentleri

Bu çalışmada kullanılan ağır hizmet motorunun hava yolu Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Mavi renkle temsil edilen kısım temiz hava borularını, kırmızı renkle gösterilen kısım egzoz gazlarının geçtiği kısmı, mor renkle gösterilen kısım ise yanma odasına

girecek temiz hava ve egzoz gazı karışımını göstermektedir. EGR valfi ve hava kelebeği de yine bu şekil üzerinde gösterilen konumlarda bulunmaktadır.



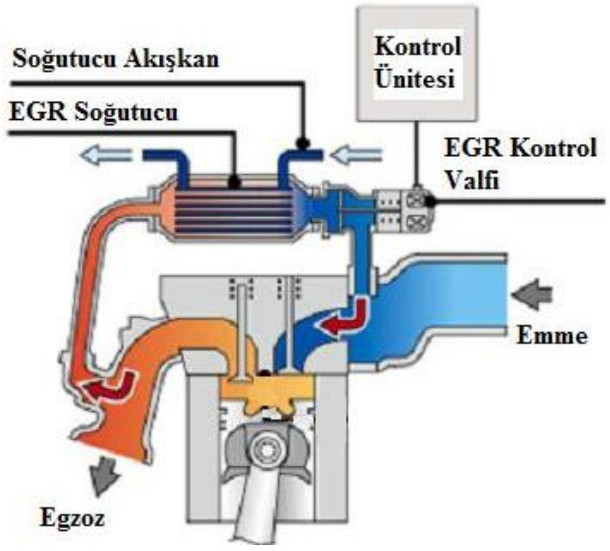
Şekil 2.2 : 6 silindirli 9L ağır hizmet motorunun hava yolu ve gaz akış diyagramı.

Giriş bölümünde EGR soğutucusu çıkış basıncının emme manifoldu basıncından küçük olması durumunda EGR gaz akışının olmayacağından bahsedilmişti. Hava yolunda bulunan her komponent gaz akışı üzerinde bir direnç etkisi göstermektedir. Motordan çıkan egzoz gazının EGR valfi ve EGR soğutucusu üzerinden geçerken meydana gelen basınç düşüşü ne kadar fazla ise EGR akışı o kadar kötü yönde etkilenir. Bu sebeple hava yolunda az basınç düşüşü yaratacak komponentler kullanmak EGR oranının artırılabilmesi açısından önemlidir. En büyük basınç düşüşü yaratacak komponentler EGR soğutucusu ve EGR valfidir.

Bununla birlikte, bu çalışmada istenen bölgede istenen EGR akışının elde edilmesi EGR valfi ve hava kelebeği pozisyonlarının kontrolü ile olacaktır. Bu valflerin kapalı çevrim pozisyon kontrolleri Bölüm 3'te anlatılmıştır.

2.2.1 EGR sistemi

Şekil 2.3'te gösterilen EGR sistemi, egzoz manifoldundan alınan egzoz gazlarının EGR soğutucusundan geçirilip soğutulmasının ardından temiz hava ile karıştırılarak yanma odasına alınmasını sağlamaktadır. Egzoz gazında bulunan karbondioksit havadan ağırdır ve özgül ısısı havaya göre yüksektir. Bu etkinin sayesinde yanma sırasında oluşan ısıyı emer, oksijen ve azot derişimleri de düştüğü için yanma sonucu oluşan NOx gazının azalmasını sağlar. Kritik olan nokta, hangi motor yükünde ve motor hızında ne kadar EGR gazının yanma odasına alınacağıdır. EGR oranının az olması durumunda yeteri kadar NOx düşüşü sağlanamayabilir, fazla olması durumunda ise yakıt tüketimi ve PM artışına sebep olabilir.



Şekil 2.3 : EGR sistemi ve komponentleri [5].

EGR sisteminin aşırı doldurmalı bir ağır hizmet motorunda kullanımı sırasında istenen miktarda EGR miktarının silindir içine alınması sırasında bazı problemlerle karşılaşılmaktadır. Temel olarak EGR gazının hava emiş hattına geri verilmesi sırasında ne kadar akacağı EGR gazının basıncı ve hava emiş hattındaki basınç ile direkt alakalıdır. Egzoz gazının egzoz manifoldundan alınıp hava emiş hattına geri verilmesi sırasında yaşanacak basınç kayıpları emme manifoldundaki basıncın daha yüksek kalmasına sebep olabilir, bu durumda gaz devridaimi sağlanamaz. Böyle bir durumla karşılaşıldığında Şekil 2.4'te örnek olarak gösterilen EGR valf pozisyonu

değiştirerek yeteri kadar akış olması sağlanır. EGR valfi normalde kapalı olan bir valf olup %0 EGR pozisyonu tam kapalı durumu ifade eder.



Şekil 2.4 : Kelebek EGR valf [6].

2.2.2 Hava kelebeği

Aşırı doldurmalı dizel motorlar doğası gereği normal şartlar altında hava kelebeği barındırmazlar. Bunun sebebi ise tork kontrolünün hava ile değil yakıt ile olmasındandır. Yüksek teknolojili dizel motorlarda kullanılmaya başlanan hava kelebeği, temel olarak daha verimli DPF (Dizel Partikül Filtresi) rejenerasyonu sağlamak içindir. Emme hattında kullanılan bu valf ile motor içerisine alınacak oksijen miktarı kontrol edilerek DPF rejenarasyonu için gerekli sıcaklık sağlanır.

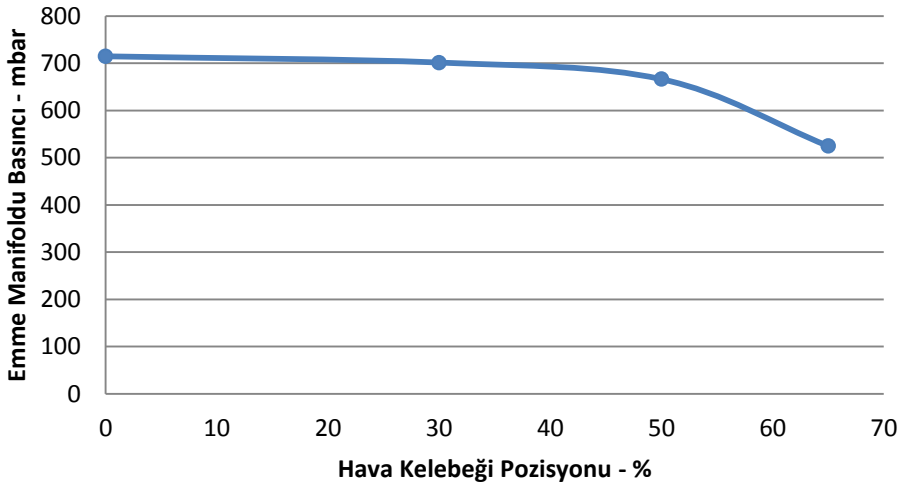
Euro VI emisyon regülasyonundaki PM (Partikül Madde) sınırı, daha önceki emisyon regülasyonlarından daha sıkı olduğu için, Euro VI çalışmalarında DPF kullanılmasını zorunlu kılmıştır. DPF kullanan bir sistemde ise verimli rejenerasyon için hava kelebeği kullanılması kaçınılmazdır.

Bu çalışmada hava kelebeği asıl amacı dışında kullanılmış, valfin kapanması ile meydana gelen basınç düşüşü ile EGR akışının sağlanamadığı bölgelerde EGR akışı elde edilmesinde kullanılmıştır. Şekil 2.5.'te örnek olarak gösterilen hava kelebeği normalde açık olan bir valf olup %0 pozisyonu tam açık halini ifade etmektedir.



Şekil 2.5 : Hava kelebeği [7].

WHSC testinin 9. noktasında yapılan bir deneyde, hava kelebeği pozisyonu yaklaşık %40'a gelene kadar ihmal edilecek düzeyde basınç düşüşüne sebep olup, sonrasında ise etkili olmuştur. Dinamometrede gerçeklenen bu deneyin sonucu Şekil 2.6.'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6 : Hava kelebeği pozisyonuna göre emme manifoldu basınç değişimi.

2.3 Euro VI Emisyon Yönetmeliği ve Getirdiği Zorunluluklar

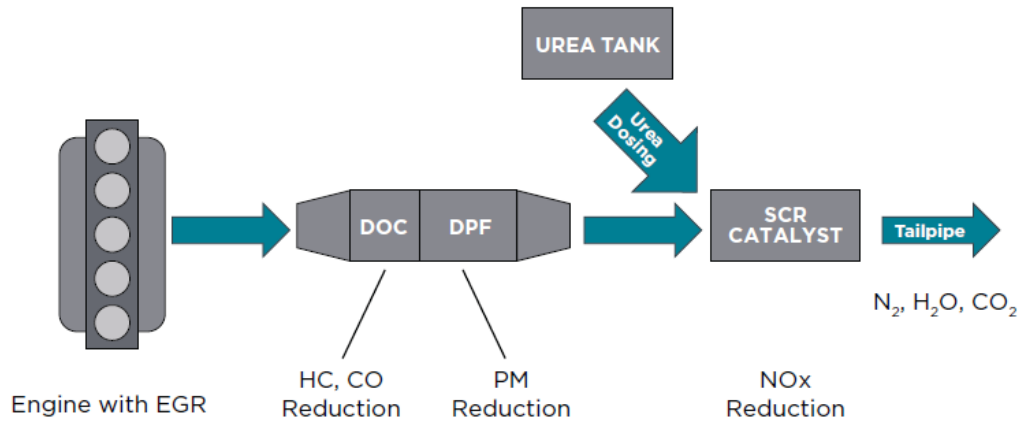
Euro VI emisyon limitleri hem daha önceki ağır ticari taşıtlar için geçerli olan emisyon limitlerine göre hem de yolcu ve hafif ticari araç emisyon limitlerine göre oldukça sıkıdır. Çizelge 2.1.'de görüleceği üzere eskiye oranla en ciddi sınırlama NOx emisyonları üzerinedir. Euro VI NOx limitleri, Euro V NOx limitlerine göre yaklaşık 5 kat daha düşüktür.

Test / Emission			EU-I	EU-II	EU-III	EU-IV	EU-V	EU-VI
			1992	1996	2000	2005	2008	2013
ESC (WHSC) Test cycle	CO	g/kW-h	4,50	4,00	2,10	1,50	1,50	1,50
	THC	g/kW-h	1,10	1,10	0,66	0,46	0,46	0,13
	NMHC	g/kW-h						
	CH4	g/kW-h						
	NOx	g/kW-h	8,00	7,00	5,00	3,50	2,00	0,40
	PM	g/kW-h	3,60	0,15	0,10	0,02	0,02	0,01
	NH3	ppm				25	25	10
	PN	#/kWh						$8*10^{11}$
	CO2, FC	g/kW-h						?
	unregulated	g/kW-h						?
ETC (WHTC) Test cycle	CO	g/kW-h			5,40	4,00	4,00	4,00
	THC	g/kW-h						0,16
	NMHC	g/kW-h			0,78	0,55	0,55	
	CH4	g/kW-h			1,60	1,10	1,10	
	NOx	g/kW-h			5,00	3,50	2,00	0,46
	PM	g/kW-h			0,16	0,03	0,03	0,01
	NH3	ppm				25	25	10
	PN	#/kWh						$6*10^{11}$
	CO2, FC	g/kW-h						?
	unregulated	g/kW-h						?

Moderate Reduction (<30%) Large Reduction (>30%)

Çizelge 2.1 : Dizel ağır hizmet motorları için emisyon limitleri ve değişimler [8].

Euro VI emisyon limitleri incelendiğinde bazı baz motor ve motor sonrası emisyon azaltan komponentleri kullanmak neredeyse zorunlu hale gelmiştir. Partikül limitlerini sağlayabilmek için Dizel Partikül Filtresi (DPF) kullanmak kesin bir çözüm olduğu gibi, EGR ve SCR teknolojilerini aynı anda kullanmadan NOx limitlerine girmek neredeyse imkansızdır. Bu sebeple Euro VI emisyon regülasyonlarını sağlayan bir ağır hizmet motorunun Şekil 2.7.'deki gibi olması beklenir.



Şekil 2.7 : Euro VI emisyon limitlerini sağlayabilecek örnek bir sistem [9].

2.3.1 Euro VI Emisyon Testleri

Euro VI emisyon regülasyonunun sağlanıp sağlanmadığının sertifikasyonu için 2 temel test uygulanmaktadır. Euro V emisyon regülasyonundaki ESC testinin yerini WHSC, ETC testinin yerini ise WTHC almıştır.

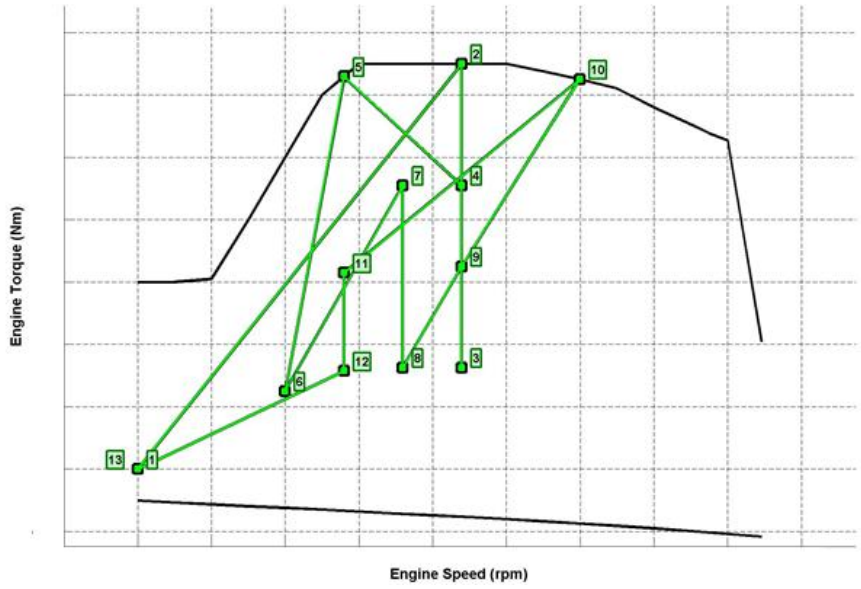
2.3.1.1 WHSC

Avrupa Komisyonu'nun 595/2009 direktifinde ayrıntılı verilen WHSC testi 13 noktadan oluşur ve bu noktalar Çizelge 2.2'deki gibi hesaplanır.

	% Normalize Motor Devri	% Normalize Tork	Test Süresi (sn)	Uyum Süresi (sn)
1	0	0	210	20
2	55	100	50	20
3	55	25	250	20
4	55	70	75	20
5	35	100	50	20
6	25	25	200	20
7	45	70	75	20
8	45	25	150	20
9	55	50	125	20
10	75	100	50	20
11	35	50	200	20
12	35	25	250	20
13	0	0	210	20

Çizelge 2.2 : WHSC noktalarını hesaplama çizelgesi [10].

Örnek bir güç eğrisi oluşturulup çizdirildiğinde Şekil 2.8.'deki gibi hız ve tork değerlerinden oluşan bir test olduğu görülür ve toplam 1800 saniye sürer.



Şekil 2.8 : Örnek güç eğrisi için WHSC noktalarının motor haritasındaki yeri.

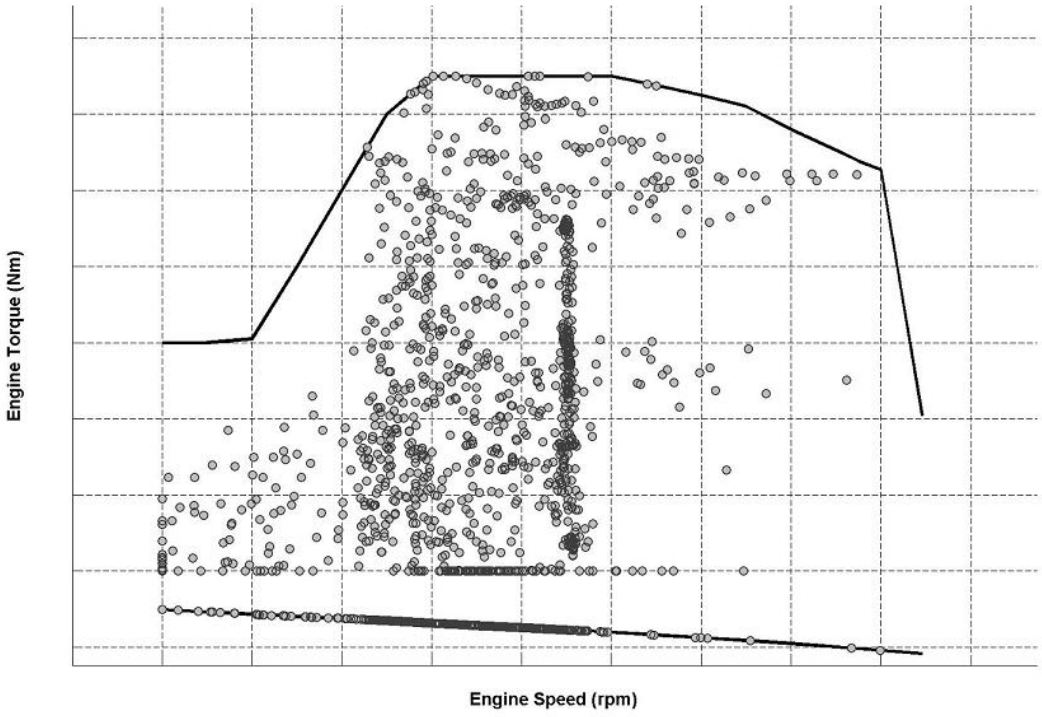
Şekil 2.8'den anlaşılacağı üzere test genel olarak tam yük noktalarında değil, motor haritasının geneline yayılmış ve yüksek hızları içermemektedir. Olabilecek en kritik nokta 10. noktadır ve Mod 10 olarak adlandırılır. Genel kanı, bu noktada Euro VI emisyon limitleri içinde kalındığında genel olarak limitlere girilmesinde problem olmayacağı yönündedir.

2.3.1.2 WHTC

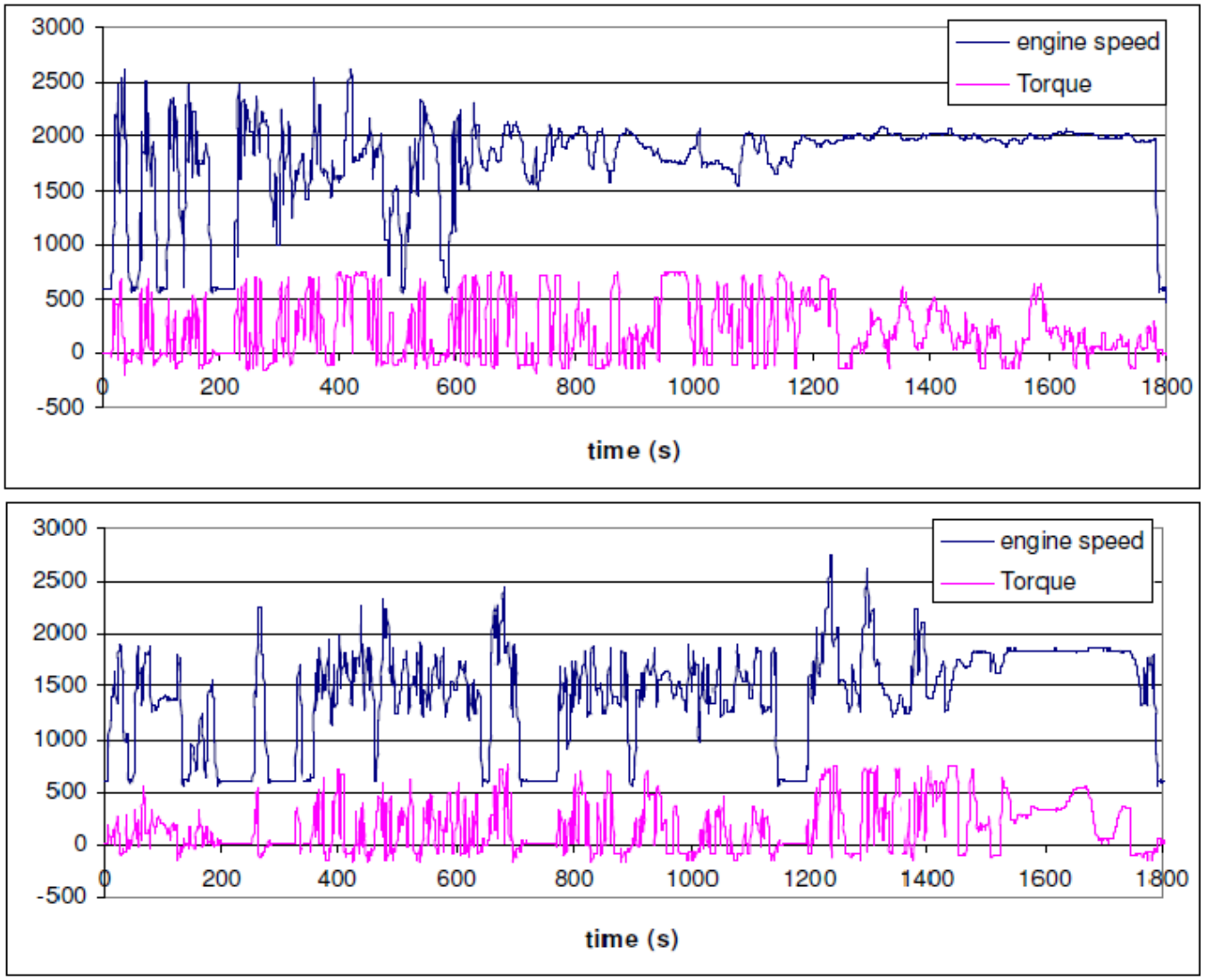
Euro III, Euro IV ve Euro V regülasyonlarında kullanılan ETC testinin aksine Euro VI regülasyonlarında WHTC testi kullanılmaktadır.

WHTC testi, WHSC testi gibi motorun güç eğrisine göre hesaplanır. WHSC noktalarının belirlenmesinde kullanılan örnek güç eğrisine göre WHTC test noktaları belirlenip Şekil 2.9.'da gösterilmiştir. Bu testin ETC testine göre çok daha agresif olduğu Şekil 2.10.'da gösterilmiştir. Bu durum hızlı çalışan bir kontrolcünün gerekliliğini göstermektedir.

1800 saniye süren WHTC test noktaları belirlenirken motorun maksimum tork eğrisi kullanılır. Bu test, farklı sürüş şekillerini temsil ederek ağır hizmet motorlarının en çok kullanıldığı noktaları gösterir. Bu sayede dinamometrede yapılacak emisyon testlerinin gerçek hayatta da sağlanması hedeflenmiştir.



Şekil 2.9 : Örnek güç eğrisi için WHTC noktalarının motor haritasındaki yeri.

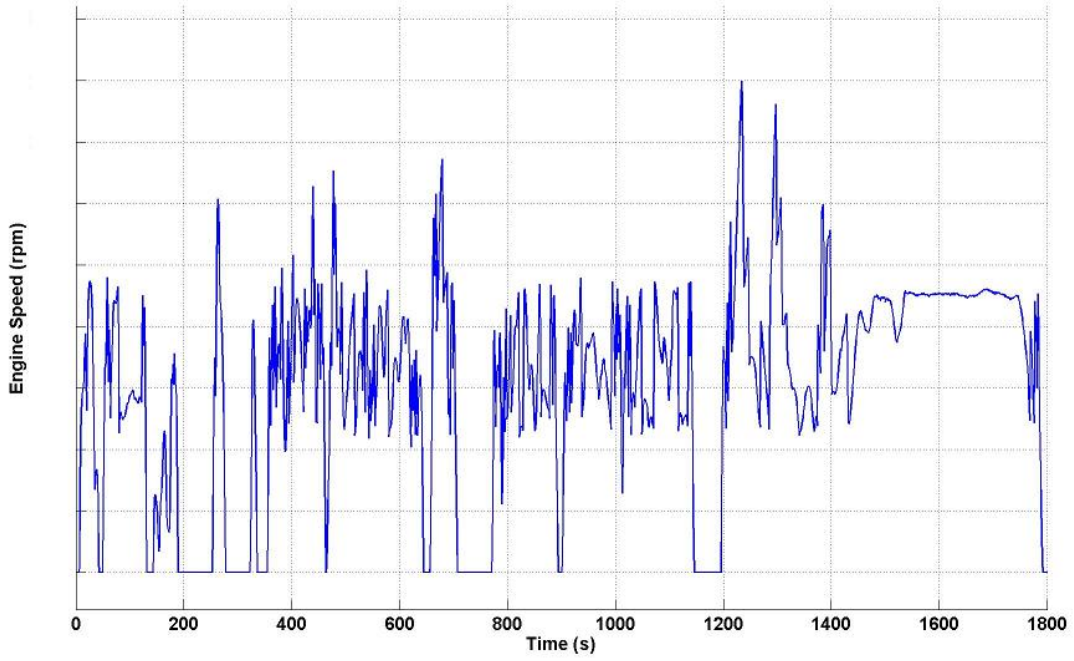


Şekil 2.10 : Örnek bir güç eğrisi için ETC ve WHTC testinin karşılaştırılması [11].

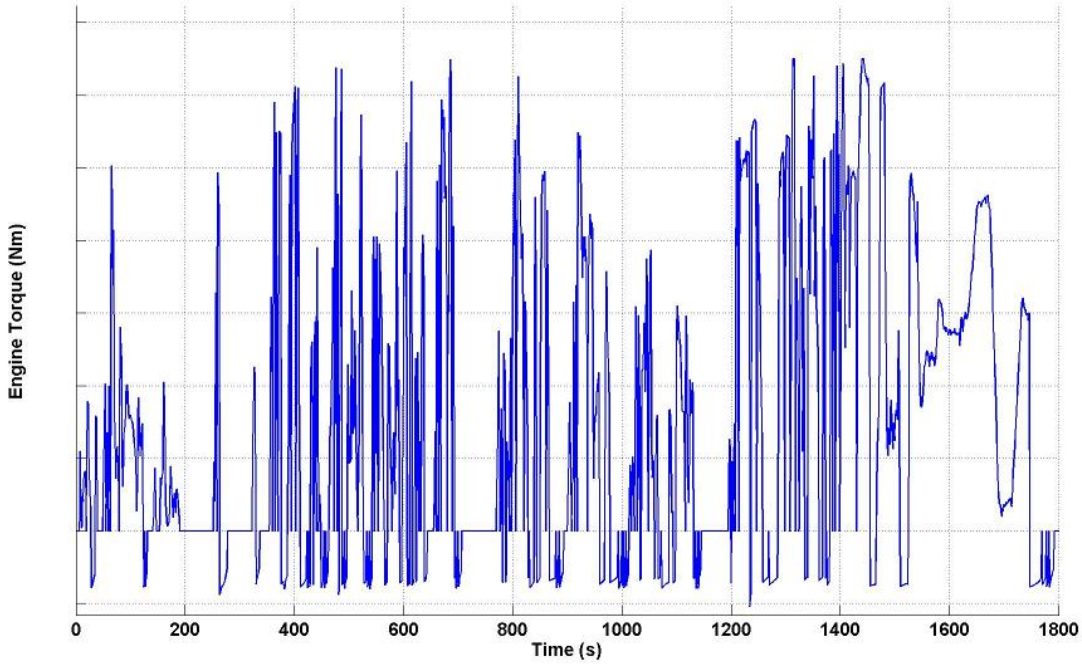
WHTC test noktaları motor haritasında çizdirildiğinde Şekil 2.9.'da görüleceği üzere WHSC gibi belli bir motor hızı etrafında kümelenmiş, çok yüksek hız ve tork noktalarında bulunmamıştır. WHTC testi sonucunda toplam güç hesaplanırken negatif kısımlar dikkate alınmaz ve sıfıra eşitlenir.

Bu test, arada 10 dakika beklemek üzere 2 defa koşulacak ve ilki soğuk (oda sıcaklığında) başlayacaktır. Soğuk koşulan WHTC test sonucunun %14'ü, 10 dakika beklendikten sonra koşulan WHTC test sonucunun ise %86'sı oransal olarak alınarak elde edilen sonucun emisyon regülasyonlarında belirlenen WHTC sınırları içerisinde kalması gerekmektedir. İki WHTC testi arasında beklenmesinin sebebi SCR sisteminde kullanılan katalistin soğukta veriminin daha düşük olmasıdır. Bu oranlar ile SCR sisteminde kullanılacak olan katalistin soğuk performansının daha iyi olması hedeflenmiştir.

Bu testi dinamometrede koşmak için dinamik bir test yaratılması gerekmekte ve 1800 noktanın sisteme girilmesi gerekmektedir. AVL Puma platformu anlık olarak interpolasyon yaparak devamlı bir test koşulmasını sağlar. Bu testin koşulabilmesi için güç eğrisine göre noktaların hesaplanması gerekmektedir. Avrupa Komisyonu'nun 595/2009 direktifinde belirtilen bu noktalara göre çalışılacak motorda noktalar hesaplanıp Şekil 2.11 ve Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



Şekil 2.11 : Örnek güç eğrisi için simülasyonu koşulmuş olan WHTC testinde motor hızı.



Şekil 2.12 : Örnek güç eğrisi için simülasyonu koşulmuş olan WHTC testinde motor torku.

2.4 Ağır Hizmet Motorunda Hava Yolu ve Emisyon İlişkisi

Ağır hizmet motorunda Euro VI regülasyonunun sağlanması için EGR kullanımının gereğinden daha önce bahsedilmişti. EGR akışının hangi bölgede ne kadar sağlanabileceği türbo seçimi ile direkt ilgilidir. Egzoz gazı türbini çevirdiğinde kompresör de o hızda dönmekte ve ne kadar hızlı dönerse o kadar yüksek emme manifoldu basınçlarına ulaşılmaktadır. Ayarlanabilir kanatlı türbin kullanıldığında uygun durumlarda egzoz gazı türbin kanatlarına istenen açıyla çarpacak, bu sayede yüksek emme manifoldu basınçlarından kaçınılmış olacaktır. Bunun bize sağladığı fayda, emme manifoldu basıncının EGR soğutucusu çıkışı basıncından büyük olduğu durumlarda EGR akmama problemini gidermesidir. Kanatçıklar istenen pozisyona ayarlanarak emme manifoldu basıncı azaltılır ve EGR akışı sağlanır.

Bu çalışmada ayarlanabilir geometrili turbo kullanılmadığı için hava kelebeği EGR akışı için kritik duruma gelmektedir. Hava kelebeğinin kullanılmasındaki amaç, yüksek emme manifoldu basınçlarına ulaşıldığında ve bu noktada EGR akıtılması gerektiğinde, hava kelebeğinin kapatılıp emme manifoldu basıncının düşürülmesidir.

EGR gazının emme manifolduna bağlandığı noktada, emme manifoldu basıncının EGR soğutucusu çıkış basıncından daha büyük olduğu durumda EGR gaz akışı

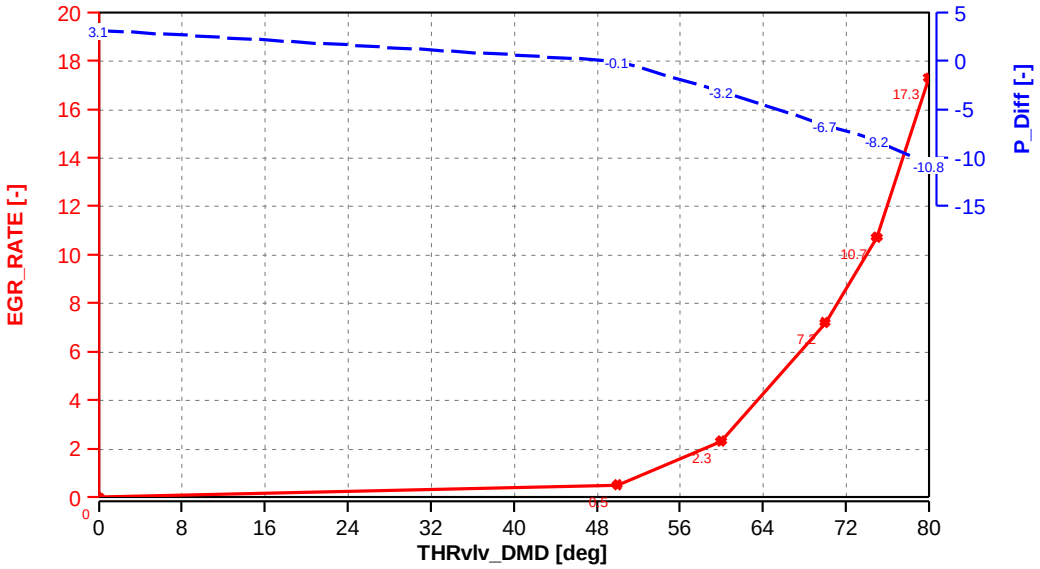
olmamaktadır. Bu durumda emme manifoldundaki basınç P_BOOST, EGR soğutucusu çıkışındaki basınç ise P_EGRO olarak ifade edildiğinde aralarındaki fark P_Diff olarak gösterilebilir.

$P_Diff = P_BOOST - P_EGRO$ ise,

$P_Diff > 0$ olduğu durumunda EGR akışı sağlanamazken,

$P_Diff < 0$ olduğu durumda EGR akışı artar. Basınç farkı ne kadar fazla ise o kadar fazla EGR akışı olur [7].

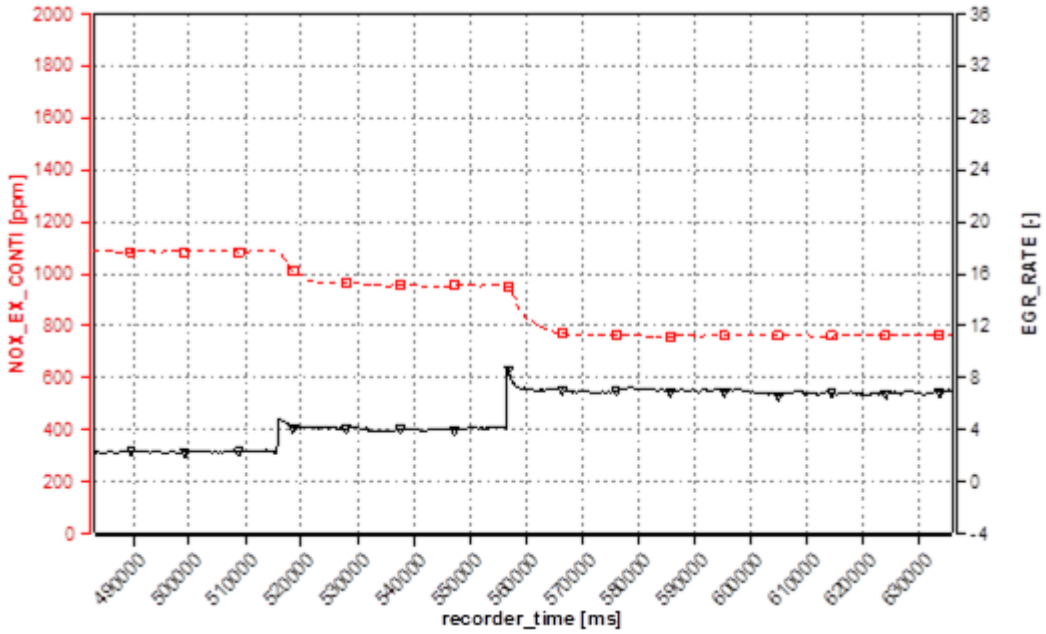
Dinamometrede yapılan bir deneyde, motor haritasındaki bir noktada EGR valfinin tam açık (%100) pozisyonunda $P_Diff > 0$ olduğu görülmüş ve bu noktada EGR gazı akıtılması için hava kelebeği kapatılarak sonuçlar gözlenmiştir. Hava kelebeğinin %40 pozisyonuna kadar etkisinin çok fazla olmadığı daha önce gösterilmişti. Bu uygulamada da hava kelebeğinin %50 pozisyonundan sonra $P_Diff < 0$ olduğu ölçülmüş, aradaki fark arttıkça da EGR oranının arttığı Şekil 2.13'te gösterilmiştir. Bu grafiğin x ekseni, hava kelebeği pozisyonunu göstermekte ve THRVlv_DMD şeklinde ifade edilmektedir.



Şekil 2.13 : Hava kelebeği pozisyonuna göre emme manifoldu ve EGR soğutucusu arasındaki basınç farkı.

Dizel motorlarda hava yakıt oranı artırılarak silindir içi basınç yükseltilip verimli bir yanma sağlanır. Yüksek hava yakıt oranı ise türbo ile elde edilir. Motor çıkışı NOx miktarının ve silindir içi basıncın yüksek olduğu noktalarda egzoz gazı silindir içine alınarak NOx miktarı ciddi ölçüde azaltılabilir. Şekil 2.14'te EGR oranı arttıkça

motor çıkışı NOx emisyonlarının azaldığı gösterilmiştir. Bu şekilde NOX_EX_CONTI, egzoz hattındaki NOx sensör değerini gösterirken, EGR_RATE, EGR oranını göstermektedir, x ekseni ise zamanı göstermektedir.



Şekil 2.14 : EGR oranına göre motor çıkışı NOx emisyonlarındaki değişim.

2.4.1 EGR oranının hesaplanması

EGR oranının hesaplanması, hava yolunun geliştirme aşamasında hangi noktada ne kadar EGR akışının olduğunu görme açısından önemlidir. EGR oranının hesaplanmasında farklı yöntemler kullanılabilir. Hava yolunun uygun noktalarından oksijen, karbondioksit veya nitrojen oksit ölçümü yapılarak oran hesaplanır.

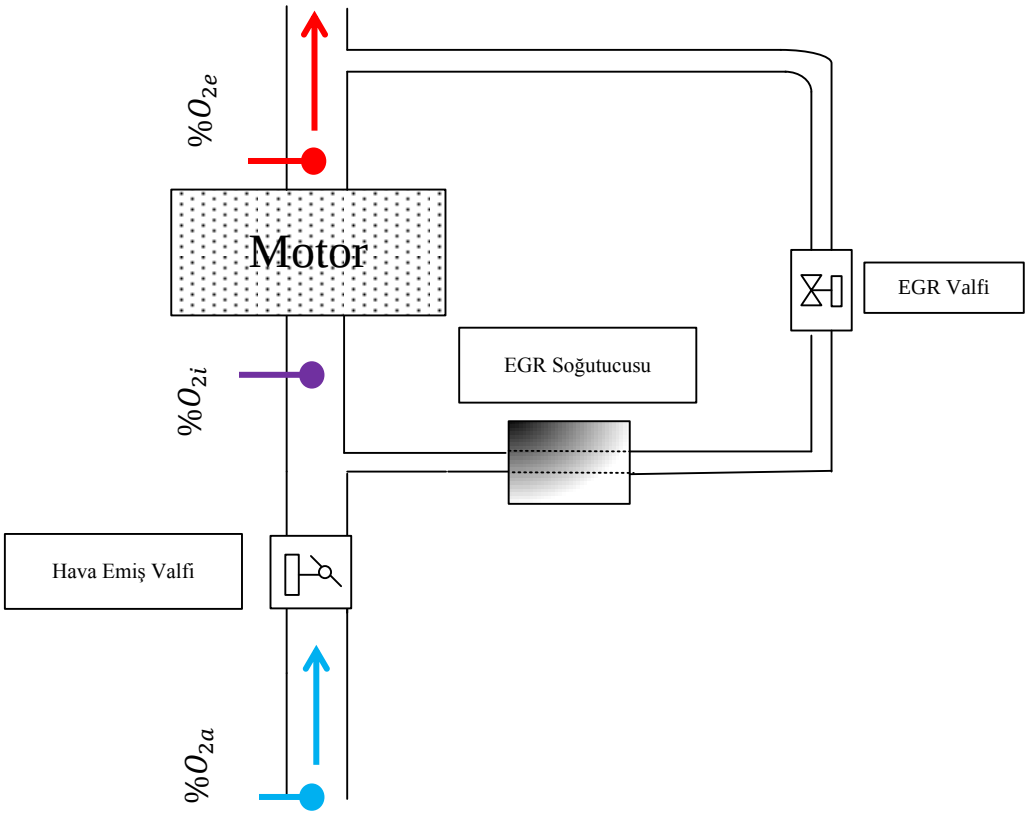
Needham (1991), EGR oranının hesaplanmasında CO_2ölçüm yöntemini kullanarak EGR oranını şu şekilde hesaplamıştır:

$$EGR_{rate}(\%) = \frac{CO_2(emme\ manifoldu) - CO_2(dış\ hava)}{CO_2(egzoz)} \times 100$$

Emme manifoldunda herhangi bir tepkimenin meydana gelmediği varsayıldığında CO_2ve O_2 ölçümleri arasında %100 eşitlik olduğu söylenebilir.

Bu çalışmada egzoz hattına ve emme manifolduna oksijen sensörleri takılarak EGR ölçümü yapılmış ve EGR oranı hesaplanmıştır.

Dış havadaki oksijen yüzdesi sabit olarak 20.94 alınıp, ölçüm yapılan noktalar Şekil 2.15.'te gösterilmiştir.



Şekil 2.15 : EGR Oranı hesaplaması için oksijen yüzdesinin ölçüldüğü noktalar.

$$\%EGR = \frac{(\%O_{2a} - \%O_{2i})}{(\%O_{2a} - \%O_{2e})} \times 100$$

Formülde,

$\%O_{2a}$: Havadaki oksijen oranı (~20.94)

$\%O_{2i}$: Emme manifoldundan ölçülen oksijen

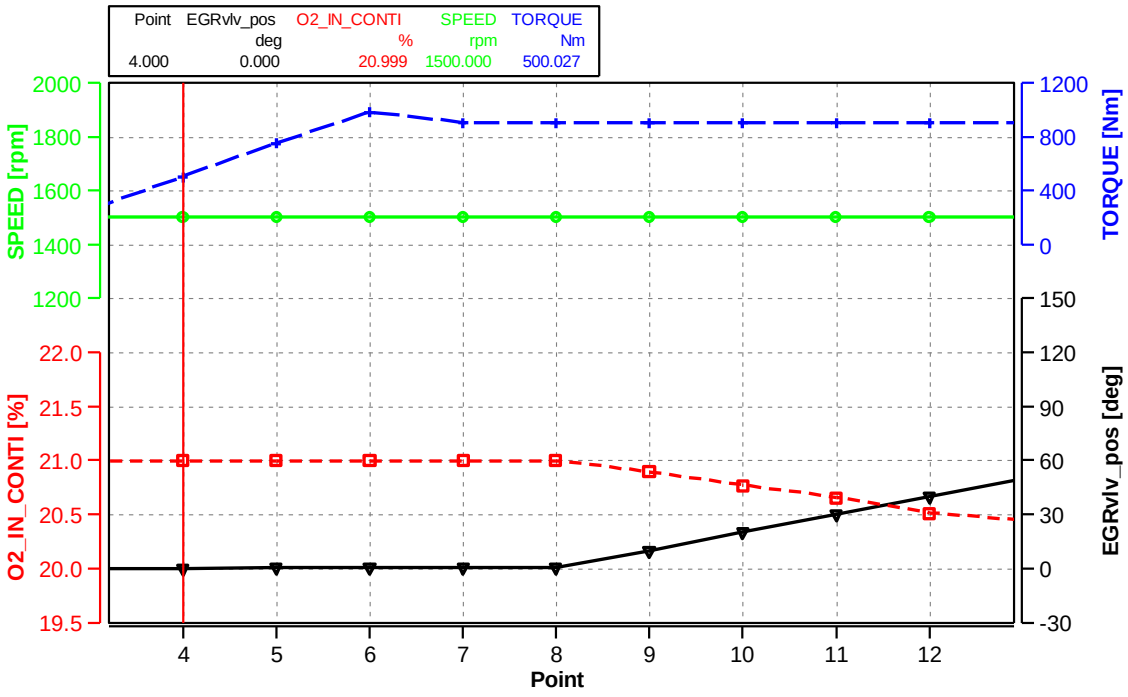
$\%O_{2e}$: Egzoz hattında ölçülen oksijen

olarak açıklanabilir.

Bu çalışmada kullanılan sensör hem O_2 hem de NO_x ölçümü yapabilme yeteneğine sahip olup ölçüm bilgilerini CAN hattı üzerinden göndermektedir. O_2 ölçüm sonucunu yüzde olarak yaptığı için formül içerisinde ölçtüğü değerler direkt olarak kullanılmıştır.

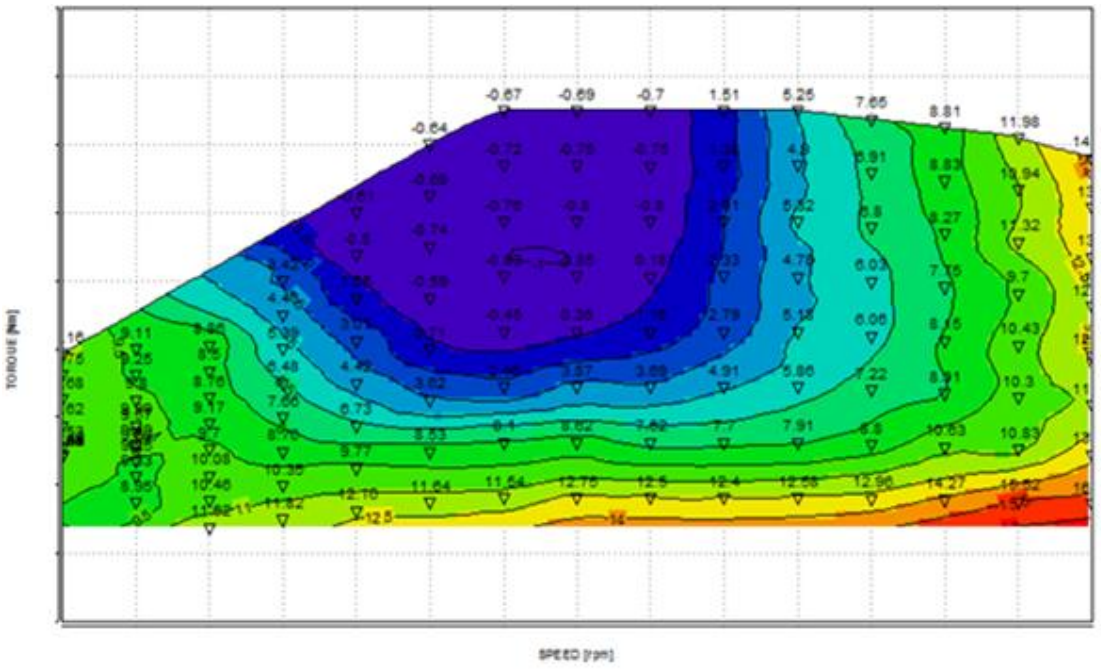
EGR valfinin kapalı konumunda egzoz gazları emme manifolduna gelmeyeceğinden sensörün direkt olarak havadaki oksijen oranını okuması beklenir. Sensörü test etmek açısından dinamometrede EGR valfi açık ve kapalı konumlardayken sensörün O_2

ölçüm değerlerine bakılmıştır. Şekil 2.16.'da EGRvlv_pos, EGR valf pozisyonunu, O2_IN_CONTI ise oksijen sensörünün ölçtüğü değeri göstermektedir. Oksijen sensörü temiz havadaki oksijen değerini %20.999 olarak ölçmesi EGR valfinin tam kapalı pozisyonunda hiç EGR akışı olmadığını gösterir.



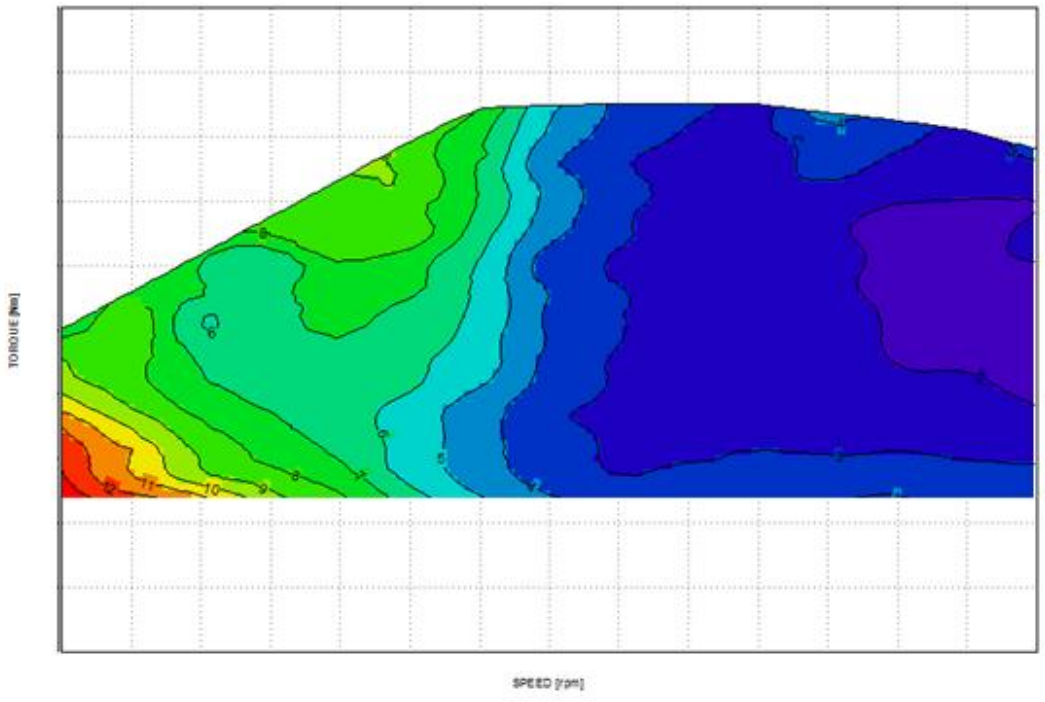
Şekil 2.16 : Temiz havadaki oksijen değerinin sensör ile okunması.

2.4.2 EGR oranı ve kütle hava akışı kontrolünün önemi



Şekil 2.17 : EGR valfinin tam açık pozisyonunda motor haritasındaki EGR oranları.

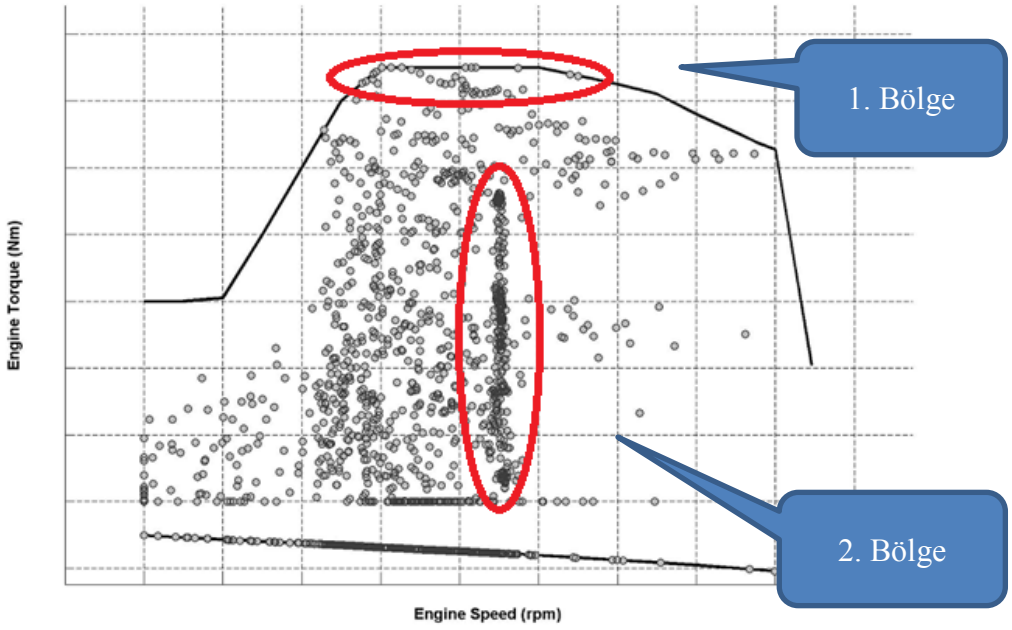
2.3.2. ve 2.3.3 bölümlerinde WHTC ve WHSC testlerinin örnek güç eğrisinde hangi kısımlarda yoğunlaştığı gösterilmişti. EGR akışının motor haritasında hangi noktalarda sağlanıp hangi noktalarda yeterli akış olmadığının anlaşılması için motor haritası EGR valf pozisyonu tam açık durumdayken taranmıştır. Şekil 2.17.'de görüldüğü gibi EGR valf pozisyonu tam açık durumdayken bile motor haritasının büyük bir bölümünde EGR akışı sağlanamamıştır. Genel kanı, motor çıkış emisyonlarında Euro IV limitleri içerisine girildiğinde (3.5 g/kWh) yüksek SCR verimi ile NOx açısından Euro VI limitlerine girilebileceği yönündedir. Şekil 2.18.'de motor çıkış NOx emisyonları gösterilmiştir.



Şekil 2.18 : EGR valfinin tam açık pozisyonunda motor çıkışı NOx miktarları, [g/kWh].

Motor çıkış emisyonları incelendiğinde EGR gaz akışı olmayan bölgedeki NOx miktarlarının hedeflenen değerlere göre yüksek seviyede olduğu görülmüştür. EGR valfinin tam açık olmasına rağmen EGR gaz akışının olmamasının nedenleri daha önceki bölümlerde anlatılmıştı. Bu durumda NOx seviyesinin kritik olduğu noktalarda hava kelebeğini kapatmak gerekecektir.

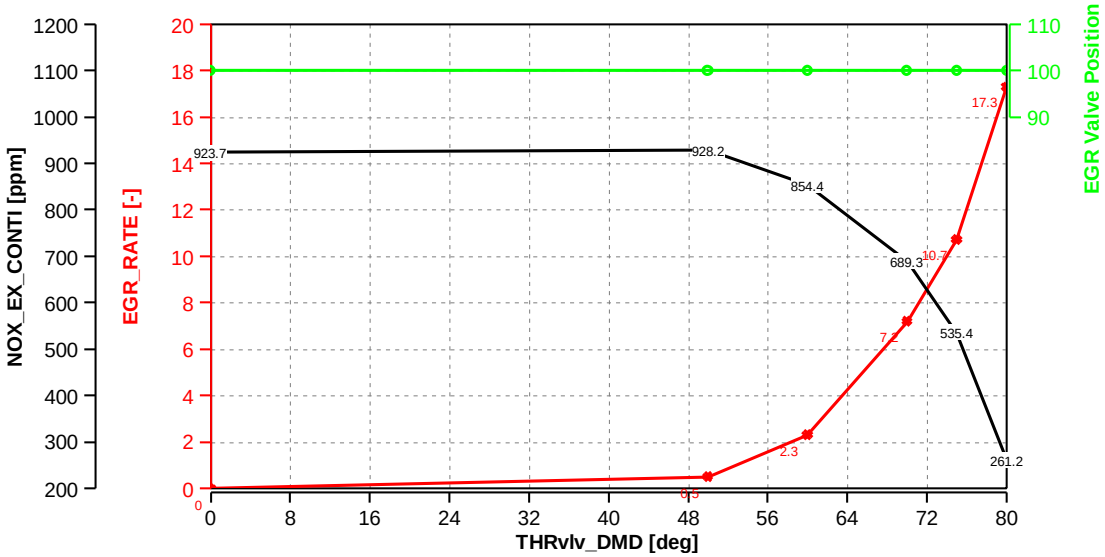
Bu sonuçlara göre WHTC testinde 2 kritik bölge işaretlenebilir. 1. bölge EGR akışının hiç olmadığı ve NOx emisyonlarının yüksek olduğu bölgedir. 2. bölge ise testin en yoğun geçtiği ve yer yer EGR akışının olduğu fakat buna rağmen NOx miktarının yüksek olduğu bölgedir.



Şekil 2.19 : WHTC testi sonucunda EGR oranına ve motor çıkışı NOx emisyonuna göre kritik bölgeler.

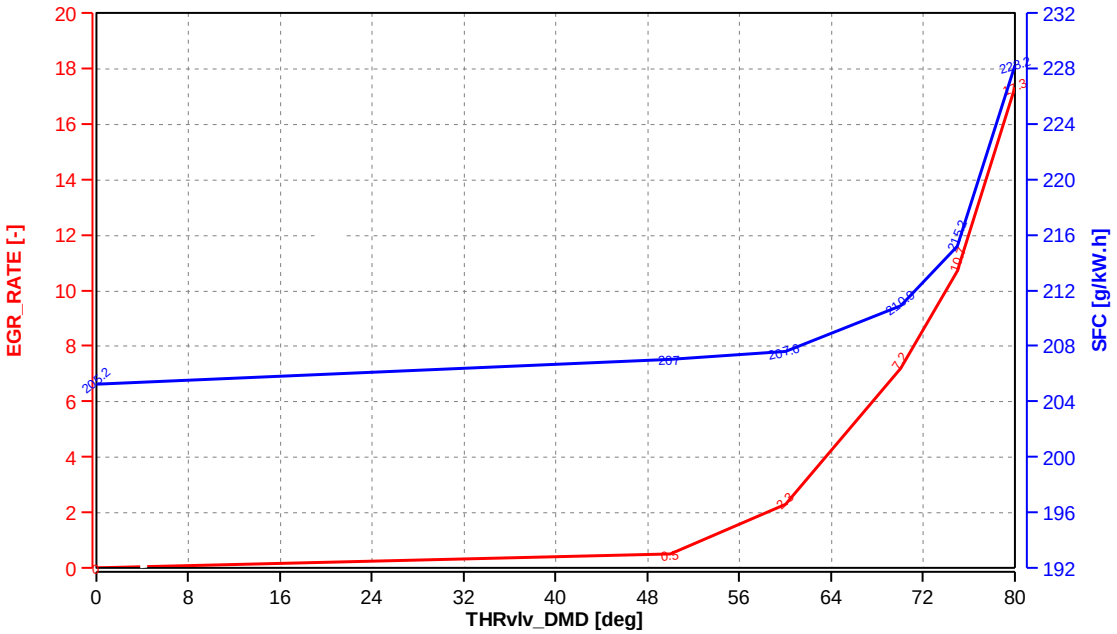
2.5 Hava Kelebeğinin Hava Yoluna Eklenmesi

Sabit geometrili turbo kullanan bir motorda EGR akmayan noktalarda motor sonrası emisyonları düşürmek için hava kelebeği kapatıldığında EGR gazının akmaya başladığı görülmüş, sonuçlar Şekil 2.20'de paylaşılmıştır. Bu şekilde NOX_EX_CONTI, motor çıkışındaki NOx gaz miktarını ppm olarak ifade etmektedir. EGR_RATE ise EGR oranını ifade eder. Hava kelebeği kapatıldıkça $P_BOOST < P_EGR_O$ olur.



Şekil 2.20 : Hava kelebeği pozisyonunun motor çıkış NOx emisyonlarına etkisi.

Hava kelebeğinin %50 pozisyonuna kadar kapatılması EGR oranında çok büyük bir etki göstermemiştir. Bununla birlikte dizel motorda hava kelebeğinin kullanılması yakıt tüketimi artırıcı etki gösterebilir, yukarıdaki durumda özgül yakıt tüketimi değişimi Şekil 2.21'deki gibidir.



Şekil 2.21 : Hava kelebeği pozisyonuna göre EGR oranı ve özgül yakıt tüketimi değişimi.

3. HAVA YOLU KONTROLÜ

Daha önceki bölümlerde hava yolu kontrolünün amacının emisyon limitleri içerisinde kalmak ve verimli bir yanma ile yakıt ekonomisi sağlamak olduğundan bahsedilmişti. Hava yolu kontrolünü sağlamak için bu çalışmada 2 valf kullanılmıştır. Bu valfler EGR valfi ve hava kelebeğidir. Bu bölümde bu valflerin motor üzerinde kullanılmadan önce ve kullanım sırasında kapalı çevrim kontrolü yapılıp sonuçları paylaşılmıştır.

3.1 Kapalı Çevrim Komponent Kontrolü

Bu çalışmada kapalı çevrim komponent kontrolü PID kontrolör kullanılarak yapılmıştır. PID, orantısal kontrol, integral etkisi ve türevsel kontrol etkisinin birleşiminden oluşur. Kontrolcü ise (3.1) ve (3.2) denklemlerindeki gibi yazılabilir;

$$u(t) = Ke(t) + \frac{K}{\tau_i}\int_0^t e(t)\,dt + K\tau_d\frac{de(t)}{dt} \quad \textbf{(3.1)}$$

ya da transfer fonksiyon olarak,

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K\left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right] \quad \textbf{(3.2)}$$

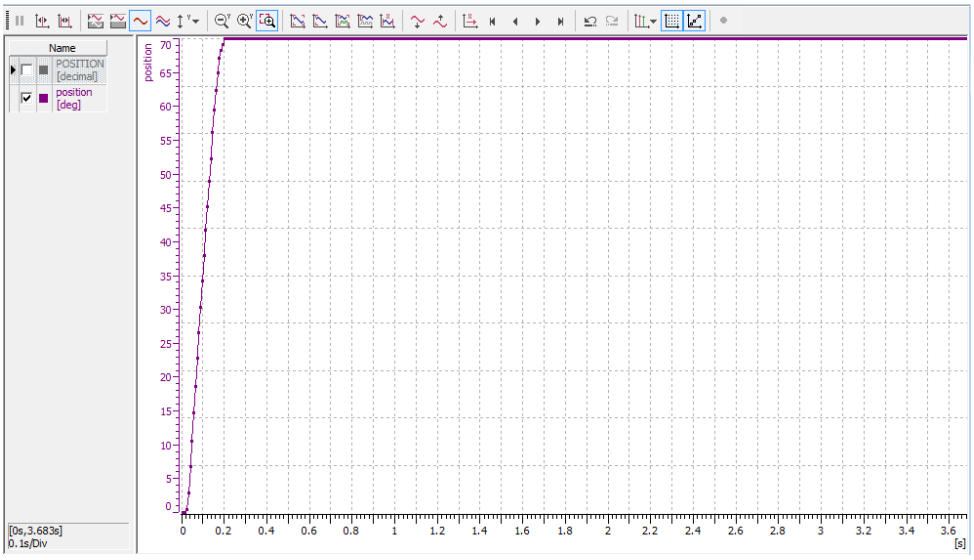
şeklinde gösterilebilir. Burada K oransal etki, T_i integral zamanı ve T_d türev zamanıdır. Oransal etki ile cevap referans değere yaklaşırken, integral etki hata oranını azaltacaktır. Kontrolcü çıkışı $u(t)$, hedef değere eşit olduğunda hata olarak tanımlanan $e(t)$ sıfır olur ve kontrolcü çıkışı sabit olarak kalır. Türevsel etki ile ise hatadaki değişimi saptayıp ileriye dönük bir etki elde edilebilir. Bu çalışmada türevsel etkiye gerek duyulmamıştır.

Kullanılan sensörlerden gelen değerlerin parazit içermesi kontrolcüyü olumsuz etkileyebileceği için bu çalışmada kütle hava akışı kontrolü yapılırken filtre kullanılmıştır. Filtrelenmiş değerin kontrolcüye verilmesi daha iyi sonuç alınmasını sağlamıştır.

3.2 EGR Valf kontrolü

Bu çalışmada kullanılan EGR valfi CAN hattı üzerinden kontrol edilmektedir. H-Köprüsü ile sürülen buna benzer valflerin aksine, tedarikçi tarafından EGR valf içerisinde bulunan mikro kontrolör, CAN hattından gelen mesajlara göre pozisyonunu kendisi kontrol etmekte ve geri bildirim göndermektedir. Bu şekildeki kontrolün çeşitli avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Avantajları arasında, kontrolcü tasarımına gerek olmaması, kendi kendine testler yapıp valf üzerinde bir problem olduğunda bunu elektronik kontrol ünitesine bildirmesi ve elektriksel olarak az pin kullandığı için kablodan tasarruf edilmesi sayılabilir. Dezavantaj olarak ise bu tür valflerin kontrolcüsüne müdahale edilememekte ve tedarikçinin verdiği kontrolcünün kullanımı zorunlu hale gelmektedir.

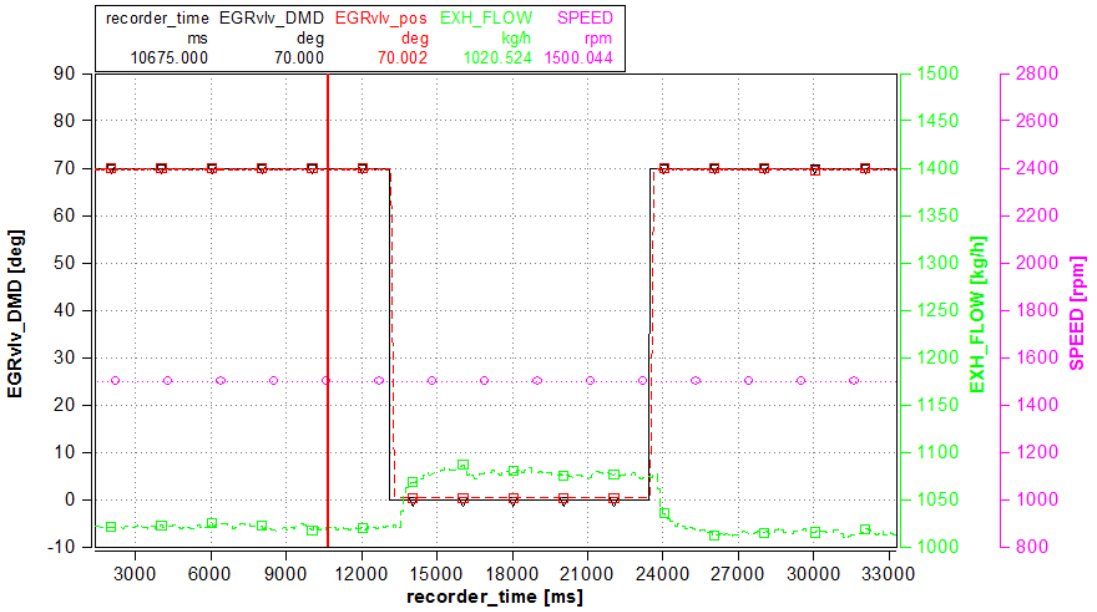
EGR valf kontrolü için ilk aşamada CANAnalyzer programı kullanılmıştır. Bunun öncesinde, bu tür programları kullanmak için bir CAN veri tabanı gerektiği için, bu veri tabanı yine CANAnalyzer ile birlikte gelen bir program olan CANdb++ Editor ile yapılmıştır. Veri tabanına tedarikçi tarafından verilen mesajlar girilip kontrol sağlanmıştır. Masa üzerinde yapılan testlerde EGR valfine CANAnalyzer programı ile 70^o'ye gitme komutu gönderilmiş ve valfin 0.2 sn'de istenen pozisyona gittiği görülmüştür.



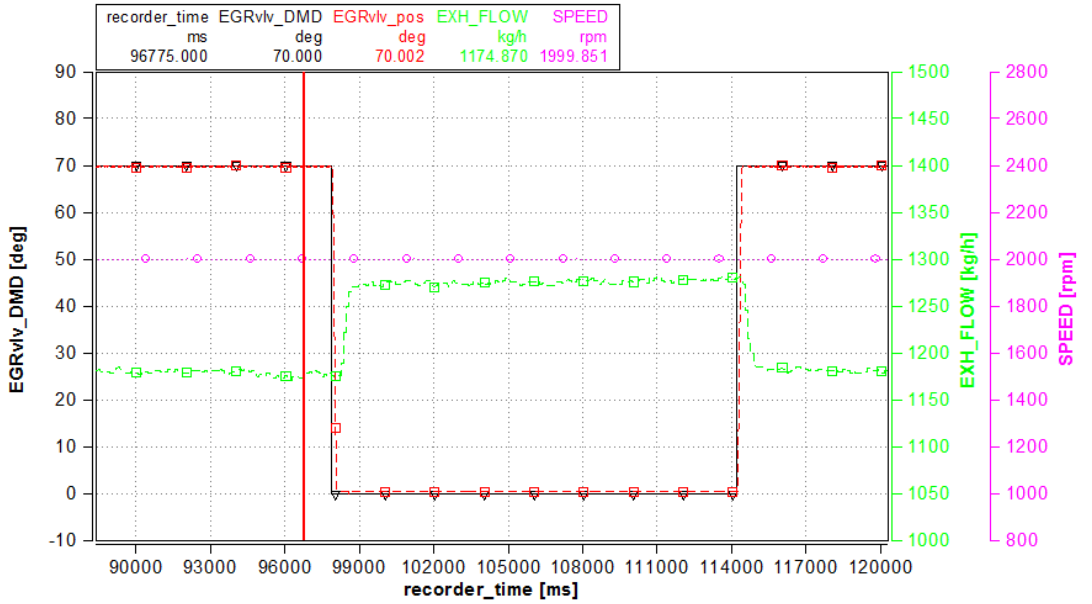
Şekil 3.1 : CANalyzer programında EGR valfi pozisyon tepkisi grafiği.

Çalışmanın ileri safhalarında entegre bir sistem kullanabilmek adına bu çalışma, üzerinde CAN kontrolcüsü de bulunan AVL Puma sistemine taşınmış ve dinamometredeki çalışmalar AVL Puma sistemi ile devam etmiştir.

1500 RPM ve 2000 RPM'de alınmış 0 – 70 EGR valf pozisyonundaki reaksiyonlar Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de gösterilmiştir. EGR valf pozisyon isteği EGRvlv_DMD ile, EGR valfinin bulunduğu pozisyon ise EGRvlv_pos ile ifade edilmektedir. Bu testler sabit motor devri ve sabit yakıt ile yapılmış olup EGR valfin açılmasıyla motor içerisine alınan havanın dolayısıyla da EXH_FLOW olarak gösterilen egzoz akışının düştüğü görülebilir.



Şekil 3.2 : 1500 RPM'de EGR valf pozisyonunun egzoz akışına etkisi.



Şekil 3.3 : 2000 RPM'de EGR valf pozisyonunun egzoz akışına etkisi.

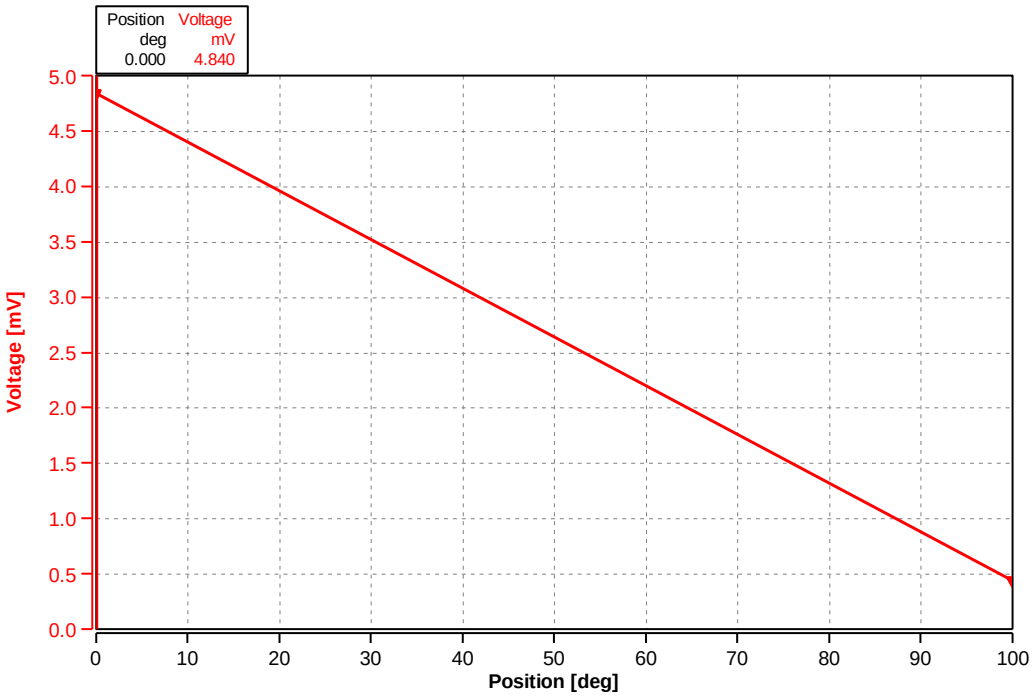
3.3 Hava Kelebeği Kontrolü

3.3.1 Hava kelebeği elemanları

EGR valfinin aksine kendi kontrolcüsünü barındırmayan hava kelebeğini kontrol etmek için hava kelebeği üzerinde bulunan pozisyon sensörü ve DC motor kullanılmıştır. Temel olarak iyi bir kontrolcü tasarlayabilmek için pozisyon sensörü ve DC motor karakteristiklerini iyi analiz etmek gerekir. Aşağıdaki kısımlarda bu konuya değinilmiştir.

3.3.1.1 Sensör

Kontrolör tasarlamaya başlamadan önce pozisyon sensörünün karakteristiği incelenmiştir. Bu çalışmada kullanılan hava kelebeğinin pozisyon sensörü 5V ile beslenerek sensör sinyali tam açık ve tam kapalı pozisyonlarda ölçülmüş ve ara bölgelerde lineer bir şekilde çalıştığı tespit edilmiştir. Sensör tam açık pozisyonda $4.84V$, tam kapalı pozisyonda ise $0.44V$ çıkış vermiş olup, Şekil 3.4.'te gösterilmiştir. Kontrolör tasarlarken bu bilgiler göz önünde bulundurulmuştur.



Şekil 3.4 : Hava kelebeği pozisyon sensörü voltaj değerleri.

Ölçülen bu değerler denklem **(3.3)** ile ifade edilebilir;

$$\text{THRvlv_pos} = 110 - 22.72 \times \text{V} \qquad \textbf{(3.3)}$$

THRvlv_pos, yüzde olarak hava kelebeği pozisyonunu ifade etmektedir.

3.3.1.2 DC motor

Tasarlanan kontrolcü ne kadar iyi olursa olsun motorun hareketi motor sürücüleri tarafından sağlandığı için motorun çektiği maksimum akımı verebilecek bir motor sürücüsü kullanılması gerekmektedir. Hava kelebeği üzerinde bulunan DC motorun ani hareketlerde 4 ampere kadar akım çektiği görülmüş ve buna uygun bir sürücü olan VNH5019'dan iki adet kullanılmıştır. Bu motor sürücüsü 12 amper sürekli 30 amper ise anlık olarak verebilmektedir [14]. Bu sürücüyle ısınma problemi de yaşanmamıştır.

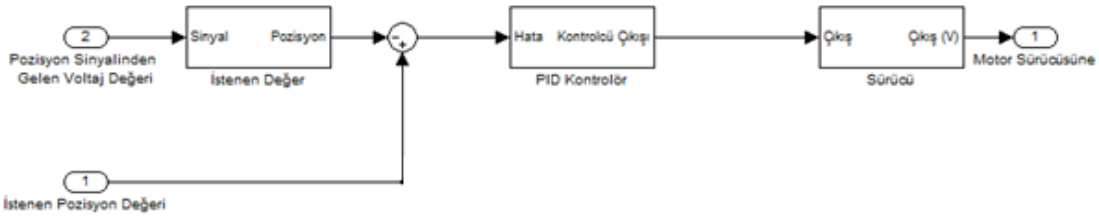
Hava kelebeğinin kontrolü 5 pin ile sağlanmış olup, bu pinler Çizelge 3.1.'de belirtilmiştir.

Pin No	
1	Pozisyon Sensörü +5V
2	DC MOTOR +
3	Sensor Toprak
4	DC MOTOR -
5	Sensör Sinyal

Çizelge 3.1 : Hava kelebeği elektriksel bağlantı çizelgesi.

3.3.2 Kontrolcü yapısı

Kontrolcü Şekil 3.5.'teki gibi tasarlandıktan sonra kodlanmış ve Arduino platformuna taşınmıştır.



Şekil 3.5 : Hava kelebeği kontrolcü yapısı.

Bölüm 3.1'de anlatılan PID algoritmasının bilgisayar ortamında gerçeklenebilmesi için PID denklemlerinin sayısallaştırılması gerekmektedir (Gün, 2007).

$$u(t) = K_p E_{TP}(t) + K_i \int_0^t E_{TP}(t)\,dt + K_d \frac{dE_{TP}(t)}{dt} \qquad \textbf{(3.4)}$$

PID denklemi (3.4) sayısallaştırılırken,

Hava kelebeğinin pozisyon hatası **(3.5)** olarak tanımlandığında; x, hava kelebeği pozisyon sensöründen gelen bilgi, x_{hedef} ise valfin gitmesi gereken konumdur.

$$E_{TP} = x - x_{hedef} \quad \textbf{(3.5)}$$

İntegral teriminin sayısallaştırılması hatanın sürekli toplanması anlamına gelir ve **(3.6)** denklemiyle ifade edilebilir.

$$\int_0^t E_{TP}(t)dt \sim T_S \sum_0^N E_{TP}[n] \quad \textbf{(3.6)}$$

Hatanın türevi sayısallaştırılırken ise ölçülen hata ile bir önceki çevrimde ölçülen hata farkı kullanılıp, denklem (3.7)'de gösterilmiştir.

$$\frac{dE_{TP}(t)}{dt} \sim \frac{[E_{TP}[n] - E_{TP}[n-1]]}{T_s} \quad \textbf{(3.7)}$$

Bu yaklaşımlardan sonra denklemin sayısallaştırılmış hali **(3.8)** gösterilip kullanılan değişkenler Çizelge 3.2'de verilmiştir.

$$u[n] = K_p E_{TP}[n] + K_i T_s \sum_0^N E_{TP}[n] + K_d \frac{[E_{TP}[n] - E_{TP}[n-1]]}{T_s} \quad \textbf{(3.8)}$$

Değişken	Açıklama
K_p	Oransal katsayı
K_i	İntegral katsayısı
K_d	Türev katsayısı
x	Pozisyon
x_{hedef}	İstenen pozisyon değeri
T_s	Örnekleme zaman aralığı

Çizelge 3.2 : PID denklemleri açıklama çizelgesi.

Bu aşamadan sonra, sayısallaştırılan PID kontrolcü, kodlanırken döngü içerisinde aşağıdaki şekilde yazılabilir,

$$E_{TP} = x - x_{hedef} \quad \textbf{(3.9)}$$

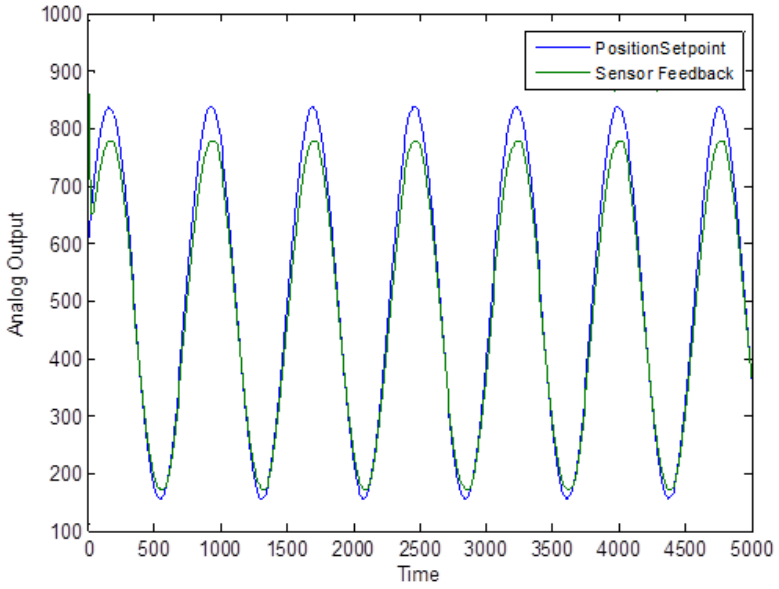
$$D_{error} = E_{TP} - E_{TP_{prev}} \quad \textbf{(3.10)}$$

$$I_{error} = I_{error} + E_{TP} \quad \textbf{(3.11)}$$

$$u = x + K_p \times E_{TP} + K_i \times I_{error} + K_d \times D_{error} \quad \textbf{(3.12)}$$

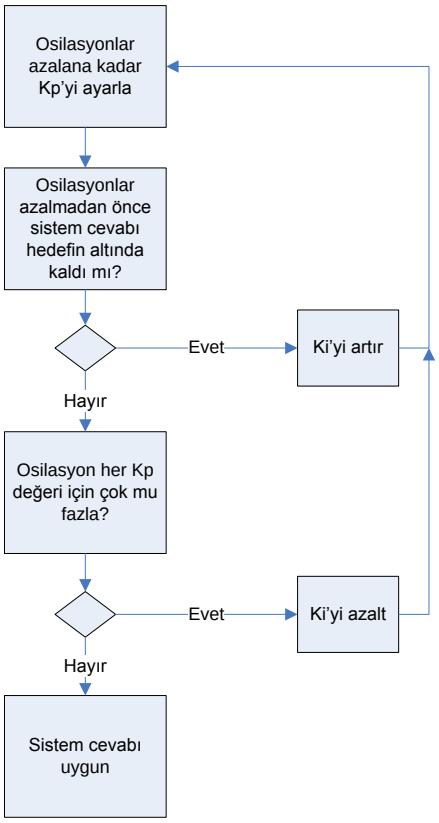
$$E_{TP_{prev}} = E_{TP} \quad \textbf{(3.13)}$$

İlk denemeler sisteme sinyal oluşturucusu bağlanıp adım cevabı izlenerek yapılmıştır. Daha sonra sinüs dalgası verilerek sistemin nasıl cevap verdiği gözlemlenmiştir. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi sensörden gelen geri besleme değeri hedeflenen değeri yakalayamamaktadır. Bu grafikte hedeflenen değer PositionSetpoint, sensör geri beslemesi ise SensorFeedback olarak gösterilmiştir.



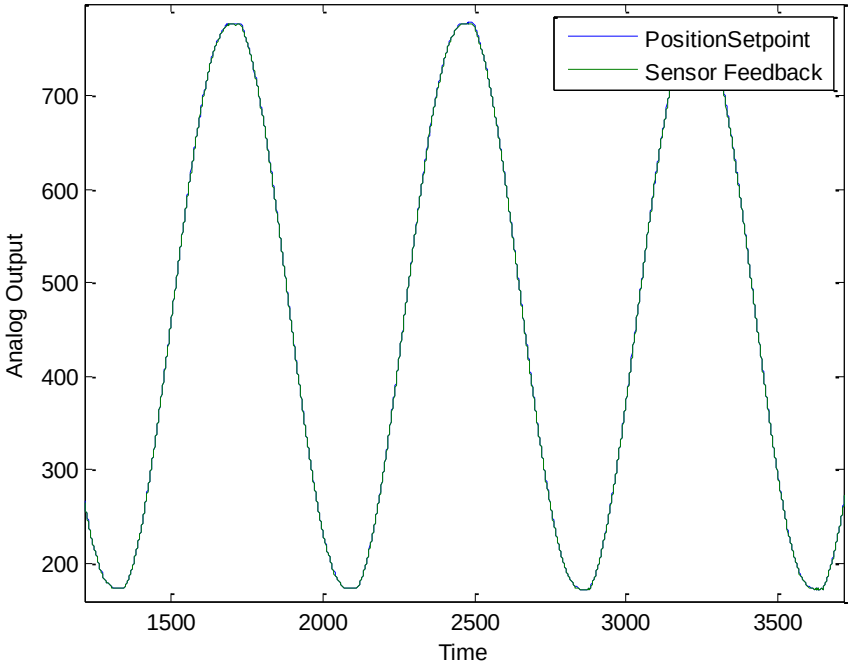
Şekil 3.6 : Hava kelebeği kontrolcüsünün denenmesi.

PID parametrelerinin belirlenmesi sırasında deneme ve yanılma metodu kullanılmış, adım cevabı osilasyona girene kadar P parametresi artırılmış, sonrasında ise I parametresi ile kalıcı hatalar giderilmeye çalışılmıştır. Şekil 3.7.'deki akış şeması kullanılarak PI parametreleri son halini almıştır.

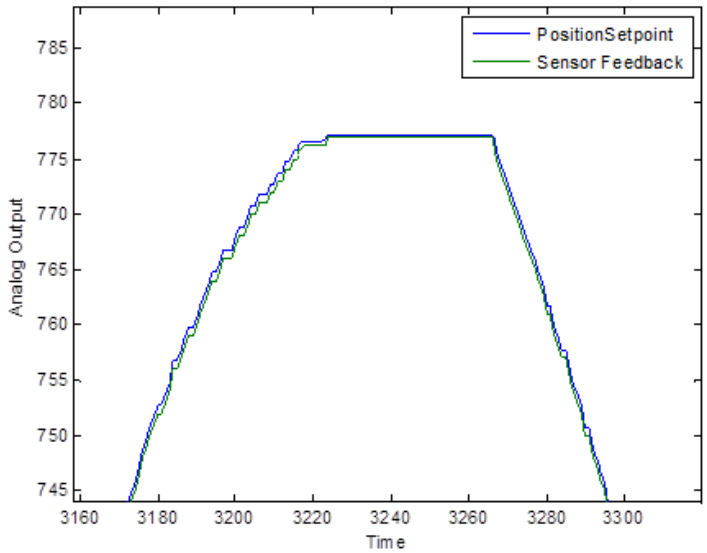


Şekil 3.7 : PI parametrelerinin optimize edilmesi [15].

PI parametreleri osiloskop kullanılarak son halini aldıktan sonra sensör sinyali ve kontrolcü girişi seri porttan 115200 baud hızında Matlab'a aktarılmış ve sonuçlar Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Kontrolcü girişi olarak sinyal oluşturucusu ile sinüs dalgası verilmiş ve hava kelebeği geri besleme sensöründen gelen sinyal ile grafik olarak çizdirilmiştir. Üst üste binen sinyallerin daha iyi anlaşılması için yaklaştırılmış hali Şekil 3.9'daki gibidir. Sistem bu haliyle bağımsız bir hal alarak kullanıma hazır hale gelmiştir.



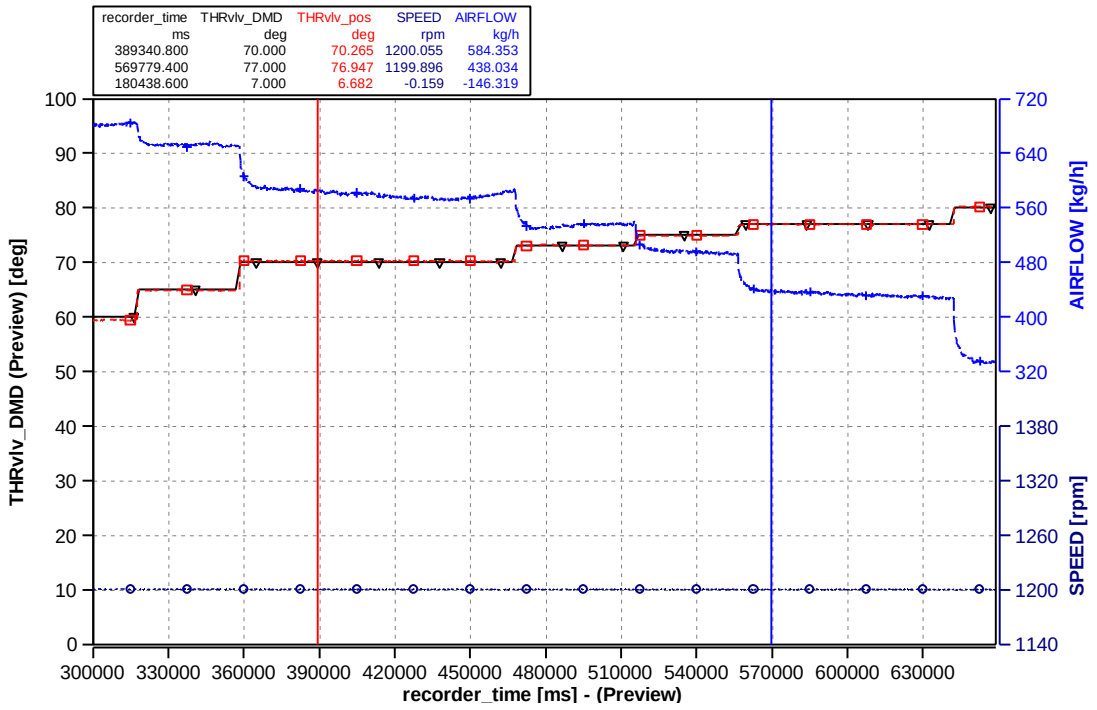
Şekil 3.8 : Hava kelebeği kontrolcüsünde PID parametrelerinin optimize edilmiş hali.



Şekil 3.9 : Optimize edilmiş parametrelerle hava kelebeği kontrolcüsünün cevabı.

Çalışmanın ileri safhalarında entegre bir sistem kullanabilmek adına bu çalışma AVL Puma sistemi ile entegre edilmiş ve dinamometredeki çalışmalara AVL Puma programı ile devam edilmiştir. Puma'ya girilen değer analog çıkış verilerek Arduino'ya hedef değer olarak verilmiş, sensörün geri beslemesi ise hem Arduino'ya kontrolcünün çalışabilmesi için bağlanmış hem de o anki pozisyonun okunabilmesi için Puma'ya analog giriş olarak bağlanmıştır.

Dinamometrede hava emiş valf pozisyonu 1200 motor devrinde denenmiş, kontrolcünün problemsiz çalıştığı gözlenip Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Hava kelebeğinin pozisyon değişimi sırasında da motor içerisine alınan kütle hava akışı miktarı incelenip, hava kelebeği kapatıldıkça kütle hava akışının azaldığı gösterilmiştir.



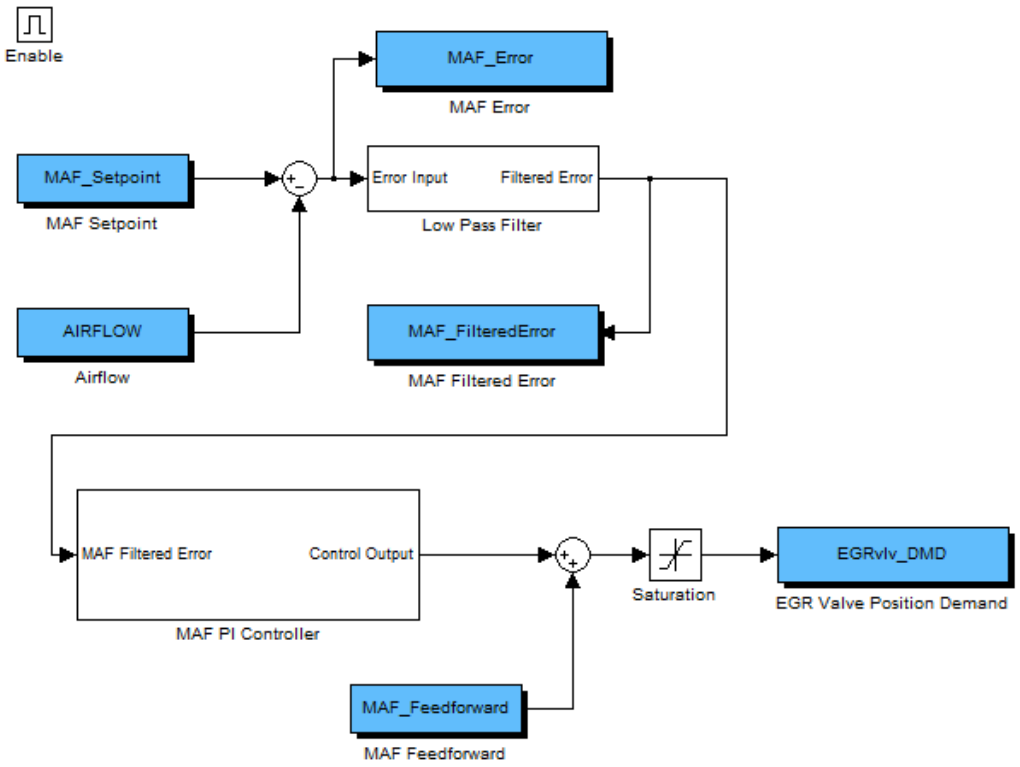
Şekil 3.10 : 1200 RPM'de hava kelebeği kontrolcüsünün denenmesi ve kütle hava akışına etkisi.

3.4 Kütle Hava Akışı Kontrolü

3.4.1 Kontrolcü Tasarımı

Bu bölümde şimdiye kadar anlatılan Euro VI emisyon limitleri içerisine girmek için gerekli olan EGR akışını sağlamak amacıyla EGR valfi ve hava kelebeği kontrolünün nasıl yapıldığı anlatılmıştır. EGR akışının sağlanması temel olarak kütle hava

akışının kontrolü ile sağlanmaktadır. Bu kontrolü sağlamak amacıyla Şekil 3.11'deki gibi yapı kurulmuştur [16].



Şekil 3.11 : EGR valf pozisyonu kontrol edilerek tasarlanan kütle hava akışı kontrolcüsü.

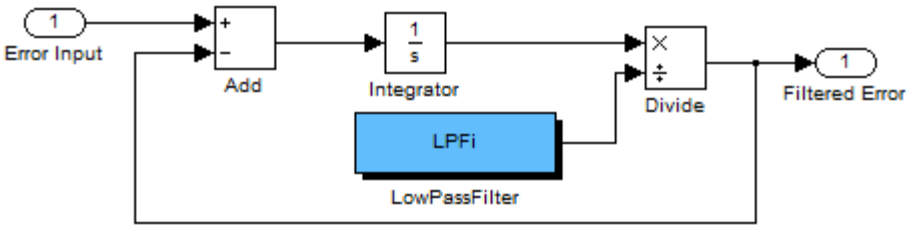
3.4.1.1 Kütle hava akışı sensörü

Kontrolcünün çalışması için önemli kısım kütle hava akışı sensörü kalibrasyonunun doğru bir şekilde yapılmış olmasıdır. Doğru sonuç vermeyen bir sensör tüm yapının yanlış çalışmasına sebep olacaktır. Kullanılan motorda kütle hava akışı sensörü bulunmadığı için dinamometrede bulunan ABB Sensyflow kullanılmıştır.

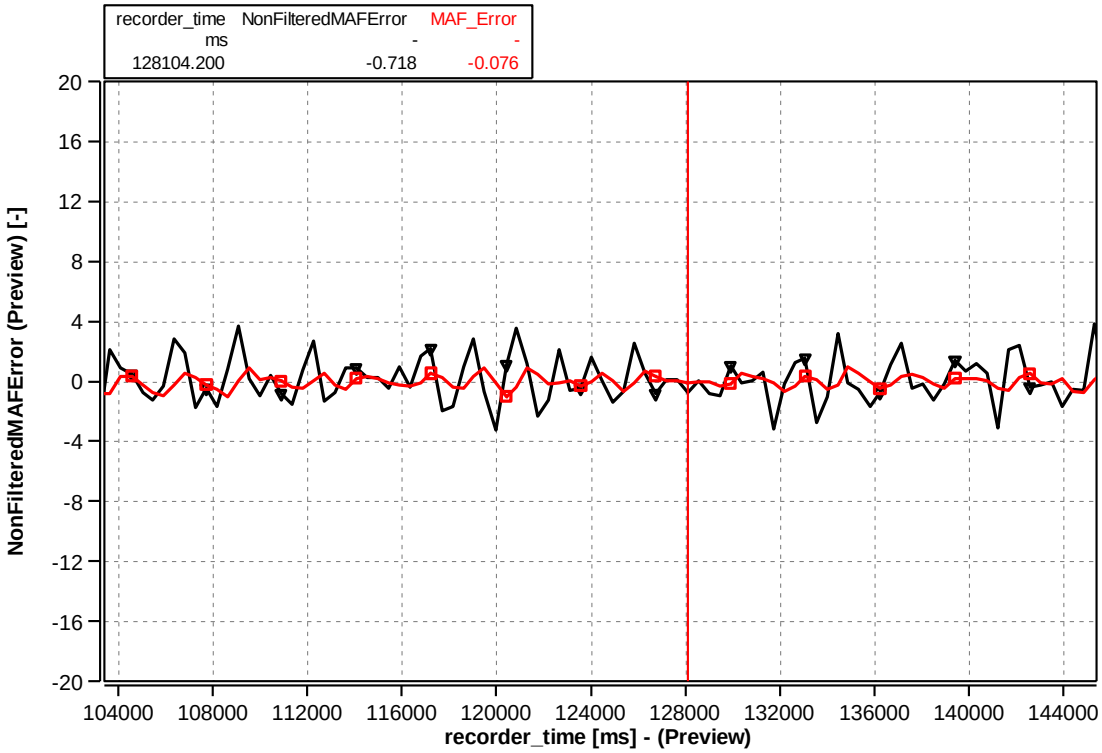
3.4.1.2 Filtreleme

Kütle hava akışı sensörü yüksek frekansta veri gönderip parazitler içerebileceği için kontrolcü içerisinde kullanılırken filtreleme yapılması gerekmektedir. Tasarlanan alçak geçirgen filtre sensörün anlık tepkilerini sönümleyerek kontrol edilebilir bir yapı haline getirmektedir. 100 ms'lik bir zaman sabiti bunun için uygundur. Şekil 3.12'de tasarlanan alçak geçirgen filtre görülebilir.

Filtre öncesi ve sonrası sinyaller Şekil 3.13'teki gibidir. Bu grafikte NonFilteredMAFError filtrelenmemiş sinyali, MAF_Error ise filtrelenmiş sinyali göstermektedir.



Şekil 3.12 : Alçak geçirgen filtre tasarımı.



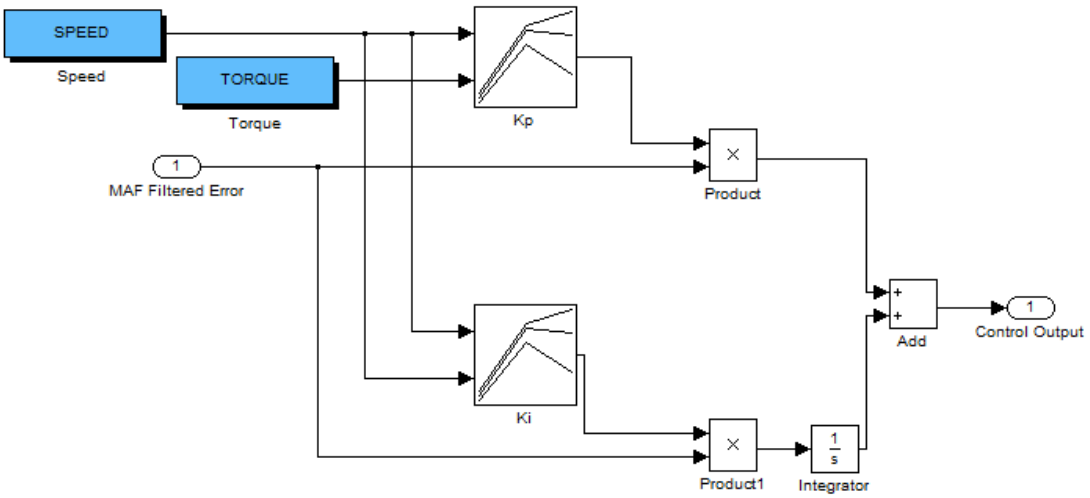
Şekil 3.13 : Alçak geçirgen filtre testi**.**

3.4.1.3 İleri besleme

Şimdiye kadar yapılan testlerde motor haritasında hangi noktada ne kadar kütle hava akışı olduğu bilindiğinden, bilinen noktalarda EGR valf tahmin edilip ileri besleme olarak kontrolcüye verilebilir. İyi çalışan bir kontrolcüde ileri besleme, tasarımın son aşamasında sistemden çıkartılabilir.

3.4.1.4 PI kontrolcü

PI katsayıları bu kontrolcünün temelini oluşturur. Problemsiz çalışan bir kütle hava akışı kontrolcüsü için bu katsayıların motor devrine ve yüküne bağlı olarak belirlenmesi gerekir. İyi kalibre edilmemiş bir PI kontrolcü hedeflenen değerlerden sistemi uzaklaştırır.



Şekil 3.14 : Motor hızı ve hataya bağlı PI kontrolcü yapısı.

PI parametrelerinin kalibre edilmesi için sisteme dışarıdan bir (Ör: ECU) müdahalenin olmaması gerekir. Bu çalışmada valfler direkt olarak dışarıdan kontrol edildiği için sisteme dışarıdan bir müdahale yoktur. Motor haritasında turbo çıkış basıncı bilinen bir noktada klape ile basınç ayarı da yapıldıktan sonra hava yolunu etkileyecek başka bir sistem kalmamış olur. PI kontrolcüsü motor haritasını eşit noktalara bölüp tasarlandıktan sonra aradaki noktalar interpolasyonla hesaplanarak haritalar doldurulabilir.

3.4.1.5 Saturasyon

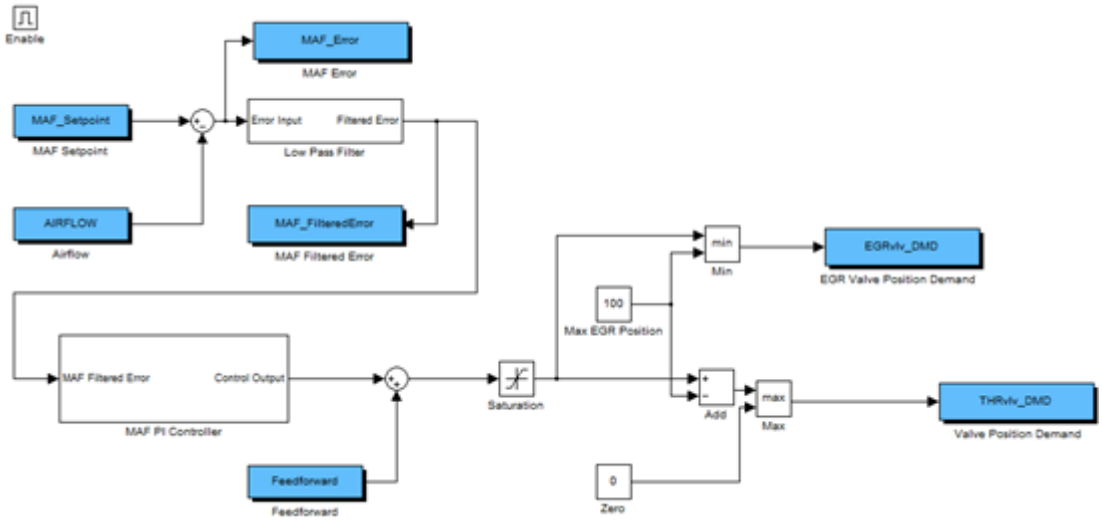
EGR valfinin ve hava kelebeğinin istenmeyen noktalara gitmesini engellemek amacıyla mutlaka kullanılması gerekir. Örneğin bu çalışmada kullanılan EGR valfine %100 ‘den fazla bir istek gittiğinde valf kendini kapatmaktadır. Hava kelebeğinin %100 pozisyonuna gitmesi, yani kendini tamamen kapatması ise motoru fiziksel olarak durdurabileceği için istenmeyen bir durumdur.

3.4.1.6 Hava kelebeğinin kontrolcüye eklenmesi

EGR valfinin %100 açık olmasına rağmen hedeflenen hava akışına ulaşılamadığı durumlarda hava kelebeğinin kullanımı gerekmektedir. Bu sayede ara soğutucu çıkış basıncı ile EGR soğutucusu çıkış basıncı arasındaki fark artırılarak daha fazla EGR akıtılması hedeflenmiştir.

Giriş bölümünde açıklandığı üzere dizel motorlarda hava kelebeğinin kullanımı yakıt ekonomisini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu sebeple hava kelebeği sadece EGR

valf pozisyonu tam açık durumdayken istenen kütle hava akışının elde edilemediği durumlarda kullanılmalıdır. Bu durumu sağlamak için minimum ve maksimum fonksiyonları kullanılarak EGR valfinin %100'den açık pozisyona gitmemesi sağlanırken, hava kelebeğinin ise sadece istenen sonuca ulaşılamaması durumunda etkileştirilmesi sağlanmıştır. Hava kelebeği pozisyonunun belli bir pozisyon üzerine çıkması durumunda motor içerisine alınacak hava çok azalacağından motorun siyah duman atmasına hatta durmasına sebep olmaması için saturasyonda maksimum değer 180 girilmiştir. Bu değer, kontrolcü çıkışı EGR valfini tam açıp hava kelebeğini açmaya başladığında, hava kelebeği pozisyonunun maksimum %80'e gelmesini sağlar. Bu sayede kontrolcü aktifken motor istenmeyen durumlara gitmez.



Şekil 3.15 : Kütle hava yolu kontrolcüsü.

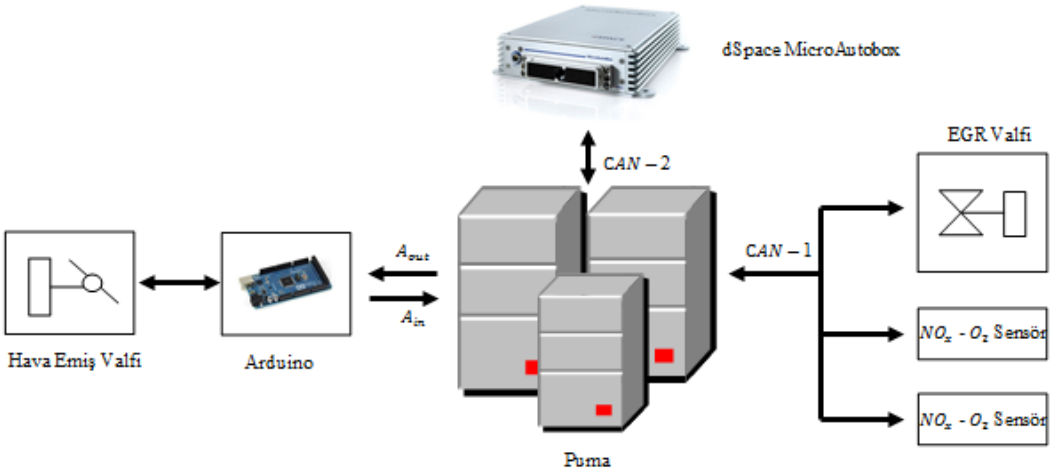
4. KÜTLE HAVA AKIŞI KONTROLÜ UYGULAMASI

Dinamometre gibi elektronik ve mekanik bileşenlerin iç içe olduğu bir sistemde kuşkusuz en büyük problem motor üzerinde kullanılan algılayıcıların ve erişim düzeneklerinin birbirleri arasındaki iletişimidir. Geliştirme safhasının ilerlemiş olduğu motorlarda, motorun çalışmaya devam edebilmesi için gerekli tüm algılayıcılar ve erişim düzenekleri elektronik kontrol üniteleri tarafından kontrol edilmekte ve değerlendirilmektedir. Motor geliştirme merkezlerinde elektronik kontrol ünitesinin desteklemediği veya yetersiz kaldığı durumlarda ise cihazlar arası haberleşme sağlanarak kontrolcü dışarıda çalıştırılıp istenen aksiyonlar alınabilir.

Cihazlar arası haberleşme, cihazların destekledikleri iletişim altyapısına göre değişiklik gösterebilmektedir. Bazı cihazlar CAN protokolü desteklerden, CAN protokolü desteklemeyen cihazlar için analog giriş ve çıkışlar gerekebilmektedir. Birbirinden farklı iletişim yolları kullanan bu cihazları birlikte kullanmak için MicroAutoBox veya dinamometrede kullanılan AVL Puma gibi cihazların kullanılması gerekmektedir.

4.1 Cihazlar Arası Haberleşme

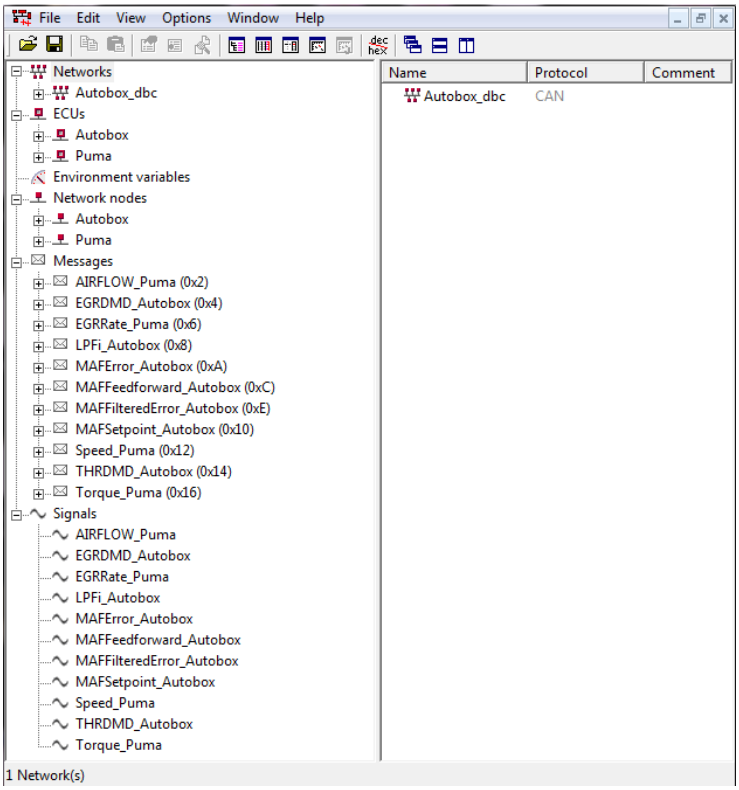
Bu çalışmada EGR valfi ve hava kelebeği kontrolü elektronik kontrol ünitesi tarafından desteklenmediği için EGR valfinin CAN veri yolu haberleşmesi ile AVL Puma tarafından, hava kelebeğinin ise yine AVL Puma tarafından analog çıkış verilerek H-Köprüsü ile Arduino ve Dual VNH5019 motor sürücüleri tarafından sürüldüğünden bahsedilmişti. MATLAB Simulink ortamında tasarlanan kontrolcü ise dSpace MicroAutoBox ile koşulmuş, AVL Puma ile CAN veri yolu ile haberleşerek motor hızı, kütle hava akışı gibi değerleri AVL Puma'dan almış, EGR valfinin ve hava kelebeğinin hesaplanan değerlerini yine AVL Puma'ya göndermiştir. EGR oranının hesaplanması için kullanılan oksijen ve NOx sensörleri ise yine CAN veri yolu ile AVL Puma ile haberleşmişlerdir. Puma'da motor devri, torku ve kütle hava akışı gibi değerler olduğu için CAN-2 hattından MicroAutoBox'a gönderilmiştir.



Şekil 4.1 : Cihazlar arası haberleşme.

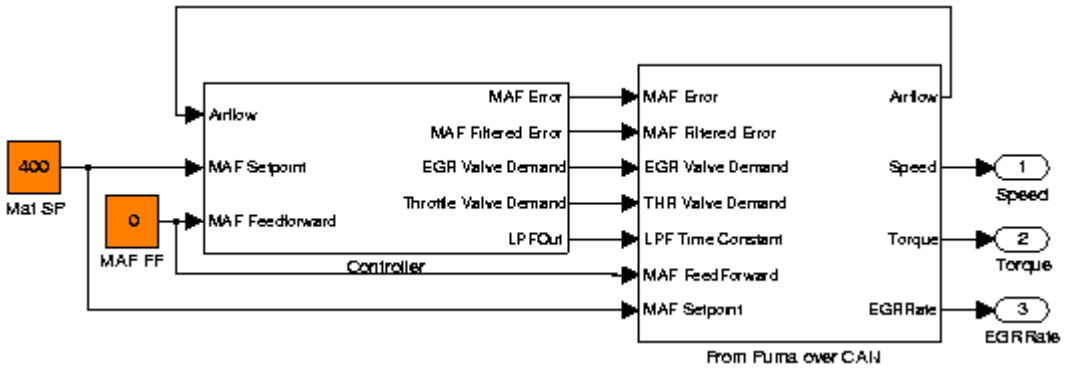
4.2 Kontrolcünün MicroAutoBox ile Çalıştırılması

Daha önce Matlab Simulink ortamında tasarlanan kontrolcü, giriş ve çıkışları Puma'dan alabilecek şekilde tekrar tasarlanmıştır. Daha önce CAN hattı üzerinden EGR valf ile haberleşebilmek için CAN veri tabanı gerektiğinden bahsedilmişti. Aynı şekilde Autobox ile Puma'nın haberleşmesi için CAN veri tabanı CANdb++ Editor ile hazırlanmıştır.



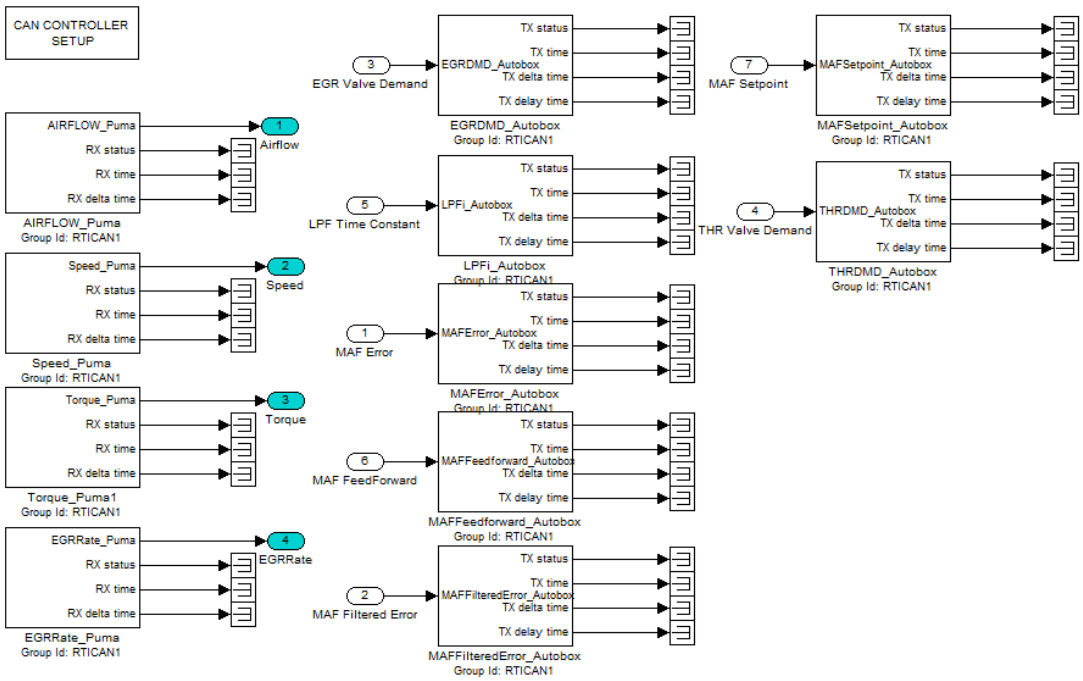
Şekil 4.2 : CAN veri tabanının oluşturulması.

Daha önce tasarlanan kontrolcü dSpace Simulink blokları kullanılarak güncellenmiş ve CAN veri tabanı da Simulink içerisinde CAN Controller Setup kısmına girilerek CAN bağlantı blokları eklenmiştir.



Şekil 4.3 : Kontrolcünün dSpace MicroAutoBox ile kullanılması.

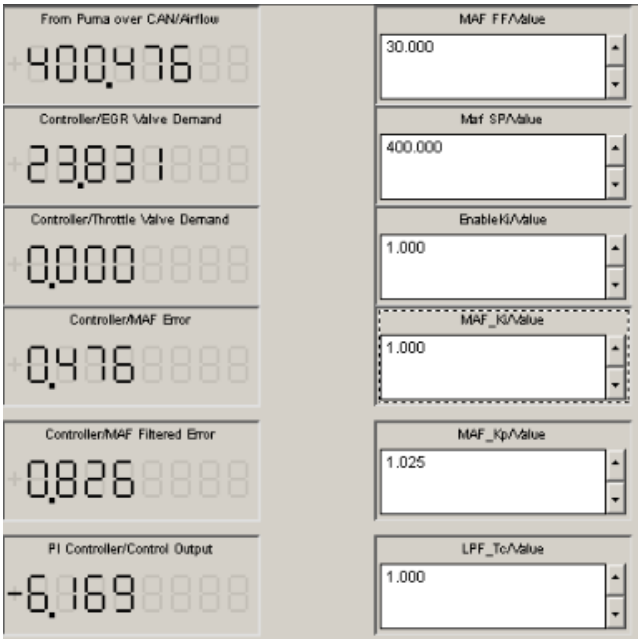
dSpace MicroAutoBox ile Puma'nın haberleşmesi sırasında haberleşme hızı Puma'nın izin verdiği en yüksek değer olan 500kbps olarak seçilirken EGR valfi ve NOx sensörleri ağır hizmet taşıtlarında standart olan 250kbps ile haberleşmişlerdir. Bu değerlerin problemsiz olarak istenen tepki süresini sağladığı görülmüştür.



Şekil 4.4 : Simulink CAN haberleşme blokları.

Simulink'te güncellenen kontrolcü derlendikten sonra dSpace ControlDesk kullanılarak kontrolcü içerisinde kullanılan değişkenler eklenmiş ve bir ara yüz oluşturulmuştur. Oluşturulan ara yüzde okunan değerler gerçek zamanlı olup,

kontrolcü içerisinde değiştirilen değerler ise yine gerçek zamanlı olarak herhangi bir işleme ihtiyaç duymaksızın geçerli olmaktadır.



Şekil 4.5 : Sistem çalışır haldeyken dSpace ControlDesk görüntüsü.

4.3 PI ve İleri Besleme Parametrelerinin Belirlenmesi

Motor hava yolunun farklı noktalarda ve farklı EGR valfi, hava kelebeği pozisyonlarında nasıl davrandığını bilmek, PI ve ileri besleme parametrelerinin belirlenmesinde kolaylık sağlayacaktır. Öncelikle belli motor devri ve torkunda yaklaşık olarak ileri besleme parametresinin belirlenmesi dinamik olan motorda istenen kütle hava akışının elde edilmesi hızlandırılmış olur. Kontrolcü bu noktadan itibaren hataları düzeltecek ve istenen kütle hava akışını sağlayacaktır.

Bu çalışmada PI katsayıları belirlenirken daha önceki motor haritası verilerinden ileri besleme değeri belirlenmiş ve sisteme eklenmiştir. Sistem bu durumdayken I parametresi sıfırlanıp sistem osilasyona girene kadar P katsayısının değeri artırılmıştır. Sistemin osilasyona girdiği noktada I parametresi artırılmaya başlanmış ve deneme – yanılma yöntemi ile P ve I parametrelerinin son hali verilmiştir. Yapılan bu işlem tek bir nokta için geçerlidir. Farkı motor devri ve torkunda sistem karakteristiği değişeceğinden motor haritasında noktalar seçilerek o noktalar için bu işlemin yapılması gerekmektedir. Aradaki noktalarda ise kontrolcüyü koşan sistem (MicroAutoBox, ECU, vb.) interpolasyon ile değerleri hesaplayacaktır.

4.4 Kontrolcü Uygulaması

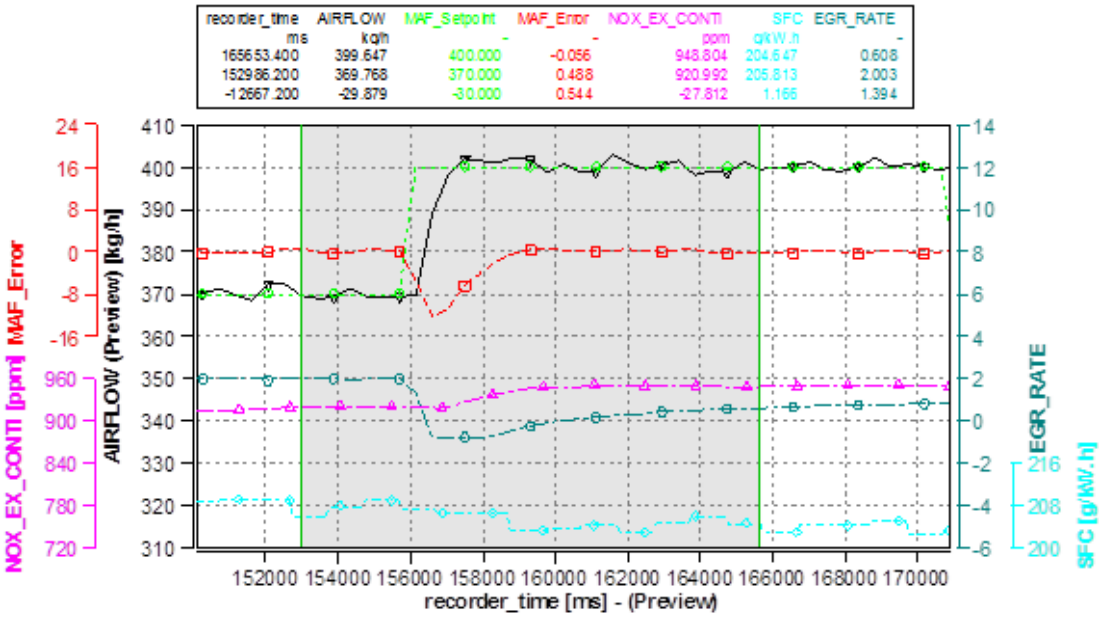
Tasarlanan kontrolcü motor haritasında çeşitli noktalarda denenip sonuçlar bu bölümde paylaşılmıştır. Öncelikle kontrolcü 400 kg/h kütle hava akışı talep etmiş, sonrasında ise 370 kg/h kütle hava akışı istenmiştir. Bu deney 1275 RPM ve 600Nm motor durumundayken gerçekleştirilmiş olup bu durumda kontrolcü parametreleri;

İleri Besleme $= 30$

$K_p = 3$

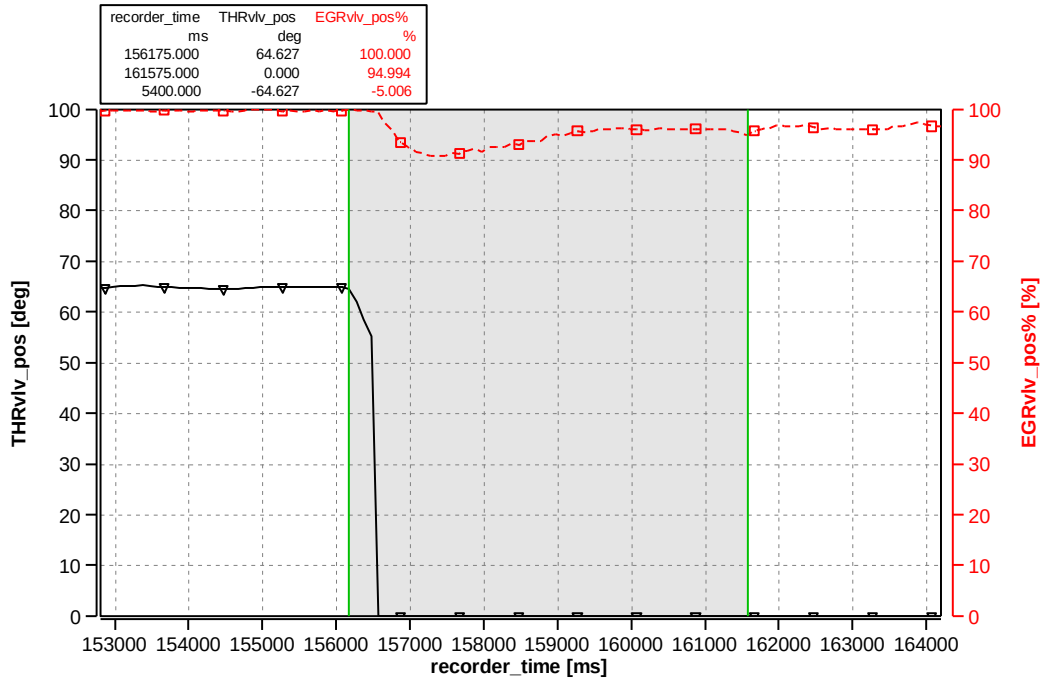
$K_i = 1.1$

şeklindedir. Şekil 4.6'da uygulamanın sonuçları paylaşılmıştır, bu şekilde MAF_Error ölçülen değer ve istenen değer arasındaki farkı, NOX_EX_CONTI egzoz hattındaki NO_x miktarını, AIRFLOW ölçülen kütle kava akışını, EGR_RATE EGR oranını, SFC ise özgül yakıt tüketimini ifade etmektedir. Kontrolcü bu parametrelerle yaklaşık 1.8 saniyede sistemi hedeflenen kütle hava akışına ulaştırmıştır. Alçak geçirgen filtre kullanılması sistemi nispeten yavaşlatmasına rağmen kütle hava akışı hatasına bakıldığına hata olmadığı görülmüştür.



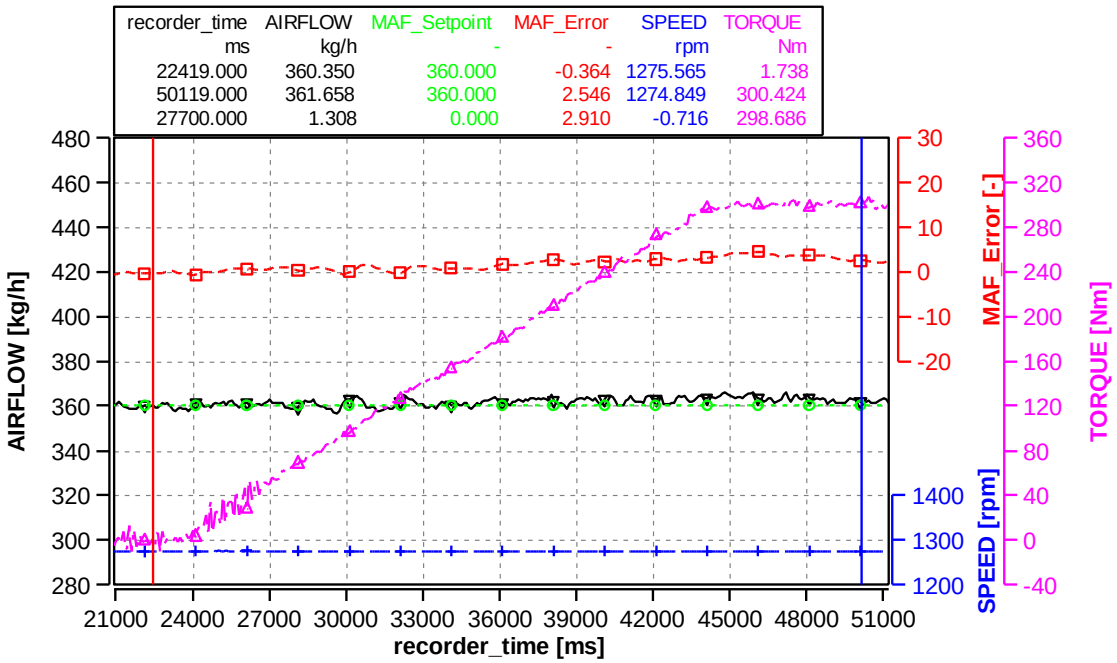
Şekil 4.6 : 1275RPM 600Nm'de sistem cevabı.

Aynı aralıkta EGR valfi ve hava kelebeği davranışları da takip edilmiştir. Şekil 4.7'de de görüldüğü gibi EGR valfi kapanmaya başladığında, kontrolcü hava kelebeğini açmaktadır. Bunun sebebi ise kontrolcünün hava kelebeğini sadece EGR valf pozisyonunun tam açık olduğu yerlerde kontrol etmesidir.

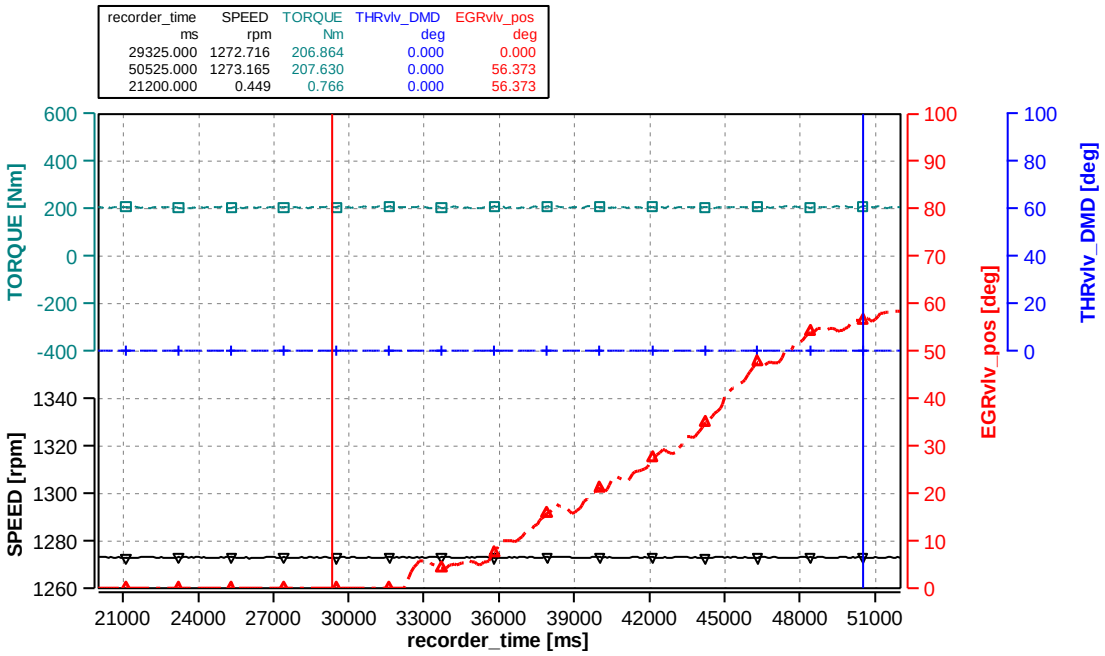


Şekil 4.7 : 1275RPM ve 600Nm'de EGR valfi ve hava kelebeği pozisyonları.

Sabit kütle hava akış hedefi verildiğinde, sabit RPM'de tork değişiminde kontrolcü denenmiştir. Sabit motor devrinde 20 saniyede motordan 600Nm talep edilmiş ve bu sırada kütle hava akışı hatası izlenip Şekil 4.8'de gösterilmiştir. EGR valfi ve hava kelebeği pozisyonları incelendiğinde ise sadece EGR valfi kullanılarak istenen hedefe ulaşabildiği için hava kelebeğinin kullanılmadığı görülmüş, bu durum Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.8 : Sabit olmayan motor hareketinde kontrolcünün denenmesi.



Şekil 4.9 : Sabit olmayan motor hareketinde EGR valfi ve hava kelebeği cevabı.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Mekanik

Dinamometrede yapılan testler, motor üzerinde hâlihazırda kullanılan aşırı doldurma sisteminin bazı WHSC ve WHTC noktalarında, emme manifoldunda yüksek basınçlar oluşturduğunu, bu durumun da EGR akışını olumsuz etkilediği yapılan testlerde gösterilmiştir. Dizel motorlarda yakıt ekonomisinin olumsuz etkilenmemesi için EGR sistemi ve hava kelebeği kullanılmadan önce enjektör zamanlaması ve ray basıncı değerleri optimizasyonu yapılarak yalnız gerekli olduğu durumlarda EGR kullanılmalıdır.

Bu çalışmada kullanan sabit geometrili turbo motor haritasında önemli noktalarda EGR akışının oluşması için hava kelebeğinin kullanılmasını gerektirmiştir. Dizel motorlarda hava kelebeğini kullanmak her zaman yakıt ekonomisine kötü yönde etki edeceği için bu çalışmada kullanılan aşırı doldurma sistemi yerine kompresör veya turbo tasarımı farklı, hava kelebeği kullanılmasını gerektirmeyecek başka bir turbo denemesi yapılmalıdır. Sabit geometrili turbo yerine değişken geometrili turbo (VGT) kullanımı ise hava kelebeği kullanımına gerek olmadan istenen EGR oranının istenen noktada sağlanmasını sağlayabilir. Bazı sabit geometrili turbolarda bulunan boşaltma kapağı pozisyonu da kontrol edilebildiği takdirde turbonun daha yavaş dönmesini sağlar, bu durum kompresörün de yavaş dönmesini sağlayarak emme manifoldu basınçlarını azaltıp bu çalışmadaki hava kelebeği görevini görebilir.

Euro VI çalışmaları için bu çalışmada kullanılan aşırı doldurma sistemi yerine başka bir sistem denenerek karşılaştırmalı olarak sonuçlar değerlendirilebilir.

5.2 Elektronik

Bu çalışmada prototip bir sistem kullanıldığı için analog giriş, analog çıkış ve 2 farklı CAN hattı kullanılması gerekmiştir. Farklı bir çok sistemin kullanımı, sistemde gecikmelere ve senkron bir yapının olmamasına sebep olduğu için kontrolcü bu yapıdan etkilenebilir. Bu sebeple prototip çalışmaların ileri safhalarında tüm bu

sistemler elektronik kontrol ünitesi (ECU) üzerinde toplanarak senkron ve stabil bir yapı sağlanabilir. Bu sayede dSpace MicroAutoBox ve Arduino gibi sistemlerin kullanımına gerek kalmayacaktır.

5.3 Kalibrasyon ve Kontrol

Bu çalışmada verilen örnekler ve deneysel sonuçlar yalnızca o noktalar için tasarlanmış kontrolcü katsayılarını içermektedir. PI kontrolcü ve ileri besleme parametreleri belirlenirken motor haritasında farklı noktalar seçilerek o noktalara uygun PI ve ileri besleme parametreleri seçilmeli ve hesaplanmalıdır.

Motor haritasında kritik noktalar için bu çalışmanın yapılması yaklaşık 16 x 16 büyüklüğündeki bir haritanın doldurulmasını gerektirmekte, bu da yoğun bir kalibrasyon ve kontrol çalışması gerektirmektedir.

Çalışmada kullanılan EGR valfi, hava kelebeği, aşırı doldurma sistemleri prototip seviyede olduğundan ve kullanılacağı kesin olmadığından bu şekilde bir kalibrasyon ve kontrol çalışması gerekli bulunmamıştır.

5.4 Sensörler ve Analizörler

Motor geliştirme ve test merkezinde kullanılan sensörler yüksek frekansta ve çözünürlükte çalışmaktadır. Kullanılan emisyon analizörleri ise sertifikalı ve yüksek çözünürlükteki analizörlerdir. Bu şekilde bir çalışma araç seviyesinde kullanılacaksa araç seviyesi sensörlerine göre kontrolcü parametrelerini tekrar ayarlamak gerekebilir. Özellikle kütle hava akışı kontrolü yapılan bu çalışmada kütle hava akışı sensörü olarak dinamometre sensörü kullanılmıştır, prototip motorun ileri safhalarında kullanılacak sensöre göre kontrolcü parametrelerinin gözden geçirilmesi gerekebilir.

KAYNAKLAR

[1] Ağır Hizmet Araçlarından Çıkan Emisyonlar (Euro 6) Bakımından ve Araç Tamir ve Bakım bilgilerine Erişim Konusunda Motorlu Araçların Tip Onayına İlişkin Yönetmelik, Resmi Gazete Sayı 28014, 3 Ağustos 2011.

[2] <*http://www.ford.com.tr/agir-ticari-araclar/ford-cargo/ecotorq*>, alındığı tarih: 20.04.2012

[3] **M. Van Nieuwstadt**, "Coordinated Control of EGR Valve and Intake Throttle for Better Fuel Economy in Diesel Engines", SAE Paper 2003-01-0362, March 2003, Detroit, Michigan.

[4] Raylı Sistemler Teknolojisi, Dizel Motorların Hava Sistemleri, MEGEP, Ankara 2008

[5] <*http://www.hitachi-c-m.com/global/images/products/excavator/wheel/z x210w-3/KS_EN042_03.jpg*>, alındığı tarih: 25.04.2011

[6] <*http://delphi.com/manufacturers/auto/powertrain/diesel/engcontrols/egr/*> alındığı tarih: 20.04.2012

[7] <*http://delphi.com/shared/pdf/ppd/pwrtrn/diesel-electronic-throttle-controls.pdf*>, alındığı tarih: 20.04.2012

[8] Current Emisssion Legislation Presentation, AVL, 20.03.2012

[9] **Dana Lowell and Fanta Kamakate**, "Urban off-cycle NOx emissions from Euro IV/V trucks and busses – Problems and solutions for Europe and developing countries", ICCT

[10] <*http://www.dieselnet.com/standards/cycles/whsc.php*>, Erişim tarihi: 14 Nisan 2012

[11] **R.P. Verbeek; N.E. Ligterink; H.J. Dekker**, "Correlation Factors between European and World Harmonised Test Cycles for heavy-duty engines", Dec 2008

[12] **J. R. Needham, D. M. Doyle, and A. J. Nicol**, "The Low NOx Truck Engine", SAE Paper 910731, 1991.

[13] **Gün, Ayhan**, "The Position Control of the DC Machine by PID Algorithm and Training with Adaptive Neuro Fuzzy Inference System", 2007.

[14] <*http://www.pololu.com/docs/0J49/1.a*>, Erişim tarihi: 14 Nisan 2012

[15] Actuator Position Control Calibration Documents, Calibration & Control Department, Ford Otosan

[16] MAF Outer Loop Calibration, Calibration & Control Department, Ford Otosan

[17] **M. Tolga Şenoğuz, H. Alper Bozkurt, Canan Karadeniz and Kazi N. Adil**, "Modeling and Testing of the Throttle Body Usage in a Diesel Engine to Improve NOx Emissions", SAE Paper 2008-01-2646, 2008, Ford Otosan, Gebze Engineering.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Osman UYGUR

Doğum Yeri ve Tarihi: Niğde - Mayıs 1986

E-Posta: osmanuygur@gmail.com

Lisans: Makina Mühendisi

Mesleki Deneyim:

Ford Otosan – Ürün Geliştirme

Motor ve Aktarma Organları – Kalibrasyon ve Kontrol Mühendisi