

39521

**BİR DİZEL MOTORUNDA SERAMİK KAPLAMA
UYGULAMALARI VE PERFORMANS ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Ekrem BÜYÜKKAYA

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 6.07.1994

Tezin Savunulduğu Tarih : 29.06.1994

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Veli ÇELİK

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Behçet SAFGÖNÜL

Doç. Dr. Ertuğrul ARSLAN

ÖNSÖZ (*)

Teknolojinin baş döndürücü bir hızla geliştiği günümüzde, ileri teknoloji malzemeleri olarak bilinen seramikler, bir çok özellikleri nedeniyle geniş kullanım alanları bulmuştur. 21. yüzyılın hakim malzemelerinden sayılan seramikler, yüksek sertlik, korozyon dayanımı, düşük yoğunluk ve ısı iletim katsayısı nedeniyle son yıllarda bir çok araştırmaya konu olmuştur. Özellikle, otomotiv endüstrisi, tekstil, tıp, elektronik, metalurji, inşaat ve kimya dallarında yüksek teknoloji seramiklerden çok şeyler beklenmektedir.

Bu çalışmada, çift silindirli bir dizel motorun yanma odası elemanlarının (piston, supap ve silindir kapağının) plazma sprej metodu kullanarak $MgO+ZrO_2$ adı verilen seramik malzemesiyle kaplanması halinde, elde edilen performans özelliklerinin, normal motorunki ile mukayesesi yapılmıştır.

Çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Doç.Dr.Veli ÇELİK 'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Adapazarı, 1994

Makina Mühendisi
Ekrem BÜYÜKKAYA

(*) Bu çalışma TÜBİTAK MİSAG-30 (DPT) projesi desteği ile yürütülmüştür.

İÇİNDEKİLER	Sayfa
ÖNSÖZ	ii
NOTASYON LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	x
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
1.1. Uygulamanın Tarihçesi	1
1.2. Adyabatik Motorlardan Beklenen Özellikler	2
1.3. Bu Çalışmanın Amacı	5
BÖLÜM 2. MOTORLARDA TERMAL BARIYER KAPLAMA TEKNİKLERİ	8
2.1. Seramik Kaplamalar	8
2.2. Seramik Kaplama Malzemeleri	12
2.3. Kaplama Teknikleri	17
2.3.1. Plazma Püskürtme Yöntemi	18
2.3.2. Alevle Püskürtme Tekniği	21
2.3.3. CVD ve PVD Teknikleri	22
2.3.4. Detonasyon Tabancası Tekniği	22
2.4. Uygulamalar	23
BÖLÜM 3. TEORİK ÇALIŞMALAR	26
3.1. Motor Performansına Ait Genel Denklemler	26
3.2. Motorlarda Isı Transferinin Önemi	28
3.3. Deney Sonuçlarına Dayanan Hesaplamalar	36
BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	42
4.1. Deney Donanımı	42
4.1.1. Deney Motorunda Yapılan Teknik Düzenlemeler	42
4.1.2. Deney Donanımı ve Kullanılan Cihazlar	44
4.1.3. Kaplanan Parçalar ve Kullanılan Seramik Tozun Özellikleri	45
4.2. İşletme Şartları ve Ölçme Tekniği	46
4.3. Deney Sonuçları	50
BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE İRDELEME	65

KAYNAKLAR

71

ÖZ GEÇMİŞ

74



NOTASYON LİSTESİ

A_c	: Soğutucu alanı (cm^2)
A_g	: Gaz alanı (cm^2)
A_{kc}	: Silindir kafasının soğutucu ile temas alanı
A_{kg}	: Silindir kafasının gaz ile temas alanı
b_e	: Özgül yakıt tüketimi (gr/kwh)
c	: Çarpım faktörü
F	: Fren kuvveti (N)
G	: Akan gaz kütlesi (m^3/sn)
G_s	: Soğutucu su miktarı (gr/sn)
g_o	: Kuvvet-kütle-ivmelendirme sabiti
H_f	: Oluşum entalpisi (kJ/mol)
H_R	: Reaktantların entalpisi (kJ/kmol)
H_u	: Yakıtın alt ısı değeri (kJ/kg)
c_p	: Sabit basınçtaki özgül ısı ($\text{kJ/kg } ^\circ\text{K}$)
h_c	: Soğutucu tarafı ısı taşınım katsayısı ($\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)
h_g	: Gaz tarafı ısı taşınım katsayısı ($\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)
k	: Duvar ısı iletim katsayısı ($\text{W/m } ^\circ\text{C}$)
t	: Duvar kalınlığı (m)
m_y	: Yakıtın kütleli debisi (kg/sn)
M_d	: Döndürme momenti (Nm)
M_y	: Yakıtın mol ağırlığı (kg/mol)
n	: Motor dönme hızı (d/dak)
i	: Çevrim oranı
η	: Sıvı viskozitesi (cm^2/sn)
n_y	: Yakıtın molar debisi (mol/sn)
P_e	: Efektif güç (kw)
P_g	: Gaz basıncı (N/m^2)
p_{me}	: Ortalama efektif basınç (N/m^2)
Pr	: Prandtl sayısı
O_{min}	: Minimum gerekli hava miktarı
Q	: Birim zamanda geçen ısı miktarı (kJ/sn)
Q_e	: Egzoz enerjisi (kJ/sn)
Q_k	: Silindir kafasından geçen ısı miktarı (kJ/sn)
W_p	: Faydalı enerji (kw)
Q_T	: Toplam enerji miktarı (kJ/sn)
Q_{tr}	: Soğutucuya transfer edilen ısı miktarı (kJ/sn)
R	: Reynolds sayısı
T	: Sıcaklık ($^\circ\text{C}$)
T_c	: Soğutucu çıkış sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)
T_d	: Silindir kafası deney noktası sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)
T_e	: Egzoz gazı sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)

T_g	: Ortalama gaz sıcaklığı (°C)
T_{gi}	: Soğutucu giriş sıcaklığı (°C)
T_{sc}	: Soğutucu tarafı yüzey sıcaklığı (°C)
T_{sg}	: Gaz tarafı yüzey sıcaklığı (°C)
T_{sg}'	: Seramik metal sınır sıcaklığı (°C)
T_o	: Ortam sıcaklığı (°C)
t	: Zaman (sn)
V_h	: Toplam kurs hacmi (m ³)
V_y	: Yakıt hacmi (cm ³)
γ	: Yakıt yoğunluğu (gr/cm ³)
η_m	: Mekanik verim (%)
η_t	: Termik verim (%)
λ	: Hava fazlalık katsayısı
q_{tr}	: Soğutucuya transfer edilen ısı yüzdesi (%)
q_p	: Faydalı ısı yüzdesi (%)
q_e	: Egzoz gazı ısı yüzdesi (%)

İNDİSLER

c	: Soğutucu, soğutucu tarafı
d	: Deney noktası
e	: Egzoz
g	: Gaz, gaz tarafı
H	: Hidrojen
k	: Silindir kafası
sc	: Soğutucu cidarı
sg	: Gaz cidarı
tr	: Transfer
T	: Toplam
$\ddot{U}$	: Ürün
y	: Yakıt
p	: Sabit basınç
R	: Reaktant
m	: Ortalama

KISALTMALAR

AÖN	: Alt ölü nokta
ÜÖN	: Üst ölü nokta
NM	: Normal motor
KM	: Kaplamalı motor
TBC	: Termal bariyer kaplama
YO	: Yanma odası
PSZ	: Kısmen stabilize edilmiş zirkonya
CaPSZ	: Kalsiyumla stabilize edilmiş zirkonya
MgPSZ	: Magnezyumla stabilize edilmiş zirkonya

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1-1	Standart ve Adyabatik Motorların Enerji Dengesinin Karşılaştırılması	4
Şekil 1-2	Turbo Kombine Motor Şeması	4
Şekil 2-1	Bazı Seramiklerin ve Dökme Demirin Genleşme Katsayıları	10
Şekil 2-2	Bazı Seramiklerin Isı İletim Katsayıları	11
Şekil 2-3	Tek ve Çok Tabakalı Termal Bariyer Kaplama	12
Şekil 2-4	Çeşitli Seramik Malzemelerinin Sıcaklığa Bağlı Olarak Isı İletkenliklerinin Değişimi	15
Şekil 2-5	MgO İle Stabilize Edilmiş ZrO_2	16
Şekil 2-6	Plazma Püskürtme Ünitesi	20
Şekil 2-7	Plazma Püskürtme Tabancasının Kesiti	21
Şekil 2-8	Çubuk İle Çalışan Sistem	22
Şekil 2-9	Detonasyon Tabancası	23
Şekil 3-1	Standart Bir Dizel Motoruna Ait Enerji Dengesi	29
Şekil 3-2	Isı Akış Diyagramı	34
Şekil 3-3	Deney Sonucuna Bağlı Isı Geçiş Diyagramı	36
Şekil 4-1	Deney Donanımı ve Fren Dinanometresi	44
Şekil 4-2	Deneyde Kullanılan Parçaların Kaplanmış Hali	48
Şekil 4-3a	Normal Motor İçin Deney Sonucunda Elde Edilen Değerlere Göre Yumurta Eğrileri	50
Şekil 4-3b	Kaplamalı Motor İçin Deney Sonucunda Elde Edilen Değerlere Göre Yumurta Eğrileri	51
Şekil 4-4	Birinci Bölge (düşük yük, düşük devir)	51
Şekil 4-5	İkinci Bölge (yüksek yük, düşük devir)	52
Şekil 4-6	Üçüncü Bölge (düşük yük, yüksek devir)	52
Şekil 4-7	Dördüncü Bölge (yüksek yük, yüksek devir)	53
Şekil 4-8	Sabit P_{me} Şartlarında Motor Devirine Bağlı Olarak Egzoz Sıcaklıklarının Değişimi	55
Şekil 4-9	Sabit P_{me} Şartlarında Motor Devirine Bağlı Olarak Egzoz Enerjisinin Değişimi	56
Şekil 4-10	Sabit P_{me} Şartlarında Motor Devirine Bağlı Olarak % Egzoz Enerjisinin Değişimi	57
Şekil 4-11	Sabit P_{me} Şartlarında Motor Devirine Bağlı Olarak Özgül Yakıt Tüketiminin Değişimi	58
Şekil 4-12	Sabit P_{me} Şartlarında Motor Devirine Bağlı Olarak Soğutmaya Transfer Edilen Enerjinin Değişimi	59
Şekil 4-13	Sabit P_{me} Şartlarında Motor Devirine Bağlı Olarak Soğutmaya Transfer Edilen Enerjinin % Olarak Değişimi	60
Şekil 4-14	Toplam Enerjinin Motor Deviri İle Değişimi	61
Şekil 4-15	Sabit P_{me} Şartlarında Motor Devirine Bağlı Olarak Hava Fazlalık Katsayılarının Değişimi	62
Şekil 4-16	Egzoz Enerjisinin Sabit P_{me} Şartlarında Motor Gücüyle Değişimi	63
Şekil 4-17	Efektif Gücün Motor Deviri İle Değişimi	64

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2-1	Bazı Yüksek Teknoloji Seramiklerinin Özellikleri	14
Tablo 2-2	TBC 'larda Bağlayıcı Katman ve Seramik Kompozitlerin Konsantrasyonu	16
Tablo 2-3	Seramik Kaplamalar ve Uygulama Alanları	18
Tablo 2-4	Seramik Kaplama Teknikleri ve Kaplama Malzemeleri	19
Tablo 3-1	Ölçülen ve Hesaplanan Değerler	37
Tablo 3-2	Soğutucuya Transfer Edilen Isının % Oranları	38
Tablo 3-3	Yakıt Özellikleri	39
Tablo 4-1	Deney Motoruna Ait Teknik Özellikler	43
Tablo 4-2	Kaplamada Kullanılan Seramik Tozun Özellikleri	47
Tablo 4-3	Motor Deney Aralıkları	49
Tablo 5-1	Normal Motor İçin Deneyden Sonra Hesaplanan Değerler	69
Tablo 5-2	Kaplamalı Motor İçin Deneyden Sonra Hesaplanan Değerler	70

ÖZET

Bu çalışmada, tabii emmeli, çift silindirli bir dizel motorun yanma odası elemanlarının (piston, supap ve silindir kapağının) kaplanmasıyla elde edilen performans özelliklerinin, normal motorun ki ile karşılaştırılması esasına dayanmaktadır.

Öncelikle motorun performans özelliklerini tesbit etmek amacıyla, sabit bir yüke karşılık motor hızı değiştirilerek her devir sayısı için motor karakteristik büyüklükleri, sisteme yerleştirilen ölçüm cihazları ile ölçülmüş, faydalı enerji miktarı, soğutmaya transfer edilen ve egzoz enerji miktarlarını hesaplamak için de bilgisayar programı yapılmış ve alınan değerler grafikler şeklinde sunulmuştur.

Doğrudan deneyden alınan değerlerle yapılan mukayese ve bunlara bağlı hesaplamalar sonucunda, seramik kaplı motor ile normal motor için eş özgül yakıt tüketimi eğrileri dört bölgeye ayrılarak çizilmiştir. Bu eğriler üzerinde yapılan incelemelerde, fazla bir fark görülmemesine karşılık kaplamalı motorun bazı noktalarda avantajlı olduğu gözlenmiştir ($P_{me}=3.75$ bar, $n=1400$ d//d). Aslında düşük yük ve devirlerde elde edilebilecek avantajlar son derece önemlidir. Yüksek devir ve tam yük durumlarında aynı gelişme görülmemesine rağmen, düşük ve orta yük ile hızlarda çalışması istenen motorlar için dikkate değer bir yakıt ekonomisi sağlanabilir.

Çalışmalar sonunda elde edilen egzoz gazı sıcaklıklarındaki artışlar, seramik ile kaplanmış olan motorun son derece avantajlı olduğunu göstermiştir. Kullanılan kaplama metodunda (Plazma Sprey) uygulanabilirliğini açık bir şekilde ortaya koymuştur. Soğutmaya olan ısı geçişini tesbit edip, soğutma suyu debisi ve sıcaklık farkıda ölçülerek diğer bilinmeyenler hesaplanmıştır. Bunların yanısıra yalıtım kaplamasının sağladığı ısı kaybı azalması sebebiyle dizayn parametrelerindeki değişimin motor performansına etkileri araştırılmıştır.

Bu çalışmalar ışığında varılan sonuçlar, daha önce yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen bulgularla karşılaştırılmış, sağlanan başarılar ve beklentiler bildirilmiştir.

CERAMIC COATING APPLICATIONS AND PERFORMANCE ANALYSIS IN A DIESEL ENGINE

SUMMARY

The major goals of the Adiabatic Engine Project are to remove the water cooling system, reduce heat rejection, and improve thermal efficiency. Elimination of the cooling system includes the radiator, water pump, fan, belts, etc.. Potentially, long term redesign would address engine block and cylinder head cooling passage elimination. The thermal efficiency improvements would be accomplished by turbocompanding the high temperature exhaust gas (converting thermal energy to mechanical energy). Turbocompounding is basically composed of a turbocharger which is geared to the flywheel.

In order to accomplish the major goals, effective insulated components (piston, head and liner) are required. In an effort to improve design insulation effectiveness, reliability, and engine performance, a design philosophy is established with the following objectives in mind:

- Maximize insulation
- Insulate at the combustion surfaces
- Minimize design complexity
- Maintain reliability
- No forced cooling
- Design for potential long term durability
- Avoid high alloy steels
- Minimize engine design changes
- Retain engine performance

After recognizing the major project goals and establishing a list of objectives, a strategy is identified as follows:

- Insulate at the combustion surface
- Use insulating ceramic
- Use a high thermal expansion ceramic
- Use ceramic-metal assemblies
- Retain current structural metals
- Retain current combustion chamber

Focusing on the overall development goals and establishing a set of objectives is necessary such that a component design strategy could be formulated. This process is considered essential in order to limit the number of alternative design approaches which would be addressed. Important factors which influence the strategy that is

coosenincluded such things as: The project is mainly technology development and application oriented, use of non-strategic materials, compenents experience temperatures which are higher than most metals are suited for, the project is not restrained by economic trade-off considerations or material costs, and demonstration goals and deadlines are specified.

Taking into acccunt the overall project goalls, related factors, and established objectives a strategy is established which concentrated on development of ceramic insulating compenents. A low thermal conductivity ceramic material is choosen because it would potentially satisfy the objectives of providing insulation at the combustion chamber surface, provide maximum insulation effectiveness, and reduce the design complexities associated with attaching and forming based structurally equivalent thermal barriers. Although air is a very low thermal conductor and air gaps can be used to provide respectable thermal barriers, the metal portion which is located between the combustion chamber and the air gap will be operating at very high temperatures, experiencing large transient temperature changes, experiencing large thermal expansion distortions, and be acting as a regenerator storing heat energy during the power stroke and releasing energy during the intake stroke.

Thermal-barrier coatings (TBCs) have been proposed for use in diesel engines to increase component durability and to function as corrosion barriers. However, most current research is aimed at the use of thermal barrier coatings in producing is to leave more heat in the hot working gas so that the gas can do other work such as turn a turbocharger. Tha main purpose of a thermal barrier coating in an adiabatic engine, therefore, is to reduce heat transfer to components to achieve a direct increase in engine efficiency, not to protect metallic components from degradation.

Reduction of heat transfer by eliminating cooling in a turbocharged diesel engine has been estimated to achieve a 1% efficiency increase. Coating the critical components, which are the piston crown and fire deck (cylinder head), with thermal barrier coatings has been estimated to provide an additional 2% increase in efficiency. Exhaust valves and cylinder liners, which support little heat flow, are not considered critical components for thermal barrier coatings. Exhaust valves are, however, candidates for coatings to increase their durability.

The conditions that exist in an adiabatic diesel engine are very different from those that exist in gas-turbine engines. Adiabatic diesel engines have a low level of cooling, low average heat fluxes (but very high momentary heat fluxes), and low peak gas temperatures (to 800°C, 1475°F). In contrast, gas turbines operate under conditions of a relatively high steady state heat flux and high temperature. The insulating layer for a low heat flux condition must be thicker to achieve a similar temperature drop as for a high heat flux condition.

The greater ceramic coating thickness required in adiabatic diesel engines adds a considerable ammount of thermal expansion mismatch stress to the coating layer due to constraint within the ceramic. The high stresses can cause failure of the thermal-barrier coating even under the relatively mild conditions that exist in diesels. Consequently, it is necessary to grade the coefficient of thermal expansion of the thick coatings to distribute the stress through the coating thickness. Grading is

accomplished by applying a 100% metallic bond coat followed by successive layers of coating with decreasing amounts of bond-coat material and increasing fractions of partially stabilized zirconia (PSZ) ceramic. Such a coating has a bulk expansion coefficient that changes gradually from the substrate to the outer surface.

Current work has achieved long thermal barrier coating life by using up to five grading layers from bond coat to top coat to achieve a final coating thickness of approximately 0.25 cm (0.1 in.). This compares to a coating thickness of only 0.00020 to 0.038 cm (0.005 to 0.015 in.) for aircraft gas turbines.

The work in diesel thermal barrier coatings is one of the newest areas for thermal barrier coating research and it is still in its early stages. The relatively wide allowable range of coating thickness and the low operating temperatures that minimize oxidation concerns has created many options for balancing insulation and durability. Current development includes variations in coating thickness, grading, strength and porosity.

It may be appropriate at this point to recognize that the best choice insulating ceramic and the ideal ceramic are two very different materials. If the ideal material were available the design strategy would be modified significantly from that described earlier. The ideal thermal conductivity and a very zero would be most ideal they would also be most ideal they would also be most unrealistic. For a given design, a set of realistic ideal numbers could be defined.

The ideal material would have a very low expansion rate which could be determined by evaluation of operating temperature distributions, material expansions, thermal conductivities, elastic modulus, etc... In some design cases the component would be a monolithic ceramic piece and in others it would be a ceramic-metal assembly, all depending on the design restraints which might be influenced by factors which are not necessarily technical in nature.

The ideal material would have a tailored elastic modulus to satisfy the design where deflections were important to control, a high elastic modulus would be desirable. If a design included a ceramic component which was not a structural supporting member, but was included only for insulation or wear control purposes, and experienced high degrees of distortion, then a low elastic modulus material might be desirable.

Given the fact that no ideal material is available nor seen in the horizon, a review of the design objectives and previous experience indicated that a material with the following property trends is the most desirable compromise:

- Low thermal conductivity
- High thermal expansion
- Low elastic modulus
- High thermal expansion
- High use temperature
- High strength
- High toughness

Although for some components the least potentially complex design could be a monolithic component (entire piston of ceramic, for example), ceramic-metal assembly designs are chosen to provide the least risk in case of a failure associated with the ceramic. In addition, a ceramic material with a relatively high expansion rate, close to that of the metal portion, is desirable in order to keep the attachment design complexity to a minimum. Attachment techniques which are proposed included casting, brazing, and interference press-fit. From experience, reliability has been related to some degree with design complexity.

Furthermore, as a result of intrinsic properties of most ceramics, there is a potential for greater high temperature long term durability as opposed to most metals. Finally, in order to limit the amount of engine redesign it is decided that a current production base engine be used and insulated components be integrated into this engine. The project is not oriented toward development of a new engine which could take advantage of elimination of water cooling passages, etc.. Rather, the project is meant to develop and demonstrate insulating technology.

In order to reduce the production costs and fuel consumption in automotive industry, research and technological development works are under way on this field. The use of ceramic parts in lieu of metal in internal combustion engines has been an important one among these developments. On this subject, several important steps have been taken and mass production of engine parts made of ceramics has been started in the past years.

In this study, a naturally aspirated, water cooled, direct injection, and four stroke diesel engine with two cylinder has been tested to determine the performance characteristics by using a hydrolic dynamometer. In this engine, top surface of the piston, part of the cylinder head, exhaust valve surfaces which are in contact with the combustion gases (which forms the upper side of the combustion chamber) have been coated with a 0.5 mm layer of low-heat conduction ceramic material ($\text{MgO}+\text{ZrO}_2$ PSZ).

The thermal expansion coefficient of the coating material and the base material (strata) should be close to each other in order to have a successful thermal coating on the base material. Also, the satisfactoriness of the performance of the coating has been tested because the bonding layer, coating technique, type of ceramic coating power, and the coating thickness affect the quality/success of the coating.

Before the coating process started, a particular thickness of all the surfaces to be coated has been removed to keep the original design dimensions/sizes of the coated motor parts.

Computer simulation results based on a normal engine data have been presented in tables and figures. It is also observed that the amount of heat lost to the cooling water decreases proportionally as the engine speed increases, and that heat loss increases when the mean effective pressure is constant. Exhaust gas temperature and exhaust energy have increased quantitatively and proportionally as the engine speed increased while mean effective pressure did not change. Effective power and the total energy increases as the engine speed increases.

Expansion and contraction values in intake and exhaust valves and cylinder head have been measured with a sensitivity of 0.01 mm by using a special experimental adaptor equipped with 4 different comparators to determine the effects of ceramic coatings on engine valve mechanism (springs, valves and connection rod, etc.).

Effects of the coating on the opening and closing time of valves, open and overlap periods of valves have also been searched. Increases in surface temperatures cause some deviations from the original standard design and operation conditions in the valve mechanism of the engine due to different expansions of the valves and the cylinder head. New design and operation conditions should be set in the light of new experimental outcomes.

Performance maps have been drawn with axis of the mean effective pressure, engine speed and the equivalent specific fuel consumption by using experimental results. In these graphs, equivalent specific fuel consumption is a function of mean effective pressure and the engine speed. Both uncoated normal engine and the coated engine have been tested under two different sets of value adjustments (conditions) and the results have been compared. For further examination, performance maps have been divided into four separate regions. These are;

1. Low load, low speed
2. High load, low speed
3. Low load, high speed
4. High load, high speed

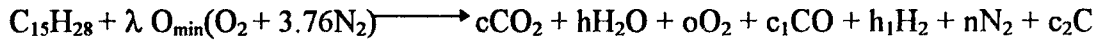
The region in which minimum specific fuel consumption occurs and the other regions have been evaluated one by one and comparatively. As a result of this evaluation, several important results have been derived such as conditions in which engine operates more economically and an appropriate usage purpose of a particular engine (for stationary purpose or for vehicles). For example, for an engine operated at low speed and low mean effective pressure, the best and the most advantageous operation condition is the first region which has the characteristics of low speed-low mean pressure engine operation.

Other ways of getting more benefit from an engine by turbocompounding and turbocharging have also been examined by measuring exhaust gas temperature. There is an increase in the useful energy of adiabatic engine because of revaluation of the high temperature exhaust gases.

As a result of experimental measurements, several new arrangements in the cooling system have also been searched due to the decrease in the heat transfer to the cooling system. There is also a decrease in the temperature of cooling water and wall (cooler side) due to the decrease in the heat loss to the cooling system. Increased gas-side fuel consumption by 4%, and increased engine speed by 1.6% affecting combustion efficiency. There is also an increase in the engine power due to the decrease in the load of cooling system.

A computer programme which determine the amounts of heat energics to the cooling water, exhaust, and useful power has been prepared.

In the test engine, the daesel fuel produced by Ipraş has been used. The closed formula of this fuel is $C_{15}H_{28}$. The general combustion equation of the fuel is as follows;



BÖLÜM 1

1. GİRİŞ

1.1 Uygulamanın Tarihçesi

Otomativ endüstrisinde maliyetin düşürülmesi ve yakıt sarfiyatının azaltılması konularında ki araştırmalar ve buna paralel olarakta, teknolojik yenilik çalışmaları sürdürülmektedir. Dünya çapında yapılan bir çok araştırmalarda, motor dizaynında yapılabilecek tasarımlarla motorun verimini iyileştirme çabaları, günümüzde oldukça önem kazanmış durumdadır. Tabi ki, bir içten yanmalı motorun performansını artırmak için yapılması gereken, kullanılan toplam enerjinin mümkün mertebe faydalı enerji haline dönüştürülmesini sağlamaktır. İçten yanmalı bir motorda kullanılabilir enerjinin %30-40 civarında olduğu bilinmektedir, geri kalan miktarı ise, motor parçalarını yüksek sıcaklıktan korumak amacıyla yapılmış olan soğutma sistemine ve ortalama 500-600 °C sıcaklıktaki egzoz gazlarına geçerek atmosfere atılır.

Kayıp enerjiyi faydalı hale getirmek, genişleme zamanındaki faydalı işi artırmak, egzoz ve soğutma sistemine giden ısıları azaltmakla sağlanabilir. Bunun için de yanma odasını teşkil eden parçaların ısı iletkenliği düşük, yüksek çalışma sıcaklığına dayanabilen bir malzeden imal edilmesi veya kaplanması, Kaplamalı Motor (KM) kavramını ortaya çıkarmıştır. Gerek motorlarda gerekse gaz türbinlerinde ısı kayıplarını azaltmak maksadıyla yanma odası seramik bir tabaka ile kaplanabilir.

Malzeme teknolojisindeki gelişmelerle bu malzemelerin fiziksel, termal ve kimyasal özelliklerini istenen şartlara yaklaştırarak geniş bir alanda kullanım imkanı hedeflenmektedir.

Bugün ileri teknoloji seramikleri ve kompozitleri olarak ifade edilen bu malzemelerin denenmeye başlanması aşağı yukarı 40-50 yıl önceye dayanmaktadır. Ancak tam anlamıyla uygulamaya geçilmesi ve özellikle roket nozulleri, gaz türbini kanatçıkları ve yanma odası elemanlarının kaplanması 1965 'lerde gerçekleştirilmiştir. O zamandan günümüze kadar olan tüm çalışmalarda kullanılacak seramik malzemelerinin kullanım yerine göre uygunluğu araştırılmış ve bir takım sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Örneğin yanma odası elemanlarının yapısal amaçlı yüksek teknoloji seramikleri olan oksit seramikler grubundan alüminyum oksit ve zirkonyum oksit dikkat çekmektedir [1].

Kaplamalı motorların gerçekleştirilmesi Termal Bariyer Kaplama (TBC) ile sağlanır. 1975 'lerden sonra dizel motorlarının yanma odası elemanlarında metal yüzey üzerine kaplama yapılarak kullanılmaya başlanmış ve hala üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Araştırmalar malzeme teknolojisinin yanı sıra, kaplama tekniği olarak da gelişmelerin hızını etkilemektedir. Günümüzde ısı yalıtımı sağlayan ileri teknoloji seramikleri, gaz türbini ve dizel motoru parçalarında kullanılmaktadır. 1970' lerde gaz türbininin çeşitli kısımlarında yapılan kaplama uygulamaları sonunda, başarılı ve geniş bir test performansı sağlanmıştır [1].

1.2. ADYABATİK MOTORLARDAN BEKLENEN ÖZELLİKLER

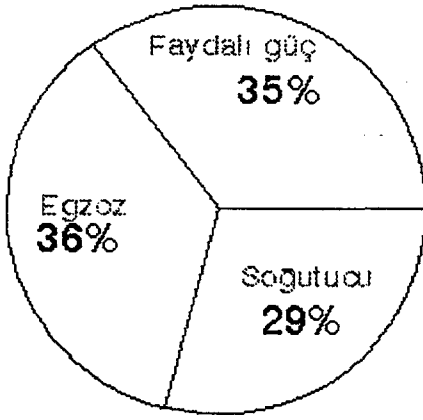
Teknolojinin baş döndürücü bir hızla geliştiği günümüzde, bilim adamları tarafından seramiği teknolojiye kazandırmak için büyük çaba harcanmaktadır. Bu çabalardan biride adyabatik motor projesinin gerçekleştirilmesi ve istenen amaca ulaşılmasıdır. Adyabatik motor projesinin en önemli amaçlarını; su soğutma sistemini kaldırma, ısı kaybını düşürme ve termik verimi artırma olarak sıralayabiliriz [2].

Isı kayıplarını azaltarak motorda verimi artırmak amacıyla; yanma odasının, pistonların, silindir kapağının ve supapların termal bariyer kaplanmasına ihtiyaç duyulur. Yanma odasından %80 'e yakın bir ısı kaybı azaltılması için enaz 3.5 mm 'lik bir kaplama kalınlığına ihtiyaç vardır. Tabi ki daha iyi kaplama yöntemlerinin gelişmesi ile bu kalınlık 5 mm civarında gerçekleştirilmektedir. Şayet silindir

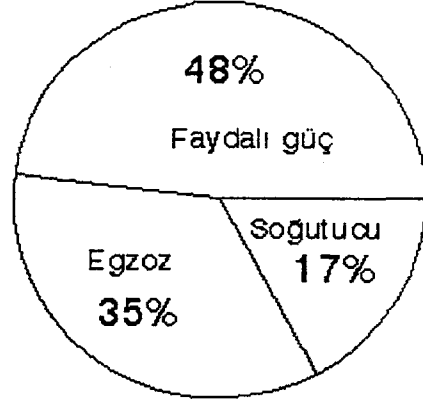
gömlükleri de seramikten yapılırsa segmanlara uygun termal genişmeli ve aşınmaya dayanıklı kaplama gereklidir. Bazı seramik malzemeler 870 °C 'ye kadar kendi kendine yağlayıcıdır [1]. Motor yanma odalarında çok iyi bir izolasyon için 5 mm 'lik bir kaplama tekniğine ihtiyaç duyulur. Ancak bu plazma püskürtmeli kaplama tekniği için pek mümkün değildir [3].

Günümüzde motorların metalden yapılması ve yanma odasındaki elemanların yüksek sıcaklığa maruz kalmalarından dolayı metal parçalarda erime görülmektedir. Düşük ısı kaybı sağlamak maksadıyla dizel motorlarında yapılan kaplamalar, soğutma sistemini ortadan kaldırmayı amaçlamaktadır. Soğutma sistemi elemanlarının (vantilatör, su kanalları, pompa, radyatör vb.) ortadan kalkmasıyla ağırlık, parça maliyeti ve ekonomisi yanısıra %40 oranında da yakıt tasarrufu sağlanacaktır. Bu amaçla yapılmış olan çalışmalarda yüksek sıcaklık yatakları ve yağları gibi problemler öne sürülmüşse de yapılan uygulamalar ümit vericidir [4]. Bugün tam adyabatik olmasa bile düşük ısı kayıplı motor yapımı özellikle soğutmaya giden ısı kayıplarının azaltılması, soğutma yükünün ve harcanan gücün azaltılması sebebiyle faydalı enerjiyi artıracak ve motor verimini yükseltecektir [5, 6,7].

Adyabatik motor projesinin diğer bir amacında, ısı kayıplarını azaltarak yanma odası (YO) cidar sıcaklıklarını artırma ve egzoz gazlarının sıcaklığını yükseltmektir. Egzoz gazlarının sıcaklığını artırmakla oluşan egzoz enerjisindeki artış, tabii emmeli bir dizel motoruna turboşarj veya turbokombine düzeneğinin eklenmesiyle dışarı atılan ısı enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesini sağlar ki bu da motorun performansını iyileştirir. Yanma odasındaki sıcaklık artışı ile yanmadan atılan hidrokarbonlar tamamıyla yanmakta, karbonmonooksit çıkışı ise azaltılmaktadır. Tabii emmeli bir dizel motorunda egzoz enerjisi toplamı %30-40 iken KM 'da %60-65 değerlerindedir. Ayrıca egzoz sıcaklıkları da standart bir dizel motorunda 400-600 °C olmasına karşılık KM 'da 700-900 °C 'dir [8]. Turbokombine bir motorda ise bu değerler 1100.°C 'ye kadar ulaşabilmektedir. Bu atık ısıların, bir takım düzeneklerin kurulmasıyla tekrar kazanılıp faydalı hale dönüştürülmesi için değişik çalışmalarda halen sürdürülmektedir. Şekil 1.1 'de standart ve adyabatik bir motor için enerji dengelerinin karşılaştırılması görülmektedir.



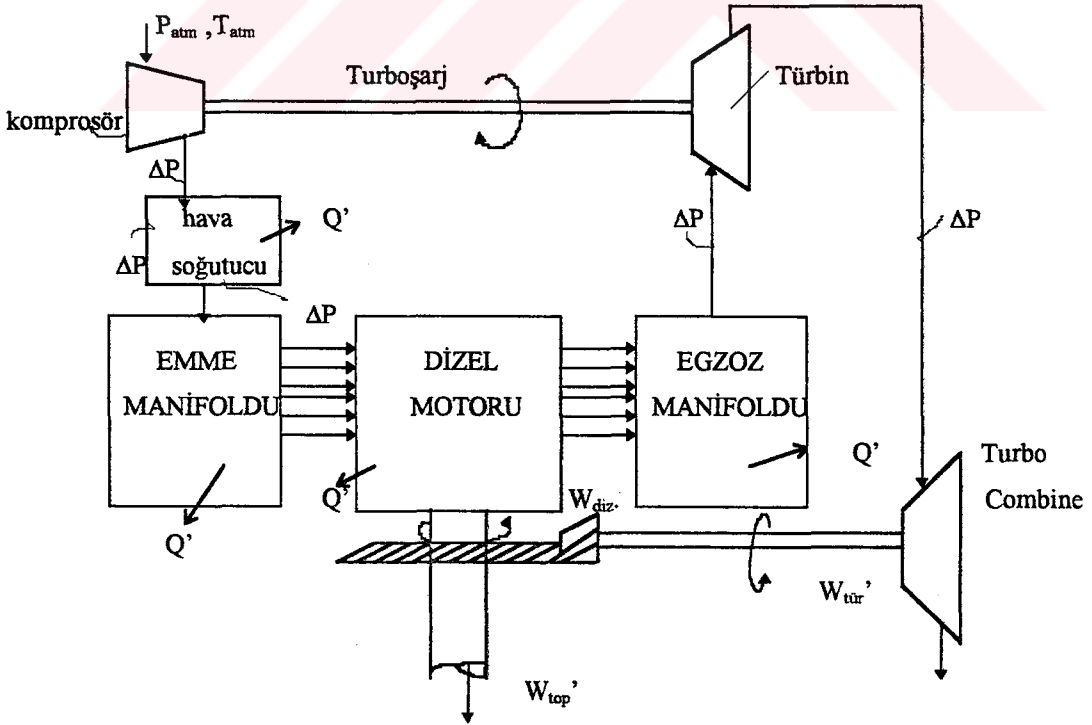
NORMAL MOTOR



KAPLAMALI MOTOR

Şekil 1-1 Standart ve Adyabatik Motorların Enerji Dengesinin Karşılaştırılması

Böyle bir sistemin uygulanmasıyla iyi bir yanma sağlanmakta, dolayısıyla egzoz gazı emisyonları da azaltılmaktadır. (Şekil 1-2)



Şekil 1-2 Turbo Kombine Motor Şeması

Yüksek ısı yalıtımını sağlamak amacıyla kaplanan yanma odası elemanlarında kullanılan bazı seramik türleri çok iyi ısı yalıtımı nedeniyle yanma ısısının yükselmesini sağlamakta, dolayısıyla birim yakıt tüketiminin düşmesine olanak vermektedir. Ancak yanma ısısının yükselmesi sadece dizel motorlarında arzu edilmektedir. Isı enerjinin dışarı atılmasını engelleyerek mekanik enerjiye dönüştüren turbokombine ünitesiyle termik verimde de artış sağlanmış olur. Cidar sıcaklıklarının artması tutuşma gecikmesinide engelleyerek motorun daha sessiz çalışmasını sağlar.

Şu ana kadar adyabatik motor projesinin üç ana amacı açıklanmıştır. Metal yerine seramik malzemesi kullanılması halinde ağırlık yönünden de oldukça önemli sonuçlar ortaya çıkarılmıştır. İleri geri hareket eden parçalarda seramik kullanılmasıyla sağlanan hafiflik, dairesel hareket eden turbo rotorları gibi parçalar için de önemlidir. Bu parçaların seramikten imal edilmeleriyle birlikte, yüksek sıcaklıkta kopma ve kırılmaya karşı dayanıklılık da sağlanmış olur. Tam adyabatik bir motor ve taşıt dizaynı sonunda bir askeri araçta (tankta) hacim azalması oranı oldukça etkilidir. Yaklaşık %40 'a varan değerlerde bir hacim azalması görülür. Bu azalma motorda %35, soğutma sisteminde %22, transmisyonda %20, yakıtta %17, aksesuarda ve diğerlerinde ise %5 değerlerine ulaşmaktadır [8]. Özellikle askeri amaçlar için hedef küçültme bakımından taşıtın küçültülmesi veya taşıtın kullanım alanının artırılması yanında, azalan ağırlığı sebebiyle daha az yakıt tüketme ve daha seri hareket kabiliyeti kazanması da performans açısından önemlidir.

Daha hafif motordan veya taşıttan sağlanan daha fazla güç, güç yoğunluğu artışı sağlar. Isı kayıplarının azaltılması sebebiyle sıkıştırma ile ateşlenen motorlarda (dizelerde) sıkıştırma sonu gaz sıcaklığı artacağından daha kolay ilk hareket sağlanır. Tutuşma gecikmesinin azaltılmasıyla da, kontrolsüz yanmadan kaynaklanan vuruntu ve gürültü azalarak daha sessiz çalışması imkanı elde edilir.

1.3. Bu Çalışmanın Amacı

Adyabatik motor projesinin en önemli amaçları olarak; motorda soğutucuya giden ısı kayıplarını önleyerek soğutma yükünü azaltmak, cidar sıcaklıklarını artırarak

tutuşma gecikmesini azaltıp yanmayı iyileştirmek, egzoz gazı sıcaklıklarını artırarak aşırı doldurmalı sistemlerde daha fazla güç elde etmek ve kısaca termik verimi iyileştirme gibi hususlar sayılabilir. Bu amaca ulaşabilmek için de ilk adımın piston, silindir kapağı ve supapların kaplanması gerektiği aşıkardır. İleri teknoloji seramiklerinin gelişmesiyle birlikte son yıllarda dizel motorlarının Yanma Odası (YO) elemanlarında termal bariyer kaplamaları kullanılması üzerine geniş araştırmalar yapılmaktadır. Seramik kaplamalı motorların 1980' lerde başlayan uygulamaları, özellikle ısı kayıplarını azaltmayı ve motor performansını artırmayı amaçlamaktadır.

Bu çalışmada öncelikle mevcut şartlarda uygulanabilir seramik malzeme ve mümkün olan kaplama tekniğı (Plazma Sprey) ile piston, silindir kapağı ve supapların ısı geçirgenliğı düşük bir seramik toz ile ($ZrO_2 \rightarrow Sn210$) kaplamak hedeflenmiştir. Çünkü seramik kaplamalarda kaplama tekniğı ve seramik toz bileşimi ile uygulama biçimi kaplama ömrüne, kalitesine ve performansa doğrudan etki etmektedir.

Bu işlemlerden sonra normal motor olarak tabir edilen kaplanmamış motordan performans sonuçları alınarak, daha sonra seramik kaplı YO elmanlarının montajıyla oluşturulan kaplamalı motor üzerinde aynı deneyler tekrarlanmıştır. Mevcut şartlarda gerçekleştirilen ve plazma sprete tekniğı kullanılan kaplama tabakasının ne ölçüde uygulanabilir olduğu incelenmiştir. Böylece normal motor ve kaplamalı motorun aynı şartlarda test edilmesinden elde edilen verilere göre performans parametrelerinin karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Özgöl yakıt tüketimi, ısı yalıtımı ve egzoz gazları sıcaklığındaki değışme, ayrı ayrı mukayese edilip uygulanan kaplamanın hangi amaca daha uygun olacağı araştırılmıştır. Bu amaca uygun dizayn ve işletme şartları tesbit edilip (devir, yük, supap ayar boşlukları vb.) KM 'dan maksimum faydalanma amaçlanmıştır. KM adyabatiklik oranı, kaplama malzemesi ve YO 'nın kaplama oranıyla ilişkili olduğu gibi, kaplama kalınlığıyla da alakalıdır. Bu ilgi çerçevesinde YO elmanlarının sürtünme dirençli kaplama ihtiyacından dolayı, segman ve silindir gömlekleri dışındaki piston, silindir kafası ve supaplar termal bariyer kaplaması ile kaplanmıştır. Ancak ısı kayıp oranı itibarı ile ciddi öneme sahip, pistonun malzemesi ve kaplamaya uygunluğu araştırılıp alternatifler sunmak istenmektedir. Deneyler sonunda, kaplanan motor elemanlarının durumu incelenerek, bundan sonra yapılacak

alışmalar için kaplama tekniği ve seramik malzeme ile yapılması gereken düzenlemelere yaklaşım sağlamak, bu çalışmanın amaçları arasındadır.



BÖLÜM 2

2. MOTORLARDA TERMAL BARIYER KAPLAMA TEKNİKLERİ

2.1. Seramik Kaplamalar

Endüstride kullanılan malzemelerin kalitelerini geliştirmek, daima ilgi çekici bir araştırma konusu olmuştur. Özellikle hareketli makina parçalarının daha yüksek, termik, mekanik ve korozyon mukavemetine sahip olması için yapılan çalışmalar, çok hızlı bir şekilde devam etmektedir. Bu özelliklere sahip malzemeleri üretebilmek için seramiklerden yararlanma yoluna gidilmektedir. Fakat parçaların tamamen seramikten yapılması, gerek imalat gerekse imalat sonrası çıkan problemler sebebiyle pek sağlıklı ve hesaplı olmamaktadır. Seramiklerin bu dezavantajlarını ortadan kaldırmak amacıyla metalik malzemeler üzerine kaplama yoluna gidilmekte, böylece dizayn esnekliği olan parçalar daha ucuz ve hafif olarak üretilmektedir. Düşük ısı kayıplı motor olarak tabir ettiğimiz seramik motorların dizaynı için, aşağıdaki ilkeler ışığında hareket edilmesi, daha iyi sonuçlara ulaşılmasını sağlamaktadır.

- a) Uygun kaplama kalınlığının tayini,
- b) Yanma yüzeylerinin kaplanması,
- c) Tasarım karmaşıklılığının minimize edilmesi,
- d) Güvenilirliğin sağlanması,
- e) Bağımsız soğutma,
- f) Uzun süre dayanıklılık,
- g) Yüksek alaşım çeliklerinden kaçınmak,
- h) Motor tasarım değişikliklerini minimize etmek,
- ı) Motor performansının artırılması.

Bu ilkelerden sonra aşağıdaki gibi bir strateji belirlenebilir.

- a) Yanma yüzeylerini kaplamak,
- b) Seramik kaplama kullanmak,
- c) Yüksek termal genleşmeye sahip seramik kullanmak,
- d) Seramik- metal uyumluluğunun sağlanması,
- e) Kullanılan yapısal metalleri muhafaza etmek,
- f) Kullanılan yanma odasını muhafaza etmek.

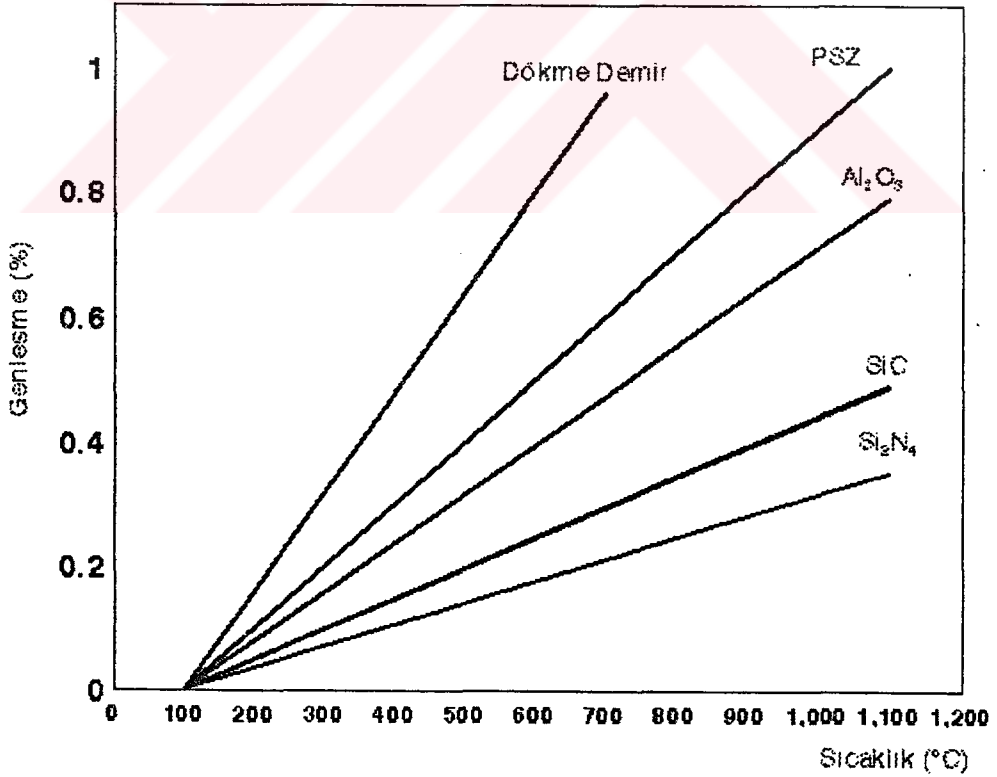
Bu şekilde bir strateji belirlemek, böyle bir tasarım çalışmasında gelişmelerin detaylı bir şekilde incelenmesini mümkün kılar. Bu proses, alternatif tasarımların sayısını belirlemek için gereklidir. Bütün projelerin genel hedeflerinde ve buna bağlı faktörlerde izlenmesi gereken en önemli unsurlardan biri de, seramik kaplama malzemelerindeki gelişmelerdir. Düşük termal geçirgenliğe sahip olan seramik malzemelerin seçilmesi yanma odası yüzeyinde kaplamadan istenen özellikleri sağlayacaktır. Havanın ısı geçirgenliğinin düşük olması, termik katmanı oluştururken, hava boşluklarının da oluşmasına neden olur. Yanma odası ile hava boşluğu arasında kalan metal kısım yüksek sıcaklıklara ve yüksek ısı genleşme zorlanmalarına maruz kalacağından, güç strokunda depoladığı enerjiyi, emme strokunda verebilecek şekilde, rejenaratör sistemi kullanılır.

Bazı bileşimlerde en düşük kompleks yapıyı elde etmek için tek bir bileşim (örneğin; seramikten yapılmış bir piston) gerekmesine rağmen seramiğe bağlı başarısızlık riskinin düşürülmesi için, seramik-metal oluşturma tasarımları tercih edilmektedir. Buna ilaveten metal kısmın üzerine yerleştirilecek yüksek genleşme oranına sahip seramik malzemesi, tasarım karmaşıklığını minimize etmek için en uygun yoldur.

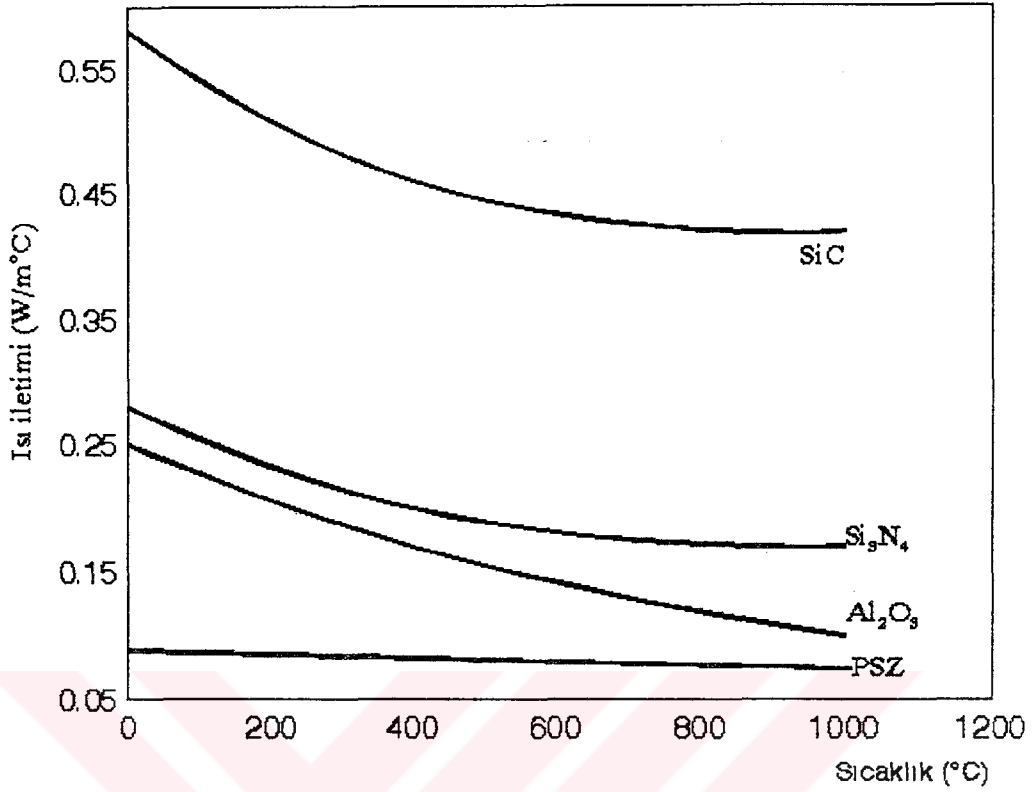
Seramik seçiminde, kaplama için en iyi yöntem ile, ideal seramik malzemesi arasındaki bağlantı çok önemlidir. İdeal malzemeler aşırı derecede düşük ısı iletkenliğe ve çok düşük termal genleşme katsayısına sahip olmalıdır. Bu değerlerin sıfır olması ideal bir durumdur, fakat gerçekte mümkün değildir. İdeal malzemenin

düşük ısı genleşme katsayısı, sıcaklık dağılımlarının incelenmesiyle hesaplanabilir. Bazı tasarımlarda bileşim tek bir seramik parça, diğerlerinde ise seramik-metal bileşimi olmalıdır. İdeal malzeme, tasarım elemanlarına uygun elastisite modülüne sahip olmalıdır. Sapmaların kontrolü etkilediği tasarımlarda, yüksek elastisite modülüne sahip olan malzemeler daha kullanışlıdır.

Seramiklerin metaller üzerine kaplanması, iki malzemenin (metal-seramik) ısı genleşme katsayılarının uygunluğu ile doğrudan ilgilidir. Bugün mevcut çalışmalarla elde edilen sonuçlara göre, (Partially-Stabilized Zirconia) PSZ cinsi seramikler için en uygun metal malzemesinin dökme demir olduğu ifade edilmektedir [9,10]. Şekil 2-1 'de bazı seramik ve dökme demir malzemelerinin genleşme katsayılarını gösteren grafik, Şekil 2-2 'de ise, dört ayrı seramik malzemesi için ısı iletim katsayıları gösterilmektedir.

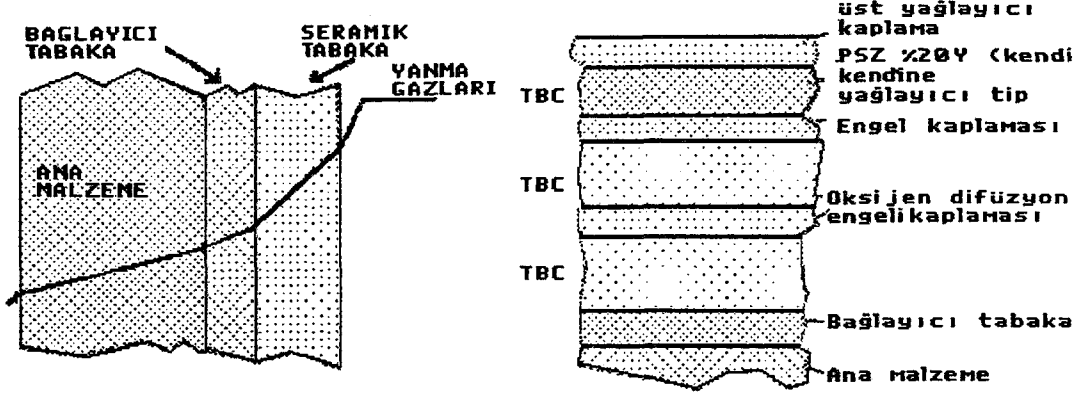


Şekil 2-1 Bazı Seramiklerin ve Dökme Demirin Genleşme Katsayıları



Şekil 2-2 Bazı Seramiklerin Isı İletim Katsayıları

Isı geçişini engellemek amacıyla yapılan kaplamalar ince ve kalın kaplamalar olmak üzere iki gruba ayrılır. İnce kaplamalar, 0.5 mm 'ye kadar olan kaplamalar, kalın olarak tabir ettiğimiz kaplamalar ise 6.5 mm 'ye kadar olan kaplamalardır. İnce, termal bariyer kaplamalar, gaz türbinlerinde, dizel ve benzin motorlarının piston ve supaplarında kullanılır. Bunlar ZrO_2 veya $MgZrO_3$ termal bariyer olarak yüzeyde kullanılan malzemelerdir. Bağlayıcı tabaka olarakta Ni-Cr, Ni-Al ya da MCrAlY malzemeleri kullanılır. Isı yalıtımı amacıyla yapılan kaplamalarda, kaplama tekniği, kaplama kalınlığı ve kaplama malzemesi kaliteye etki eden en önemli faktörlerdir. Herşeyden önce temiz bir yüzey ve iyi bir bağ tabakası gereklidir. Genleşme katsayısı seramik tabakayla çok farklı olan metal yüzeylere çok katlı kaplama tekniği uygulanabilir. Şekil 2-3 'de tek ve çok tabakalı olarak bir malzemenin termal bariyer ile kaplanmış hali görülmektedir.



Şekil 2-3 Tek ve Çok Tabakalı Termal Bariyer Kaplama

2.2. Seramik Kaplama Malzemeleri

Endüstride çeşitli alanlarda kullanılan seramik malzemelerin, kimyasal ve fiziksel kompozisyonları değiştirilerek metallere uygun özellikler göstermesi sağlanabilir. İleri teknoloji seramikleri olarak bilinen bu malzemeler;

- a) Düşük ısı iletimi,
- b) Korozyon direnci,
- c) Revizyon direnci,

d) Düşük sürtünme ve aşınma direncinden dolayı kaplama kullanımında artışa sebep olmaktadır.

Malzemelerin bazı yüzeylerinde meydana gelen çentik, çizik, oyuk, ezilme ve aşınma gibi kusurların, metalle kaplanarak onarılmasının yanısıra, metal spreyn altında kalan ana metalin aşınmasını ve korozyona uğramasını engeller. Aşınma direnci gösteren kaplamalar genellikle statik makina parçalarında kullanılmalarına karşın, hareketli kısımlarda da kullanımı için yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Genelde yapısal amaçlı yüksek teknoloji seramikleri olarak oksit seramikler grubunda Al_2O_3 , ZrO_2 dikkat çekerken, oksit olmayan seramikler grubunda ise Si_3N_4 , SiC , BC , BN , Ti_2B gibi üstün özellikli malzemeler bulunmaktadır. Bu malzemeler hafiflikleri ve yüksek sertliklerinin yanısıra, üstün ısıl ve korozyon dayanımları, iyi yüzey özellikleri ve bazı elektriksel özelliklerinden dolayı değişik endüstriyel alanlarında kullanılmaktadır.

Seramik kaplamalar, sert ve gevrek olmaları nedeniyle, ısı darbelere maruz kaldıklarında pullanmaya sebep olurlar. Ancak bu kaplamalar oksidasyona ve korozyona karşı mükemmel direnç gösterdiklerinden statik parçalar için oldukça uygundur. Seramik kaplamalar; ZrO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , CeO_2 gibi katkılı kompleks silikatlar olup $1250\text{ }^{\circ}C$ sıcaklıklara kadar dayanıklıdır. Ni-CrSi sanayi türbinlerinde kullanılmakta ve sıvı Sn-Al fazı Mo ve Nb alaşımlarına kaplanan, gözenekli silikat kaplamada, çatlakları doldurmaktadır. Karbürler, nitrürler veya borürler sert kaplamaların yapımında kullanılan bileşikler olup, özellikle piston veya supaplar üzerine TiN, TiC ve Ti(CN), demir alaşımları için TiB_2 kaplamaları başarıyla kullanılmaktadır [11].

Malzemelerin özelliklerine göre değişik kullanım alanlarına sahip olan seramiklerin başlıca özelliklerini ise şöyle sıralıyabiliriz.

- a) Yüksek kullanım sıcaklıklarına dayanıklıdır,
- b) Isı iletkenlikleri ve özgül ısıları düşüktür,
- c) Kimyasal ve mekanik aşınmalara karşı oldukça dayanıklıdır,
- d) Yoğunlukları düşüktür,
- e) Termal şok dirençleri iyidir,
- f) Sürtünme kayıpları düşüktür,
- g) Çok iyi ısı yalıtımı sağlarlar,
- h) Elastisite modülü düşüktür.

Tablo 2-1 'de görüldüğü gibi, en iyi kaplama malzemeleri olarak Transformation Toughened Zirconia (TTZ) veya Partially Stabilized Zirconia (PSZ)' dir. Çeşitli kaplama teknikleri ile V, Ti, Zr, Hf, Nb ve Ta' nın nitrür ve karbonitrürlerini ihtiva eden sert kaplamalar ve çeşitli oksit esaslı seramik kaplamalar ile feldispat, boraks, kuvars, ihtiva eden kaplamalar metal üzerine uygulanabilir [11]. En yaygın ve kullanılması en kolay seramik kaplama işlemi, toz halindeki seramiğin plazma sprey yöntemiyle metal üzerine tutturulmasıdır.

Eriyebilen seramik malzemeler için, ark, alev veya detonasyon teknikleri kullanılarak kaplama olayı gerçekleştirilebilir. Fakat plazma püskürtme yönteminde sıcaklık pek önemli olmamasına rağmen çalışma atmosferi çok önemlidir. Seramik malzemeleri diğer kaplama malzemelerinden daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun tek sebebi ise kolayca eriyebilmeleridir. Zor eriyen malzemeler olarak bilinen borürler, karbürler ve nitrürlerin kaplanmasında kullanılan metod PVD veya CVD teknikleridir.

Tablo 2-1 Bazı Yüksek Teknoloji Seramiklerinin Özellikleri

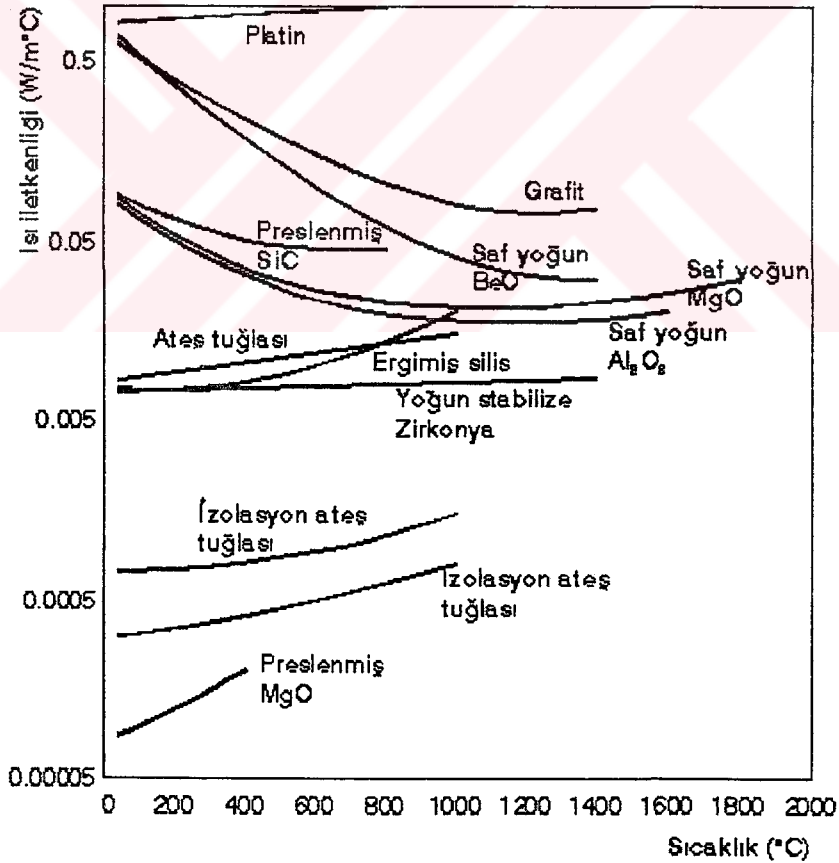
Malzeme	Ergime Sıc. (°C)	Yoğunluk (g/cc)	Mukavamet (MPa)	Elastik Modul (Gpa)	Sertlik kg/mm ²	Tokl K _{ic}
Cam	500	2.2	48	7.2	650	0.5
Al ₂ O ₃	2050	3.96	250-300	36-40	1300	4.5
ZrO ₂	2700	5.6	113-130	17-25	1200	6-9
SiC	3000	3.2	310	40-44	2800	3.4
Si ₃ N ₄	1900	3.24	410	30.7	1300	5.0
WC	2700	15.7	350-550	54-70	2000	5-8

Termal Bariyer Kaplamalarda kullanılan ZrO₂ malzemesi, ısı iletkenliğinin düşük ve termal genleşme katsayısının nispeten yüksek, kimyasal kararlılığının iyi olması nedeniyle TBC için tercih edilen malzemedir (Şekil 2-4).

MgO ile stabilize edilmiş ZrO₂, Şekil 2-5 'de görüldüğü gibi, 0.1 mm kalınlıktaki ara katman üzerine, 0.6 mm kalınlıkta bir tabaka halinde plazma sprej yöntemi ile kaplanmıştır. Ara katmanın esas fonksiyonu, metal yüzeyi ile seramik katman arasındaki termal uyumluluğu sağlamaktır. Bağlayıcı malzemenin çalışma sıcaklığındaki, oksidasyonlara veya korozyonlara karşı direncinin yüksek olması gerekir. Bu niteliklere sahip MCrAlY alaşımı (M, Co veya Ni 'li gösterir) türbin kanatları için geliştirilmiştir. Ancak gaz türbinlerinin performansını artırmak için TBC 'nin geliştirilmesi gerekmektedir. İki veya üç katmanlı kaplamaların yeterli olmadığı, buna karşın bileşimin sürekli olarak değiştiği kaplamalarda, performansın arttığı ve kaplamanın uzun süre özelliklerini koruduğu saptanmıştır. Plazma sprej ile yapılan kaplamada gözeneklerin bulunması, ısı koruma ve gerilme direncinin gelişmesine

katkıda bulunmakla birlikte, poröz yapı, korozyon sıvı ve gazların penetrasyonuna imkan verdiğinden kaplamanın bozulmasına neden olacaktır.

1970 'li yılların ortalarına kadar yapılan çalışmalardan, %12 yitriya içeren ZrO_2 'nin NiCrAlY bağlayıcısı katman üzerine uygulanması, uçak türbinleri için yararlı olduğu tespit edilmiş ancak bu sistemde kaplamanın ne denli dayanıklı olduğu anlaşılamamıştır. Üç katmanlı zona sahip ZrO_2 kaplamaların dayanıklılığı ile ilgili tüm testler $1150^\circ C$ 'ye kadar denenmiştir. Bu deneylerde kaplamanın bozulmasını, NiCrAlY 'in içten oksitlenmesiyle NiO, Cr_2O_3 ve Al_2O_3 'e dönüşmesinden kaynaklandığı saptanmıştır. % 8 yitriya içeren ZrO_2 / NiCrAlY kaplaması ise kaplamanın $900^\circ C$ 'ye kadar dayandığı görülmüştür.



Şekil 2-4 Çeşitli Seramik Malzemelerinin Sıcaklığa Bağlı Olarak Isı İletkenliklerinin Değişimi

TBC 'ların çeşitli dizaynlarına göre bağlayıcı katmanların ve seramik kompozitlerinin konsantrasyonu Tablo 2-2 'de verilmiştir.



Şekil 2-5 MgO ile Stabilize Edilmiş ZrO_2

Tablo 2-2 TBC 'larda Bağlayıcı Katman ve Seramik Kompozitlerin Konsantrasyonu

Dizayn	Bağlayıcı katman kompozitleri					Seramik kompozitleri		
	Co	Ni	Cr	Al	Y	ZrO_2	MgO	Y_2O_3
LTB4	23 0.3		48	17	12	75	25	--
LTB5	22 0.5		48	20	9	75	25	--
LTB6	23 0.3		48	17	12	88	--	12
LTB7	22 0.5		48	20	9	88	--	12
LTB8	39 0.5		32	21	7.5	75	25	--
LTB12	39 0.5		32	21	7.5	93	--	6.5
LTB13	39 0.5		32	21	7.5	93	--	6.5

Termal sprej kaplamaların özellikleri üniform değildir. Fakat kullanılan malzemenin cinsine ve dağılımına bağlı olarak kaplama işlevi değişir. Ayrıca kaplama özelliklerine, kaplanacak malzemenin sertliği ve yumuşaklığı, termal sprej anında mikro yapısının korunması, metalografik numune hazırlama işlemlerine (cılalama, zımparalama, parlatma) etki ederek seramik kaplama elde edilir. Metal tabanı-Bağlayıcı katman-TBC ile kaplanmış seramik kaplamanın sıcaklık profili Şekil 2-3 'de

gösterilmiş idi. Orada seramik kaplama 0.127 mm kalınlığında olup, metal sıcaklığını 189°C azaltır. Yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı ise 400°C 'dir. Tipik bağlayıcı katman kompozitleri de Şekil 2-3 'de gösterilmişti. Termal şoka karşı dayanım ve porozite kontrolünü sağlamak amacıyla, kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Çeşitli uygulama alanlarına sahip olan seramik kaplama malzemeleri, Tablo 2-3 'de gösterilmiştir. Seramik kaplamaların metallerle uyumunu sağlamak amacıyla kullanılan ara tabaka, ısı bağlayıcı özellik gösteren önemli bir tabakadır. Püskürtülen seramik tozlarının yapışması temiz bir yüzey ve uygun bir bağlayıcı ile mümkün olur. Isı yalıtımı maksadıyla motorlarda kullanılan en önemli kaplama malzemesi PSZ olarak adlandırılan Kısmi Stabilize Edilmiş Zirkonyum 'dur. Bu stabilize işlemi, CaO, MgO ve Y₂O₃ ile yapılır. Özellikle gaz türbinlerinde kullanılan kaplamalarda YPSZ çatlak ve kopma dayanımı bakımından en iyi neticeyi vermiş Mg ve Ca ile stabilize edilen ZrO₂ ise daha sonraları geliştirilmiştir. Bu malzemeler daha ekonomiktir.

Seramik kaplamalarda ki termal yorgunluk çatlamları, ısıl genleşme katsayısı uyumsuzluğundandır. Dizel motorlarında başarılı bir termal şok dayanımı sağlayabilmek için, NiCrAlY üzerine MgO + ZrO₂ kaplanması uygundur. Bu malzeme aşınma ve esneklik yorulmasına karşı da iyi bir dirence sahiptir. Seramik kaplama malzemesi, ana malzeme sıcaklığını 120-150°C arasında düşürdüğünden dolayı, motorun YO elemanlarında ve özelliklede pistonlarda kullanılmaktadır [1].

Kaplama tekniğinde karşılaşılan güçlükler ve daha yüksek ısı yalıtımı sağlama çalışmaları için (tam adyabatik motor), iticiler, supap yuvaları, supap kayıtları, silindir gömlekleri, ön yanma odaları, silindir kapakları ve piston üst yüzeylerinin seramik esaslı malzemelerden imal edilmesi gerekir [12]. Fakat seramikden yapılması düşünülen bu parçaların gerek imalat gerekse imalat sonrası karşılaşılan problemler nedeniyle, kaplama işlemine yönelinmiştir [10,12,13]. TBC silindir gömlekleri üzerine yalnız başlarına uygulandığında çabuk aşınırlar. Bunu engelleyebilmek için de üç tabakalı bir kaplama sisteminde 0.125 mm 'lik bir CrO₂ veya AlTi zirkonyum üzerine kaplanır.

2.3. Kaplama Teknikleri

Metallerin yüzeyine seramik kaplamak için değişik yöntemler uygulanır. Bu yöntemler kullanım amaçlarına uygun olarak, kaplanacak metal ve seramik tozun özelliğine göre değişir. Kaplama tekniklerini şu şekilde sıralayabiliriz [14]:

- a) Fiziksel buhar çöktürme (PVD)
- b) Kimyasal buhar çöktürme (CVD)
- c) İyonla kaplama
- d) Sıçrama ile kaplama
- e) Elektron hüzmeye buharlaştırmasıyla kaplama (EBE)
- f) Alevle Püskürtme (FS)
- g) Plazma püskürtme (PS)
- h) Sol-jel (SG)
- ı) Detonasyon tabancası (DG)
- j) Reaktif iyon kaplama (IP)
- k) Sıcak izostatik presleme ile kaplama (HIP)

Tablo 2-3 Seramik Kaplamalar ve Uygulama Alanları

UYGULAMA	KAPLAMA
Aşınma DİRENCİ	TiN, TiC, Ti(CN), ZrN, TaN, Si ₃ N ₄ , TaC, WC-TiC-TaC, BC, ZrB ₂ , HfB ₂ , TiZrB, A ₂ O ₃ , NiO+CaF ₂ /SrF ₂ , Cr ₃ C ₂ , Cr ₇ C ₃
Erozyon DİRENCİ	Ta ₂ O ₅ , TaN, NiOCaF ₂ , NiCaF ₂ , Cr ₃ C ₂ , WTiC ₂
Karbürizasyon DİRENCİ	NbB ₂ , TaB ₂
Oksidasyon DİRENCİ	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , MgO, BeO ₂ , HfO ₂ , T ₂ O ₅ , CeO ₂ , Ru, Ir oksitleri, WSi ₂ /ZrO ₂ , Hf NiOCaF ₂ , NiCaF ₂ , NbSi ₂ , VSi ₂ , ZrSi, CrSi ₂ , TiSi ₂ , T ₁ B ₂ , ZrB ₂ , WSi ₂ /ZrO ₂ , ZrSi ₂ /ZrSi, MoSi ₂ /ZrO ₂ , ZrB ₂
Difüzyon DİRENCİ	TiC, TiN

Yukarıda saydığımız yöntemlerin avantajları olduğu gibi dezavantajları da vardır. Tablo 2-4 'de bu metodların uygulandığı seramik malzemeleri görülmektedir.

2.3.1. Plazma Püskürtme Tekniği

Plazma kaplama yöntemi, bir tabakanın kuvvetlendirilmiş yüzey özellikleri ile bir ana metalin ya da diğer bir alt tabaka malzemesinin istenen kapasite özelliklerinin kombinasyonuna imkan sağlar. Endüstride kullanılan plazma sprej, aşınma, ısı ya da korozyon ile bozulmuş özel alanlara kaplamaların uygulanmasıyla sağlanır. Plazma kaplama aynı zamanda işlem esnasında ana metal sıcaklıklarını düşük tutarak hassas parçaların ısıl deformasyonlara uğrama endişesini ortadan kaldırmaktadır.

Plazma sprej; yüksek proses sıcaklığına sahip olması nedeniyle tüm endüstri sahasında kullanılma imkanı sağlamaktadır. Plazma sprej esnasındaki yanmalardan ilki, anodik polarize edilmiş silindirik formda su ile soğutulmuş plazma üflecisi, diğeri ise konik formda ekseriyetle toryumlu tungstenden imal edilmiş bir katod arasındaki gaz atmosferi ile stabilize edilmiş, yüksek enerji yoğunluğuna sahip arklar tarafından sağlanır. Bu arklar ise plazma gazları adı verilen gazlar içinden geçirilir.

Tablo 2- 4 Seramik Kaplama Teknikleri ve Kaplanan Malzemeler

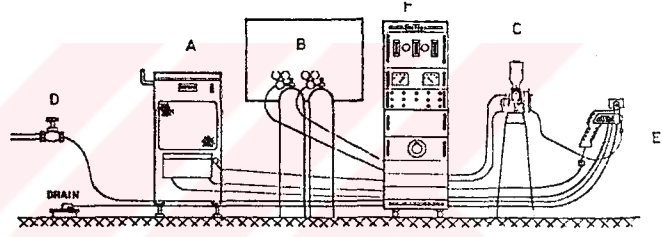
YÖNTEM	KAPLAMA
CVD	SiO ₂ , TiSi, SiB, TiN, Si ₃ N ₄
EBE	Al ₂ O ₃ , ZrO ₂
PVD	TiN, TaN, VC, TiC, In ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃
PS	Al ₂ O ₃ , Cr ₂ O ₃ , ZrN, MoS ₂ , CaF ₂ , ZrO ₂ , TiO ₂
FS	ZrO ₂ , Al ₂ O ₃ , Cr ₃ C ₂
HIP	Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ , MgO, SiO ₂ , BeO
RS	Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , NbN, TiN, CdS
SL	Karbürler

Argon, Helyum, Azot, Hidrojen veya bunların karışımlarından meydana gelen bütün plazma gazları, gazların ısıl kapasitesine ve ekonomiklik durumuna göre seçilmiştir. Plazmanın en önemli özelliği "QUASİNÖTR" olmasıdır. Yani ortamda (+) iyonlar ve (-) elektronlar aynı anda bulunurlar, ama plazma dış ortama göre

elektriksel olarak nötürdür. Plazma sprey de katottan yayılan serbest elektronlar her iki elektron arasındaki potansiyel farkı nedeniyle hızla fırlatılır ve plazma gazının atomları veya molekülleri ile çarpışır. Bu çarpışma momentinin etkisiyle, plazma gazı iyonize olur, pozitif iyonlarına ve negatif iyonlarına ayrılır [14].

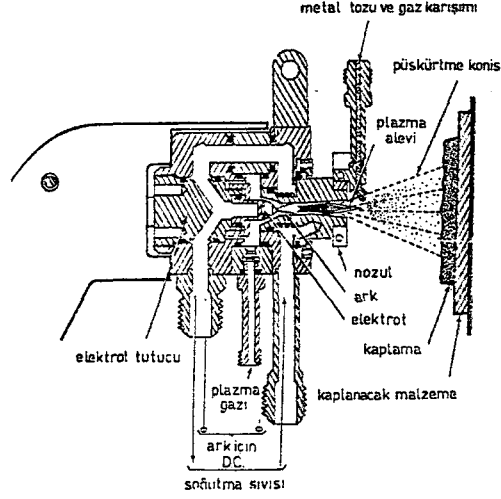
Şayet plazma gazı, hidrojen ve nitrojenden meydana geliyorsa; bu gazlar iyonize olmadan dissosiyasyon olur. Partiküllerin yeniden düzenlenmesi ve iyonizasyon için gerekli enerji, ısı ve ışınım enerjisi olarak açığa çıkar. Bu yolla plazma sıcaklığı 20000°K ulaştığı bilinmektedir. Bu sıcaklık, üfleçten çıkan gazın hacim artışına neden olur. Şekil 2.6 'da plazma püskürtme sisteminin basit bir tesisatı görülmektedir.

- A) Güç ünitesi
- B) Gaz ünitesi
- C) Toz besleme ünitesi
- D) Soğutma sistemi
- E) Sprey tabancası
- F) Kontrol ünitesi



Şekil 2-6 Plazma Püskürtme Ünitesi

Bir taşıyıcı gaz akımı yardımı ile, toz formundaki plazma partikülleri plazma hüzmesi içersine bırakılır. İnjektasyon işlemi, üflecin yanma konstrüksiyonunun dışında üfleçte bulunan deliklere bağlıdır. Plazma sprey esnasında sprey partikülleri erir ve gaz akımı ile püskürtülür. Bu kaplama metodu genelde 20000°K 'den daha yüksek sıcaklıklarda üretilen kızdırılmış plazma (iyonlaşmış gaz) püskürtmesi husule getiren bir 'DC' elektrik arkıyla sağlanır [15]. Eritilmiş ve sürülmüş toz malzemeler kaplanacak olan yüzey üzerine yüksek bir hız püskürtücüsüyle bu iyonlaşmış gazın içersine püskürtülür. Ultra yüksek erime noktasına sahip olan oksitli seramik malzemelerinin püskürtülmesiyle kaplama işlemi yapılır. Şekil 2-7 'de plazma sprey tabancasının kesiti görülmektedir.



Şekil 2-7 Plazma Püskürtme Tabancasının Kesiti

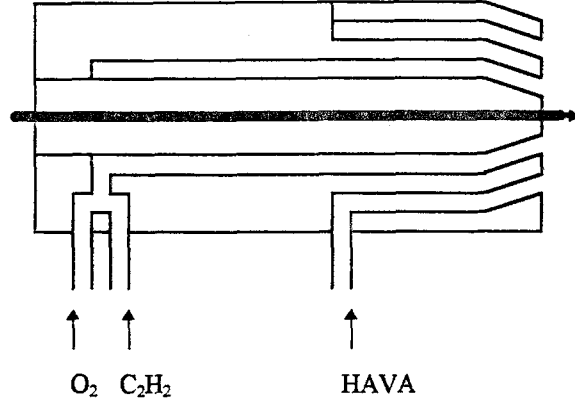
Bu kaplamalar üst aşınma direnci, yalıtımı ya da elektrik direncini sağlamak için uygulanır. Sprey partiküllerinin hızı plazma gazlarının debisine bağlıdır ve gazların hacimsel genişlemesi ile gerçekleşir. Burada partikül, gaz bileşimine ve yöntemine bağlı olarak 300 m/s ile 700 m/s arasında bir hıza ulaşır [15].

2.3.2. Alevle Püskürtme Tekniği

Bu teknikde seramik malzeme, toz veya çubuk şeklinde alevin içinden geçirilir. Böylece seramik erir ve kaplanacak yüzeye püskürtülmüş olur. Genellikle O_2-H_2 ve $O_2-C_2H_2$ gaz karışımları ile kullanılır. Bunlardan ilk karışım sıcaklığı $2600^\circ C$ ve ikincisi ise $3000^\circ C$ 'ye ulaşır [16]. Çubuk ile çalışan bir sistemin şeması Şekil 2-8 'de görülmektedir. Çubuğun hızı ayarlıdır ve otomatik olarak dışarı doğru itilir. Çubuğun ucunda meydana gelen erimeyle oluşan sıvı damlası basınçlı hava ile alevin etkisiyle de ileri doğru püskürtülür.

Çubuklu alev püskürtme sistemi tozlu sistemden daha iyidir. Buna paralel olarak da seramik uçları üretmek oldukça zordur [17]. Alevle püskürtme tekniğinin bir uygulaması olan sıcak püskürtme yönteminde iş parçasına $100-300^\circ C$ bir ön tav yapılır. Üniform bir kaplama yapabilmek için alev-toz veya kaplanacak yüzey çok

dikkatli bir şekilde hareket ettirilmelidir. Dairesel parçalar bir döner tezgah üzerine bağlanarak hem parçanın hem de alevin dengeli hareketi sağlanmalıdır.



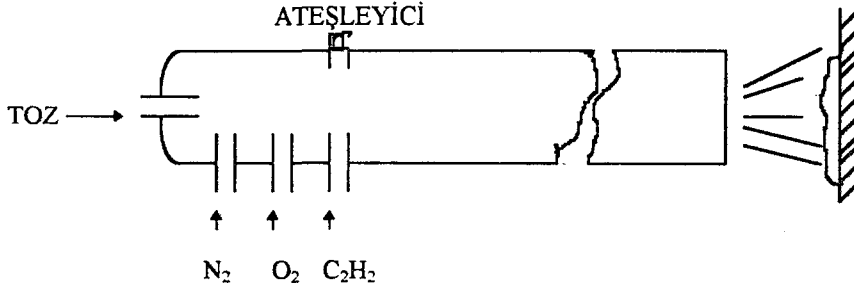
Şekil 2-8 Çubuk ile Çalışan Sistem

2.3.3. CVD ve PVD Teknikleri

Gaz türbini kanatlarının ön yüzeylerinde erozyon dirençli kaplamalara ihtiyaç duyulmaktadır. Komprosörlerin çelik kanatları üzerine daha iyi koruma için Ti (C,N) uygulanmaktadır. Bunun yerine kimyasal buhar çökeltme (CVD) yöntemi ile Cr_7C_3 kullanılması daha iyi ısı ve mekanik şok direncinin yanısıra erozyona karşı da iyi direnç sağlar. Roket lülelerindeki erozyon, Re, W ve BC malzemeleriyle kaplama yapılarak azaltılmaktadır. 850-1050°C gibi yüksek sıcaklıklarda yapılan bu yöntemde H_2 , N_2 , CH_4 ve CO gazları kullanılır. Fiziksel buhar çöktürmede (PVD) ise olay yüksek vakumda gerçekleşir. TiN kaplamaları bu yolla yapılır. Ti buharlaştırıldıktan sonra Ar ve N_2 gazları karışımı ile reaksiyona sokularak iyonize edilir. Kaplama sıcaklığı 300-600 °C arasında olabilir.

2.3.4. Detonasyon Tabancası Tekniği

Bu teknik, özel bir odada oksijen-asetilen karışımının kontrollü bir şekilde yanması sonucuna dayanır (Şekil 2-9). Yanma odası genellikle 20-30 mm çapında ve 1-1.5 m uzunluğunda olup, bir su soğutucusunu içerir. Kaplanacak seramik tozları yanmadan önce gaz karışımında süspansiyon haline getirilir.



Şekil 2-9 Detonasyon Tabancası

Daha sonra meydana gelen patlama şokları, tanecikleri hızlandırır, erime noktasına kadar ısıtır ve yüksek bir hızla (800 m/s) kaplanacak yüzey üzerine püskürtülür. Bu olay saniyede 4-7 defa tekrarlanır. Seramik toz, tabancadan her atılışında 25 mm çapında ve bir kaç mikron kalınlığında bir tabaka meydana gelir.

2.4. Uygulamalar

Günümüze kadar olan çalışmalarda bir çok yol katedilmiştir. Aşağı yukarı 40-50 yıl öncesine dayanan seramikle kaplama yöntemi 1980 'li yılların başlarında deneysel olarak çalışmalara tabii tutulmuştur. İlk çalışmalar genel olarak gaz türbinlerinin kanatları üzerine yoğunlaşmasına rağmen sonraları motorlarda özellikle de dizel motorlarında geniş uygulama alanları bulmuştur. Isı yalıtımı maksadıyla piston yüzeyleri, silindir gömlekleri, supaplar, manifoldlar, silindir kapağı, egzoz portu ve turbo şarj parçaları gibi bir çok motor elemanına kaplama yapılabilir. 1985 yılında Walzer ve arkadaşlarının yaptıkları bir çalışma sonunda turbo şarj bir dizel motorunun YO 'nın %80 'ini 3 mm kalınlığında alüminyum titronat ve zirkonyum dioksit kaplayarak yalıtılmışlardır. Bunun sonucu olarak yaptıkları ölçümde soğutmaya olan ısı akışı %13 azaltılmış ve %5 'lik bir yakıt ekonomisi sağlanmıştır.

Pistonlar yanıcı gaz nedeniyle büyük mekanik gerilmelere maruz kalırlar. Bu gerilme gaz basıncına ve piston dizaynına bağlıdır. Isıl gerilme özellikle düşük ısı iletkenliği ve büyük ısı derecesine sahip olan seramik pistonlar için gözönünde bulundurulmuştur. SN-220 malzemesinden yapılmış olan bir pistonun yüzey sıcaklığı, motorun işlemesi esnasında termokopul (Isı derecesi) yoluyla ve mekanik bağlanmış kurşunlarla ölçülmektedir. Öncelikle, Fuji Heavy Industry's Robin DY30D tarafından

geliştirilen tek silindirli bir dizel motorunun yüke, sıcaklığa ve gerilmelere maruz kalan parçaları seramikten imal ederek dayanıklılıklarını araştırmışlardır [18]. Çalışmalar neticesinde piston üzerindeki sıcaklıkta ve ısı derecesinde dikkate değer sonuçlar çıkarmışlar ve kullandıkları KC-301 motoru için 3 mm 'de 24°C, esas motor (DY30D) için ise 4 mm 'de 3°C olarak gözlemişlerdir. Isıl gerilmeyi de, silikon nitratla kaplanmış piston için 80 Mpa, alüminyum piston için 18 Mpa olarak ölçmüşlerdir. Ayrıca üstteki oring sıcaklığını 300°C civarında, diğer motorda ise 130°C değerinde olduğunu açıklamışlardır [18].

1986 yılında Hay ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmanın raporunda ise düşük hız ve yüklerdeki ısı geçişinde, %30 'luk azalma ile beraber, en az %3.6 'lık bir özgül yakıt tüketimi iyileşmesi başarılmış [19]. Work ve arkadaşlarının 1985 'de yaptıkları bir çalışmada da %30 ısı geçişi azalmasının yanısıra volumetrik verimde de %3.4 'lük bir azalma olduğunu bildirmişlerdir. Egzoz gazı sıcaklığında 70°K 'lik artış ile turboşarj sistemde yakıt tüketimi %0.8, turbokombine sistemde ise %2 'lik bir gelişme sağladığını açıklamışlardır [19].

Seramiklerin hafif olması özellikle supap donanımına fayda sağlamaktadır. Çünkü seramik supaplar sayesinde ileri geri hareket eden pistonun kütlesinde %50 oranda bir azalma söz konusudur. Norton / TRW Ceramic tarafından yapılan çalışmalarda supap yay kuvvetinde %40 oranında bir azalma olduğu görülmüştür [20].

Roger B. Coers ve arkadaşları 172 kw gücündeki soğutmasız bir adyabatik motora bir taşıt üzerinde 250 saatlik ömür ve 5080 km 'lik seyir çevrimi uygulamışlardır. Motorun pistonları, silindir gömlekleri, supapları ve silindir kapak yüzeyleri zirkonya krom oksit, segmanları ise krom karpit, alüminyum titonat ile kaplanmıştır. Parçalar termal bariyer ve aşınmaya dirençli seramikler ile 0.65 mm kalınlığında plazma sprey ile kaplanmıştır. 250-450 saatlik ömür ve dayanım testi sonunda silindir gömlekleri çok başarılı, pistonlarda yanma hücresi erozyonu ve etek çatlamları ile beraber kopmalar, segmanlarda yüksek aşınma ve kopma, silindir kapağının ise mükemmel sayılabilecek durumda olduğu ifade edilmiştir. Yakıt

tüketiminde %14 'lük bir azalma görülmüş, soğutma sisteminin kaldırılmasıyla da 0.047 m³ 'lük hacim artışı ve 1.53 kg 'lık bir ağırlık azalması olduğu açıklanmıştır [3].

Bunlar gibi yapılan bir çok çalışmalarda ve uygulamalarda iyi neticeler alınmıştır. Bundan sonrada yapılacak çalışmaların daha da geliştirilmesiyle çok iyi yerlere varılacağı sanılmaktadır. Çünkü 1988 yılında yapılan ve Delphi metodu adı verilen bir çalışmaya göre; yüksek güçlü motorlarda, seramik parçalarla tanışmanın 1990 'da egzoz akış hatları ile başlayacağını, 1991 'de supap mekanizması parçaları ve 1992 'de de turboşarj motorların takip edeceği vurgulanmıştır. Düşük güçlü uygulamalara benzer olarak, yüksek güç parçalarının çoğu 1995 'e kadar üretimin ilk safhasında olacak ve beş yıl içinde %5 pazar oranına ulaşacağı bildirilmiştir [21]. Bu tarihe kadar söylenenlerin gerçekleştiği görülmektedir.

Yüksek güç uygulamalarında, seramik dizel motorlarının üretime geçişin 1995 'de, minimum sürtünmeli ve benzin motorlarında üretimin 2000 'lerde, gaz türbini motorlarında da 2005 yıllarında gerçekleşeceği açıklanmıştır [21].

BÖLÜM 3

3. TEORİK ÇALIŞMALAR

3.1. Motor Performansına Ait Genel Denklemler

Deneyisel çalışmalarımız esnasında ölçülen değerlerin, performans karakteristiklerini veren denklemlerde yerlerine koyarak motorun çalışma performansını iyi bir şekilde analiz edebiliriz. Özgül yakıt tüketimi, moment, efektif güç, ortalama efektif basınç, mekanik verim ile düzeltme faktörleri bu karakteristiklerin başındadır. Efektif güç, motor krank milinden alınan net güçtür. Efektif gücü veren formül, deney donanımının konstrüksiyonuna bağlı olduğundan (moment kolunun uzunluğundan dolayı) farklı olabilir.

Bu deneydeki cihazın dönüşüm formülü;

$$P_e = \frac{F \cdot n}{13337} \quad (\text{kw}) \quad (3.1)$$

P_e : Efektif güç (kw)

n : Motor devri (d/d)

F : Uygulanan yük (N)

Ortalama efektif basınç, motorun gerek çevrimdekine eşdeğer bir P_e gücünü vermesi için bir strok boyunca pistona etkimesi gereken sabit basınçtır.

$$P_{me} = \frac{P_e}{V_H \cdot n \cdot i} \quad (3.2)$$

- P_{me} : Ortalama efektif basınç (N/m^2)
 n : Motor devri (d/sn)
 i : Bir devirdeki çevrim adedi (çev/dev)
 4 zamanlı motorlarda $i=1/2$
 2 zamanlı motorlarda $i=1$

Motor momentini ölçülmesinde, su freni, yük kolu uzunluğu ve uygulanan fren kuvveti etkilidir.

$$M_d = F \cdot \ell \quad (3.3)$$

- M_d : Döndürme momenti (Nm)
 ℓ : Su freninin yük kolu uzunluğu (m)

Bu denklemler sayesinde elde edilen karakteristik eğriler, motorumuzun nedenli verimli çalıştığını gösterir. Örneğin motordaki duman sınırı ve yükleme aralıkları açısından önemli olan P_{me} , yumurta eğrilerinin çiziminde de çok önemli bir parametredir. Özgül yakıt tüketimini (b_e) ise, deneyden alınan verilere dayanılarak hesaplanır. Taşıt veya motorun genel yakıt tüketimleriyle yük ve devrine bağlı olarak bütün çalışma aralıklarının yakıt sarfiyatı açısından incelenmesi motor hakkında daha detaylı bilgilenmeyi sağlar.

$$b_e = \frac{3600 \cdot V_y \cdot \rho_y}{P_e \cdot t} \quad (3.4)$$

- b_e : Özgül yakıt sarfiyatı (gr/kwh)
 ρ_y : Yakıtın özgül ağırlığı (gr/cm^3)
 t : Yakıt tüketme zamanı (sn)
 V_y : Yakıt hacmi (cm^3)

Silindirdaki sürtünme ve pompalama kayıplarını gözönünde bulundurduğumuz da, motorun mekanik veriminin, efektif ve indike büyüklükler ile ilişkilidir. Motorun

termik verimi ise, ısı şekline dönüşen enerjinin faydalanılabilir miktarının değeridir. Sıcaklık değerine bağlı olarak bulunur ($Q'_{tr}=0$).

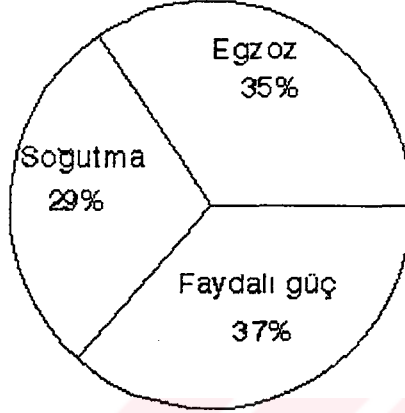
$$\eta_m = \frac{W_e}{W_i} = \frac{P_e}{P_i} = \frac{b_i}{b_e} = \frac{P_e}{P_e + P_s} 100 \quad (3.5)$$

$$\eta_t = \frac{W_i}{Q'_T} = \frac{(Q'_T - Q'_E)}{Q'_T} \quad (3.6)$$

3.2. Motorlarda Isı Transferinin Önemi

İçten yanmalı motorun silindirindeki yanmış gazların sıcaklığı 2500 °K civarındadır. Yanma yüzeylerinin iç kısımlarındaki maksimum metal sıcaklıkları, silindir kafası, silindir ve pistonlar için soğutmanın önceden sağlanmış olması nedeniyle, daha küçük değerlerle sınırlandırılmıştır. Bu durumlar yanma periyodu esnasında, 10 MW/m² 'den daha yüksek değerlere ulaşabilen yüzey duvarlarındaki ısı taşınımına öncülük eder. Bununla beraber işletme çevriminin diğer bölümleri esnasında, ısı taşınımı sıfırdır. Aslında ısı taşınımı bölgeden bölgeye değişir: Silindirde ki gazların çok hızlı hareketlerinden ve sürekli sıcaklık değişiminden dolayı, silindirlerden çevreye olan ısı geçişi hızı her an değişmektedir. Yüksek sıcaklıkta yanmış olan gazların hızlı bir şekilde hareket etmesiyle yanma odası bölgelerine temas ederek, daha yüksek ısı taşınımına sebep olur. Yüksek ısı taşınımı olan bölgelerde ki ısıl gerilmeler, yorgunluk çatlamlarına sebebiyet veren daha üst derecelerde (dökme demir için 400 °C, alüminyum alşımı için 300 °C 'den aşağı) tutulabilir [22]. Motor silindirleri içinde yakılan enerjinin, faydalı miktarın artırılması içten yanmalı motorların en önemli hedefidir. Toplam enerjinin bir kısmı faydalı güç olarak kullanılırken, bir kısmı egzozdan, bir kısmı da soğutmada kullanılması nedeniyle atmosfere atılır. Standart bir dizel motoru için enerji dağılım dengesi: Faydalı enerji %36.5, egzoz enerjisi %34.5 ve soğutma için kullanılan enerji %29 civarındadır. Şekil 3-1 'de bu enerji dağılımı sunulmuştur. Enerjinin bir kısmı ise, eksik yanma, yağlama yağı ve atık kayıplar şeklinde kaybolur [23]. Yüksek sıcaklıklardan dolayı yağlama yağının bozulmasını önlemek için, silindir duvarının gaz

tarafındaki yüzeyi 180 °C altında tutulmalıdır. Buji elektrotlarının ve egzoz subabının aşırı ısınması nedeniyle ortaya çıkan erken tutuşmayı ve vuruntuyu engellemek için supap ve bujiler sıcak tutulmalıdır. Vuruntunun olduğu son gaz bölgesinde basınç ve gaz yoğunluğu çok yüksektir.



Şekil 3-1 Standart Bir Dizel Motoruna Ait Enerji Dengesi

Bu sebeple söz konusu bölgede sıcak gazlar basıncın etkisiyle segmanlardan sızabilir. Bir arada oluşan yüksek basınç ve kesif sıcak gaz akışı, silindir gazlarından piston ve segmanlara önemli bir miktar ısı geçişine sebebiyet verebilir. Uzun süren şiddetli vuruntu bu parçaların erimesine sebep olur. Basınç dalgalarının hareketi sırasında buji üzerinde önemli bir miktar ısı birikimi olur. Bunun iki önemli sonucu vardır: Birincisi, bujinin elektriksel ve termik karakteri bozulur ve tamamen iş göremez hale gelebilir. Diğeri ise bujinin akkor hale gelerek erken tutuşmaya yol açan bir kaynak rolü oynamasıdır [24].

Bir motorda iş akışı ve soğutma sistemi arasındaki ısı akış prosesi, önceden tanımlanmış ısı değiştiricisinde ki ısı akış prosesine paralel olan tahminlerin, ideal olanlarına yaklaşılarak sağlanır [25].

- 1) Silindir duvarlarına ve egzoz sistemine transfer edilen ısınn hissedilebilir bir kısmı radyasyonla olur.
- 2) Gaz sıcaklıkları, sistemdeki ve krank mili pozisyonuna bağlı olarak değişir.

- 3) Duvarların iletkenliği, iç ve dış yüzeyler üzerinde biriken yağ, karbon yada arta kalan miktarları ile ve bölgesi ile değişir.
- 4) Akış sisteminin geometrisi düzenli değildir ve krank mili dönmesi gibi periyodik olarak değişir.
- 5) Yüzey sıcaklıkları hem gaz hem de soğutucu tarafında noktadan noktaya düzensiz olarak değişir.
- 6) Silindir gömleğine transfer edilen ısının bir kısmı piston sürtünmesinden dolaydır.
- 7) Gaz tarafındaki akışkan sıvısının oranı zamana bağlı değildir.
- 8) Silindir duvarlarındaki ısı akışı sıcaktan soğuğa doğrudur.

Motordaki ısı akış analizini gösteren bu düşünceler önemli olduğu kadar karışık yönlü bir problemdir. Isı geçişi, motor performansını, motorun verimini ve egzoz emisyonlarını etkiler. Silindir içindeki yakıtın birim kütlesi için yanma odası duvarlarında ki yüksek ısı geçişi, ortalama yanma gazı sıcaklığını ve basıncını daha da düşürecektir. Bunun yanında pistonu transfer edilen ısının çevrim işini azaltacaktır. Böylece efektif güç ve efektif verim motordaki ısı geçişiyle etkilenmiş olur. Ateşlemeli motorlarda yanmamış dolgu ve yanma odası duvarları arasındaki ısı geçeşi, sıkıştırma oranının sınırlanmasıyla güce ve verime tesir eden vuruntunun başlangıcını etkiler. Burada ki kritik nokta en son gaz bölgesinde ki karışım için piston ve egzoz supabındanolan ısı geçişidir [23].

Egzozdan dışarı atılan egzoz enerjisinin, turbokombine sistemiyle tekrar kazanılarak faydalı enerji haline dönüştürülür. Sürtünmeye hem motordaki ısı geçişi hem de soğutma yükü etki eder. Silindir gömlek sıcaklığı, piston ve oring yağlama yağı film sıcaklığını ve yağ viskozitesini elinde tutar. Uniform olmayan sıcaklıktan dolayı piston ve silindir gömleğinde ki şekil bozukluluğu birbiriyle temasta olan piston parçalarının sürtünmelerinden kaynaklanmaktadır. Mekanik enerjinin bir kısmı sürtünmeyle ve soğutma sistemiyle atmosfere atılır. Vantilatör ve su pompası ihtiyaçları ısı atılımının önemine bağlıdır.

Motor silindirinde ki dolguya bağı sıcaklık, çevrim boyunca çeper sıcaklığını ve akış alanını aşırı derecede değiştirir. Bu sonuçların her ikisinde ısı transferi üzerinde önemli bir etkisi vardır. Emme periyodu esnasında, giren dolgu genellikle çeperler ve akış hızlarından daha soğuktur. Sıkıştırma periyodu esnasında dolgu sıcaklığı duvar sıcaklığı üzerindedir, fakat hızları azalır. Isı geçişi silindir gazlarıyla yanma odası duvarlarından olur. Yanma esnasında gaz sıcaklıkları önemli ölçüde artar. Yanma odası duvarlarında ki ısı geçiş oranı bu periyotta daha yüksektir. Aynı zamanda, silindir basıncı artar, silindirdeki dolgunun küçük bir kısmı çatlak bölgeler içinde sıkıştırılır. Genişleme esnasında gaz sıcaklıkları azaldığı gibi ısı geçiş oranı da azalır. Egzoz supabı açıldığı zaman silindirdeki aşağı doğru hareket yüksek hızlarla sağlanır. Aslında egzoz gazları supap, port ve monifolddan olan ısı geçişi, egzoz işlemi esnasında meydana gelir. Isı geçiş oranı, silindir basıncından, yanmamış ve yanmış gaz sıcaklıklarından, yanma odası yüzey alanı ve duvar sıcaklığından tahmin edilebilir.

Motordaki ısı transferinin büyük bir bölümü zorlanmış konveksiyonla gerçekleşir. Fakat yanma ve genişleme periyodu esnasında radyasyon ile olan ısı geçişi de önem kazanır. Motor yanma elevlerinden elde edilen radyasyon araştırmaları; alevin yayılma özeliğinin zamana, karışım oranına, yakıt tüketimine, mevcut detonasyon miktarına bağı olarak hem dalga boyu dağılımı hem de toplam yoğunluk bakımından değiştiğini göstermiştir. Motorda kondüksiyonla olan ısı geçişi genellikle silindir kafası, silindir duvarları ve piston boyunca olmaktadır. Ayrıca silindir duvarları için piston oringleri, motor bloku ve monifoldlar boyunca da kondüksiyonla ısı geçişi sözkonusudur. İletimle ısı geçişi, silindir içindeki gazların silindir kafasından, supaplardan, silindir çeperlerinden ve pistondan ayrıca indüksiyon esnasında, sıkıştırma, genişleme ve egzoz işlemleri esnasında gerçekleşir. Asıl iletimle olan ısı geçişi egzoz supabı, egzoz portu ve egzoz monifoldu gibi egzoz işlemleri esnasında gerçekleşir. İç sistemde ki iletimle olan ısı transferi içeri giren dolgu sıcaklığının yükselmesiyle sağlanır. Motordan çevreye olan ısı transferi de iletimle olur.

Dizel motorunda soğutucuya geçen ısı, benzer bir benzin motorundakinden daha azdır ve efektif güç daha büyüktür. Soğutmaya giden enerjinin yaklaşık %8

kadarı yanma, %6 'sı genişleme, %9 'uda egzoz peryodunda kaybedilir. Belirtilen bu kayıpların önemli bir kısmını faydalı hale getirilebilir. Örneğin tam gazda yanma peryodunda kaybedilen %8 'lik enerjinin %5 'i tekrar faydalı hale dönüştürülebilir. Sonuç olarak faydalı enerjide %51.4 kadar bir yükselme beklenebilir. Bu değerler dizel motoru için %30 hava fazlalığı ile çalışmasına göredir. Hava fazlalığının daha büyük olduğu düşük yüklerde soğutucuya ısı geçişi daha az olacaktır [26].

Standart içten yanmalı motorlarda yanma odasındaki elemanlardan ısı geçiş oranı özellikle piston, segman ve silindirler yoluyla olmaktadır. Diğer etkili ısı iletim yolu silindir kafa yüzeyi, ve supaplardır. Hacim ve alan olarak ısı geçiş oranını ifade etmek kolay değildir. Çünkü silindir hacmi ile yanma gazlarının temas alanı ve soğutucu temas alanı piston AÖN (alt ölü nokta) 'da bulunduğu sırada oldukça büyüktür. Kafa yüzeyi, gaz ve soğutucu temas alanı ise daha küçüktür. Burada silindirdeki ısı kayıplarının çok büyük kısmının silindir gömleği yoluyla iletildiği düşünülebilir. Halbu ki yanma olayı pisto ÜÖN (üst ölü nokta) 'ya yakinken ceryan eder ve maksimum sıcaklık ile basınç bu bölge civarında oluşur. Dolayısıyla hava haeketi, yanma hızı ve alev oluşumu dikkate alınır, piston ÜÖN bölgesinde iken silindir kafa yüzeyi gaz ve soğutucu alanı ile, silindir-piston gaz ve soğutucu temas alanı çok büyük farklılık göstermez. Böylece ısı kaybı oranlaması için tambir oranlama yapılması çok zordur. Yük azaldıkça ortalama alev sıcaklığı azalması sebebiyle termik verim gittikçe artmakta, yük azaldıkça soğutmaya geçen ısı miktarı azda olsa artmaktadır.

Silindir içindeki gaz ortamından yayılan ısı, gaz sıcaklığını (T_g) artırdığı gibi, oradan silindir cidarına (T_{sg}) belli bir ısı taşınım katsayısı (h_g) ile geçer. Gaz cidarından soğutucu akışkana geçen ısı taşınımıyla gerçekleşmektedir (h_c). Isı taşınım katsayısı genellikle amprik ifadelerle tesbit edilip konveksiyon ve radyasyonun ortak etkisini taşır. Isı iletim katsayısı değeri bir araştırmacılar tarafından değişik parametrelerle ifade edilmiştir. Bunlar silindirdeki gaz hızına, ortalama piston hızına, ortalama çevrim gaz basıncına ve sıcaklığına, silindir çapına ve bazı çarpım faktörlerinin etkisine bağlıdır. Van Tyen, Brilling, Nusselt, Hütte, Woschni, Eichelberg eşitlikleri sayılabilir.

NUSSELT tarafından geliştirilen ısı taşınım katsayısı ;

$$h_g = \sqrt[3]{P^2 \cdot T} \quad \text{dır.} \quad (3.7)$$

h_g : Isı taşınım katsayısı (W/m² °K)

P : Yanma odası basıncı (N/m²)

T : Yanma odası sıcaklığı (°K)

Isı transferini ölçmek için bir aparat kullanıldığında deney sonuçlarının korelasyonu için aşağıdaki formül kullanılabilir [25].

$$\frac{h \cdot \ell}{k} = c \cdot \left(\frac{G \cdot \ell}{\eta_{go}} \right)^n \cdot \left(\frac{cp \cdot \eta_{go}}{k} \right)^m \quad (3.8)$$

k : Isı iletim katsayısı (W/m²)

G : Akan sıvının kütlesi (m³/s)

c_p : Özgül ısı (kJ/kgK)

ℓ : Isı geçişinin karakteristik boyutu (m²)

η : Sıvı viskozitesi (cm²/s)

g_o : Kuvvet- kütle-ivmelendirme sabiti

c, n, m : Akış rejimi ve sistemin geometrisine bağlı boyutsuz sabitler

Bölüm başında da belirttiğimiz gibi motorlardaki ısı geçişi ve soğutma sistemi arasındaki ısı akış prosesi, bir ısı değiştiricisinde ki ısı akış prosesine benzerlik göstermektedir. Motorlarda ki ısı akışı gazdan soğutucuya doğru olmaktadır (Şekil 3-2). Bu nedenle sistem bir ısı değiştiricisi gibi düşünülürse;

Q' : A_g ve A_c yüzeylerinden birim zamanda akan ısı miktarı (kJ/s)

T_c : Soğutucu sıcaklığı (°K)

T_g : Gaz sıcaklığı (°K)

T_{sg} : Gaz tarafı cidar sıcaklığı (°K)

- T_{sc} : Soğutucu tarafı cidar sıcaklığı (°K)
 k : Gaz tarafı ısı iletim katsayısı (W/m²)
 h_g : Gaz tarafı ısı taşınım katsayısı (W/m²K)
 h_c : Soğutucu tarafı ısı taşınım katsayısı (W/m²K)
 ℓ : Duvar kalınlığı (m)

Gaz cidarından A_g alanı boyunca geçen ısı miktarı;

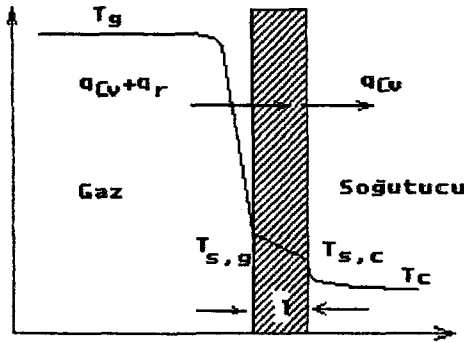
$$\frac{Q'}{A_g} = h_g (T_g - T_{sg}) \quad (3.9)$$

Cidardan soğutucuya olan ısı akışı;

$$\frac{Q'}{A_c} = h_c (T_{sc} - T_c) \quad (3.10)$$

Uniform duvar kalınlığı ve yüzeye dik olan ısı akışı;

$$\frac{Q'}{A_g} = \frac{k}{\ell} (T_{sg} - T_{sc}) \quad (3.11)$$



Şekil 3-2 Isı Akış Diyagramı

Temel eşitlikler olan (3.9), (3.10) ve (3.11), gazdan soğutucuya olan ısı akışını ifade etmektedir. Bu ısı akışını ısı direnci olarak ifade etmek mümkündür. Bu şekilde toplam ısı iletim katsayısı ve toplam ısı direnci tesbit edilir.

1) İç yüzeyin birim alanından geçen ısı miktarı;

$$\frac{Q'}{A_g(T_g - T_c)} = \frac{1}{1/h_g + \ell/k + A_g/h_c \cdot A_c} \quad (3.12)$$

2) Duvar kesitinde ki sıcaklık farkı;

$$\frac{T_{sg} - T_{sc}}{T_g - T_c} = \frac{\ell/k}{1/h_g + \ell/k + A_g/h_c \cdot A_c} \quad (3.13)$$

3) İç yüzey sıcaklığı;

$$\frac{T_{sg} - T_c}{T_g - T_c} = \frac{\ell/k + A_g/h_c \cdot A_c}{1/h_g + \ell/k + A_g/h_c \cdot A_c} \quad (3.14)$$

Yukarıda ki eşitliklerin, motorlar için düzenlenen ısı iletimi eşitliklerine göre yazılması halinde düzenlemelerin yapılması gerekir. Bunun için soğutucu ve gazlara ait Prandtl sayısını sabit tutarak ve ayrıca soğutucu olarak da hava kullanıldığı zaman, en son hal gazlar içinde doğrudur.

$$\frac{h \cdot b}{k} = KR^n \quad (3.15)$$

C boyutsuz çarpan, P (Prandtl sayısı) olmak üzere $K=CP^m$ dir. (3.12), (3.13) ve (3.14) eşitlikleri yeniden düzenlenip yazıldığında ve $R = \frac{G \cdot b}{\mu \cdot g_0}$ bölgesel

Reynolds sayısı olmak üzere;

1) Birim alanda ki ısı geçiş miktarı;

$$\frac{Q'}{A_g(T_g - T_c)} = \frac{k_g/b}{1/(KR^n)_g + \ell h_g/bk_s + [h_g/(kKR^n)_c](A_g)(A_c)} \quad (3.16)$$

2) Duvar kesitindeki sıcaklık farkı;

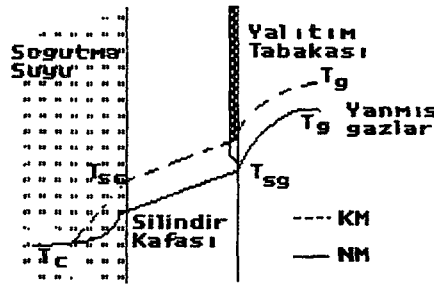
$$\frac{T_{sg} - T_{sc}}{T_g - T_{sc}} = \frac{\ell h_g/bk}{1/(KR^n)_g + \ell h_g/bk + [h_g/(kKR^n)_c](A_g)(A_c)} \quad (3.17)$$

3) İç yüzey sıcaklığı;

$$\frac{T_{sg} - T_{sc}}{T_g - T_c} = \frac{\ell h_g/bk + [h_g/(kKR^n)_c](A_g)(A_c)}{1/(KR^n)_g + \ell h_g/bk + [h_g/(kKR^n)_c](A_g)(A_c)} \quad (3.18)$$

3.3. Deney Sonuçlarına Dayanan Hesaplamalar

Her iki deney çalışması için alınan değerlerin, denklemlerde yerlerine koyarak elde edilen neticelerin karşılaştırılmasıyla avantaj ve dezavantajların ortaya çıkarılması, deneyimizin deneysel kısmının amacını göstermektedir. Adyabatik motor olarak tabir ettiğimiz kaplamalı motorda ki ısı iletimi incelenerek, diğer motora göre ayrıcalıkları incelenmiştir. Özellikle referanslar da, referans olarak alınan deney değerlerinden T_d , T_c , T_{gi} sıcaklıklarının yer ve durumları Şekil 3-3 'de görülmektedir.



Şekil 3-3 Deney Sonucuna Bağlı ısı Geçişi Diyagramı

Deneyisel çalışmalarımız esnasında alınan neticelerin, özellikle hesaplanması gerekli olan ısı kayıplarını bulmak için bir bilgisayar programı yapılmıştır. Bu değerler, değişik hava fazlalık katsayıları ve reaksiyon entalpisi için yanma denklemlerinden yararlanılarak bulunmuştur. KM ve SM 'a ait deney değerleri Tablo 3-1 'de sunulmuştur. Bu tabloda verilen değerler motorun belli devir ve yük altında gerek KM gerekse SM arasında ki farkı göstermektedir.

Tablo 3-1 Ölçülen ve Hesaplanan Değerler

	n (d/d)	P _e (kw)	b _e (gr/kwh)	T _{gi} (°C)	T _c (°C)	T _o (°C)	T _y (°C)	T _e (°C)	m _s (gr/dak)
SM	1400	6.2	298	7	82	15	63	302	846
KM	1400	6.3	275	7	84	15	69	339	823

Toplam ısı miktarını ve soğutucuya olan ısıyı veren ifadeler;

$$Q_T = P_e \cdot H_u \cdot b_e \quad (3.19)$$

$$Q_{tr} = m_s \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3.20)$$

Q_T : Toplam ısı miktarı (kj/s)

Q_{tr} : Soğutucuya olan ısı geçişi (kj/s)

H_u : Yakıtın alt ısı değeri (kj/kg)

c_p : Suyun özgül ısı (kj/kgK)

Yukarıda verilen formullerde suya giden ısı yüzdeleri hesaplanarak tablolara yerleştirilir. Yapılan deneyel çalışmalarımızda deney noktası sıcaklıkları (silindir kafa yüzeyi sıcaklığı) ölçülmemiştir. Bu değer alınması durumunda T_{cs}, T_{gs} ve T_g sıcaklıkları (3.11) eşitliğinden yararlanılarak hesaplanabilir.

$$T_{sc} = T_d - \frac{Q_k \cdot \ell_{dc}}{A_{kg} \cdot k_k} \quad (3.21)$$

$$T_{sg} = T_d + \frac{Q_k \cdot \ell_{dg}}{A_{kd} \cdot k_k} \quad (3.22)$$

$$T_g = T_{sg} + \frac{Q_k}{A_{kg} \cdot h_g} \quad (3.23)$$

T_d : Deney noktası sıcaklığı

A_{kg} : Silindir kafası gaz tarafı alanı

ℓ_{dc} : Deney noktası ile soğutucu cidarı arasındaki mesafe

ℓ_{dg} : Deney noktası ile gaz cidarı arasındaki mesafe

Suya giden yüzde ısı miktarı; $\frac{Q_r}{Q_T} = \%65$ 'dır. Literatürde ki bilgilere göre, ısıнын %29 'u silindir kapağından geçtiği bilinmektedir. O halde suya giden ısıнын silindir kapağından olan miktarı hesaplayacak olursak,

$$q_k = q_r \cdot \frac{29}{100} \quad (3.24)$$

formülünden %18 olarak buluruz. Aynı hesaplamaları KM için yaparsak, %64 'ü soğutucuya transfer edildiği ve bunun da %18.6 'sının silindir kafasından geçtiği hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi KM diğer motorumuza göre azda olsa avantajlı olduğu görülmektedir. Kaplama malzemesinin ısı iletim katsayısının (k_s) etkisine dayanılarak, T_{sg} ve T_g 'de artış olması gerekmektedir. Duvarın gaz tarafı için yapılan hesaplamalar bu düşünce çerçevesindedir ve sonuçlar literatüre uygundur. Tablo 3-2 'de soğutucu ile dışarı atılan ısıнын yüzde oranları verilmektedir [27].

Tablo 3-2 Soğutucuya Transfer Edilen Isının % Oranları

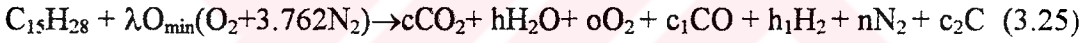
%29	Silindir kafasından	%27	Pistondan
%40	Silindir gömleğinden	%4	Diğer kısımlardan

Bu yüzde oranlarını deneyimizin değişik yük ve devir sayıları için hesaplamak mümkündür. Deneysel çalışmalarımız boyunca, sistemden atılan ısı miktarının yüzde olarak hangi kısımlardan ne kadar geçtiğini hesaplayabilmemiz için basit bir bilgisayar programı yaparak neticeler alınmıştır. Bu değerlerin hesaplanması için aşağıdaki eşitliklerden yararlanılmıştır [28,29,30].

Deney motorumuzda yakıt olarak İpraş ürünü motorin kullanılmıştır. Bu yakıtın kapalı formülü ise, $C_{15}H_{28}$ 'dir. Bu yakıtı ait özellikler Tablo 3-3 'de sunulduğu gibi genel yanma denklemi de aşağıda görülmektedir.

Tablo 3-3 Yakıt Özellikleri

Yakıt	M_y (kg/kmol)	ρ_y (kg/dm ³)	Tutuşma Sınırı (λ)	H_u (kJ/kg)	ΔH°_{fy} (kJ/mol)
$C_{15}H_{28}$	208	0.83	0.5-1.35	42696	-3991.0322



Bu yanma denkleminde değişik λ değerleri için ayrı ayrı hesaplanır. Bunun için gerekli olan bazı ifadelerin bilinmesi gerekir.

$$O_{min} = 15 + \frac{14}{2} = 22$$

$\lambda > 1$ için ; ürünlerde CO_2 , H_2O , N_2 ve O_2

$\lambda = 1$ için ; ürünlerde CO_2 , H_2O ve N_2

$\lambda < 1$ için ; ürünlerde CO_2 , H_2O , CO , H_2 ve N_2 reaksiyon sonucunda ürün olarak çıkar.

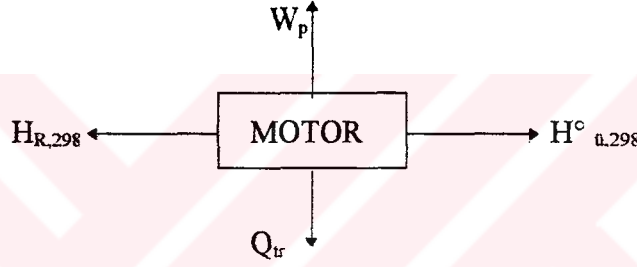
Reaksiyon ısısı için ;

$$\Delta H^\circ_{ur} = H_u - H_R = \sum (b_i - a_i) \cdot H^\circ_{i,T} = Q_u - W_p \quad (3.26)$$

H_u : Ürünlerin entalpisi (kJ/kmol)

H_R : Reaktantların entalpisi (kJ/kmol)

Ürünlerin ve reaktantların hesaplanması esnasında bazı kabuller yapılır (Hava şartları $P=1\text{atm}$, $T=298\text{ °K}$). Deney motorunda her iki hal için özgül yakıt sarfıyatı, faydalı enerji ve egzoz gaz sıcaklığı ile ortam sıcaklığı değerleri deneysel yolla belirlenir. Yanma denklemlerinden yararlanılarak enerji dağılımları hesaplanır. Toplam yakıt enerjisinin, faydalı enerji ve egzoz gazı enerjisinden kalan kısmı soğutma sistemiyle kaybedilen enerji olarak kabul edilir ve ısı dengesi hesapları gerçekleştirilir.



Motor başlı başına bir sistem olarak düşünülürse; faydalı enerji (W_p), soğutucuya transfer edilen ısı (Q_{tr}) ve egzoz enerjisi (Q_e) ise (3.26) eşitliği yazılabilir. Bir mol yakıt başına bulunan bu değerler, her λ değeri için farklı yakıt molar debisi hesaplanır.

$$n'_y = \frac{m'_y}{M_y} = \frac{b_e \cdot P_e}{3600 \cdot M_y} \quad (3.26)$$

n'_y : Yakıtın molar debisi (mol)

m'_y : Yakıtın mol ağırlığı (gr)

M_y : Yakıtın molekül ağırlığı (gr/mol)

$$Q'_{tr} = n'_y \cdot \Delta H + W'_p \quad (3.28)$$

$$Q'_T = m'_y \cdot H_u \quad (3.29)$$

$$Q'_e = Q'_T - Q'_u - W'_p \quad (3.30)$$

(3.28), (3.29) ve (3.30) eşitliklerinden sistemden atılan enerjilerin miktarları hesaplanabilir. Bununla beraber bu enerjilerin yüzde dağılımları ise,

$$q_e = \frac{Q_e}{Q_T} \cdot 100, \quad q_p = \frac{W_p}{Q_T} \cdot 100, \quad q_u = \frac{Q_u}{Q_T} \cdot 100, \quad (3.31)$$

formüllerinden hesaplanır.



BÖLÜM 4

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Geçen bölümlerde, seramik kaplı motorlarla ilgili yapılması gereken işlemlerin izahatı yapılmıştı. Deney işlemi öncesinde yapılan çalışmalarda, uygun motor tipi, deney düzeneği ve cihazları, kaplama tekniği ve kullanılacak malzemelerin özellikleri belirlenmiştir. Bu bölümde ise, kurulan deney sistemi tanıtılmakta ve elde edilen deneysel sonuçlar sunulmaktadır.

4.1. Deney Donanımı

4.1.1. Deney Motorunda Yapılan Teknik Düzenlemeler

Super Star dizel motorunun silindir bloku ve kafası, özel dökme demirden yapılmış ve her silindir için altı adet kuvvetli saplama ile birbirine bağlanmıştır. Silindir gömleği yaş tiptendir. Krank ve kam milleri dövme çelikten imal edilmiş, ısıl işlem görmüş ve hassas olarak taşlanmıştır. Piston kolu dövme çeliktendir. Alüminyum alaşımından mamul piston, üçü kompresyon ve ikisi yağ segmanı olmak üzere beş segmanla oluşturulmuştur. Supaplar Cr-Ni çeliğinden imal edilmiş ve sertleştirilmiştir. Silindir kapağının dökme demirden yapılmış olması termal uyumsuzlukları ortadan kaldıracaktır. Kaplanan seramik malzeme ile kaplanacak metal yüzeyi arasında genleşme katsayıları uyumu, kaplama ömrü bakımından son derece önemlidir. Deney motoruna ait teknik özellikler Tablo 4-1 'de sunulmuştur.

Deney motorumuzun bünyesinde bulunan elemanlar haricinde, motorumuzun performans karakteristiklerini bulabilmek için bir çok cihazla (ölçü aletleriyle) donatılmıştır. Deneyimiz kaplamasız ve kaplamalı olarak iki aşamada yapılmıştır. Motorun yanma odası elemanlarının birer adet daha orijinal parçalarının olması işimizi

oldukça kolaylaştırmıştır. Bu elemanların üst yüzeyleri 0.5 mm PSZ ile yalıtılmıştır. Kaplama olayı gerçekleştirildikten sonrada hassas taşlama ile parçalarımız, standart motor ile aynı sıkıştırma oranını sağlayacak boyutlara getirilmiştir.

Tablo 4-1 Deney Motoruna Ait Teknik Özellikler

Motor markası ve tipi	: Super Star 7720
Strok sayısı	: 4
Silindir sayısı	: 2
Silindir çapı	: 98 mm
Piston stroku	: 100 mm
Sıkıştırma oranı	: 1/17
Motor gücü	: 20 HP $\cong$ 14 kw (1800 d/d)
Özgöl yakıt tüketimi	: 254 gr/kwh
Silindir hacmi	: 1.54 lt.
Püskürtme avansı	: 32 KMA
Püskürtme şekli	: Direkt püskürtmeli tam dizel
Püskürtme basıncı	: 175 bar
Yakıtı	: Dizel
Soğutma şekli	: Pompalı su ile soğutmalı
Supap boşluğu	: 0.25 mm (emme - egzoz)
Yağlama şekli	: Tam basınçlı
Emme supabı açılması	: 15 KMA
Egzoz supabı kapanması	: 15 KMA
Ağırlık	: 285 kg

Deney motoru, performans karakteristiklerini hesaplayabilmek için bazı cihazlarla (ölçü aletleriyle) donatılmıştır. Deneyler kaplamasız ve kaplamalı olmak üzere iki aşamada yapılmıştır. Motorun yanma odası elemanlarının üst yüzeyleri 0.5 mm PSZ ile yalıtılmıştır. Kaplamadan sonra hassas taşlama ile parçaları, standart motor boyutlarına getirilerek montajı gerçekleştirilir.

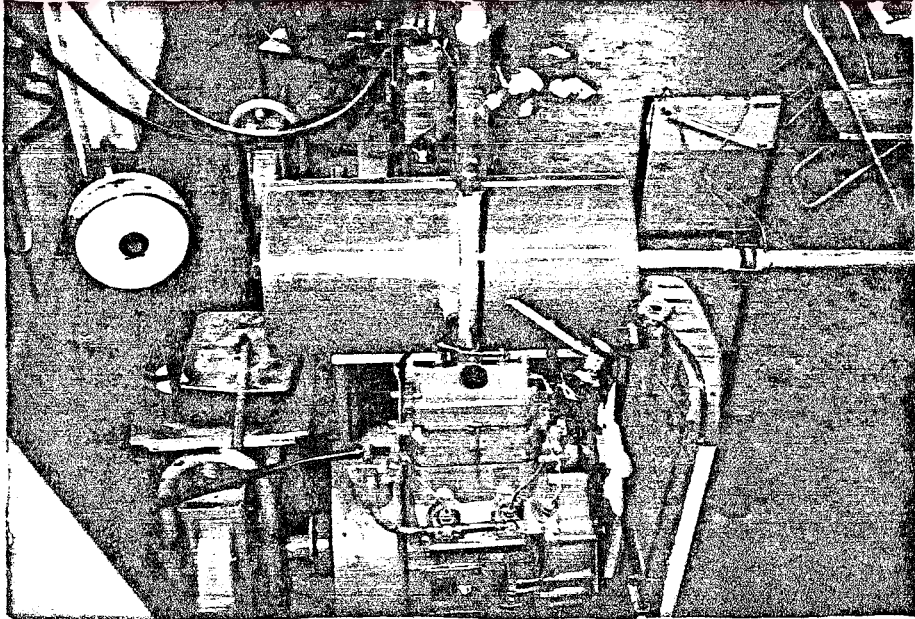
Kaplamasız ve kaplamalı durumdaki motorun her ikisi için soğutucuya olan ısı geçişini hesaplamak amacıyla, motorun yük, devir, soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklıklarıyla soğutma suyu debisi ölçülmüştür. Isı transferi hesaplamalarında yukarıda belirtilen değerler kullanılarak diğer bilinmeyenler hesaplanmıştır. Bunlarla birlikte motor performansı üzerine önemli etkisi olan supap mekanizmasının davranışları, kaplamalı ve kaplamasız motorda mukayese edilmiştir. Böylece her iki

motor içinde sözü edilen motor elemanlarının performans üzerindeki etkileri incelenmiştir.

4.1.2. Deney Donanımı ve Kullanılan Cihazlar

1) Manometre : Motora emilen hava miktarını bulmak için, motor silindir hacminin yüz katı kadar bir hava tankı kullanılır. Tankın emiş kısmına açılan bir delikle bağlantısı yapılan bir borunun ortasına 35 mm çapında sukbe konulur. Emme monifoldu ile atmosfer basıncı arasındaki basınç farkını ölçmek için sukbenin iki ucu arasına bağlantısı yapılır, ve deney esnasında belli yük ve devirlerde neticeler alınır. Monometre sıvısı olarak 0.784 gr/cm^3 yoğunluğunda özel bir sıvı kullanılmıştır.

2) Hidrolik fren dinamometresi : Su freni olarak ifade edilen bu cihaz, motorun çeşitli yük kademelerinde yüklenmesini sağlayarak yük ve devir parametrelerine bağlı olarak performans özelliklerini tesbite yarar. Motor miline bağlı olan bir çarka, şebekeden gelen suyun çarka karşı uyguladığı ters yöndeki kuvvetle dönmesini engeller. Bir karşı ağırlıkla dengelenen terazi şeklinde oluşturulmuş düzenek, su debisi ile dengeye getirilerek motor yüklenir (Şekil 4-1).



Şekil 4-1 Deney Donanımı ve Fren Dinanometresi

3) Takometre : Devir sayısını ölçmek için kullanılan bu alet, krank miline yapıştırılmış özel band ile gönderilen ışınların algılanması sonucunda dijital ekrana yansiyarak motor hızı ölçülmüş olur.

4) Kronometre : Yakıt ölçeğinin, başlangıç ve bitiş noktalarında zamanın tutulması için 1/10 saniye hassasiyetli mekanik bir zaman ölçeği kullanılmıştır.

5) Yakıt Ölçeği : Hacimsel tipte ve mekanik kontrollü 50 cm^3 ve 100 cm^3 iki boğumlu camdan yapılmış silindirik bir cihazdır. Başlangıç ve bitiş noktaları iki çizgi ile işaretlenmiştir.

6) Termokopul : Deneylerde NiCr / Ni (0.5*2) olmak üzere tek tip termokopul kullanılmıştır. Termokopullar, özellikle egzoz gazlarını ölçen kısımda gazdan etkilenmesini önlemek ve dayanıklılığını artırmak maksadıyla bir vida içersine gömülerek akışkana temas ettirilir.

7) Termometreler : 130°C 'ye kadar ölçme yapabilen 1°C hassasiyetli muhtelif boylarda civalı ve ibreli taşıt tipi termometreler kullanılmıştır.

8) Supap aralık mastarı (Sentil) : 0.05 mm aralıklı ve hassasiyetli lama tipidir.

9) Terazi : Soğutma suyu debisini tesbit etmek ve motora ne kadarlık bir yükleme yaptığımızı görebilmek için kullanılan ibreli ve 15 kg yük taşıyabilen bir terazidir.

10) Milivoltmetre : Elektronik dijital değer okunabilen bir milivolt ölçme aletidir. Isı farklarından etkilenme sureti ile çalışır ve termokopul ile kullanılır.

4.1.3. Kaplanan Parçalar ve Kullanılan Seramik Tozun Özellikleri

Deneysel çalışmaların birinci bölümünü tamamladıktan sonra, daha önceden kaplanmış olan piston, supap ve silindir kapağının motora montajı yapılarak, aynı

çalışma şartlarında deneyler tekrarlanmıştır. Seramikle kaplanacak olan parçaların üst yüzeylerinden 0.5 mm 'lik bir talaş kaldırılmış ve yüzeyi iyi bir şekilde temizlenerek (sıvı ve kum püskürtmeyle) kaplamaya hazır hale getirilmiştir. Daha sonra kaplanacak seramik malzemesi (PSZ), kaplanacak yüzeye herhangi bir ön tav yapılmadan 10 cm mesafeden plazma tabancasından çıkan yüksek sıcaklıktaki eritilmiş tozun püskürtülmesiyle kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Püskürtme işlemi, kaplama kalınlığına bağlı olarak bir kaç kat atılır. İstenilen kalınlıktan fazla püskürtülmesi halinde bazı problemler çıkabilir. Plazma sprej yöntemiyle yapılan kaplama işleminde kullanılan seramik toza ait teknik özellikler Tablo 4-2 'de sunulmuştur. Kaplamadan önce bir bağlayıcı ve astar olarak 0.01 mm kalınlığında NiCrAlY tabaka kaplanırsa iki malzeme arasındaki termal genleşme uyumluluğu daha iyi sağlanmış olur.

Kaplama işlemi, pistonların üst yüzeyi, supapların yanma odasındaki gazların temas ettiği tabla yüzeyi ve silindir kapak yüzeyini içermektedir. Şekil 4-2 'de deneyde kullanılan supap ve silindir kapağının kaplanmış hali görülmektedir.

4.2. İşletme Şartları ve Ölçme Tekniği

Deneyin birinci bölümü tamamlandıktan sonra, kaplanmış olduğumuz parçaların montajı yapılmıştır. Aynı çalışma şartlarında deneylerimizi gerçekleştirebilmek için, supap ayar boşlukları, enjektör püskürtme basıncı ve pompa regülatörü gibi kısımlar imalatçının tavsiye ettiği değerlere göre ayarlanmıştır. Gerekli olan tesisat donanımı gözden geçirilir. Burada önemli olan ölçülecek parametrelerin iyi bir şekilde bağlantılarını sağlanmasıdır. Bu nedenle özgül yakıt tüketimi (b_e) ölçümünde motora ve gösterge hunisine olan bağlantıları dikkatli bir şekilde yapılmalıdır.

Diğer bir amacımızı gerçekleştirmek için de (egzoz gazı sıcaklığını ölçmek için) egzoz portundan yaklaşık 30 cm mesafede egzoz borusu içine termokopul sokularak milivoltmetre ile değerler alınmıştır. Burada kullanılan termokopul NiCr-Ni 2x0.2 ölçülerindedir. Bu cihazın hassasiyeti 1370 °C civarındadır.

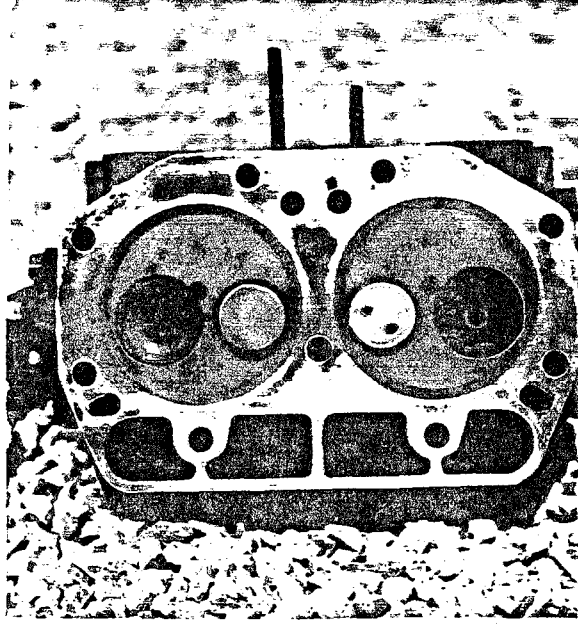
Soğutma suyu sıcaklıkları, düz ve civalı termometre ile ölçülmüştür. Motorun, sabit yük kademeli bremzenin terazi koluna sabit bir yükün kademeli olarak bağlanmasıyla sağlanmıştır. Soğutma debisini ölçmek için de radyatör sistemi sökölüp suyun motora giriş kısmı şebeke musluğuna bağlanarak çıkıştaki suyun bir kaptaki 5 dakika süreyle toplanıp, tartılmasıyla soğutma için gerekli olan suyun debisi bulunmuştur. Motor hızı da takometre adı verilen bir cihazla ölçülmüştür.

İşletme şartları için önem arzeden diğer bir husus ise karışımı teşkil eden havanın miktarıdır. Bu ölçüm için de silindir toplam hacminin yüz katı kadar bir hava tankı kullanılmıştır. Bu tankın hava emiş kısmına 1.2 m uzunluğunda, 60 mm çapında bir boru yerleştirilerek ve bunun ortasına konulan bir sukbe vasıtasıyla ortam havası ile emme monifoldu arasındaki basınç farkı manometreden okunarak gerekli ifade de yerine konularak hava debisi hesaplanmıştır.

Tablo 4-2 Kaplamada Kullanılan Seramik Tozun Özellikleri

Kimyasal toz bileşimi	MgO + ZrO ₂
Yaklaşık sertlik	RC 30 ceya 1200 kg/mm ²
Maksimum kullanım sıcaklığı	1250 °C
Ergime noktası	2700 °C
Sünme dayanımı	İyi
Yoğunluğu	5.6 gr/cc
Toz rengi	Gri
Kaplama kalınlığı	0.5 mm
Elastik modülü	17 - 25 GPa
Mukavemet	113 - 130 MPa
Termal şok dayanımı	Çok iyi
Isı yalıtımı	Çok iyi
Tokluk	6 - 9 K _{ic}

Özellikle motor performans karakteristikleri bakımından yumurta eğrilerinin (eş özgül yakıt tüketimi) tesbiti için deney aralıkları mümkün mertebe küçük aralıklarda alınmıştır. Deney motoru 1000 d/d 'dan 1900 d/d 'ya kadar her 100 d/d aralıklı hızlarda ve 8 ayrı yük kademesinde ölçümler yapılmıştır. Bunun neticesinde efektif güç (P_e), özgül yakıt sarfıyatı (b_e), ortalama efektif basınç (P_{me}), kaplanmış ve kaplanmamış motorun performans açısından mukayesesinin detaylı olarak yapılabilmesi için hesaplanmıştır.



Şekil 4-2 Deneyde Kullanılan parçaların kaplanmış hali

Çalışmada elde edilen yumurta eğrileri 4 bölgeye ayrılarak incelenmiş ve mukayese edilmiştir. Bu bölgeler;

- 1) Düşük yük, düşük devir
- 2) Yüksek yük, düşük devir
- 3) Düşük yük, yüksek devir
- 4) Yüksek yük, yüksek devir

Bu bölgelerde yapılan incelemelerde özgül yakıt tüketiminin en az olduğu yükleme ve devir aralığı bulunarak motorun optimum çalışma aralığı tayin edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar da standart motor için kabul edilen ve alınan değerler ile bunların sonuçları, kaplanmış motor ile aynı değildir. Motorda yanma odası elemanlarının kısmen de olsa ısı yalıtımı yapılması cidar sıcaklıklarının artması ile bir çok faydalar sağladığı bilinmektedir. Bunların başında, tutuşma gecikmesinin azalmasıyla motorun daha sessiz çalışması gelmektedir. Yanma odasında sadece bir elemanın kaplanması bir çok işletme ve dizayn özelliğinin etkilenmesine ve değişmesine sebep olmaktadır. Yaptığımız deneyde, istenilen neticeye tam anlamıyla

ulaşılmamış olsa bile normal motora göre bir avantaj sağladığı görülmektedir. Tablo 4-3 'de her iki motor tipi için uygulanan deney aralığı görülmektedir.

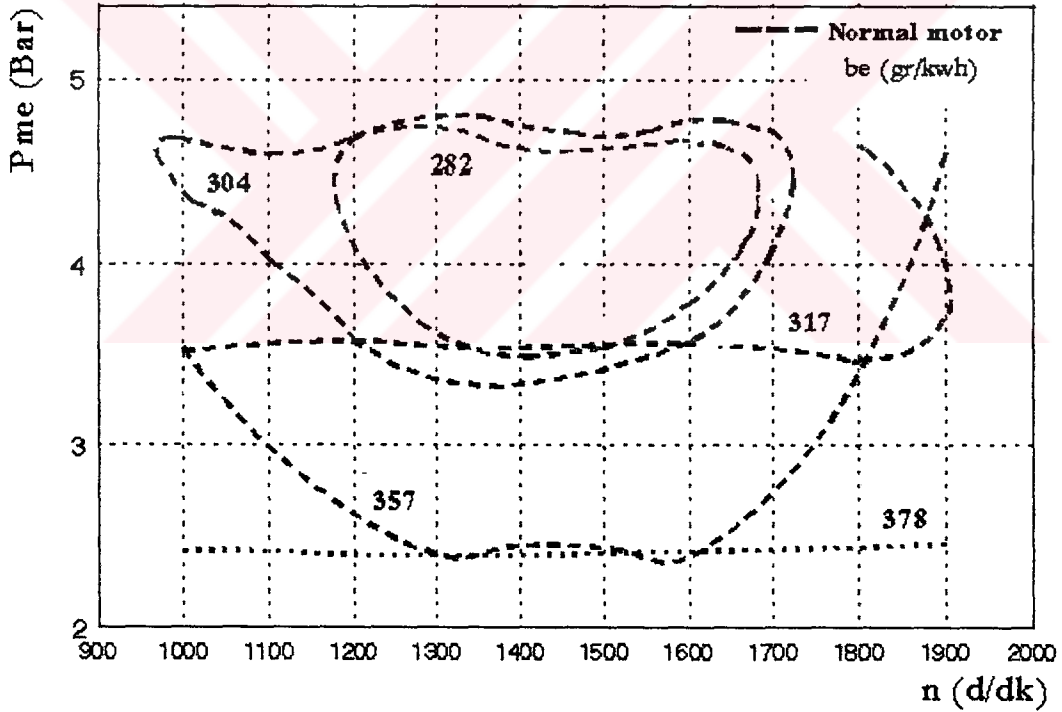
Yukarıdaki minimum ve maksimum değerleri arasındaki neticelere karşılık gelen sonuçların, çalışma aralığımızı belirlememize yardımcı olur. Deney motoru başlangıçta 1100 d/d 'da ve yaklaşık 10-15 dakika rolantide çalıştırılmıştır. Daha sonra 1500 d/d 'da 20-25 dakika çalıştırılarak rejim haline gelmesi sağlanmıştır. Bu işlemlerden sonra deneysel çalışmalarımıza başlarız. Öncelikle 1000 d/d 'dan başlayarak 100 'er aralıkla 1900 d/d 'ya kadar deneyler yapılmıştır. Referans alınan yük ve devir sayılarında 100 cm^3 'lük yakıtı tüketmek için geçen süre kronometre ile ölçülmüştür. Bu çalışmadan sonra motora giren havanın debisini bulabilmek için manometreden, ortam havası ile emme monifoldu arasındaki basınç farkı ölçülmüştür. Deney donanımımız da yerleştirilmiş olan göstergelerden de T_e , T_{ag} , $T_{a\phi}$ ölçülmüştür. Bu alınan değerler sayesinde, hava fazlalık katsayısı (λ), özgül yakıt sarfiyatı (b_e), ortalama efektif basınç (P_{me}) ve efektif güç (P_e) parametreleri hesaplanır.

Tablo 4-3 Motor Deney Aralıkları

	SM	KM
	min. - max.	min. - max.
n (d/d)	1000 - 1900	1000 - 1900
F (N)	40 - 100	40 - 100
T_e (°C)	227 - 483	253 - 484
T_o (°C)	20 - 23	20 - 24
T_c (°C)	70 - 89	77 - 94
b_e (gr/Kwh)	378 - 388	374 - 386

4.3. Deney Sonuçları

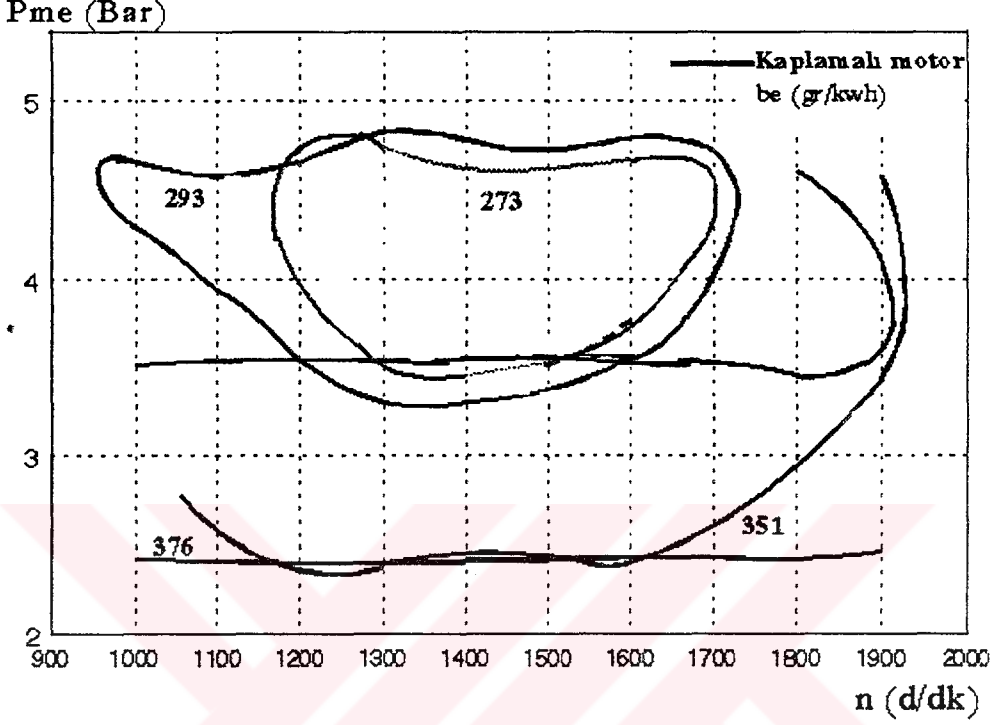
Buraya kadar yapılan çalışmalarda elde edilen değerler bölüm 5 'de tablolar halinde, bu kısımda ise grafik halinde sunulmuştur. Değişik devir ve yüklemeler sonucunda elde edilen özgül yakıt sarfiyatı ve ortalama efektif basınç değerlerini kullanarak, normal motor (NM) ve kaplamalı motor (KM) için yumurta eğrileri Şekil 4-3a ve 4-3b 'de gösterilmektedir. Bu eğriler incelendiğinde minimum yakıt sarfiyatı 1200-1600 d/d ve ortalama basıncın 3.5-4.75 bar arasında olduğu tesbit edilmiştir. Her iki motoru yakıt tüketimi açısından karşılaştırdığımızda, NM için yukardaki devir aralığına karşılık 282 gr/kwh, KM 'da ise 273 gr/kwh 'lik bir yakıt sarfiyatı söz konusudur. Bununla birlikte bu devir aralığı için normal motorun optimum çalışma aralığı seramik motora göre daha dar olduğu görülmektedir.



Şekil 4-3a NM İçin Deney Sonucunda Elde Edilen Değerlere Göre Yumurta (Eş Özgül Yakıt Tüketimi) Eğrileri

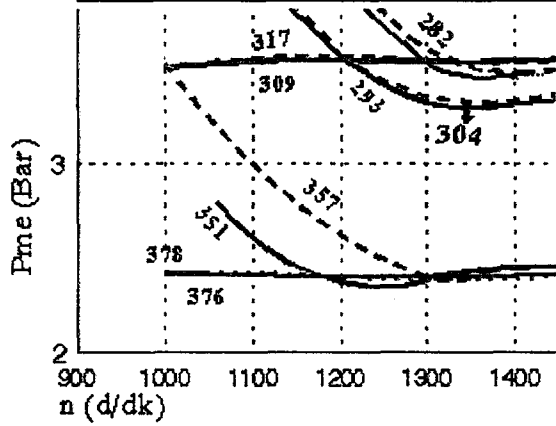
Bölüm 4.2 'de belirtildiği gibi, eş özgül yakıt tüketimi eğrileri dört bölgeye ayrılarak ayrı ayrı incelenmiştir. Birinci bölge; 0-3.75 bar ve 900-1450 d/d aralığında, ikinci bölge; 3.75-5 bar ve 900-1450 d/d aralığında, üçüncü bölge; 0-3.75 bar ve

1450-2000 d/d aralığında, dördüncü bölge: 3.75-5 bar ve 1450-2000 d/d aralığında, alınarak karşılaştırma yapılmıştır.



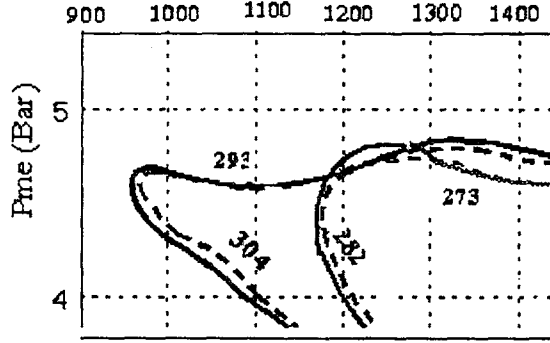
Şekil 4-3b KM İçin Deney Sonucunda Elde Edilen Değerlere Göre Yumurta (Eş Özgül Yakıt Tüketimi) Eğrileri

Minimum özgül yakıt tüketimi açısından genel olarak dört bölge için eşit bir dağılım sözkonusudur. Fakat birinci bölge, diğer üç bölgeye kıyasla pek elverişli olmadığı görülmektedir (Şekil 4-4). Bu bölgedeki yakıt sarfiyatının önemi oldukça büyüktür.



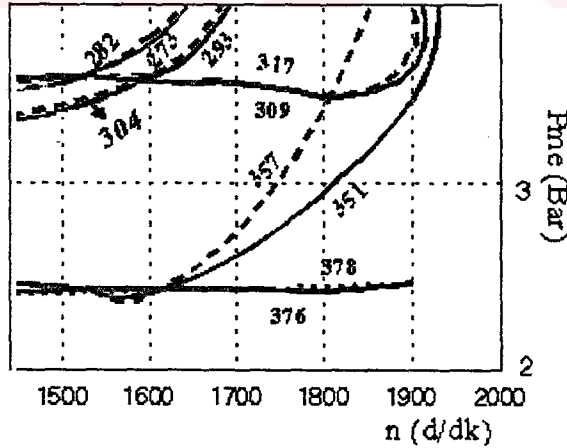
Şekil 4-4 Birinci Bölge (Düşük Yük, Düşük Devir)

İkinci bölgede ise, birinci bölgede ki bu elverişsiz durumun iyileştiği görülmektedir (Şekil 4-5). Bununla birlikte, maksimum ortalama basınç noktasındaki yakıt sarfiyatı KM için daha az olduğu görülmektedir.



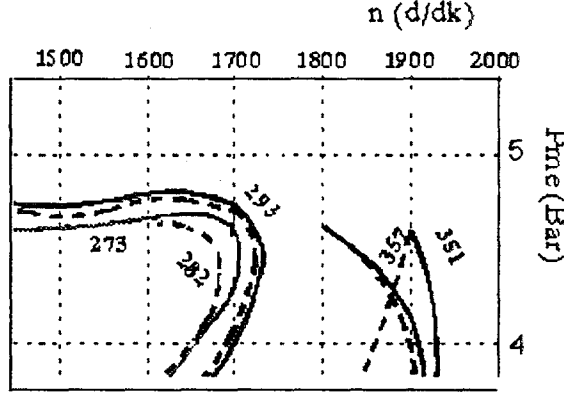
Şekil 4-5 İkinci Bölge (Yüksek Yük, Düşük devir)

Üçüncü ve dördüncü bölgelerde ise böyle bir fark olmayıp, ikinci bölge için bulunan özelliklerin değişmediği görülmektedir. Yalnız üçüncü bölgede merkezden uzaklaştıkça kaplamalı motorun yakıt tüketiminde artış görülmekte ve hatta tam gaz durumunda, karasız bir çalışma göze çarpmaktadır (Şekil 4-6).



Şekil 4-6 Üçüncü Bölge (Düşük Yük, Yüksek Devir)

Son bölgede ise; yakıt sarfiyatında bir ve üçüncü bölgelere nazaran iyi olduğu söylenemez (Şekil 4-7). Çünkü kaplamalı motordaki bu çalışma aralığı, oldukça yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmektedir.



Şekil 4-7 Dördüncü Bölge (Yüksek Yük, Yüksek Devir)

Motorun her iki durumundaki eş özgül yakıt tüketimi eğrileri karşılaştırıldıktan sonra, adyabatik motor projesinin ana amaçlarından olan egzoz gazı sıcaklıklarındaki değişimleri inceleyelim. İki motor tipinde de, özellikle cidar ve soğutma suyu çıkış sıcaklıklarındaki farklılaşmalar egzoz gazlarında meydana gelen artışlardan kaynaklanmaktadır. Bu durumu gözönünde bulundurduğumuzda, aynı şartlarda yapılan deneyde, seramik kaplı motorun daha avantajlı olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Yükün ve motor hızının artırılmasıyla, bu fark daha da belirginleşmektedir. Kaplamalı ve normal motorun deney sonuçlarına dayanılarak, bilgisayar yardımı ile hesaplanmış değerleri ve buna ait T_e-n , Q_e-n , q_e-n (%), b_e-n , Q_{tr-n} , q_{tr-n} (%), Q_T-n , $HFK-n$, Q_e-P_e ve P_e-n , grafikleri ayrı ayrı sunulmuştur. Şekil 4-8, 4-9 ve 4-10 'da gösterilen egzoz gazı sıcaklığı, egzoz enerjisi ve yüzde oranı, devir ve yükün artmasıyla, belli bir oranda artış göstermektedir. Normal motora göre 15-40°C civarında artış gösteren seramik kaplı motor istenilen neticeyi belirgin bir şekilde vermiştir.

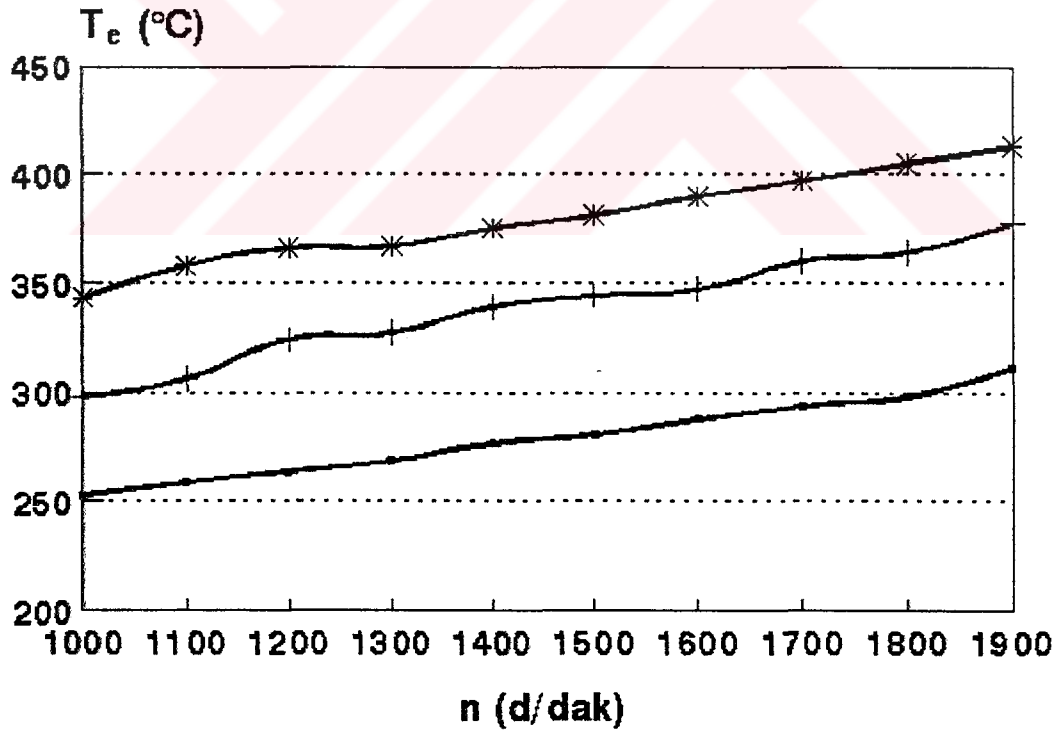
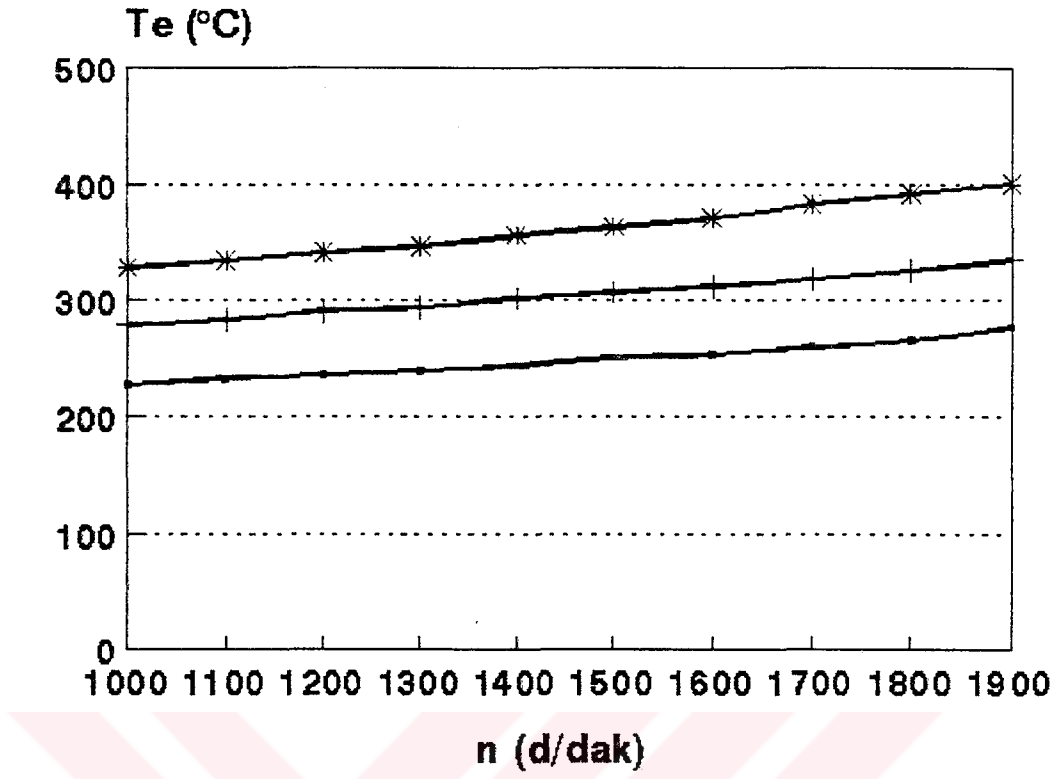
Şekil 4-11 'deki $b_e=f(n)$ grafiğinde görüldüğü gibi, düşük ve yüksek devirlerde yakıt sarfiyatında bir artış görülmektedir. Buna rağmen orta devirlerde (optimum çalışma aralığında), minimum yakıt sarfiyatı tesbit edilmiştir. Kaplamalı motordaki yakıt sarfiyatı, 1000-1300 d/d aralığında normal motora göre daha hızlı bir azalış göstermektedir. Yüksek devirlerde (1600-1900 d/d) ise, bu azalma daha belirgin hale gelmiştir.

Şekil 4-12 'de $Q_{ir}=f(n)$ grafiği incelendiğinde, yükün ve motor hızının artırılmasıyla, soğutmaya transfer edilen enerji miktarının arttığı görülmektedir. İki motor tipi için de aynı durum söz konusudur, fakat kaplamalı motordaki ısı transferi bazı noktalarda avantajlı olduğu özellikle de maksimum yüklemde bir dalgalanma hakim olup, azalma görülmektedir. Soğutmaya transfer edilen enerjinin yüzde miktarı ile devir ilişkisini gösteren Şekil 4-13 ise, motor devri arttıkça soğutmaya geçen ısının toplam enerjiye göre azaldığını görmekteyiz. Şekil 4-14 'deki $Q_1=f(n)$ değişiminde görüldüğü gibi, devir sayısındaki artışla beraber toplam enerji miktarında da artış söz konusudur.

Şekil 4-15 'de hava fazlalık katsayısının motor devri ile olan değişimi görülmektedir. Dizel motorları için önemli olan bu parametre, motor devrinin artmasıyla azalış göstermektedir. Normal motordaki azalma diğer motora göre daha yavaş gerçekleşmektedir. Şekil 4-16 'da $Q_e=f(P_e)$ değişimi görülmektedir. Kaplamalı motordaki egzoz gazı sıcaklığının diğer motora göre belirgin bir artış göstermesi, egzoz enerjisinde de artışa sebep olacağı aşikardır. Bu artış ise, efektif gücün (motor yükünün ve hızının) artırılmasıyla sağlanır. Grafikten de görüldüğü gibi, kaplamalı motordaki artış diğer motora nazaran daha liner bir değişim göstermektedir.

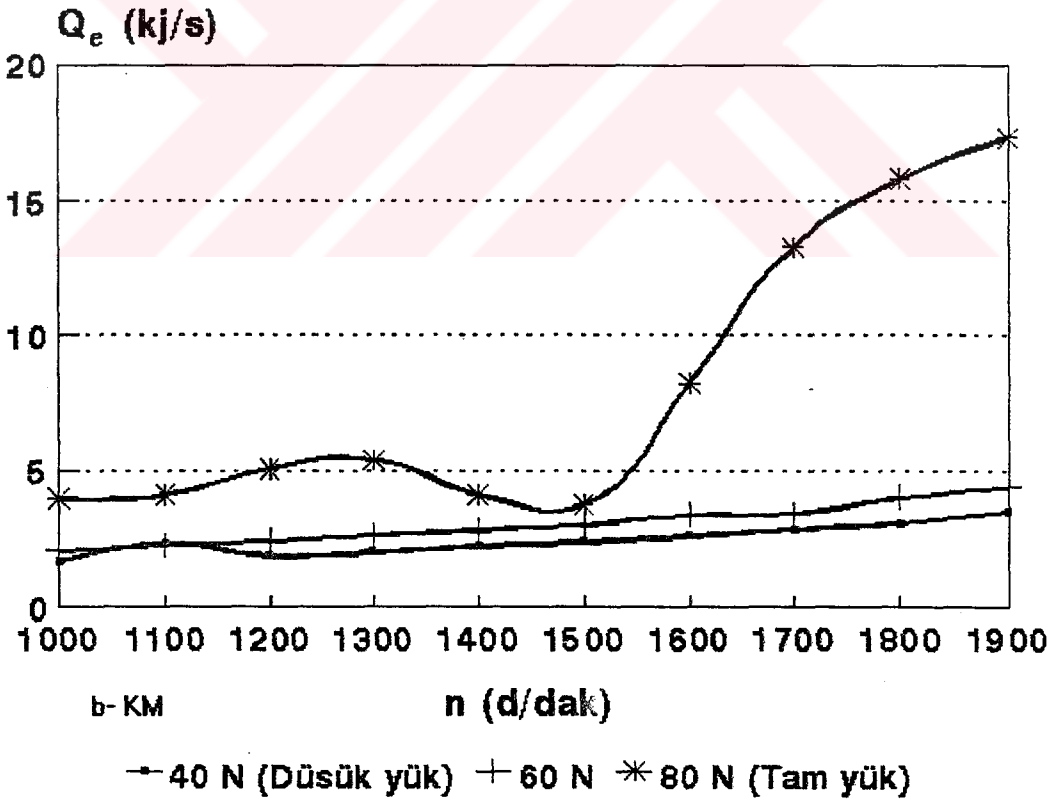
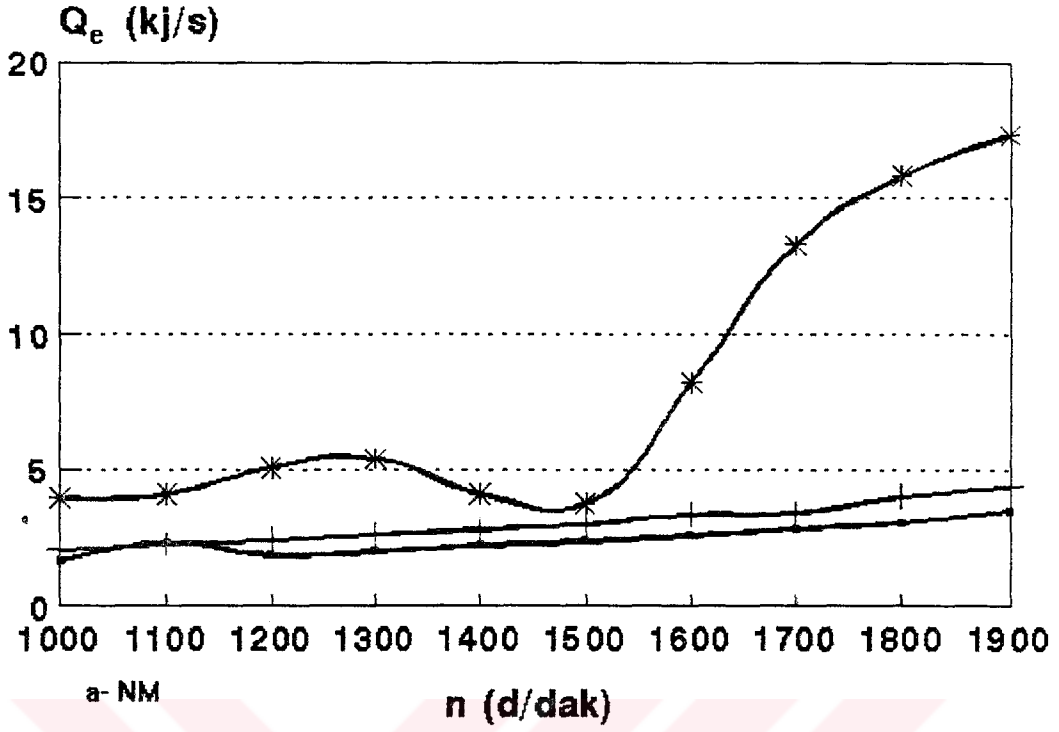
Şekil 4-17 'de ise efektif gücün devir sayısı ile olan ilişkisi görülmektedir. Yukarıda deyindiğimiz gibi, motor hızının artmasıyla bu gücün de artacağı fiziksel olarak anlamını veren formullerden de rahatça anlaşılır.

Deneysel çalışmalarımız neticesinde elde edilen grafiklerden görüldüğü üzere, adyabatik motor projesinin amaçları arasında bulunan egzoz gaz sıcaklıklarındaki artışların açık bir şekilde görülmüş olması, bu çalışmadaki kaplama uygulamasının başarısını ortaya koymaktadır. Her ne kadar yanma odası elemanlarının yüzeylerinde hafif çatlaklar olsa bile, kopma olayı görülmemiştir.

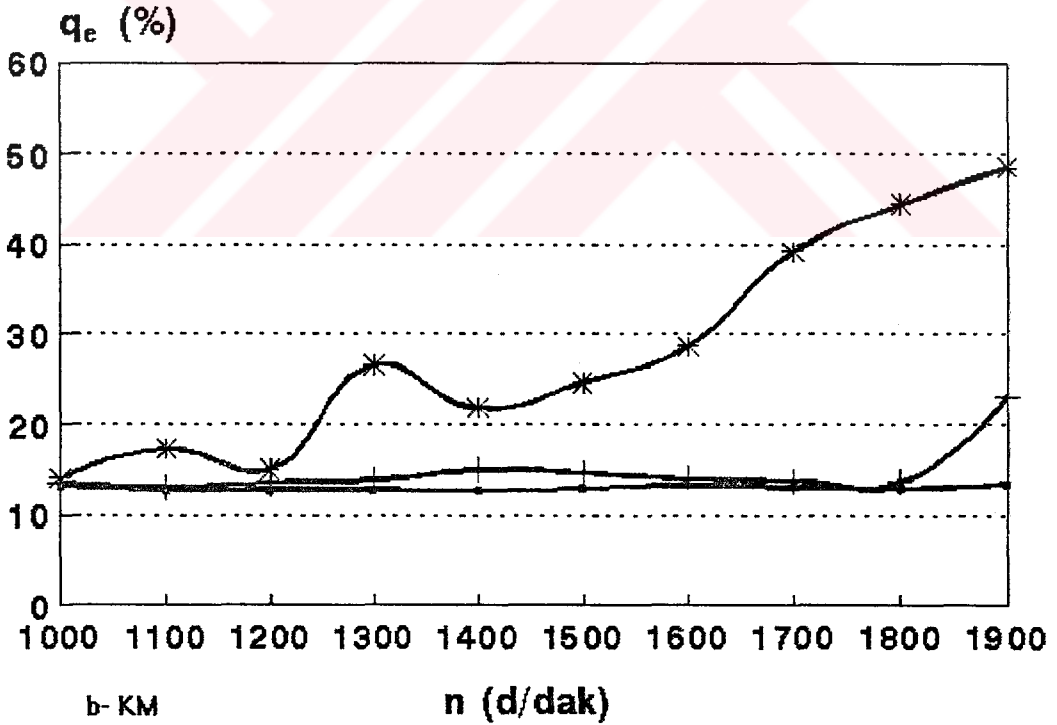
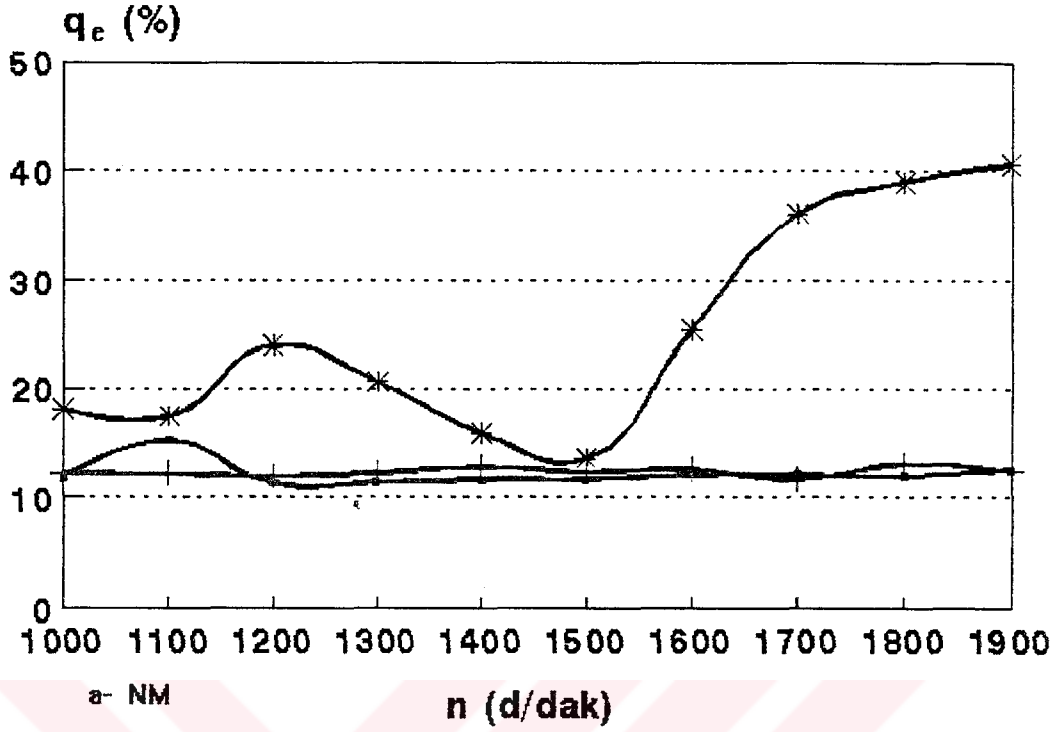


→ 40 N (Düşük yük) + 60 N * 80 N (Tam yük)

Şekil 4-8 Sabit P_{me} Şartlarında Motor Devrine Bağlı Olarak Egzoz Sıcaklığının Değişimi

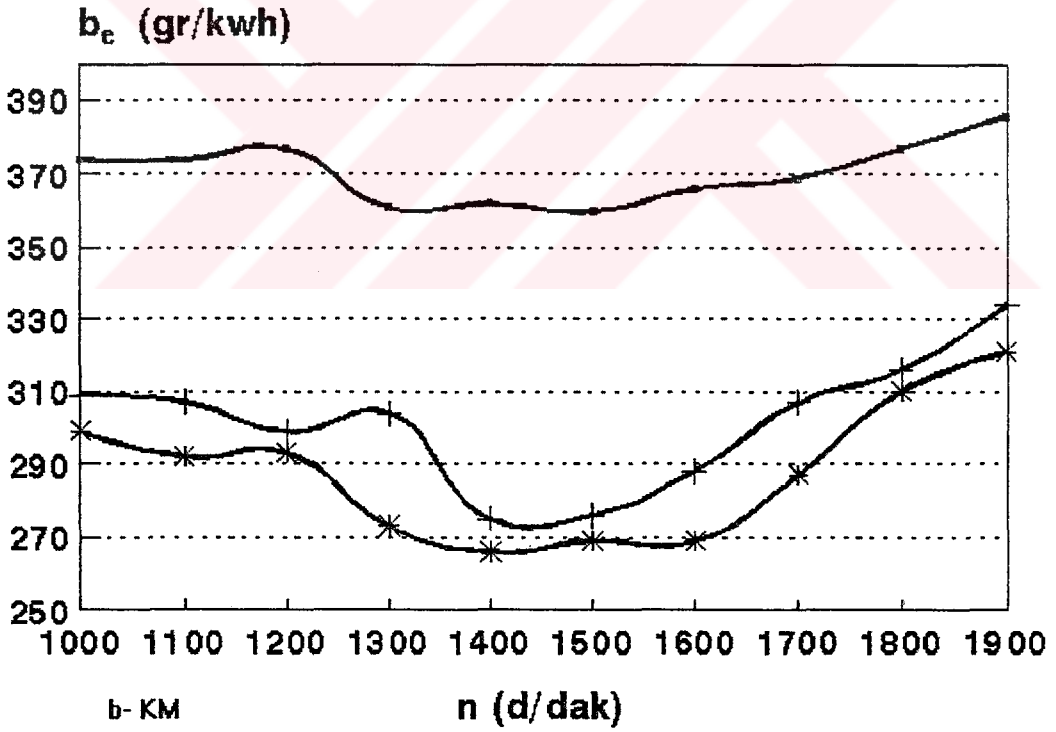
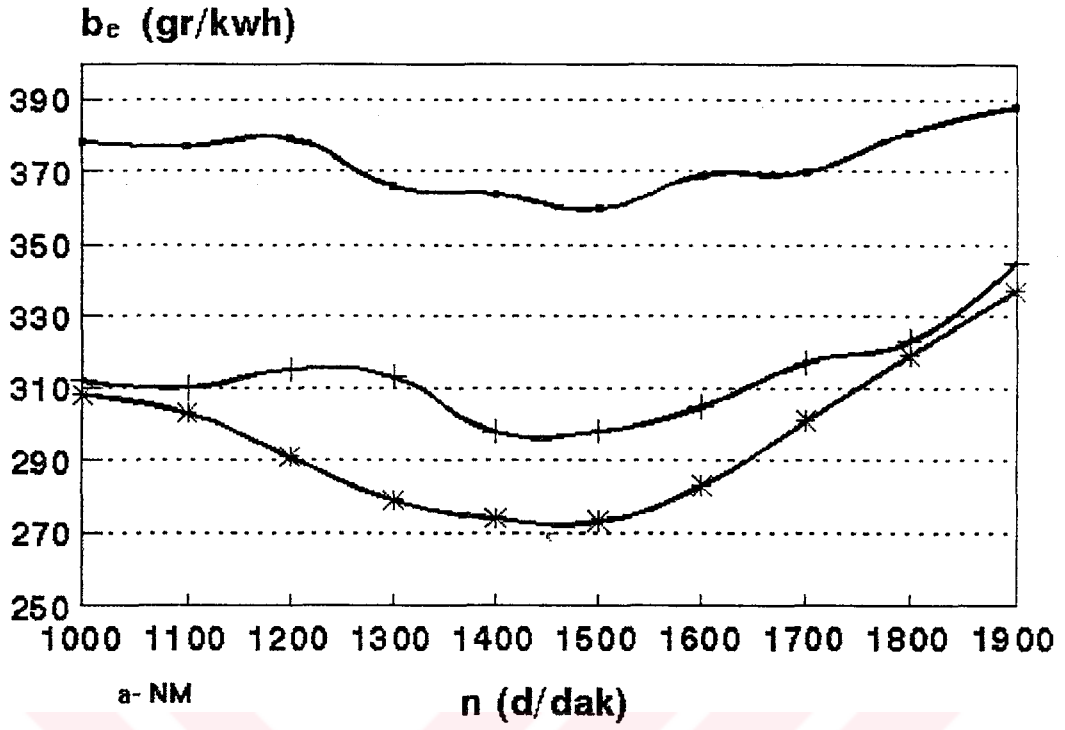


Şekil 4-9 Sabit P_{me} Şartlarında Motor Devrine Bağlı Olarak Egzoz Enerjisinin Değişimi



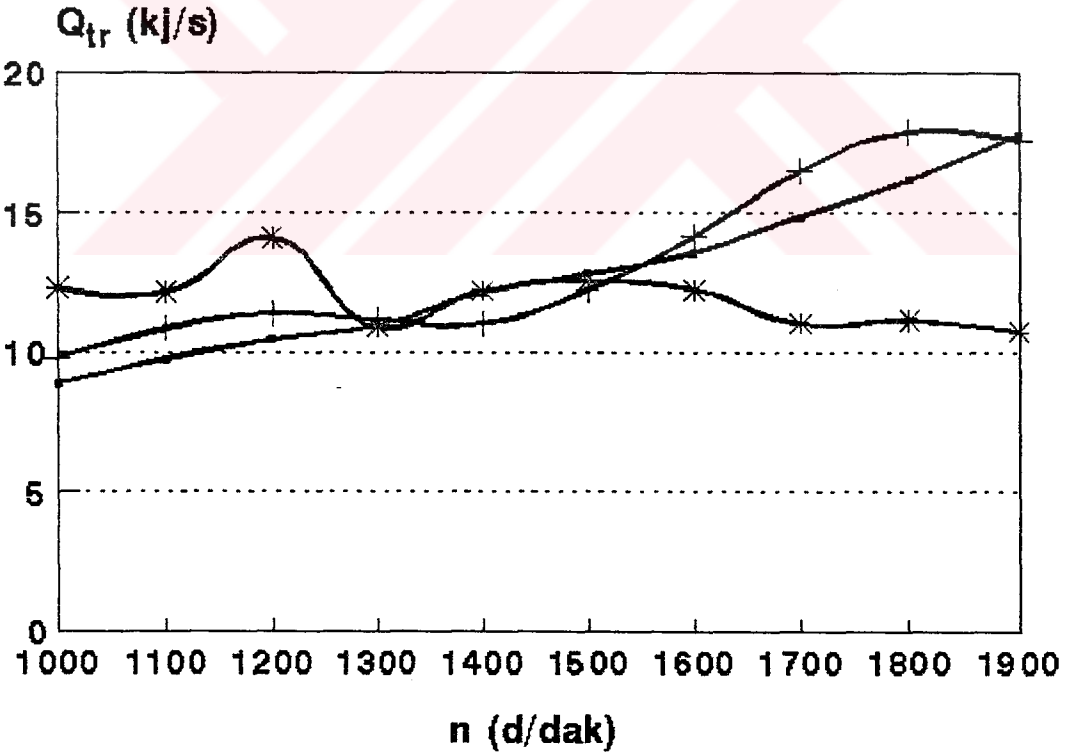
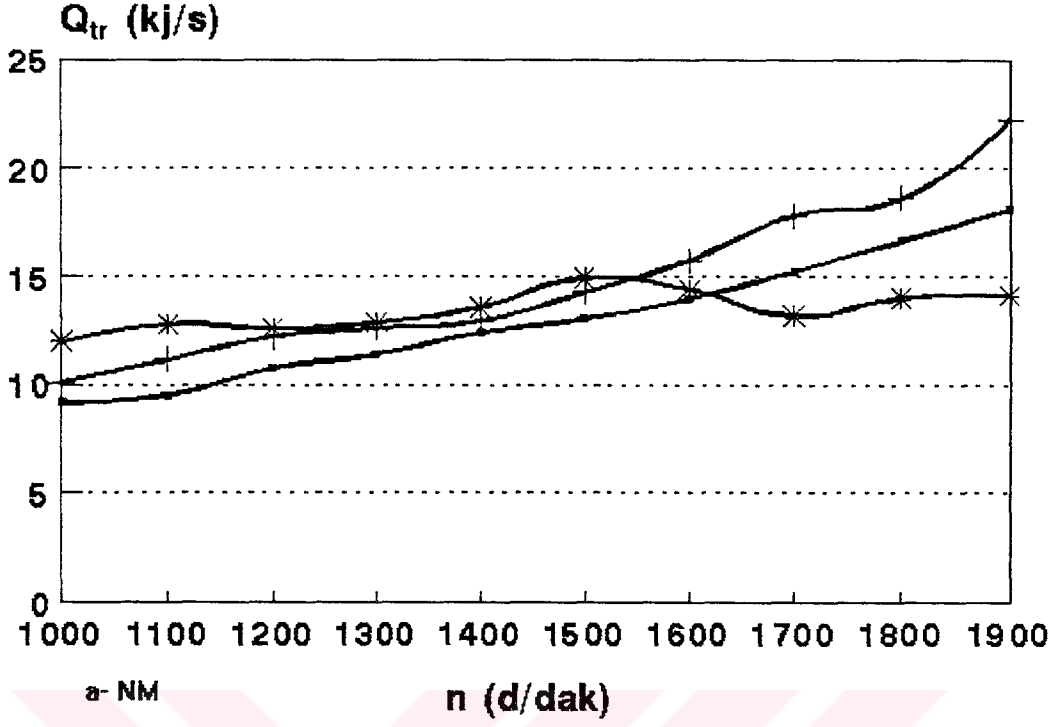
→ 40 N (Düşük yük) + 60 N * 80 N (Tam yük)

Şekil 4-10 Sabit Pme Şartlarında Motor Devrine Bağlı Olarak % Egzoz Enerjisinin Değişimi



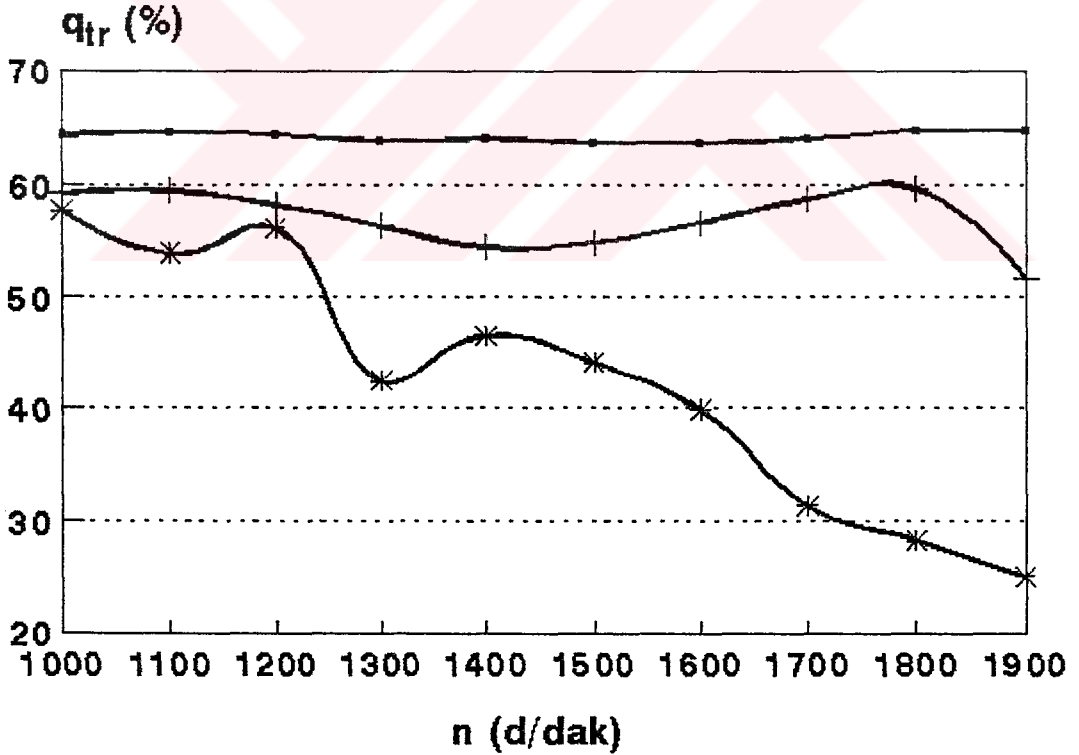
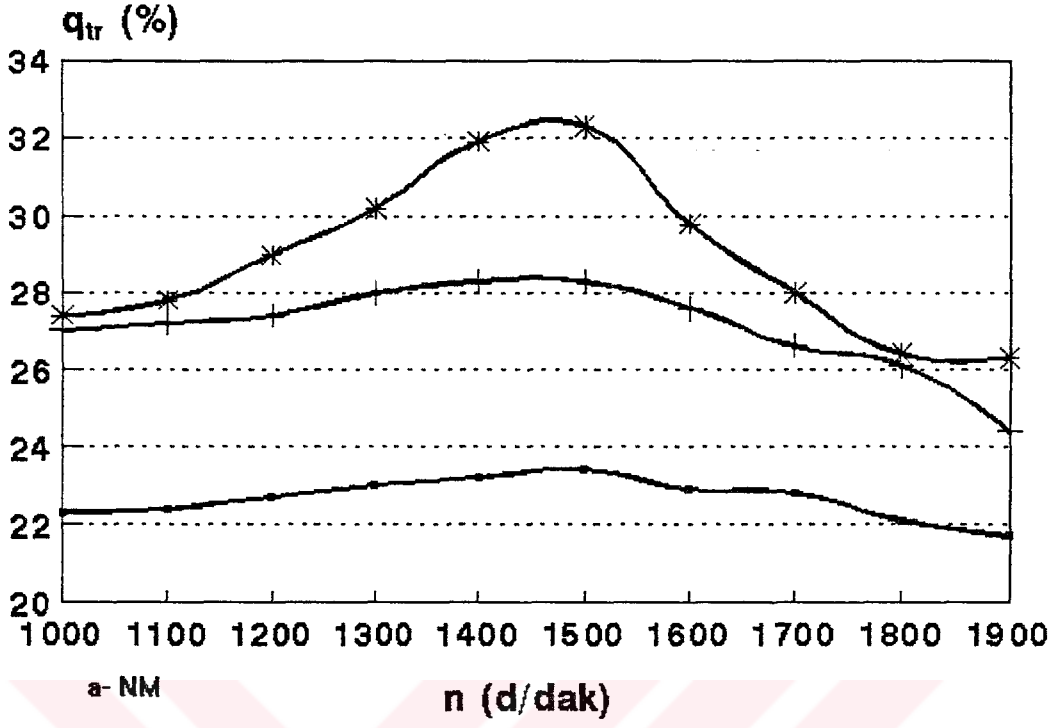
—•— 40 N (Düşük yük) —+— 60 N —*— 80 N (Tam yük)

Şekil 4-11 Sabit P_{me} Şartlarında Motor Devrine Bağlı Olarak Özgül Yakıt Tüketiminin Değişimi



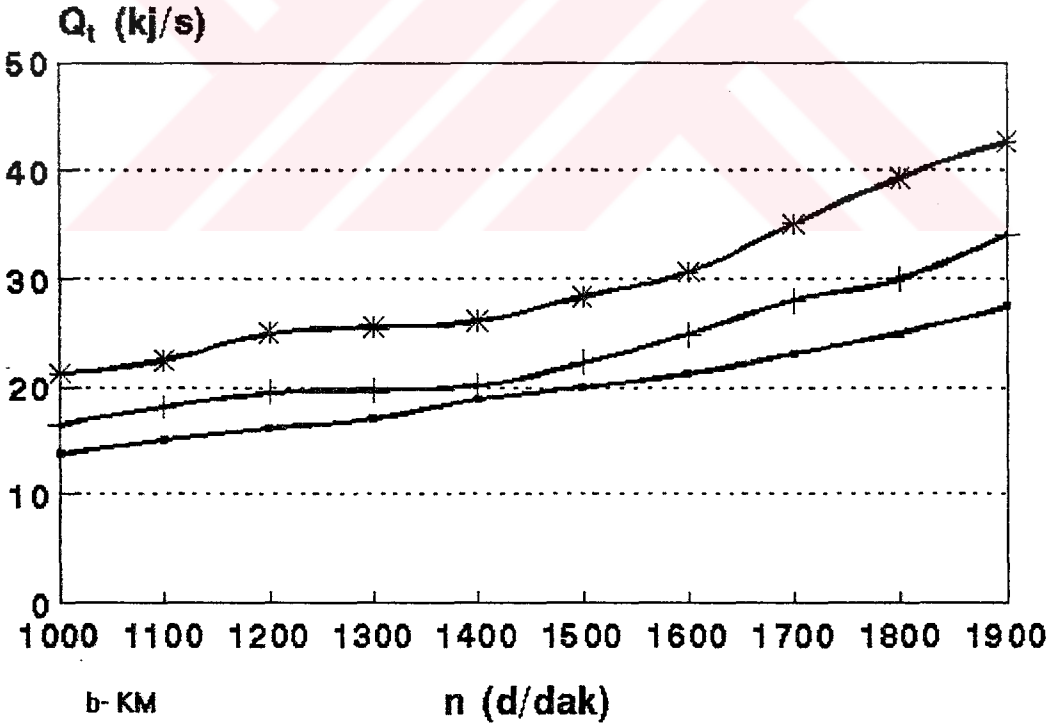
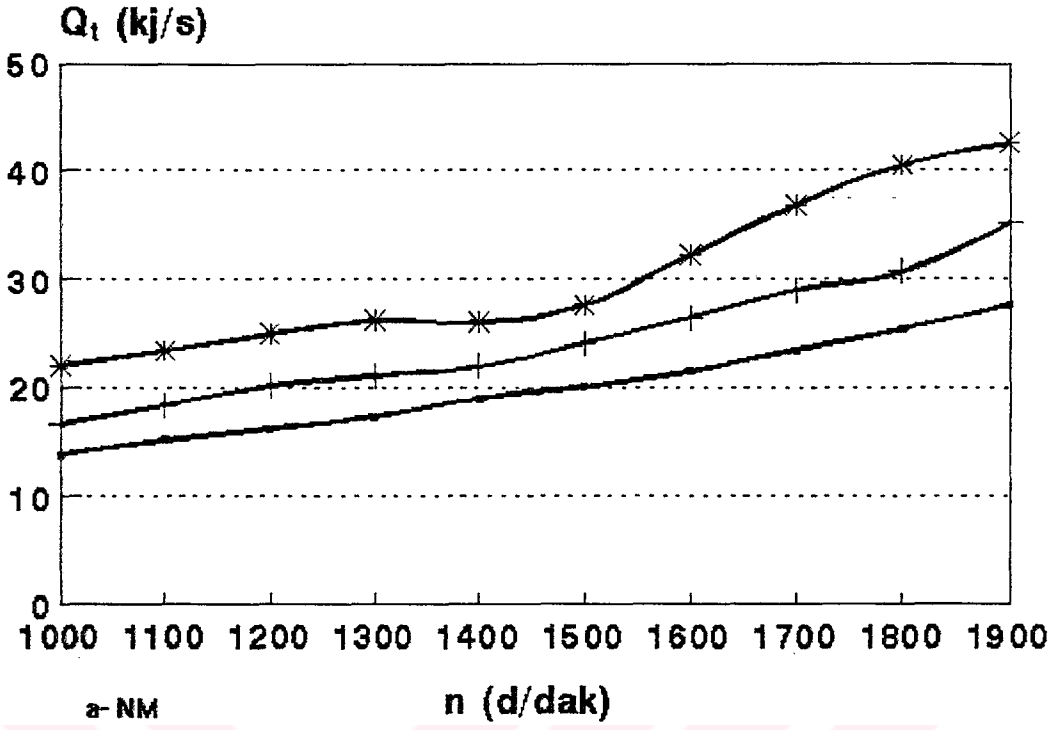
—•— 40 N (düşük yük) —+— 60 N * 80 N (tam yük)

Şekil 4-12 Sabit P_{me} Şartlarında Motor Devrine Bağlı Olarak Soğutmaya Transfer Edilen Enerjinin Değişimi



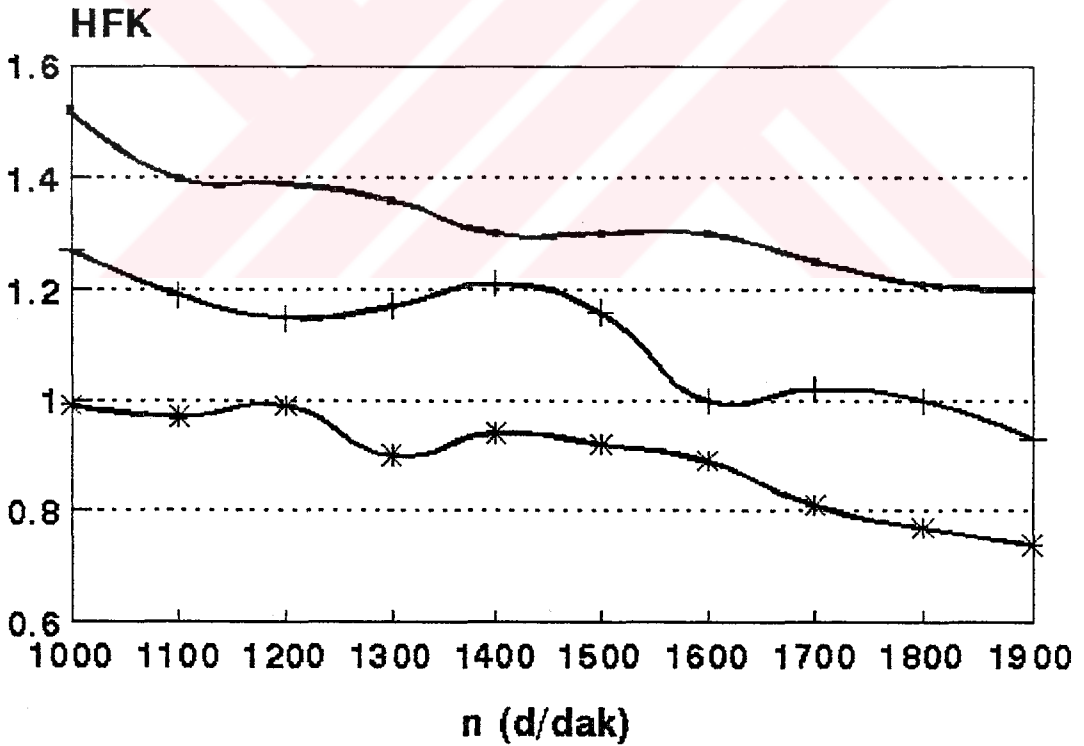
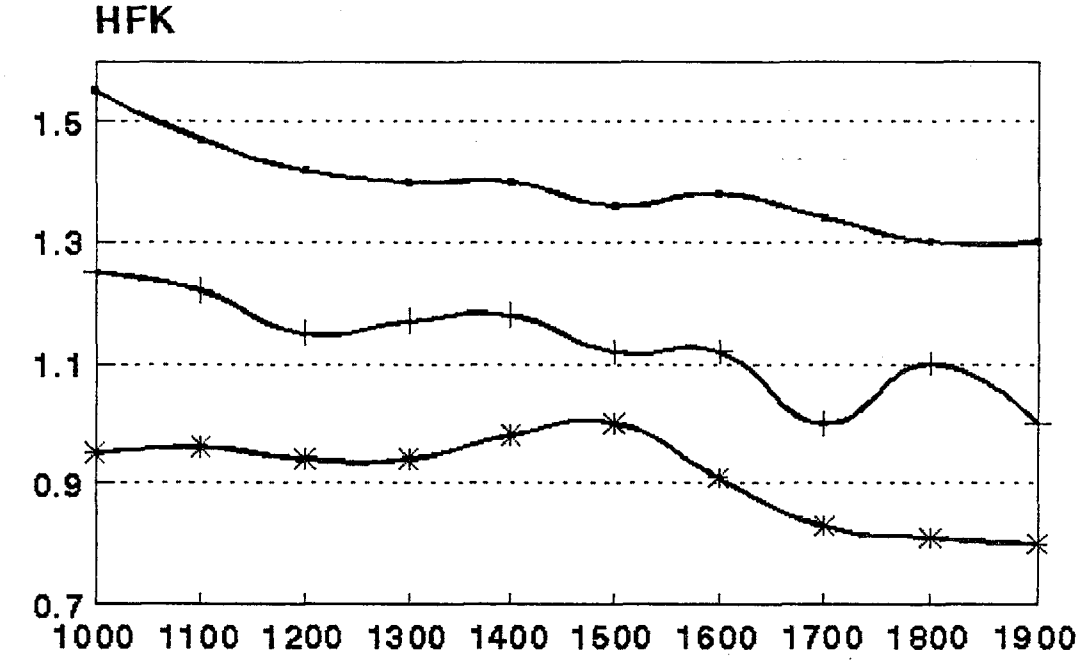
• 40 N (düşük yük) + 60 N * 80 N (Tam yük)

Şekil 4-13 Sabit P_{me} Şartlarında Motor Devrine Bağlı Olarak Soğutmaya Transfer Edilen Enerjinin Yüzde Olarak Değişimi



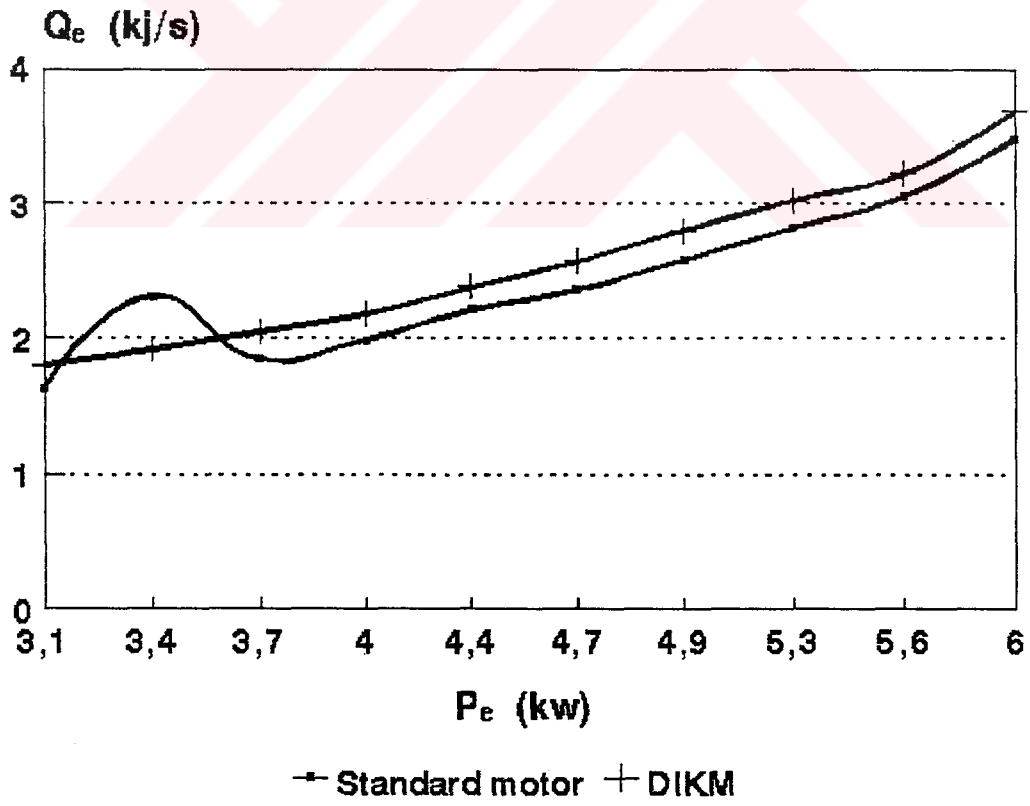
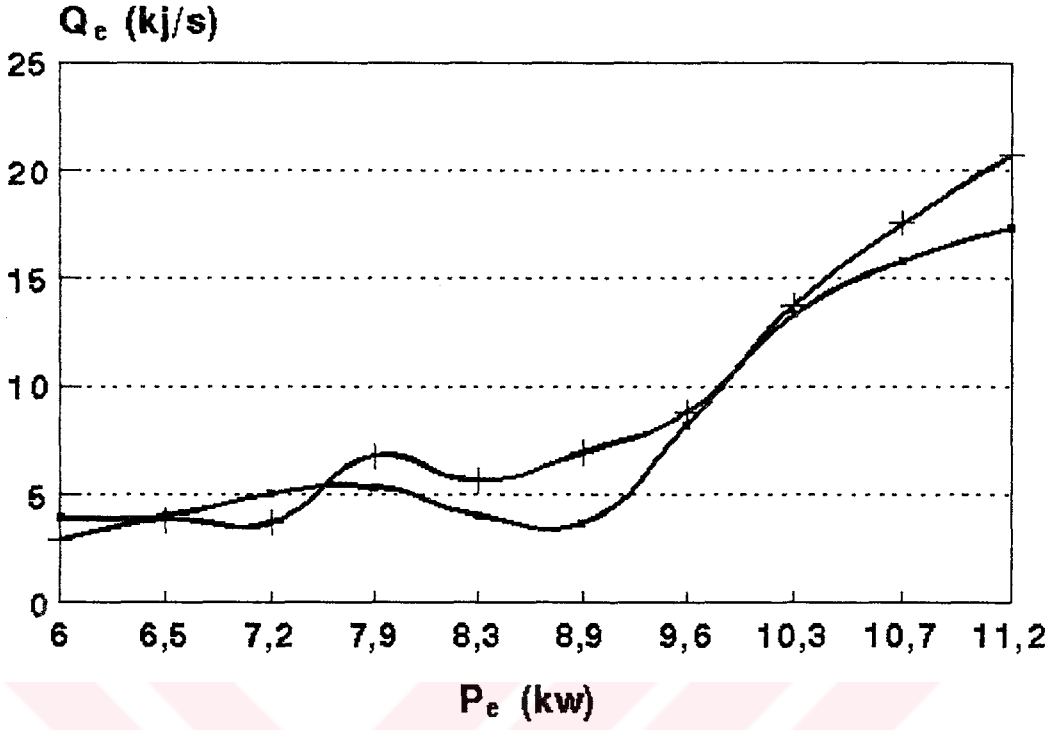
• 40 N (Düşük yük) + 60 N * 80 N (Tam yük)

Şekil 4-14 Toplam Enerjinin Motor Deviri İle Değişimi

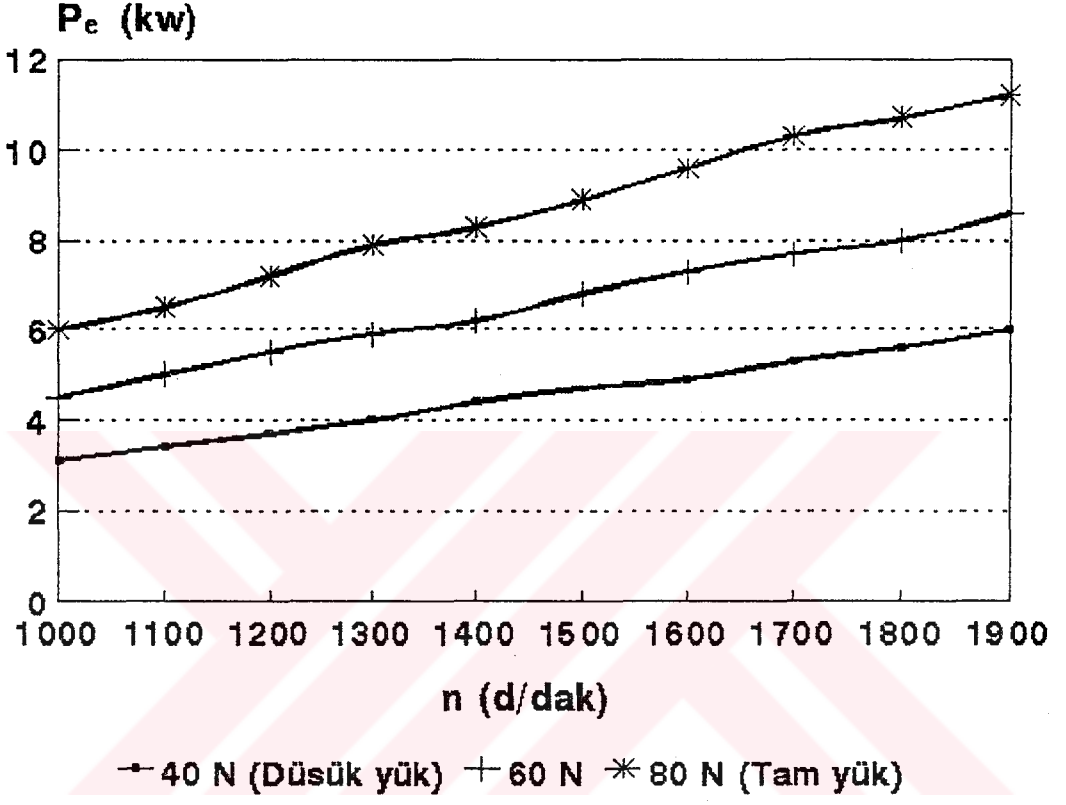


→ 40 N (Düşük yük) + 60 N * 80 N (Tam yük)

Şekil 4-15 Sabit Pme Şartlarında Motor Devirine Bağlı Olarak Hava Fazlalık Katsayılarının Değişimi



Şekil 4-16 Egzoz Enerjisinin Sabit P_{me} Şartlarında Motor Gücüyle Değişimi



Şekil 4-17 Efektif Gücün Motor Devri İle Değişimi

BÖLÜM 5

5. SONUÇLAR VE İRDELEME

Adyabatik motor projesinin ana amaçlarının, soğutma sistemini ortadan kaldırma, egzoz sıcaklığını ve termik verimi artırma olduğunu Bölüm 2 'de vurgulamıştık. Bu amaca ulaşmak için de, yanma odası elemanlarının seramikten imal edilmesi gerektiğini, fakat bunun şimdilik mümkün olmadığını sadece kaplama yoluna gidildiğini belirtmiştik. Bu nedenle deneye tabi tuttuğumuz dört zamanlı, su soğutmalı ve çift silindirli bir dizel motorun yanma odası elemanları (piston, silindir kapağı ve egzoz supaplarının gaz ile temas eden yüzeyleri) seramikle kaplanarak, standart motor için yapıla gelen çalışmalar tekrarlanılarak ikisi arasında mukayese yoluna gidilmiştir. Motor her iki durumda da 1000-1900 d/d 'ya kadar, 100 d/d aralıklı, 10 devir kademesinde ve 8 ayrı ortalama efektif basınçta ($10 \times 8 = 80$ çalışma noktası) teste tabi tutulmuştur. Aynı zamanda, soğutma suyu giriş çıkış sıcaklıkları, soğutma suyu debisi (deney tertibatının sonradan şebekeden beslenmesiyle sağlandı), egzoz gazı sıcaklığı, ortam havası ile emme monifoldu arasındaki basınç farkı okunarak, özgül yakıt sarfiyatı, efektif güç, ortalama efektif basınç, hava fazlalık katsayısı, motordan transfer edilen enerjilerin miktarları ve yüzde oranları hesaplanarak her iki durum için mukayeseler yapılmıştır.

Standart motora ait deney çalışmaları devam ederken, yedekte bulunan diğer yanma odası elemanlarının kaplama işlemi yapılmıştır. Bunun için öncelikle, kaplanacak olan parçaların her birinden 0.5 mm 'lik talaş kaldırılarak kaplamaya hazır hale getirilmiştir. Parçalar kaplandıktan sonra da, yüzeyler taşlanarak ikinci verilerimizi almak için montaj işlemi yapılmıştır.

Aynı çalışma şartlarında yeni verilerimizi alarak, sonuçların mukayesesi için bir bilgisayar programı yazılmıştır. Kaplamalı motor günde ortalama 5 saat kadar, bir

hafta süreyle deneme amacıyla çalıştırılmış ve herhangi bir problemle karşılaşmamıştır. Sadece supap ayarlarının tekrar yapılması gerekmiştir. Bu motordaki çalışmalarımızda 10 ayrı devir sayısı ve her bir devir için 8 ayrı ortalama efektif basınçta teste tabi tutulmuştur. Çalışmalarımızın sonunda, deney parçalarında fazla bir hasar görülmemiştir. Piston yüzeylerinde hafif kararmalar ve çatlaklar, silindir kapağında ve supaplarda ise hafif pullanmalar mevcuttur (dökülme söz konusu değildir). Ayrıca motor 10 dakika civarında vuruntu sınırında çalıştırılmış olmasına rağmen, kaplanmış olan parçalar da herhangi bir hasar ve dökülmenin olmaması, seramik kaplamanın kalitesini ve motorlarda kullanılabilirliğini göstermesi açısından önemli bir durumdur.

Alüminyum alaşımlı piston üzerine yapılan PSZ cinsi seramik kaplamaların, ısıl genleşme katsayılarındaki büyük uyumsuzluk nedeniyle, başarısız neticeler vereceği literatürde bahsedilmektedir [3]. Dökme demirden yapılan silindir kapağı ve supaplarda çatlak ve kopma görülmemesi termal uyumsuzluğun çok daha az olmasından kaynaklanmaktadır. Aslında bu kaplama yöntemiyle, şartların çok iyi ayarlanması ve ara tabaka kullanılması durumunda herhangi bir problemle karşılaşmayacağını rahatlıkla söyleyebiliriz. Bunlara paralel olarak kaplama tekniği, seramik kaplama malzemesi ve kaplama kalınlığının da kaplamanın kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu literatürde belirtilmektedir [1,3].

Eş özgül yakıt sarfıyatı eğrilerinin mukayesesinde, birinci bölgede (düşük yük, düşük devir), kısmen de olsa bir azalma görülmektedir. Kaplamalı motorun bu bölgedeki iyiliği önemlidir. Özellikle orta ve daha az yük ve devirlerde çalışma, stasyonier motor ya da çalışma aralığı bu alanlarda olan motorlar için dikkate değer bir fayda sağlar. İkinci bölgede, standart motora göre yakıt tüketimi aynı kalmış, buna rağmen daha geniş bir çalışma sahası görülmektedir. Üçüncü bölgede, efektif basınç ve devir sayısı bakımından da geniş bir çalışma aralığı görülmesiyle beraber yakıt tüketimindeki azalma yine de sınırlıdır. Dördüncü bölgede ise, yüksek devir ve yüklemelerden dolayı ortalama efektif basınç alanında daralma görülmüştür. Kaplamalı motorda, düşük devir ve ortalama efektif basınçlarda yakıt tüketiminde belli bir oranda azalma görülmesine karşılık, bu bölgede hızlı bir artış söz konusudur. Bu

da belirtilen işletme şartlarında, yüksek cidar ve gaz sıcaklıklarının hasıl olması ve yalıtımın etkisiyle de daha da yükselen bu sıcaklıklar dizyan ve işletme şartlarının değişmesine sebep olmaktadır. Supap açılma ve kapanma dereceleri yani açık kalma süreleri, gerçek değerlerine göre değiştiğinden motorun yakıt sarfiyatı artmıştır.

Yapılan mukayeseler sonucunda, egzoz gazı sıcaklıklarında da oldukça önemli farklılaşmalar olduğu gözlenmiştir. Seramik kaplı motorda egzoz gazı sıcaklıkları normal motora kıyasla önemli derecede artmıştır. Bilindiği üzere, egzoz enerjisinin tekrar sisteme kazandırılarak faydalı hale dönüştürülmesi (aşırı doldurma sistemleri) turboşarj ve turbokombine sistemleriyle sağlanabilmektedir. Fakat motorumuz da böyle bir sistem mevcut olmadığından bu enerjiden faydalanmak söz konusu değildir. Egzoz gazı sıcaklığı, egzoz borusu içersine yerleştirilen bir termokopul vasıtasıyla ölçülerek, sıcaklık artışları tesbit edilmiştir. Aynı şartlarda (düşük devir ve ortalama efektif basınçlarda), kaplamalı motordaki egzoz gazı sıcaklığı daha fazladır. Bu sıcaklık farkı yüksek yük ve devirlerde daha da belirginleşmektedir. Örneğin 2.4 bar 'lık bir efektif basınçta sıcaklık farkı 15 °C iken, 5.4 bar 'da bu fark 40 °C 'leri bulmaktadır. Meydana gelen sıcaklık farkı yüksek motor devirlerinde P_{me} 'ye bağlı olarak daha da artmaktadır. Kaplamalı ve kaplamasız motorlara ait sonuçlar Tablo 5-1 ve 5-2 'de sunulmuştur. Egzoz enerjisinin faydalı hale dönüştürülmesi durumunda ise, tüketilen yakıtın daha az olacağı aşikardır. Böylece egzoz ve soğutucu yoluyla kaybolan enerjiler azaldıkça, motorun ısı dengesi efektif gücün artışı, yönünde değişecektir.

Adyabatik motor projesinin diğer bir amacının da, soğutmaya giden ısı miktarının azalması ve buna paralel olarakda soğutma sistemi parçalarının (su pompası gücü, soğutma fanı gücü ve radyatör alanı), hacimsel ve boyutsal olarak küçüleceği literatürde belirtilmektedir [2]. Tabi ki bu amaca ulaşabilmek için ısı yalıtımının tam olarak yapılması gerekmektedir. Çünkü soğutma suyu ile dışarı atılan ısı enerjisinin büyük bir kısmı silindir gömleğinden gerçekleşmektedir. Bu nedenle yanma odasının tamamıyla kaplanması halinde büyük bir avantaj sağlanabileceği aşikardır. Çalışmalarımızda, kaplamalı motordaki ısı transferinin bazı noktalarda kısmende

avantajlı olduğu söylenebilir. Özellikle maksimum yüklemde bir azalma görülmektedir.

Bu sonuçlar ışığında; seramik kaplı motorlardan beklenen özellikleri şu şekilde sıralayabiliriz [31].

1- Düşük ısı kaybı sağlamak amacıyla soğutma sistemi tarafından dışarıya atılan ısı enerjisini azaltmayı hatta ortadan kaldırmayı amaçlamaktadır.

2- Soğutma sisteminin küçültülmesiyle daha hafif motordan veya taşıttan sağlanan güç, güç yoğunluğu artışı sağlar.

3- Isı kayıplarının azaltılması sebebiyle sıkıştırma ile ateşlenen motorlarda (dizellerde), sıkıştırma sonu gaz sıcaklığı artacağından, ilk hareket daha iyi sağlanır.

4- Cidar sıcaklıklarının artması sebebiyle, tutuşma gecikmesini azaltarak yanma verimini iyileştirmek, dolayısıyla kontrolsüz yanmadan kaynaklanan vuruntu ve gürültü azalarak, daha sessiz çalışmasını mümkün kılar.

5- Daha yüksek cidar ve gaz sıcaklıkları, çok çeşitli ve daha az kaliteli yakıt kullanılmasına imkan verecektir.

6- Isı kayıplarının azaltılmasıyla, egzoz gazlarının sıcaklığını yükseltmek dolayısıyla termik verimi artırmak mümkün olacaktır.

Yapılan uygulama sonuçlarının değerlendirilmesi sonucu yukarıda belirtilen ana ilkeler doğrultusunda olumlu sonuçlar elde edildiği, ancak kaplama uygulanan motorun tabii emmeli olması, normal motorla kaplama yapılan motorun performans değerlerinde büyük farklılıklar ortaya çıkmasına mani olmuştur. Plazma kaplama yöntemi ile yapılan termal bariyer kaplamanın rahatlıkla motor çalışma şartlarında kullanılabileceği sonucu da yapılan uygulama ile ortaya konulmuştur. Konu ile ilgili araştırmalar için bir ön adım teşkil eden bu çalışma, hem kaplama şartları ve özellikleri açısından ve hem de motorlarla ilgili değişik yönlerden incelenmeye muhtaç olduğu aşikardır.

Tablo 5-1 Normal Motor İçin Deneyden Sonra
Hesaplanan Değerler

n	b _e	T _e	W _p	Q _{tr}	Q _e	Q _T	q _{tr}	q _e	w _p
(d/d)	(gr/kwh)	(°K)	(kw)	(kj/s)	(kj/s)	(kj/s)	(%)	(%)	(%)
1000	378	500	3.10	9.16	1.63	13.90	65.9	11.8	22.3
1000	312	552	4.50	10.11	2.04	16.65	60.7	12.3	27.0
1000	308	601	6.00	11.96	3.96	21.92	54.6	18.1	27.4
1100	377	506	3.40	9.50	2.31	15.20	62.5	15.2	22.4
1100	310	556	5.00	11.14	2.24	18.38	60.6	12.2	27.2
1100	303	607	6.50	12.76	4.09	23.36	54.6	17.5	27.8
1200	379	509	3.70	10.73	1.85	16.28	65.9	11.4	22.7
1200	315	564	5.50	12.19	2.40	20.09	60.7	12.0	27.4
1200	291	614	7.20	12.58	5.07	24.85	50.6	20.4	29.0
1300	366	513	4.00	11.38	1.99	17.36	65.5	11.4	23.0
1300	313	567	5.90	12.58	2.59	21.06	59.7	12.3	28.0
1300	279	620	7.90	12.84	5.40	26.14	49.1	20.6	30.2
1400	364	517	4.40	12.38	2.21	18.99	65.2	11.7	23.2
1400	298	575	6.20	12.92	2.80	21.91	58.9	12.8	28.3
1400	273	629	8.30	13.56	4.12	25.99	52.2	15.9	31.9
1500	360	524	4.70	13.01	2.36	20.07	64.8	11.7	23.4
1500	298	580	6.80	14.25	2.98	24.03	59.3	12.4	28.3
1500	273	636	8.90	14.91	3.74	27.55	54.1	13.6	32.3
1600	369	527	4.90	13.96	2.58	21.44	65.1	12.1	22.9
1600	305	585	7.30	15.77	3.34	26.41	59.7	12.6	27.6
1600	283	644	9.60	14.42	8.20	32.22	44.8	25.4	29.8
1700	370	533	5.30	15.24	2.82	23.39	65.2	12.1	22.8
1700	317	592	7.70	17.85	3.39	28.95	61.7	11.7	26.6
1700	301	656	10.30	13.18	13.28	36.77	35.9	36.1	28.0
1800	381	539	5.60	16.66	3.05	25.30	65.8	12.0	22.1
1800	323	599	8.00	18.64	4.00	30.65	60.8	13.1	26.1
1800	319	665	10.70	13.99	15.79	40.48	34.6	39.0	26.4
1900	388	550	6.00	18.13	3.48	27.61	65.7	12.6	21.7
1900	345	608	8.60	22.23	4.36	35.19	63.2	12.4	24.4
1900	337	674	11.20	14.13	17.31	42.64	33.1	40.6	26.3

Tablo 5-2 Kaplamalı Motor İçin Deneyden Sonra
Hesaplanan Değerler

n	b _e	T _e	W _p	Q _{tr}	Q _e	Q _T	q _{tr}	q _e	w _p
(d/d)	(gr/kwh)	(°K)	(kw)	(kj/s)	(kj/s)	(kj/s)	(%)	(%)	(%)
1000	374	526	3.10	8.85	1.80	13.75	64.4	13.1	22.5
1000	309	571	4.50	9.78	2.21	16.49	59.3	13.4	27.3
1000	299	616	6.00	12.29	2.98	21.28	57.8	14.0	28.2
1100	374	532	3.40	9.76	1.92	15.08	64.7	12.7	22.5
1100	307	579	5.00	10.83	2.37	18.21	59.5	13.0	27.5
1100	292	631	6.50	12.13	3.88	22.51	53.9	17.2	28.9
1200	377	537	3.70	10.44	2.05	16.19	64.5	12.7	22.9
1200	299	597	5.50	11.37	2.63	19.50	58.3	13.5	28.2
1200	293	639	7.20	14.07	3.75	25.02	56.2	15.0	28.8
1300	361	542	4.00	10.95	2.18	17.13	63.9	12.7	23.4
1300	304	600	5.90	11.16	2.74	19.80	56.4	13.8	29.8
1300	273	640	7.90	10.88	6.80	25.58	42.5	26.6	30.9
1400	362	550	4.40	12.11	2.38	18.89	64.1	12.6	23.3
1400	275	612	6.20	11.02	3.01	20.22	54.5	14.9	30.7
1400	266	648	8.30	12.19	5.70	26.18	46.5	21.8	31.7
1500	360	554	4.70	12.79	2.57	20.07	63.8	12.8	23.4
1500	276	617	6.80	12.22	3.24	22.26	54.9	14.6	30.5
1500	269	654	8.90	12.52	6.97	28.39	44.1	24.6	31.3
1600	366	561	4.90	13.57	2.80	21.27	63.8	13.2	23.0
1600	288	620	7.30	14.14	3.50	24.93	56.7	14.0	29.3
1600	269	663	9.60	12.23	8.80	30.63	39.9	28.7	31.3
1700	369	567	5.30	14.87	3.02	23.19	64.1	13.0	22.9
1700	307	633	7.70	16.50	3.84	28.04	58.8	13.7	27.5
1700	287	670	10.30	11.02	13.73	35.06	31.4	39.2	29.4
1800	377	571	5.60	16.22	3.22	25.04	64.8	12.8	22.4
1800	316	637	8.00	17.90	4.08	29.98	59.7	13.6	26.7
1800	310	678	10.70	11.12	17.52	39.34	28.3	44.5	27.2
1900	386	584	6.00	17.79	3.68	27.47	64.8	13.4	21.8
1900	334	650	8.60	17.59	7.88	34.07	51.6	23.1	25.2
1900	321	686	11.20	10.72	20.72	42.64	25.1	48.6	26.3

KAYNAKLAR

- [1] HOCKING, M.G., VASATASREE, V., SIDKY, P.S., "Metallic and Ceramic Coatings, Production High Temperature and Applications", London 1989.
- [2] WOODS, M.E., and ODA, I., "Ceramic Insulating Components for The Adiabatic Engine", SAE Government Industry Meeting & Exposition Washington, May 1984.
- [3] KAMO, R., BRYZIK, W., "Cummins/TACOM Advanced Adiabatic Engine", SAE International Congress, Michigan, 1984.
- [4] ROGER, B., LURYY, D., DOUGLAS, J., "Cummins Uncooled 250 Engine", SAE international Congress, Michigan, 1984.
- [5] WACKER, E., SANDER, W., "Piston Design for High Combustion Pressures and Reduced Heat Rejection to Coolant", SAE International Congress, Michigan, 1982.
- [6] CROUSE, H.W., Çev. ARVUZ, V., TAŞKAYA, Y., KARASU, T., "Otomobil Motorları yakıt, Yağlama, Soğutma Sistemleri", ETYÖÖ Matbaası, Ankara, 1971.
- [7] Otomarsan A.Ş. "Araçlar İçin Teknik Kavramlar", MH.4. 77.
- [8] LEISING, C.J., "PUROHIT, G.P., "Waste Heat recovery In Truck Engines", SAE National West Coast Meeting, California, 1978.
- [9] BRYZIK, W., KAMO, R., "TAKOM/Cummings Adiabatic Engine Program", SAE International Congress, Michiman, 1983.
- [10] WOODS, M.E., And ODA, I., "PSZ Ceramics for Adiabatic Engine Components", SAE International Congress, Michiman, 1982.
- [11] ÇEVİK, İ., "Zirkonya Esash Seramik Kaplamanın Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerinin Değiştirilmesi", Doktora Tezi, İTÜ, 1990.
- [12] MARMACH, M., and HANNINK, R.H., "Toughened PSZ Ceramics Their Role as Advanced Engine Components", SAE International Congress Michigan, 1983.

- [13] GODFREY, D.J., "Silikon Nitride Ceramics for Engineering Applications", SAE Automotive Engineering Congress, Michigan, 1974.
- [14] ÇELİK, E., "Seramik Kaplama Teknolojisi". Yüksek Lisans Tezi, Haziran, 1993.
- [15] HEANY INDUSTRIES, COATINGS CATALOG
- [16] BALLARD, W.E., "Metal Spraying and The Flame Deposition of Ceramics and Plastics", Griffin, London, 1963.
- [17] LINGUET, R., RODIER, R., AND ROGER, J., "Revetements Ceramiques par Production Haute-Temperature", Bull. Soc. Française de Ceram., 54, 39, 1962.
- [18] WOODS, M.E., "Testing a Small DI ceramic Diesel Engine", SAE Automotive Engineer, V 94, 7-12, 1986.
- [19] STONE, R., "Motor Vehicle Fuel Economy", MACMILLAN Education Ltd. Hong Kong, 1989.
- [20] QUACKENBUSH, C.L., "Advanced Ceramics for Automobiles", SAE Automotive Engineer, V 96, 1-6, 1988.
- [21] KALAMASZ, T.G., GOTH, G., & PASTO, A.E., "Ceramics in Internal Combustion Engines", SAE Automotive Engineer, V 96, 12, 1988.
- [22] HEYWOOD, J.B., "Internal Combustion Engine Fundamentals", Chapter 12 p668-672, Newyork, Mcgraw-hill, 1988
- [23] SAFGÖNÜL, B., "Pistonlu Motorlar", İTÜ Kütüphanesi, s.1207, İTÜ Matbaası, 1981.
- [24] BORAT O., BALCI, M., SÜRMEN, A., "İçten Yanmalı Motorlar I", Teknik Eğitim yayınları-2, Birinci baskı, s.253, Eylül 1992.
- [25] TAYLOR, C.F., "The Internal Combustion Engine in Theory and Practise", Vol.1, M.I.T Press Third Printing, London, 1989.
- [26] RICARDO, R.H., Çev. DEMİRGÜÇ, Z., "Yüksek hızlı İçten Yanmalı Motor", İTÜ Kütüphanesi s.465, İTÜ matbaası, İstanbul, 1961.
- [27] YOSHIMITSU, T., TOYOMA, K., SATO, F., YAMAGUCHI, H., "Capabilities of Heat Insulated Diesel Engine", SAE International Congress, Michigan, 1984.
- [28] YAVAŞLIOĞLU, İ., "İçten Yanmalı Motorlar", YÜ Matbaası, İstanbul, 1988.

- [29] BORAT, O., "Yanma Stokiometrisi", İTÜ Makina Ofset Atölyesi, İstanbul, 1983.
- [30] BORAT, O., "Termokimyasal Denge ve Yanma", İTÜ Makina Ofset Atölyesi, İstanbul, 1982.
- [31] ÜNAL, N., "Motor Üretiminde Seramik Malzemeler", G.Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Matbaası.



ÖZGEÇMİŞ

Ekrem Büyükkaya 1969 yılında Kdz.Ereğli 'de doğdu. İlk öğrenimini Cumhuriyet, orta öğrenimini Zonguldak Ereğli Lisesinde tamamladıktan sonra 1987 yılında İTÜ Sakarya Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünü kazandı. 1991 yılında bölüm birincisi olarak mezun olup, aynı yıl İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans Öğrenimine başladı. Halen, 1992 yılında Araştırma Görevlisi olarak girdiği Sakarya Üniversitesi 'nde görevini yürütmektedir.