

66376

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TERMAL BARIYER KAPLAMANIN TÜRBO DOLDURMALI
BİR DİZEL MOTORUNUN PERFORMANSINA ETKİLERİ**

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Halit YAŞAR

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27 Haziran 1997

Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Ekim 1997

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Veli ÇELİK

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Cem SORUŞBAY

Prof.Dr. Bahri ŞAHİN

Doç.Dr. Metin ERGENEMAN

Doç.Dr. Mehmet TEKİN

EKİM 1997

ÖNSÖZ

Enerji kaynaklarının büyük bir hızla tükenmekte olması gerçeği, mevcut enerji kaynaklarını en verimli şekilde kullanmayı zorunlu hale getirmiştir. Bu sebeple, son yıllarda otomotiv endüstrisinde yakıt tüketimini azaltmaya yönelik bilimsel çalışmalar artarak devam etmektedir.

Bu çalışmada, termal bariyer kaplamaların türbo doldurmalı ve ara soğutuculu bir dizel motorunun performansına etkisi incelenmektedir. Bu amaçla, deney motorunun yanma odası yüzeyleri zirkonya esaslı seramik malzemelerle, plazma kaplama yöntemi kullanılarak yalıtılmış ve motor değişik yük ve devir sayısı şartlarında çalıştırılmak suretiyle, termal bariyer kaplamanın motor performansına etkileri belirlenmiştir.

Çalışmaya katkılarından ötürü, TÜBİTAK MİSAG-30 Araştırma Projesi yürütücüsü sayın Prof. Dr. Fevzi YILMAZ 'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım esnasında maddi ve manevi her türlü yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Veli ÇELİK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Çalışmaya destek veren; 1010. Ana Tamir ve Bakım Fabrikası, Otosan A.Ş., GOETZE İstanbul Segman ve Gömlek Sanayi, PARSAT A.Ş. ve TUSAŞ yetkililerine teşekkürlerimi sunarım.

Ekim 1997

Halit YAŞAR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	ii
SEMBOL LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xvi
ÖZET	xviii
SUMMARY	xix
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
1.1 Uygulamanın Tarihçesi	5
1.2 Çalışmanın Tanıtımı	12
BÖLÜM 2 TERMAL BARIYER KAPLAMALAR VE MOTORLARA UYGULANMASI	14
2.1 Termal Sprey Kaplama Yöntemleri	14
2.1.1 Alevle tel sprej	17
2.1.2 Alevle toz sprej	17
2.1.3 Elektrik ark sprej	18
2.1.4 Detonasyon tabancası	18
2.1.5 Yüksek hızlı oksji-yakıt sprej	19
2.1.6 Plazma sprej kaplama yöntemi	19
2.2 Seramik Kaplama Malzemeleri	34
BÖLÜM 3 DENEY SONUÇLARININ ANALİZİNDE KULLANILAN İFADELER VE TEORİK ÇALIŞMALAR	41
3.1 Karakteristik Değerler	41
3.2 Motorlarda Enerji Dağılımı	44
3.3 Performans Eğrilerinin Modellenmesi	51
3.4 Egzoz Gazlarının Kullanılabilirliğinin Modellenmesi	53

BÖLÜM 4 DENEYSEL ÇALIŞMALAR	52
4.1 Deney Motorunun Teknik Özellikleri	57
4.2 Deney Donanımı ve Deneylerin Yapılışı	58
4.3 Motor Parçalarının Kaplanması	64
4.4 Bilgisayar Programının Tanıtılması	68
BÖLÜM 5 DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI	72
5.1 Türbo doldurmalı Motor Çalışma Sonuçları	72
5.1.1 Seramik kaplamanın özgül yakıt tüketimine etkisi	72
5.1.2 Seramik kaplamanın volumetrik verime etkisi	79
5.1.3 Seramik kaplamanın efektif verime etkisi	84
5.1.4 Seramik kaplamanın efektif güce ve döndürme momentine etkisi	88
5.1.5 Seramik kaplamanın egzoz enerjisine etkisi	90
5.1.6 Seramik kaplamanın faydalı işe dönüşen enerjiye etkisi	100
5.1.7 Seramik kaplamanın soğutma enerjisine etkisi	105
5.2 Egzoz Gazlarının Ekserji Analiz Sonuçları	111
5.3 Püskürtme Avansının Değiştirilmesinin Özgül Yakıt Tüketimine Etkisi	115
5.4 Tabi Emmeli Motor Çalışması Halinde Özgül Yakıt Tüketimi Sonuçları	119
5.5 Seramik Kaplamanın Egzoz Gaz Emisyonlarına Etkisi	123
BÖLÜM 6 SONUÇLAR VE ÖNERİLER	130
KAYNAKLAR	138
EK	147
ÖZGEÇMİŞ	149

SEMBOL LİSTESİ

A_1	: Sukbe delik kesit alanı (m^2)
b_e	: Özgöl yakıt tüketimi (g/kWh)
c_p	: Sabit basınçtaki kütleel özgöl ısı (kJ/kg K)
$\bar{c}_{p,i}$	: i bileşenin sabit basınçtaki molar özgöl ısısı (kJ/kmol K)
c_v	: Sabit hacimdeki kütleel özgöl ısı (kJ/kg K)
$C_{D,H}$	: Emme havası için debi katsayısı
$C_{D,S}$	: Soğutucu akışkan için debi katsayısı
d_H	: Emme havası sukbe delik çapı (m)
d_S	: Soğutucu akışkan sukbe delik çapı (m)
D	: Soğutucu akışkan boru çapı (m)
$\dot{E}$	: Toplam ekserji akısı (kW)
$\bar{e}$	: Toplam molar özgöl ekserji (kJ/kmol)
$\bar{e}_{tm}$	: Molar termo mekaniksel özgöl ekserji (kJ/kmol)
$\bar{e}_{kim}$	: Molar kimyasal özgöl ekserji (kJ/kmol)
$\dot{E}_{E,K}$	: Egzoz gazlarının kinetik enerji akısı (kW)
F	: Fren terazi kuvveti (N)
g	: Yer çekim ivmesi (m/s^2)
h_{min}	: Stokiyometrik hava yakıt oranı (kgH/kgY)
H_u	: Yakıtın alt ısı değeri (kJ/kgY)
H_e	: Egzoz gazlarının enerjisi (kJ)

- $\bar{h}_i$: i bileşeninin molar özgül entalpisi (kJ/kmol)
- $\dot{H}_E$: Birim zamanda atılan egzoz entalpisi (kW)
- $\dot{H}_{E,H}$: Egzoz gazları ile atılan hissedilebilir entalpi akısı (kW)
- $\dot{H}_{E,Y}$: Eksik yanma ile oluşan kimyasal enerji kaybı akısı (kW)
- i : Çevrim oranı (çevrim/dev)
- k : İzentropik üs, ısı iletim katsayısı (W/m °C)
- l : Fren moment kolu (m)
- M_H : Havanın mol ağırlığı (kg/kmol)
- M_d : Döndürme momenti (Nm)
- $\dot{m}_H$: Kütlesel hava debisi (kg/s)
- $\dot{m}_S$: Kütlesel soğutucu akışkan debisi (kg/s)
- $\dot{m}_y$: Kütlesel yakıt debisi (kg/s)
- $\dot{m}_{H,g}$: Gerçek hava debisi (kg/s)
- $\dot{m}_{H,t}$: Teorik hava debisi (kg/s)
- n : Motor devri (dev/dak)
- n' : Motor devri (dev/s),
- n_ϕ : Çevrim sayısı (çevrim/s)
- n_{top} : Yanma ürün bileşenlerinin toplam mol sayısı (kmol)
- $\dot{n}_{top}$: Yanma ürün bileşenlerinin toplam molar debisi (kmol/s)
- n_i : i bileşenini mol sayısı (kmol)
- p_H : Havanın basıncı (bar)
- P_e : Efektif güç (kW)
- P_i : İndike güç (kW)

P_f	: Toplam sürtünme gücü (kW)
$P_{f,p}$	: Piston sürtünme gücü (kW)
p_{me}	: Ortalama efektif basınç (bar)
p_o	: Çevre basıncı (bar)
$\dot{Q}_M$	: Sürtünmelere giden toplam enerji akısı (kW)
$\dot{Q}_D$	: Diğer kayıp enerji akıları (kW)
$\dot{Q}_f$	: Faydalı İşe Dönüşen enerji akısı (kW)
$\dot{Q}_T$	: Toplam yakıt enerji akısı (kW)
$\dot{Q}_W$	: Silindir cidarlarından olan ısı akısı (kW)
$\dot{Q}_{E,R}$	: Egzoz sisteminden radyasyonla kaybedilen enerji akısı (kW)
$\dot{Q}_S$	: Birim zamanda soğutucu akışkana giden enerji (kW)
$\dot{Q}_{S,E}$	: Egzoz sisteminden soğutucu akışkana geçen enerji akısı (kW)
$\bar{R}$	: Üniversal gaz sabiti (kJ/kmol K)
$\bar{s}_i$	: i bileşeninin molar özgül entropisi (kJ/kmol K)
T_0	: Çevre sıcaklığı (K)
T_e	: Egzoz gaz sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
V_1	: Lüle akış hızı (m/s)
$\dot{V}_H$	: Hacimsel hava debisi (m^3/s)
V_H	: Toplam strok hacmi (m^3)
V_h	: Strok hacmi (m^3)
ρ_H	: Havanın yoğunluğu (kg/m^3)
ρ_S	: Suyun yoğunluğu (kg/m^3)
ρ_y	: Yakıtın yoğunluğu (kg/m^3)

x_i	: i bileşeninin mol kesri
$x_{i,0}$	: i bileşeninin çevre şartlarındaki mol kesri
W_e	: Efektif çevrim işi (J)
z	: Silindir sayısı
ΔV	: Yakıt hacmi (cm^3)
Δt	: Yakıt tüketim zamanı (s)
Δh_H	: Emme havası basınç farkı (cmSS)
Δh_S	: Soğutma suyu basınç farkı (cmSS)
ω	: Açısal hız (rad/s)
α	: Termal genleşme katsayısı ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)
λ	: Hava fazlalık katsayısı
η_e	: Efektif verim
η_v	: Volumetrik verim

KISALTMALAR

AÖN	: Alt ölü nokta
APS	: Atmosferik Plazma Sprey
BDC	: Before Dead Center
EHBf	: Emme Havası Basınç Farkı
İPS	: İnert Plazma Sprey
KMA	: Krank Mili Açısı
KSZ	: Kısmi Stabilize Zirkonya
LHR	: Low Heat Rejection
NM	: Normal Motor

PA	: Püskürtme avansı
SKM	: Seramik Kaplı Motor
SSBF	: Soğutma Suyu Basınç Farkı
SPS	: Sualtı Plazma Sprey
TBC	: Thermal Barrier Coating
ÜÖN	: Üst Ölü Nokta
VPS	: Vakum Plazma Sprey
YHOYS	: Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt Sprey



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1	Türbokombine bir motorun şematik görünümü 2
Şekil 1.2	Rankin alt çevrimli bir motorun şematik görünümü 3
Şekil 2.1	Termal spreycaplama tekniklerinin sınıflandırılması 16
Şekil 2.2	Plazma spreycaplama sisteminin şematik gösterilişi 21
Şekil 2.3	Plazma spreycaplamasının şematik görünüşü 22
Şekil 2.4	Plazma spreycaplama yöntemlerinin sınıflandırılması 32
Şekil 2.5	Plazma spreycaplamaların başlıca uygulama alanları 33
Şekil 2.6	Çeşitli seramik malzemelerinin ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi 35
Şekil 2.7	Çok tabakalı termal bariyer kaplama 40
Şekil 3.1	İçten yanmalı motorlarda enerji akış (sanky) diyagramı 44
Şekil 3.2	Motora birim zamanda giren ve çıkan enerjiler 45
Şekil 3.3	Lüle ve U-manometre yerleştirilmiş soğutucu kanal kesiminin şematik görünümü 50
Şekil 4.1	TCI Ford Cargo motoru 59
Şekil 4.2	Motor test ünitesi kontrol paneli 59
Şekil 4.3	Motor test hücresi ve ölçüm noktalarının şematik gösterimi 61
Şekil 4.4	Motor emme havası debisi ölçüm düzeneği 62
Şekil 4.5	Motor soğutma suyu debisi ölçüm düzeneği 62
Şekil 4.6	Su soğutmalı ara soğutucu 66
Şekil 4.7	Plazma kaplama laboratuvarı 66

Şekil 4.8	Motor parçalarının kaplanması izlenen işlem sırası	67
Şekil 4.9	Seramik kaplı pistonların 250 saat çalışma sonundaki görünüşleri	69
Şekil 4.10	Seramik kaplı silindir kafası ve supapların 250 saat çalışma sonundaki görünüşleri	69
Şekil 4.11	Bilgisayar programı akış diyagramı	70
Şekil 5.1	Normal motora ait eş özgül yakıt tüketimi eğrilerinin üç boyutlu gösterimi	74
Şekil 5.2	Seramik kaplı motora ait eş özgül yakıt tüketimi eğrilerinin üç boyutlu gösterimi	74
Şekil 5.3	Normal motorun yumurta (eş özgül yakıt tüketimi) eğrileri	75
Şekil 5.4	Seramik kaplamalı motorun yumurta (eş özgül yakıt tüketimi) eğrileri	75
Şekil 5.5	Özgül yakıt tüketiminin devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=2,226$ bar)	76
Şekil 5.6	Özgül yakıt tüketiminin devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=5,194$ bar)	76
Şekil 5.7	özgül yakıt tüketiminin devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=8,162$ bar)	77
Şekil 5.8	Özgül yakıt tüketiminin ortalama efektif basınçla değişimi ($n=1000$ dev/dak)	77
Şekil 5.9	Özgül yakıt tüketiminin ortalama efektif basınçla değişimi ($n=1800$ dev/dak)	78
Şekil 5.10	Özgül yakıt tüketiminin ortalama efektif basınçla değişimi ($n=2400$ dev/dak)	78
Şekil 5.11	Volumetrik verimin devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=2,226$ bar)	81
Şekil 5.12	Volumetrik verimin devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=5,194$ bar)	81
Şekil 5.13	Volumetrik verimin devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=8,162$ bar)	82
Şekil 5.14	Volumetrik verimin ortalama efektif basınçla değişimi ($n=1000$ dev/dak)	82
Şekil 5.15	Volumetrik verimin ortalama efektif basınçla değişimi ($n=1800$ dev/dak)	83

Şekil 5.16	Volumetrik verimin ortalama efektif basınçla değişimi ($n=2400$ dev/dak)	83
Şekil 5.17	Efektif verimin devir sayısıyla değişimi ($p_{mc}=2,226$ bar)	85
Şekil 5.18	Efektif verimin devir sayısıyla değişimi ($p_{mc}=5,194$ bar)	85
Şekil 5.19	Efektif verimin devir sayısıyla değişimi ($p_{mc}=8,162$ bar)	86
Şekil 5.20	Efektif verimin ortalama efektif basınçla değişimi ($n=1000$ dev/dak)	86
Şekil 5.21	Efektif verimin ortalama efektif basınçla değişimi ($n=1800$ dev/dak)	87
Şekil 5.22	Efektif verimin ortalama efektif basınçla değişimi ($n=2400$ dev/dak)	87
Şekil 5.23	Motor efektif gücünün devir sayısıyla değişimi	89
Şekil 5.24	Döndürme momentinin devir sayısıyla değişimi	89
Şekil 5.25	Egzoz gaz sıcaklığının devir sayısıyla değişimi ($p_{mc}=2,226$ bar)	90
Şekil 5.26	Egzoz gaz sıcaklığının devir sayısıyla değişimi ($p_{mc}=5,194$ bar)	91
Şekil 5.27	Egzoz gaz sıcaklığının devir sayısıyla değişimi ($p_{mc}=8,162$ bar)	91
Şekil 5.28	Egzoz gaz sıcaklığının ortalama efektif basınçla değişimi ($n=1000$ dev/dak)	92
Şekil 5.29	Egzoz gaz sıcaklığının ortalama efektif basınçla değişimi ($n=1800$ dev/dak)	92
Şekil 5.30	Egzoz gaz sıcaklığının ortalama efektif basınçla değişimi ($n=2400$ dev/dak)	93
Şekil 5.31	Egzoz enerjisinin devir sayısıyla değişimi ($p_{mc}=2,226$ bar)	96
Şekil 5.32	Egzoz enerjisinin devir sayısıyla değişimi ($p_{mc}=5,194$ bar)	96
Şekil 5.33	Egzoz enerjisinin devir sayısıyla değişimi ($p_{mc}=8,162$ bar)	97
Şekil 5.34	Egzoz enerjisinin ortalama efektif basınçla değişimi ($n=1000$ dev/dak)	97
Şekil 5.35	Egzoz enerjisinin ortalama efektif basınçla değişimi ($n=1800$ dev/dak)	98

Şekil 5.36	Egzoz enerjisinin ortalama efektif basınçla değişimi ($n=2400$ dev/dak)	98
Şekil 5.37	Farklı ortalama efektif basınçlarda egzoz enerji akısının devir sayısı ile değişimi	99
Şekil 5.38	Farklı devir sayılarında egzoz enerji akısının ortalama efektif basınçla değişimi	99
Şekil 5.39	Farklı devir sayılarında egzoz enerji akısının ortalama efektif basınçla değişimi	100
Şekil 5.40	Faydalı işe dönüşen enerjinin devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=2,226$ bar)	102
Şekil 5.41	Faydalı işe dönüşen enerjinin devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=5,194$ bar)	102
Şekil 5.42	Faydalı işe dönüşen enerjinin devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=8,162$ bar)	103
Şekil 5.43	Faydalı işe dönüşen enerjinin ortalama efektif basınçla değişimi ($n=1000$ dev/dak)	103
Şekil 5.44	Faydalı işe dönüşen enerjinin ortalama efektif basınçla değişimi ($n=1800$ dev/dak)	104
Şekil 5.45	Faydalı işe dönüşen enerjinin ortalama efektif basınçla değişimi ($n=2400$ dev/dak)	104
Şekil 5.46	Soğutma enerjisinin devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=2,226$ bar)	107
Şekil 5.47	Soğutma enerjisinin devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=5,194$ bar) devir sayısı ile değişimi	107
Şekil 5.48	Soğutma enerjisinin devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=8,162$ bar)	108
Şekil 5.49	Soğutma enerjisinin ortalama efektif basınçla değişimi ($n=1000$ dev/dak)	108
Şekil 5.50	Soğutma enerjisinin ortalama efektif basınçla değişimi ($n=1800$ dev/dak)	109
Şekil 5.51	Soğutma enerjisinin ortalama efektif basınçla değişimi ($n=2400$ dev/dak)	109
Şekil 5.52	Farklı ortalama efektif basınçlarda soğutucu akışkan enerji akılarının devir sayısı ile değişimi	110

Şekil 5.53	Farklı devir sayılarında soğutucu akışkan enerji akılarının ortalama efektif basınçla değişimi	110
Şekil 5.54	Farklı devir sayılarında soğutucu akışkan enerji akılarının ortalama efektif basınçla değişimi	111
Şekil 5.55	Sabit p_{me} şartlarında egzoz gazlarının ekserjilerinin devir sayısıyla değişimi	113
Şekil 5.56	Sabit p_{me} şartlarında egzoz gazlarının ekserjilerinin devir sayısıyla değişimi	113
Şekil 5.57	Sabit devir sayısı şartlarında egzoz gaz ekserji akısı değerlerinin ortalama efektif basınçla değişimi	114
Şekil 5.58	Sabit devir sayısı şartlarında egzoz gaz ekserji akısı değerlerinin ortalama efektif basınçla değişimi	114
Şekil 5.59	Özgöl yakıt tüketiminin devir sayısıyla değişimi ($p_{me}=2,226$ bar)	116
Şekil 5.60	Özgöl yakıt tüketiminin devir sayısıyla değişimi ($p_{me}=4,195$ bar)	116
Şekil 5.61	Özgöl yakıt tüketiminin devir sayısıyla değişimi ($p_{me}=8,162$ bar)	117
Şekil 5.62	Özgöl yakıt tüketiminin ortalama efektif basınçla değişimi ($n=1000$ dev/dak)	117
Şekil 5.63	Özgöl yakıt tüketiminin ortalama efektif basınçla değişimi ($n=1800$ dev/dak)	118
Şekil 5.64	Özgöl yakıt tüketiminin ortalama efektif basınçla değişimi ($n=2400$ dev/dak)	118
Şekil 5.65	Özgöl yakıt tüketiminin devir sayısıyla değişimi ($p_{me}=2,226$ bar)	120
Şekil 5.66	Özgöl yakıt tüketiminin devir sayısıyla değişimi ($p_{me}=4,452$ bar)	121
Şekil 5.67	Özgöl yakıt tüketiminin devir sayısıyla değişimi ($p_{me}=6,678$ bar)	121
Şekil 5.68	Özgöl yakıt tüketiminin ortalama efektif basınçla değişimi ($n=1000$ dev/dak)	122
Şekil 5.69	Özgöl yakıt tüketiminin ortalama efektif basınçla değişimi ($n=1800$ dev/dak)	122
Şekil 5.70	Özgöl yakıt tüketiminin ortalama efektif basınçla değişimi ($n=2400$ dev/dak)	123

Şekil 5.71	Partikül miktarının devir sayısı ile değişimi ($p_{mc}=2,968$ bar)	125
Şekil 5.72	Partikül miktarının devir sayısı ile değişimi ($p_{mc}=5,194$ bar)	125
Şekil 5.73	Partikül miktarının devir sayısı ile değişimi ($p_{mc}=7,420$ bar)	126
Şekil 5.74	Karbonmonoksit miktarının devir sayısı ile değişimi ($p_{mc}=2,968$ bar)	126
Şekil 5.75	Karbonmonoksit miktarının devir sayısı ile değişimi ($p_{mc}=5,194$ bar)	127
Şekil 5.76	Karbonmonoksit miktarının devir sayısı ile değişimi ($p_{mc}=7,420$ bar)	127
Şekil 5.77	Hidrokarbon miktarının devir sayısı ile değişimi ($p_{mc}=2,968$ bar)	128
Şekil 5.78	Hidrokarbon miktarının devir sayısı ile değişimi ($p_{mc}=4,195$ bar)	128
Şekil 5.79	Hidrokarbon miktarının devir sayısı ile değişimi ($p_{mc}=7,420$ bar)	129

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 Termal sprey yöntemlerinde kullanılan kaplama malzemeleri ve bu yöntemlerin başlıca uygulama alanları	15
Tablo 2.2 Termal sprey kaplama tekniklerinin karşılaştırılması	16
Tablo 2.3 Alevle sprey gazları	17
Tablo 2.4 Plazma gazlarının temel fiziksel ve kimyasal özellikleri	24
Tablo 2.5 Çeşitli endüstrilerde aşınmaya karşı dayanım amacıyla kaplama İşleminin uygulandığı parçalar ve kullanılan kaplama malzemeleri	34
Tablo 2.6 Bazı yüksek teknoloji seramiklerinin özellikleri	37
Tablo 2.7 Çeşitli cinsteki zirkonya seramiklerin tipik stabilizör İçerikleri	38
Tablo 3.1 Motor testlerinde kullanılan yakıtın özellikleri	53
Tablo 3.2 Ekserji analizlerinde esas alınan çevre tanımı	56
Tablo 4.1 Deney motoruna ait teknik özellikler	57
Tablo 4.2 Motor testlerinde ölçülen parametreler ve ölçüm cihazları	60
Tablo 4.3 Hesaplanan parametrelerdeki maksimum hata oranları	63
Tablo 4.4 Motor parçalarında kaplanmasında kullanılan tozların özellikleri	65
Tablo 4.5 Kaplama İşleminde kullanılan sprey parametreleri	65
Tablo 5.1 Türbo doldurmalı normal ve kaplamalı motorun özgül yakıt tüketimi değerleri	73
Tablo 5.2 Türbo doldurmalı normal ve kaplamalı motora ait volumetrik verim değerleri	80
Tablo 5.3 Türbo doldurmalı normal ve kaplamalı motora ait efektif verim değerleri	84

Tablo 5.4	Türbo doldurmalı normal ve kaplamalı motorun tam yükte döndürme momenti ve efektif güç değerleri	88
Tablo 5.5	Türbo doldurmalı normal ve kaplamalı motora ait egzoz enerjileri	94
Tablo 5.6	Türbo doldurmalı kaplamalı ve kaplamasız motora ait egzoz enerji akıları	95
Tablo 5.7	Türbo doldurmalı normal ve kaplamalı motorda faydalı işe dönüşen enerji değerleri	101
Tablo 5.8	Türbo doldurmalı normal ve kaplamalı motorun soğutucu akışkan enerji yüzdeleri	105
Tablo 5.9	Türbo doldurmalı normal ve kaplamalı motorda soğutucu akışkan enerji akısı değerleri	106
Tablo 5.10	Türbo doldurmalı normal ve kaplamalı motorda egzoz gaz ekserji akıları	112
Tablo 5.11	Türbo doldurmalı standart ve değiştirilmiş püskürtme avanslı seramik kaplı motorun özgül yakıt tüketimi değerleri	115
Tablo 5.12	Doğal emişli normal ve kaplamalı motorun özgül yakıt tüketimi değerleri	119
Tablo 5.13	Türbo doldurmalı normal ve kaplamalı motor egzoz gaz emisyon ölçüm değerleri	124

ÖZET

Otomotiv endüstrisinde maliyetin düşürülmesi ve yakıt sarfiyatının azaltılmasına yönelik araştırmalar ve teknolojik yenilik çalışmaları sürdürülmektedir. İçten yanmalı bir motorun performansını artırabilmek, toplam yakıt enerjisinin mümkün olan en fazla oranda faydalı enerji haline dönüştürülmesini gerektirmektedir. Bu motorlarda yanma sonucu açığa çıkan enerjinin ancak %30-40 kadarı faydalı işe dönüşmekte, geri kalan enerji ise; motor parçalarını yüksek sıcaklıktan korumak amacıyla yapılmış olan soğutma sistemine, egzoz gazlarına ve diğer kayıplara gitmektedir. 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 ısıl iletkenliği düşük, yüksek çalışma sıcaklığına dayanabilen bir malzemeye kaplanması, “Düşük Isı Kayıplı Motor” kavramını ortaya çıkarmıştır. Literatürde bu motorlar için, “Adyabatik Motor” kavramı da sıklıkla kullanılmaktadır.

Düşük ısı kayıplı motorlarda, soğutma sistemine giden enerjinin azaltılması sonucu, artan silindir sıcaklığı ve tutuşma gecikmesi periyodundaki küçülme ile birlikte özgül yakıt tüketimi de azalmaktadır.

Bu çalışmada, seramik kaplamanın türbo doldurmalı bir dizel motorunun performansına etkisi incelenmektedir. Bu amaçla motorun, silindir kapağı, supaplar ve pistonlar termal bariyer amaçlı olarak zirkonya ile 0,5 mm kalınlığında, plazma kaplama tekniği kullanılarak, kaplanmıştır. Daha sonra, normal ve seramik kaplı motor, değişik yük ve devir şartlarında çalıştırılmak suretiyle test edilmiş ve her iki hale ait deneysel veriler hazırlanan bir bilgisayar programı yardımıyla analiz edilerek sonuçlar karşılaştırmalı olarak grafikler halinde sunulmuştur.

Termal bariyer kaplama sonucu egzoz gaz enerjisi önemli ölçüde artmaktadır. Egzoz enerjisindeki bu artış, motora türbokombine veya rankin alt çevriminin eklenmesiyle faydalı işe dönüştürülebilir. Bu sebeple çalışmada, egzoz gazlarının kullanılabilir enerji (ekserji)’leri de hesaplanarak seramik kaplamanın egzoz gazlarının enerjilerine etkisi de incelenmiştir.

Çalışmada motor, türbo doldurucu devre dışı bırakılarak kaplamalı ve kaplamasız olarak test edilerek seramik kaplamanın tabi emmeli motor çalışmasına etkileri de incelenmiştir.

Çalışma sonuçları, termal bariyer kaplamanın motorun performansını belirgin şekilde iyileştirdiğini göstermektedir. Seramik kaplı motorun püskürtme avansının azaltılması sonucu yakıt ekonomisindeki iyileşmenin daha da arttığı gözlenmiştir. Motorun tabi emmeli olarak çalıştırılması durumunda, seramik kaplama sonucu motor performansında elde edilen iyileşmenin türbo doldurmalı motora göre çok daha düşük kalmakta ve bazı çalışma şartlarında ise kötüleşme görülmektedir.

EFFECTS OF THERMAL BARRIER COATING ON A TURBOCHARGED DIESEL ENGINE PERFORMANCE

SUMMARY

The quest for increasing the efficiency of an internal combustion engine has been going on over since the invention of this reliable workhorse of the automotive world. In recent times, much attention has been focused on achieving this goal by reducing energy lost to the coolant during the power stroke of the cycle. A cursory look at the internal combustion heat balance indicates that the input energy is divided into roughly three equal parts; energy converted to useful work, energy transferred to coolant and the energy lost to exhaust. This phenomenon, of course, should conform to some physical laws. The first law of thermodynamics is satisfied as long as energy is conserved and it does not matter how that energy is apportioned between various categories. The second law stipulates that all the input energy cannot be converted into work; in other words, it is impossible to obtain 100 percent efficiency, and so some heat to be rejected, preferably at the lowest possible temperature to achieve highest possible efficiency.

The reduction in, or the elimination of, in-cylinder heat transfer to either the coolant and/or the environment does not violate the second law of thermodynamics and, moreover, according to the first law, has the potential of producing more work. Added to this, another important advantage of the concept is the great reduction in parasitic losses due to the elimination of cooling system, thus increasing the brake horse-power of the engine. The absence of cooling fans, pumps, radiators, hoses, etc. can facilitate compact design of power plant and considerably enhance its reliability and maintainability. These prospects of improving the design and performance have generated impetus to active research on “adiabatic” or more appropriately, “low heat rejection (LHR)” or “insulated” engines [50].

One of the development trends of heat engines is their energy efficiency improvement. In the case of internal combustion piston engines, one of the ways to achieve this aim is the engine adiabaticization. To create suitable conditions for the thermodynamic cycle in internal combustion engine, it is essential to construct the elements of the combustion chamber from materials of low thermal conductivity.

One of the possible methods to do this to cover the surface of the combustion chamber with a Thermal Barrier Coating. Thermal insulation thus obtained is supposed to lead, according to the second law of thermodynamics, to engine heat efficiency improvement and fuel consumption reduction. Test data published in specialist literature indicates that the effects achieved are less significant, than were expected from theoretical calculations. Exhaust energy rise which accompanies this,

can be effectively used in turbocharged engines. Higher temperatures in the combustion chamber can also have a positive effect in diesel engines, due to the ignition delay drop and hardness of engine operation, though an increase of nitric oxide emission may be expected as well.

The efficiency of most commercially available diesel engine ranges from 38% to 42%. Therefore, between 58% and 62% of the fuel energy content is lost in the form of waste heat. Approximately 30% is retained in the exhaust gas and the remainder is removed by the cooling, etc. More than 55% of the energy which is produced during the combustion process is removed with cooling water/air and through the exhaust gas. In order to save energy, it is an advantage to protect the hot parts by a thermally insulating layer. This will reduce the heat transfer through the engine walls, and a greater part of the produced energy can be utilized, involving an increased efficiency.

The Low-Heat Rejection (LHR) Engine design promise to meet the increasingly stringent regulations in the areas of fuel economy and permissible emissions levels. The LHR concept uses insulation of the combustion chamber and exhaust passages to reduce, or possibly, eliminate heat loss during the closed portion of the cycle. According to the first law of thermodynamics, any energy which is not rejected to the coolant remains available to produce useful piston work. According to the second law of thermodynamics, combustion taking place at higher temperature is also more efficient, as irreversibilities decrease with increasing temperature. The reduction in heat losses also results in increased exhaust enthalpy. This extra exhaust energy can be utilized to drive a compounding turbine or a bottoming cycle, thus improving the overall system efficiency.

The changes in the combustion process due to insulation also affect exhaust emissions. Higher gas temperatures should reduce the concentration of incomplete combustion products at the expense of increases nitric oxides. However, researches have measured decreases in carbon monoxide, unburned hydrocarbons, and soot only under some operation conditions.

Adiabatic turbocompound diesel engine concept promises reduced brake specific fuel consumption in future diesel engines as a result of three basic design revisions:

- Insulating the combustion chamber.
- Removing the cooling system.
- Utilizing the increased energy in the exhaust gases by turbocompounding.

The advantages in operating an adiabatic turbocompound diesel engine are:

- Reduced specific fuel consumption,
- Reduced emission and white smoke,
- Multi-Fuel capability,
- Reduced noise level,
- Improved reliability,
- Smaller size,

- Lighter weight.

A ceramic layer will prevent heat transfer from the hot working medium to the coolant and surroundings. It will contribute to a reduction of the temperature and heat load of the metallic base and will provide corrosion protection. Reduced heat flow implies that a larger fraction of the fuel energy released during the combustion process will be converted into mechanical power and exhaust energy. The question is how much of the energy can be recovered as increased mechanical work.

The adiabatic engine name implies no-heat loss engine. It should be noted that this engine is not adiabatic, or without heat loss, in the true thermodynamic sense; however the engine is without conventional forced cooling and strives to minimize heat loss. The adiabatic engine insulates the diesel combustion chamber with high temperature materials to allow “hot” operation with minimized heat transfer. The “hot” or insulated high temperature components include piston, cylinder head, cylinder liner, exhaust valves, and exhaust ports. Additional power and improved efficiency derived from an adiabatic Engine are possible because thermal energy, normally lost to the cooling water and exhaust gas, is converted to useful power through the use of turbomachinery and high temperature materials.

Fundamentally, the adiabatic engine is more efficient than a conventional diesel because it converts the fuel heat energy into additional useful output. By greatly reducing lost energy and essentially eliminating the need for a conventional cooling system, the adiabatic engine dramatically improves fuel economy and provides approximately a 40 percent reduction in weight and volume for the same horsepower fuel. Further, from a military system standpoint, the component volume of the total “under armor” propulsion system could be reduced by 40 percent overall. Elimination of the engine cooling system, including cooling fans, radiators, hoses and shrouds would produce a remarkable increase in reliability and maintainability. The engine would not be sensitive to most conventional cooling systems damage and extreme environmental conditions. Fuel economy improvements translate into increased vehicle range and reduced logistics concerns. Specific weight reductions allow improved vehicle response, while less vehicle volume allows reduced armor cover requirements, reduced vehicle weight, and new innovative designs with improved survivability characteristics. The Adiabatic Engine’s high temperature operation also gives smoother combustion and a wider range of acceptable fuels. With this engine, the entire philosophy of combat vehicle design becomes far less restrictive. Concerns regarding satisfactory locations for cooling grilles, air passages, and associated equipment are eliminated. The cost of the engine is expected to be equal to or less than its cooled counterpart since engine radiators, cooling fans, water pump, seals, hoses, and costly water jackets would be eliminated. Application of the Adiabatic Engine to commercial activities provides advantages similar to those discussed above and in addition includes improvements in the areas of emissions, simplicity, vehicle aerodynamics, operation cost, and maintenance. It should be noted that 50% of the commercial and military engine field failures are cooling system related.

Specific material requirements and selection methodology for the Adiabatic Engine are somewhat constrained by specific design and application approaches; however, the following properties are representative of important characteristics:

- Insulative properties
- High expansion coefficients
- High temperature capability
- High strength
- Fracture toughness
- High thermal shock resistance
- Low-friction and wear characteristics
- Low cost

Typical desired material properties for an adiabatic diesel engine are listed above:

- | | |
|---|--------|
| • Temperature Limit (°F) | > 1800 |
| • Fracture Toughness, K_{IC} | > 8,0 |
| • Flexural Strength (MPa) | > 800 |
| • Thermal Conductivity, k , (W/m °C) | <0,01 |
| • Thermal Shock Resistance, ΔT , (°C) | > 500 |
| • Coefficient of Expansion, α , ($\times 10^{-6}$ / °C) | > 10 |

In order to achieve the program’s ultimate goals, it is necessary to reduce heat rejection rates by at least 70% for the combustion chamber components, and thus thermal conductivity is an extremely important consideration for an Adiabatic Engine. At the present time, partially stabilized zirconia has been found to be quite desirable for Adiabatic Engine application because of its excellent insulating characteristics, adequate strength characteristics, and thermal expansion characteristics which are relatively close to some metals.

Zirconia based thermal barrier coating systems (TBC) were initially developed for high temperature insulation for rocket and turbine engines. When applying this technology to reciprocating engines, such as diesels, one must realize that optimum coating characteristics may be different for turbine and reciprocating engine components. Also, coating failure mechanism can change as TBC morphology and chemistry are changed.

One of the primary difficulties of the TBC lies in its endurance problems. With increasing thickness the service life of the TBC decreases. However, thick thermal barriers are of interest to engine manufacturers due to possible improvements in insulation characteristics. Failure arises during engine operation largely because of ceramic coating fatigue. Thermally induced cyclical stresses combine with residual stresses found in the coating system to cause failure. Thermal stress cycles are caused by engine heating and cooling during operation coupled with the mismatch of thermal expansion coefficients of TBC components. The residual stresses arise from complex interaction of grit blasted substrate surface stresses, shrinkage of molten splits of bondcoat metal and zirconia, and stresses arising from temperature transients in the

substrate and coating during spraying coupled with thermal expansion coefficient mismatch of materials.

Lastly, stresses can be induced during elevated temperature operation if TBC components aren't stable at operation times and temperatures. Two primary problems of this class are bond coat oxidation and zirconia destabilization. Zirconia destabilization and bondcoat oxidation are in general less of a factor in reciprocating engine applications than in turbine and rocket engines due to the lower service temperatures. By selecting oxidation resistant bondcoat materials and sufficiently stabilized zirconia these problems can be avoided [92].

The hot combustion chamber wall temperatures of an Adiabatic Engine provide higher compression charge temperatures with consequent reduction in ignition delay. Short ignition delay is conducive to multi-fuel capability in compression ignition engines.

It is important to note that an Adiabatic Engine can be applied to a wide range of military vehicles, ranging from trucks to main battle tanks. In addition, adiabatic engine technology can be applied commercially to ground vehicles from trucks to automobiles and to such applications as helicopters, winged aircraft, locomotives, marine use etc.

Eliminating the conventional liquid cooling system of a diesel engine to conserve energy normally rejected to that heat sink offers promise as a means for improving fuel economy. Such low-heat rejection diesels have generally been advanced for heavy-duty vehicles. The low-heat rejection approach is ill-suited to the conventional gasoline engine because high cylinder-gas temperature promotes combustion knock, but it is ideal for the diesel engine. Among the positive attributes of the low-heat rejection diesel, beyond elimination of a cooling system that includes a coolant pump, radiator, and cooling fan, are the potential for improved fuel economy as a result of decreased heat rejection, and a reduction in the ignition delay period. Shorter ignition delay may allow use of a lower compression ratio, with a consequent decrease in motoring power that could contribute to a higher mechanical efficiency, hence better fuel economy.

In an internal combustion engine, the process of heat addition is most important. The performance depends not only on the amount of heat released but also the timing of its release. If, for example, all the heat were released at the beginning of the working stroke (near TDC), all of it is available to potentially produce work thus giving the highest efficiency; on the other hand, if it were released at the end of the stroke, none of it is useful to do any work in the cylinder, thus giving the lowest (zero) efficiency, but it enhances the availability of the exhaust gases. Therefore, when a comparison is to be made between insulated and non-insulated engine performances, it is imperative that the heat release process be identical for both cases. This may require constant air-fuel ratio and any adjustment or redesign of the combustion chamber and fuel injection system.

Another important factor that affects the engine performance is the heat rejection during the working stroke. If, for instance, all the heat were to be rejected at the beginning of expansion stroke, no work is possible; on the other hand, if no heat were to be rejected during this stroke, there is a potential for the work to approach isentropic work (which is the maximum possible) by maximizing the indicated mean effective pressure. Of course, this possibility is the main factor that carried the interest in the adiabatic engine research a few years ago. However, all the heat recovered by insulation that would have been lost to coolant will not be converted to indicated work. For example, the reduction in heat rejection occurring at the end of the power stroke (near BDC) has little potential to do any work other than increasing the availability of exhaust gases. Siegl et al. [6] have estimated, using the second law of thermodynamics, that about one-third of the reduction in the heat rejection would be converted to work and the rest of the two-thirds would go to increase the availability of exhaust gases. Assuming one-third of the input energy is saved by insulation (which would have gone to coolant otherwise; and most of the energy loss to coolant occurs during the expansion stroke only), the total potential for additional work is about 11 percent ($\frac{1}{3}$ of $\frac{1}{3}$) of the input energy. In other words, about 33% improvement in the indicated thermal efficiency may be achieved over the present conventionally cooled engines which are assumed to have about 30% efficiency. In addition, there are savings in the parasitic energy loss due to elimination of the cooling system and the reduction in frictional loss caused by increased oil temperatures in the insulated engine. These savings should increase the brake thermal efficiency of insulated engine further. The utilization of enhanced availability in the exhaust of adiabatic engines by employing turbo-compounding and/or Rankine bottoming cycle would increase the overall efficiency of the adiabatic engine even further.

However, all the above potential may not be actually realized in practice due to several reasons. Chief among them is the reduction in the volumetric efficiency for the naturally aspirated insulated engines because of the higher cylinder temperatures. This drop in volumetric efficiency is attributed to be the primary cause for the deterioration in the insulated engine performance in the investigations already reviewed under literature survey on the naturally aspirated engines. Probably this adverse effect would reduce the potential gains of the insulated engine [2].

The purpose of this thesis is to study the effects of thermal barrier coating on the performance of a turbocharged diesel engine. The engine selected for evaluation of the thermal barrier coatings was a four-stroke, direct-injection, six cylinder, turbocharged, intercooled diesel engine. First, this engine was tested, as equipped with a water-cooled intercooler, at different speeds and load conditions without coating. Then, combustion chamber surfaces of the engine were coated with ceramic materials. Cylinder head and valves were coated with a 0,35 mm thickness of CaZrO_3 over a 0,15 mm thickness of NiCrAl bond coat. The material used on pistons was MgZrO_3 . The coating process was done by using Plasma Spray Technique at Sakarya University Engineering Faculty Plasma Coating Laboratory. Finally, the ceramic coated test engine was again tested at the same operation conditions as the standard engine. The test data of the both cases were analyzed by using a computer program and the results were compared as diagrams and tables. The experimental and

computational results show that, thermal barrier coating greatly affects performance of a turbocharged diesel engine.

The specific fuel consumption and energy transferred to the cooling water were decreased, and energy transferred to the exhaust gases was increased with thermal barrier coating. The results indicate that specific fuel consumption values of insulated engine were 1 to 6% lower than baseline engine. This reduction was especially significant at low load-high speed, medium load-medium speed and medium load-high speed conditions. There was only a little fuel consumption increase at full-load and speed condition.

It is a known fact that thermal barrier coating increase cylinder temperatures of diesel engines. Higher cylinder temperatures will cause reduction in ignition delay. For this reason, injection timing of coated engine must be optimized. In the experimental study, the injection timing of the coated engine was lowered from 20 °CA to 18 °CA, and the engine was tested. In the decreased injection timing, specific fuel consumption of engine was decreased about %2.

The other subject studied was exhaust gas energy recovery. For this reason, availability of exhaust gases were calculated, and thus what amount of this energy can be converted to useful work also studied. By using a turbocompound or a rankine bottoming cycle this energy can be recovered. The exhaust gas availabilities of coated engine were 3,2 to 40 kW, and 3,3-45 kW for uncoated engine. These results indicate that in the case of coated engine, the increase of exhaust gas exergy was between %3 to %21.

In the study, another subject studied was to see the effects of thermal barrier coatings on naturally aspirated engine performance. For this aim, the engine was tested as naturally aspirated engine for both coated and uncoated cases. In the case of naturally aspirated engine, specific fuel consumption of coated engine was about two percent lower than that of the uncoated engine at medium-load and speed conditions. At low loads-low speeds and high loads-high speeds, specific fuel consumption of coated engine was increased significantly.

It is known that one of the most important result of thermal barrier coating is the reduction in exhaust emissions. For this reason, soot, hydrocarbon, and carbon monoxide emissions were measured and the results were compared with each other. The test results show that the hydrocarbon, particulate and carbon monoxide emissions of the ceramic coated engine were lower than that of the uncoated engine. These reductions, as a result of thermal barrier coating of the engine combustion chamber, were about 35% at carbon monoxide, 40% at hydrocarbon, and 48% at particulate emissions.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

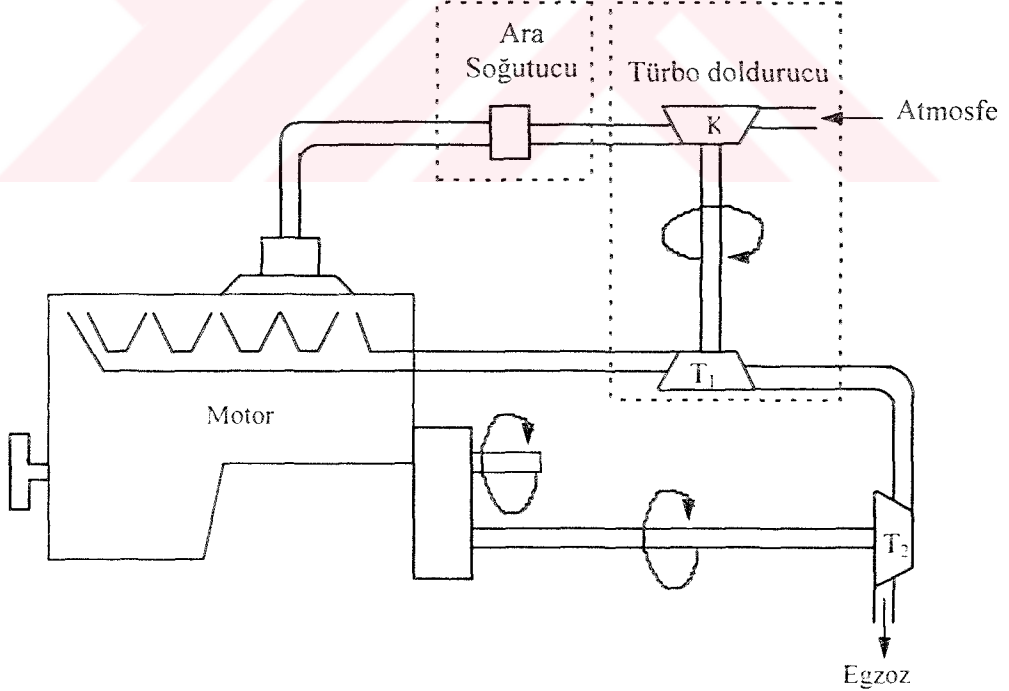
Otomotiv endüstrisinde yakıt sarfiyatının azaltılmasına yönelik araştırmalar ve teknolojik yenilik çalışmaları sürdürülmektedir. Motor dizaynında yapılabilecek değişikliklerle motorun verimini iyileştirme çabaları günümüzde oldukça önem kazanmıştır. İçten yanmalı bir motorun performansını artırabilmek için, toplam yakıt enerjisinin mümkün olan en fazla oranda faydalı işe dönüştürülmesini sağlamak gerekmektedir. Bu motorlarda yanma sonucu açığa çıkan enerjinin ancak %30-40 kadarı faydalı işe dönüşmekte, geri kalan enerji ise motor parçalarını yüksek sıcaklıktan korumak amacıyla yapılmış olan soğutma sistemine, egzoz gazlarına ve diğer kayıplara harcanmaktadır.

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 malzemeden imal edilmesi veya kaplanması, “düşük ısı kayıplı motor” kavramını ortaya çıkarmıştır. Literatürde bu motorlar için, “Adyabatik Motor” ve “Seramik Kaplı Motor” kavramları da sıklıkla kullanılmaktadır.

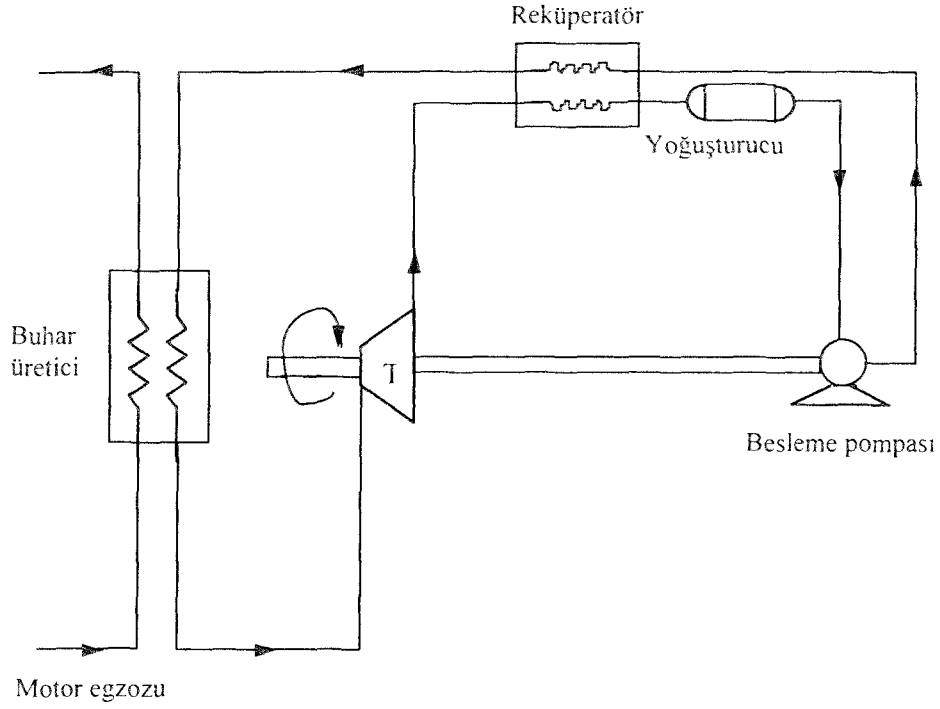
Adyabatik motor düşüncesi, soğutma sistemini ortadan kaldırmayı amaçlamaktadır. Soğutma sistemi elemanlarının (vantilatör, su kanalları, pompa, radyatör vb.) ortadan kalkmasıyla ağırlık, parça maliyeti ve ekonomisi yanı sıra, önemli ölçüde yakıt tasarrufu da sağlanacaktır. Günümüzde tam adyabatik olmasa bile, düşük ısı kayıplı motor tasarımının, özellikle soğutmaya giden ısı kayıplarını azalttığı, soğutma yükünün ve harcanan gücün azaltılması sebepleriyle, faydalı enerjiyi artırdığı ve motor verimini yükselttiği gözlenmiştir [1,2,3,4,5].

Düşük ısı kayıplı motorlarda, soğutma sisteminin küçültülmesi, ısı kaybı ve tutuşma gecikmesindeki azalma ile birlikte özgül yakıt tüketimi de azalmaktadır. Daha küçük tutuşma gecikmesi, daha düşük sıkıştırma oranı ile çalışmaya imkan vermektedir. Böylece daha yüksek bir mekanik verim elde edilmekte ve yakıt ekonomisinde iyileşme sağlanmaktadır [6].

Düşük ısı kayıplı motor projesinin diğer bir amacı da, soğutma sistemine olan ısı kayıplarını azaltarak yanma odası cidar sıcaklıklarını artırmak ve egzoz gazlarının sıcaklığını yükseltmektir. Seramik kaplı motorda yanma odasında meydana gelen sıcaklık artışı ile, yanmadan atılan hidrokarbonlar tamamen yanmakta, karbonmonoksit emisyonları ise azalmaktadır. Termal bariyer kaplama sonucu egzoz gazlarının enerjisinde meydana gelen artış, doğal emişli bir dizel motoruna türbo doldurma ve/veya türbokombine sistemlerinin ilavesiyle faydalı işe dönüştürülebilir ve bu da motorun performansını artırır [7]. Şekil 1.1'de türbokombine, Şekil 1.2'de ise Rankin alt çevrimli motorların şematik görünümü verilmektedir.



Şekil 1.1 Türbokombine bir motorun şematik görünümü [7].



Şekil 1.2 Rankin alt çevrimli bir motorun şematik görünümü [7].

Seramik kaplama sonucu silindir cidar sıcaklıklarının artması, aynı zamanda tutuşma gecikmesini azaltarak motorun daha sessiz çalışmasını sağlar. Ayrıca, kaplamalı motorlarda meydana gelen yüksek silindir sıcaklıklarının bu motorlarda düşük setan sayılı alternatif yakıtların kullanılmasına imkan vermesi de beklenmektedir [8].

İçten yanmalı bir motorda, çevrime olan ısı girişi işlemi çok önemlidir. Motorun performansı yalnızca yanma sonucu açığa çıkan ısı enerjisi miktarına değil, aynı zamanda ısınin açığa çıkma zamanına da bağlıdır. Örneğin, eğer ısınin tamamı iş zamanının başlangıcında (ÜÖN'ya yakın) açığa çıkarsa, bu enerjinin tamamı potansiyel olarak işe dönüştürülebilecek ve böylece en yüksek verimi verebilecektir. Diğer yandan, eğer ısı iş zamanının sonunda açığa çıkacak olursa, bu enerji herhangi bir iş üretme potansiyeline sahip değildir. Bu durum, verimin azalması ile birlikte egzoz gazlarının kullanılabilirliğinin artması sonucunu doğuracaktır. Bu sebeple, yalıtılmış ve standart motorlar arasında performans açısından bir karşılaştırma yapılabilmesi için her iki halde de sisteme ısı girişi işleminin aynı olması zorunludur. Bu ise, sabit hava/yakıt

oranı ile yakıt püskürtme sistemi ve yanma odasında birtakım değişikliklerin yapılmasını veya yeniden dizayn edilmesini gerektirmektedir.

Motor performansını etkileyen diğer bir önemli faktör de iş zamanı esnasında silindirlerden olan ısı kaybıdır. Örneğin, eğer bu ısı kaybı genişleme zamanının başında gerçekleşiyorsa motorun faydalı iş üretme potansiyeli azalacaktır. Diğer yandan, iş zamanı süresince ısı kaybı olmuyorsa, bu da mümkün olan maksimum iş potansiyelinin söz konusu olduğu anlamına gelir. Bu ise, maksimum ortalama indike basıncı meydana getirir. İzolasyon sonucunda soğutucu akışkana geçmesi önlenen ısıнын tamamının indike işe çevrilebilmesi mümkün değildir. Örneğin, iş zamanının sonunda kazanılan ısı enerjisinin iş üretme potansiyeli yok denecek kadar azdır. Kazanılan bu ısı, daha ziyade egzoz gazlarının kullanılabilirliğini artıracaktır [9].

Siegla ve diğ.[6], termodinamiğin II. Kanunu gereğince, yalıtım sonucu kazanılan ısı enerjisinin yaklaşık üçte birinin faydalı işe dönüştürülebileceğini, geri kalan üçte ikilik kısmın ise egzoz gazlarının kullanılabilir enerjisindeki artışa gideceğini belirtmektedir. Soğutucuya gidecek ısı enerjisinin üçte birinin engellendiği kabul edildiğinde ilave iş potansiyeli %11 olacaktır. Başka bir ifadeyle, yaklaşık olarak %30 verime sahip olan konvansiyonel soğutmalı motorlarda seramik kaplama sonucu indike termik verimde yaklaşık olarak %33 mertebesinde bir iyileşme sağlanabilir. Bunun yanında, soğutma sisteminin kaldırılması ile enerji kayıplarından kazanım ve yalıtılmış motorda artan yağ sıcaklığından ötürü sürtünme kayıplarında azalma da söz konusudur. Bu kazanımlar da ayrıca, yalıtılmış motorun termik verimini artırır. Adyabatik motorlarda egzoz gazlarının kullanılabilir enerjisinde meydana gelen artış, sisteme türbokombine ve/veya Rankin alt çevrimlerinin eklenmesiyle motorun toplam veriminin artırılmasında kullanılabilir.

Bununla beraber, yukarıda belirtilen enerji potansiyelleri birkaç sebepten ötürü tam olarak kullanılamaz. Bunların en önemlisi, tabii emmeli seramik kaplı motorlarda yüksek silindir sıcaklıklarının bir sonucu olarak volumetrik verimde meydana gelen azalmadır. Bu olumsuz etki seramik kaplı motorların potansiyel kazanımlarını

sınırlamaktadır. Fakat, burada volumetrik verimdeki azalmanın termik verimi azaltmayacağı, yalnızca motor gücünü etkileyeceğine dikkat edilmelidir [9].

1.1 Uygulamanın Tarihçesi

Dizel motorlarının yanma odası elemanlarının seramik esaslı malzemelerle kaplanması çalışmaları 1975'lerden sonra başlamış ve halen üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Araştırmalar, malzeme teknolojisinin yanı sıra, kaplama teknikleri alanında da sürdürülmektedir. Günümüzde ısı yalıtımı sağlayan ileri teknoloji seramikleri, gaz türbini ve dizel motoru parçalarının kaplanması kullanılmaktadır. 1970'lerde gaz türbinlerinin çeşitli kısımlarında yapılan kaplama uygulamaları sonunda, başarılı ve geniş bir test performansı sağlanmıştır [10]. Dizel motorların; piston yüzeyleri, silindir gömlekleri, supaplar, manifoldlar, silindir kapağı, egzoz ve türbo doldurucu parçaları gibi motor elemanlarına kaplama yapılabilmektedir.

Düşük ısı kayıplı motorlar üzerine yapılan deneysel ve teorik çalışmaların büyük bir bölümünü türbo doldurmalı ve/veya türbokombine motorlara ait çalışmalar teşkil etmektedir. Yukarıda da vurgulandığı üzere, yalıtılmış bir motorun egzoz enerjisi önemli ölçüde artmaktadır. Egzoz enerjisinde meydana gelen bu artışı, motora türbo doldurucu, türbokombine veya rankin sistemlerini ekleyerek, faydalı işe dönüştürmeye yönelik çalışmalar önem kazanmıştır. Bu sebeple deneysel çalışmalar, günümüzde yaygın olarak kullanılmakta olan türbo doldurmalı dizel motorları üzerinde yoğunlaşmıştır. Türbokombine ve rankin çevrimli motorlar henüz kullanım alanı bulmadıklarından, bu motorlara ilişkin çalışmalar ise genellikle teorik düzeyde sürdürülmektedir.

Sudhakar [11], seramik kaplama sonucu soğutma sistemine giden enerji miktarında %20-25, özgül yakıt tüketiminde %1,7'lik bir azalma olduğunu söylemektedir. Yazar ayrıca, yalıtılmış motorda HC emisyonlarının azaldığını, NOx emisyonlarının ise önemli ölçüde arttığını belirtmektedir. Coers ve diğ. [12], türbo doldurmalı bir dizel motorunun; pistonları, silindir gömlekleri, supapları ve silindir kapak yüzeylerini zirkonya ve krom oksit, segmanlarını ise krom karpit ve alüminyum titronat ile

0,65 mm kalınlığında kaplayarak motora taşıt üzerinde 250 saatlik ömür ve 5080 km'lik seyir çevrimi testleri sonucunda; silindir gömleklerinin ve silindir kafasının çok iyi durumda olduğunu, pistonlarda etek çatlamaları ile beraber kopmalar, segmanlarda ise aşınma ve kopmalar olduğunu gözlemişlerdir. Çalışmada ayrıca, yalıtılmış motorun yakıt tüketiminde %14'lük bir azalma elde edildiği belirtilmektedir.

Badgley ve diğ. [13]'nin, 6 silindirli bir dizel motorunda 400 saatlik test sonuçları, motorun özgül yakıt tüketiminde %5'lik bir azalmayı göstermektedir. Havstad ve diğ. [14], seramik kaplı motorda indike yakıt tüketiminin %5-9, silindirlerden olan ısı kayıplarının ise %30 azaldığını belirtmektedirler. Havstad ve diğ. [15], aynı motorda yalıtım miktarını azaltarak gerçekleştirdikleri diğer bir çalışmada, motorun özgül yakıt tüketiminin % 4-7 arasında azaldığı ifade edilmektedir.

Miyairi ve diğ. [16], tek silindirli direkt püskürtmeli bir dizel motorunda yaptıkları deneysel çalışmada, yanma odasının izolasyonu sonucu özgül yakıt tüketiminde %7'lik bir azalma tespit etmişlerdir. Toyama ve diğ. [17]'nin, izole edilmiş türbokombine sistemli bir dizel motorunda elde ettikleri deneysel sonuçlar; ısı kaybında % 50'nin üzerinde bir azalma ve yakıt tüketiminde % 11'lik bir azalmayı göstermektedir.

Alkidas [18], tek silindirli bir dizel motorunun termal bariyer amaçlı kaplanması sonucunda motorun performans ve emisyon değişimlerini inceleyen deneysel çalışmasında, kaplamalı motorda normal motora kıyasla yakıt tüketiminde azalma, NO emisyonlarında artma ve partikül emisyonlarında ise belirgin bir azalma olduğunu belirtmektedir. Siegla ve diğ. [19], tek silindirli, direkt püskürtmeli bir dizel motorunda gerçekleştirdikleri deneysel çalışma sonuçları da, kaplamalı motorda; NO emisyonlarının arttığını, partikül emisyonlarının ise belirgin bir şekilde azaldığını göstermektedir.

Levy [20], sekiz silindirli bir dizel motorunun yanma odası yüzeylerini 0,38 mm kalınlığında yalıtarak gerçekleştirdiği deneyler sonucunda kaplamalı motorlarda; maksimum motor gücünde, termik verim ve mekanik verimde artış, özgül yakıt tüketiminde ise %11 civarında bir azalma olduğunu belirtilmektedir.

Assanis ve diğ. [21], tek silindirli, direkt püskürtmeli bir dizel motorunu 0,5 ve 1 mm kalınlığında zirkonya ile yalıtarak motorun performans değişimlerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, 0,5 mm'lik kaplama durumunda performansta artış sağlanırken, 1 mm'lik kaplama sonucu ise azalma olduğu belirtilmektedir.

Sudhakar [22], altı silindirli, türbo dolduruculu ve türbokombine bir dizel motorunda yanma odasının yalıtılması sonucu motorun performans ve egzoz emisyonlarında meydana gelen değişimleri inceleyen deneysel çalışmasında, motorun özgül yakıt tüketiminde %1-2 arasında azalma olduğunu, hidrokarbon emisyonlarının azaldığını, azot oksit emisyonlarında ise her hangi bir azalma olmadığını ifade etmektedir.

Kvernes ve diğ. [23], tek silindirli, iki zamanlı bir dizel motorunda gerçekleştirdikleri çalışmada seramik kaplama ile; motor veriminde %2-3, egzoz gaz sıcaklıklarında %5-7 arasında artma, özgül yakıt tüketiminde ise %5 azalma elde ettiklerini belirtmektedirler.

Algidas [24], tek silindirli bir dizel motorunda gerçekleştirdiği deneysel çalışmada seramik kaplı motorun; özgül yakıt tüketiminin azaldığını, azot oksit emisyonlarının arttığını, hidrokarbon ve is emisyonlarının ise azaldığını belirtmektedir.

Woods ve diğ. [25], tek silindirli türbo dolduruculu bir dizel motorunda gerçekleştirdikleri 100 saatlik ömür testi sonucunda; 6242 Titanyum alaşımının düşük ısı kayıplı motorlar için çok uygun bir piston malzemesi olduğunu, yüksek sıcaklığa dayanıklı yağlar üzerinde çalışması gerektiğini ve termal bariyer kaplama malzemesi olarak zirkonyanın halen tercih edilen en uygun malzeme olduğunu belirtmektedirler.

Wang ve diğ. [26], seramik kaplı bir dizel motorunda yanma olayını inceleyen deneysel çalışmada; yüksek sıcaklıkta tutuşma gecikmesinin çok azaldığını ve tutuşmanın meme yakınında meydana geldiğini belirterek; meme delik sayısını artırmak, delik çapını küçültmek, püskürtme zamanını optimize etmek suretiyle yanma

süresinin kısaltılabileceğini ve böylece düşük ısı kayıplı motordan daha yüksek verim elde edilebileceğini belirtmektedirler.

Havstad ve diğ. [14], tek silindirli bir motorda sabit hava/yakıt oranında, seramik kaplama sonucu, ısı kaybında % 55, özgül yakıt tüketiminde de % 12 azalma elde etmişlerdir. Woschni ve diğ. [27] çalışmalarında, pistonları 5 mm kalınlığında zirkonya ile kaplanan türbo doldurmalı, sekiz silindirli bir dizel motorunda gerçekleştirdikleri simülasyon çalışması sonucunda; özgül yakıt tüketiminin düşük yüklerde azaldığını, yüksek yüklerde ise arttığını belirtmişlerdir.

Miyairi [28], türbo doldurmalı, direkt püskürtmeli bir dizel motorunda yalıtım miktarının artması sonucu; termik verimin ve azot oksit emisyonlarının arttığını, seramik kaplı motorlardan daha iyi sonuçlar elde edilebilmesi için ise püskürtme avansının değiştirilmesi gerektiğini söylemektedir.

Assanis [29], türbo doldurmalı ve türbokombine bir dizel motoru sisteminin yanma odasının zirkonya ile farklı kalınlıklarda kaplanması sonucu motorun performansında meydana gelecek değişimleri inceleyen simülasyon çalışmasında, sisteme rankin alt çevrimi ilavesiyle kaplama kalınlığına bağlı olarak termik verimde %10-14 arasında bir artış olduğunu belirtmektedir.

Kouremenos ve diğ. [30], ön yanma odalı bir dizel motorunda, ön ve ana yanma odalarının izolasyonunun motorun performansına etkilerini inceleyen bir simülasyon çalışmasında; kaplamasız halde %36,9 olan indike verimin, kaplama ve türbokombine sistem ilavesi sonucu %39,9'a yükseldiği, egzoz gazlarının enerjilerinin %10 civarında arttığı belirtilmektedir. Kamo ve Bryzik [31], türbokombine sistemli bir motorda, sabit hava/yakıt oranında, izolasyon sonucu özgül yakıt tüketiminde % 10 ve silindirlerden olan ısı kaybında % 70'in üzerinde azalma tespit etmişlerdir.

Morel ve diğ. [32], türbo doldurmalı hafif ve ağır yük dizel motorlarında değişik kaplama kalınlıklarında, her iki motorda da termik verimin bütün yük şartlarında kaplama kalınlığı ile birlikte arttığını, kamyon motorunda %8 olan termik verim

artışının rankin çevrimi ilavesiyle %13'e yükseldiğini, egzoz sıcaklıklarının arttığını ve ısı kayıplarının ise azaldığını belirtmektedirler. Morel ve diğ. [33], türbo doldurmalı bir motorda gerçekleştirdikleri diğer bir çalışmada, sabit hava/yakıt oranında ve farklı kaplama kalınlıklarında yalıtım sonucunda %6 civarında bir termik verim artışı ile %60 ısı kaybı azalması tespit etmişlerdir.

Leising ve diğ. [34], yalıtımdan istenen sonuçların alınabilmesi için dizel motorlarının türbo doldurmalı ve ara soğutuculu olması gerektiğini ve mevcut dizayn şartlarında yakıt ekonomisinde %6 civarında bir iyileşmenin mümkün olduğunu söylemektedirler. Bir dizel motorunun performansının, motora türbo doldurma, türbokombine ve rankin sistemlerinin ilavesiyle %20, adyabatik dizelde ise %40 civarında artırılabilceğini ifade etmektedirler.

Hoag ve diğ. [35], türbo doldurmalı ve/veya türbokombine bir motorda sabit hava/yakıt oranı ve farklı izolasyon miktarlarında, özgül yakıt tüketiminin türbokombine motorda %4, türbo doldurmalı motorda %2 ve silindirlerden olan ısı kaybında ise %55 azalma elde etmişlerdir. Tovel [36], türbo doldurmalı bir motorda sabit hava/yakıt oranında, değişik izolasyon miktarları sonucunda indike özgül yakıt tüketiminde %7,5 iyileşme tespit etmiştir.

French [37], türbo doldurmalı ve/veya türbokombine bir motorun sabit hava/yakıt oranında farklı izolasyon miktarlarında kaplanması sonucunda; türbo doldurma ile özgül yakıt tüketiminde %9 azalma olduğunu, türbokombine sistem ilavesi ile ise motorun termik veriminde %17 artış sağlandığını belirtmektedir. Bruns ve diğ. [38], bir ağır yük dizel motorunda gerçekleştirdikleri simülasyon çalışmalarında, termal bariyer kaplama sonucunda yakıt tüketiminde %16 ile %37 arasında azalmayı belirtmektedirler. Wallace ve diğ. [39]'nin çalışma sonuçları, tam adyabatik halde indike termik verimde %14, yarı adyabatik halde ise %7 artışı ifade etmektedir.

Sun ve diğ. [40], yalıtılmış motorda yanmanın iyileşmesi için, yakıt sisteminin optimize edilmesi gerektiğini, çok silindirli motorlarda, egzoz enerjisinin faydalı işe

dönüştürülmesi ve böylece verimin artırılmasında türbo doldurma ve türbokombine sistemin etkili bir yöntem olduğu belirtmektedirler.

Rakopulos ve diğ. [41], altı silindirli, türbo doldurmalı bir dizel motorunda egzoz sisteminin izolasyonunun motorun performansına etkisini inceleyen çalışmalarında, deneysel ve analitik çalışma sonuçlarını karşılaştırmalı olarak vermektedirler. Rakopulos ve diğ. [42], diğer bir simülasyon çalışmalarında, yalıtılmış motorda, volumetrik verimdeki azalma sebebiyle, toplam verimde belirgin bir artış olmadığını, motora türbokombine sistem ilavesiyle toplam veriminin artırılabilceğini, NO emisyonlarında izolasyon sonucu belirgin bir artışın olduğunu tespit etmişlerdir.

Düşük ısı kayıplı motorlar üzerine yapılan deneysel ve teorik çalışmaların büyük bir bölümünü türbo doldurmalı ve/veya türbokombine motorlara ait çalışmalar teşkil etmektedir. Tabi emmeli motorlarda gerçekleştirilen çalışma sonuçları, termal bariyer kaplama sonucu motorun performansında önemli bir artış olmadığını, hatta bazı çalışma şartlarında ise azalma olduğunu göstermektedir.

Cheng ve diğ. [43]'nin deneysel çalışma sonuçları, seramik kaplı motorun kaplamasız motora kıyasla tüm yük şartlarında düşük performans gösterdiğini, cidar ve egzoz gaz sıcaklıklarında %20'den fazla artış olduğunu göstermektedir. Wosehni ve diğ. [44]'nin çalışmalarında da seramik kaplı motorun performansında kaplamasız motora göre azalma görülmektedir.

Dickey [45], tek silindirli, direkt püskürtmeli bir dizel motorunda kaplama sonucunda, daha düşük termik verim, daha fazla is ve partikül emisyonu, NO emisyonlarında ise düşük yüklerde artış, tam yükte ise azalma gözlediğini belirtmektedir. Kimura ve diğ. [46] de, tek ve dört silindirli, direkt püskürtmeli dizel motorlarında seramik kaplama sonucu ısı kayıplarında azalma olduğunu, fakat termik verimde ise aynı oranda bir iyileşme sağlanmadığını belirtmektedirler. Buna sebep olarak da, yanmadaki bozulmanın işe dönüşme veriminde meydana getirdiği azalmayı göstermektedirler.

Alkidas [18], düşük ısı kayıplı motorlarda performansta gözlemlenen azalmanın; yetersiz hava/yakıt karışımı ve yanma bozulmasının bir sonucu olabileceğini söylemektedir. Bununla beraber, yazarın kendi ölçüm sonuçları, düşük ısı kayıplı motorun standart motora göre eşit veya daha düşük yakıt tüketimi ve ayrıca yanma süresi ve tutuşma gecikmesinde kısalma ile kaplamalı motorda difüzyon yanma süresinde artış olduğunu göstermektedir. Yazar, düşük ısı kayıplı bir motorda yakıt ekonomisini iyileştirmek için sadece yalıtımın yeterli olmadığını, bunun yanında yakıt püskürtme sistemini optimize etmek için ayrıca bir takım değişikliklerin yapılması gerektiğini söylemektedir. Benzer bir yaklaşım, Cheng ve diğ. [43] tarafından da ifade edilmektedir.

Siegla ve diğ. [6] çalışmalarında, tabi emmeli motorda izolasyon sonucu, termik verimde standart motora kıyasla çok az miktarda bir artış olduğunu söylemekte, bunun nedeni olarak da izole edilen motorda yüksek cidar sıcaklıklarının sonucu olarak volumetrik verimde meydana gelen azalmayı göstermektedirler. Çelik [47]'in, tek silindirli tabi emmeli bir dizel motorunda gerçekleştirdiği çalışmada seramik kaplama sonucu; düşük ve yüksek yük ve devir sayılarında yakıt tüketiminde artış olduğunu, orta yük ve devir sayısı şartlarında ise özgül yakıt tüketiminin azaldığını belirtmektedir.

Termal bariyer kaplı motorlarda, cidar ve silindir sıcaklıkları artmaktadır. Bu sıcaklık artışı dizel motorları için istenen bir durum olmasına karşın, benzin motorlarında motorun vuruş eğilimini arttıracaktır. Bu sebeple, literatürde benzin motorları üzerinde çok az çalışmaya rastlanmaktadır. Assanis ve Mathur [48], dört zamanlı, dört silindirli bir benzin motorunda seramik kaplama sonucunda beklenenin aksine; moment ve efektif güçte %8-18 artış ve yakıt tüketiminde %5-10, egzoz emisyonlarında da önemli ölçüde azalmalar elde ettiklerini söylemektedirler. Kamo ve diğ. [49] de ince termal bariyer kaplamaların (0,1-0,3 mm) benzin motorlarında da kullanılabileceğini belirtmektedirler.

1.2 Çalışmanın Tanıtımı

Bu çalışmada, termal bariyer kaplamanın türbo dolduruculu bir dizel motorunun performansına etkisi incelenmiştir.

Deneysel çalışmalar için model olarak seçilen motorun silindir kapağı, pistonlar ve supapları, uygun bir seramik malzeme, uygun bir kaplama yöntemi (Plazma sprey) belirlenerek termal bariyer amaçlı olarak kaplanmıştır. Çalışmada kullanılan kaplama yöntemi ile ilgili bilgiler Bölüm 2'de, motor ve kaplama malzemeleriyle ilgili özellikler ise Bölüm 4'de verilmektedir.

Deneysel çalışmalarda kullanılan motor önce kaplanmamış olarak, on farklı yükte ve on farklı devir sayısında test edilerek performans değerleri alınmış, daha sonra kaplanmış motor üzerinde aynı deneyler tekrarlanmıştır. Böylece normal motor ve kaplamalı motorun aynı şartlarda test edilmesi sonucu elde edilen verilere göre performans parametrelerinin karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmalarda motor, türbo doldurucu devre dışı bırakılarak tabi emmeli olarak da kaplamalı ve kaplamasız haller için test edilmiştir. Böylece, termal bariyer kaplamaların tabi emmeli motorun performansına etkileri de irdelenmiştir.

Çalışmalarda inceleme konusu yapılan diğer bir nokta da, farklı püskürtme avansı değerlerinin motorun özgül yakıt tüketiminde meydana getirdiği değişimi incelemektir. Bu amaçla, orijinal motorda 20° KMA olan püskürtme avans değeri 18° KMA değerine düşürülerek yakıt tüketiminde meydana gelen değişim araştırılmıştır.

Termal bariyer kaplamaların motorun yanma verimini iyileştirdiği bilinmektedir. Bunun da karbonmonoksit, partikül ve hidrokarbon emisyonlarını azaltacağı aşîkardır. Bu sebeple, karbonmonoksit ve hidrokarbon emisyonları ölçülerek, seramik kaplamanın bu emisyonlara etkisi de kısaca incelenmiştir.

Seramik kaplı motorun egzoz enerjisinde belirgin bir artış belirlenmiştir. Bu kayıp enerjinin bir kısmının bir takım sistemlerin ilavesiyle faydalı işe dönüştürülebileceği yukarıda vurgulanmıştır. Egzoz enerjisinin ne kadarının faydalı işe dönüştürülebileceğinin belirlenmesi için egzoz gazlarının kullanılabilirlik (ekserji) hesaplamaları yapılmıştır. Çalışmada, deneysel veriler esas alınarak, egzoz gazlarının kullanılabilirliği modellenmiş farklı yük ve devir sayısı şartları için elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.



BÖLÜM 2

TERMAL SPREY KAPLAMALAR VE MOTORLARA UYGULANMASI

Termal sprej kaplama teknolojisindeki ilk çalışmalar, 1920'li yıllarda S.M.U. SHOOP tarafından gerçekleştirilmiştir. Önceleri bir eriyik metal sıvısının püskürtülmesini kapsayan yöntem, daha sonraları çok hızlı bir şekilde gelişme göstermiştir. Bu yöntemlerde, kaplama işlemleri esnasında eriyen partiküller yüksek bir hızla malzeme yüzeyine püskürtülerek malzeme yüzeyinde tabakalı bir yapı meydana getirirler. Püskürtülen partiküllerin erime ve katılaşma gibi fiziksel dönüşümleri işlem esnasında meydana gelir. Termal sprej kaplama teknolojisi, endüstriyel olarak ilk defa 1939 yılında Reinecke tarafından uygulanmış ve daha sonra Amerikan şirketleri tarafından geliştirilmiştir. Bu teknolojiyle üretilen malzemeler üniversal bir karaktere sahip olduklarında, yeni sprej teknikleri geliştirilmiş ve böylece çok geniş bir aralıktaki malzemelerin kaplanması mümkün olmuştur [50,51].

2.1 Termal Sprej Kaplama Yöntemleri

Günümüzde endüstride yaygın olarak kullanılan termal sprej yöntemleri olarak; alevle toz ve tel sprej, elektrik ark sprej, detonasyon tabancası tekniği, yüksek hızlı oksiyakıt sprej (YHOYS) ve plazma sprej sayılabilir. Termal sprej kaplama teknolojisi, başta uçak ve uzay sanayi ile otomotiv sektörü olmak üzere tekstil, kağıt ve madencilik endüstrilerinde, tıbbi uygulamalarda ve malzeme bilimi ile metalurjide kullanılmaktadır. Tablo 2.1'de termal sprej yöntemlerinde kullanılan kaplama malzemeleri ve uygulama alanları verilmekte, Tablo 2.2'de termal sprej yöntemleri karşılaştırılmakta, Şekil 2.1'de ise termal sprej kaplama teknikleri sınıflandırılmaktadır.

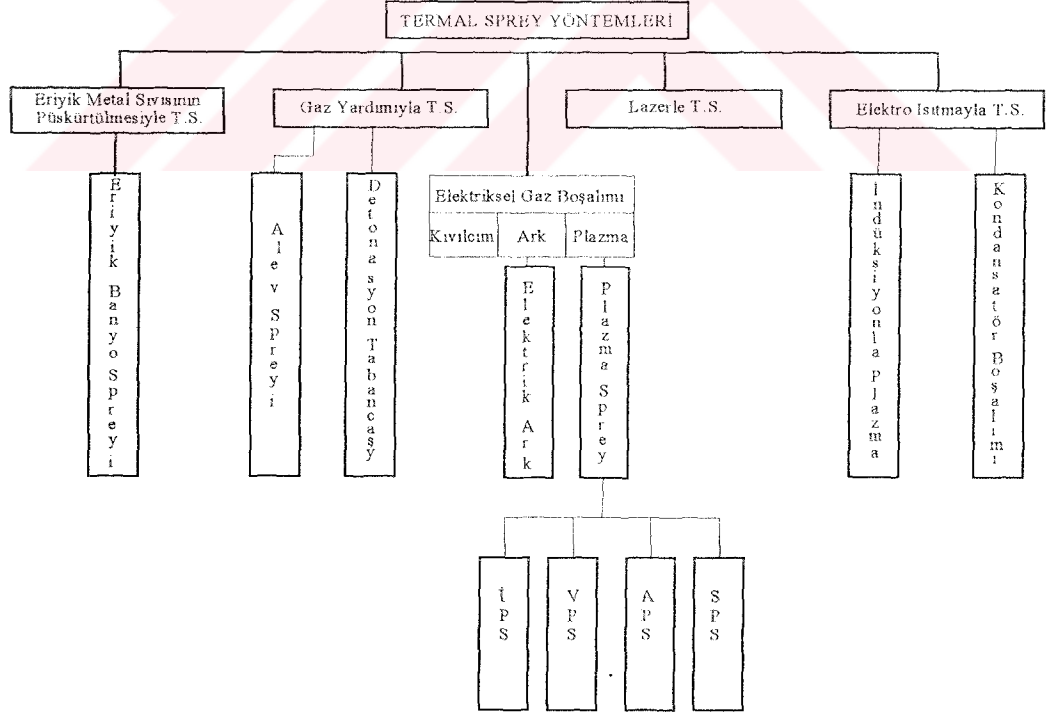
Tablo 2.1 Termal spreyci yöntemlerinde kullanılan kaplama malzemeleri ve bu yöntemlerin başlıca uygulama alanları [52].

Yöntem	Kaplama Malzemeleri	Uygulama Alanları
Alevle Toz Sprey	Paslanmaz ve normal çelik, Ni-Cr Alaşımları, Bronzlar, Co Alaşımı, Seramikler (Al_2O_3 , Cr_2O_3 v.s.)	Otomotiv: Rulman yatakları, mil muyluları, kompresör pistonları, kam milleri, burç ve kovanlar.
Alevle Tel Sprey	Paslanmaz ve normal çelik, Mo, Zn, Cu, Al, bronz alaşımı	Otomotiv: Hidrolik piston milleri, mil muyluları, kompresör pistonları, kam milleri, piston segmanları ve millerin aşınma yüzeyleri.
Elektrik Ark Sprey	Paslanmaz ve normal çelik, Mo, Zn, Cu, Al, bronz alaşımı	Otomotiv: Krank milleri, debriyaj baskı plakaları, yatak ve şaft aşınma yüzeyleri. Kağıt sanayi: Kurutma silindirleri. Demir çelik: Silindir ve rulolar.
Detonasyon Tabancası	NiCrMo ve NiCr, CoCr, Al_2O_3 WC-Co, Al_2O_3 -Ti - O_2	Matbaa sanayi: Merdaneler. Uçak sanayi: Gaz türbin motor parçaları. Demir çelik: Çelik merdaneler. Otomotiv: Yataklar. Tekstil: Tekstil makina parçaları.
YHOYS	WC, Cr_3C_2 , NiCrAl, Paslanmaz çelik, Süper alaşımlar.	Uçak sanayi: Türbin kanatları. Kağıt: Sıyırıcı bıçaklar. Tekstil: Polimer bıçakları. PSV: Tel çekme makaraları. Petrokimya: Salmastra burçları, Piston rodları, sürgülü vanalar.
Plazma Sprey	Paslanmaz ve normal çelik, seramikler (Al_2O_3 , ZrO_2 , Cr_2O_3), karbürler (Wc-Co Cr_3C_2 -NiCr), sermetler, Süper alaşımlar.	Uçak: Yanma odası, türbin kanatları Savunma: Roket nozulları. Kağıt: Kurutma silindirleri, salmastra burçları Tekstil: Mekikler, iplik kılavuzları. Otomotiv: Yanma odası parçaları.

Tablo 2.2 Termal sprej kaplama tekniklerinin karşılaştırılması [53].

Yöntem	Alev Sprey	Elektrik Ark Sprey	Detonasyon tabancası	YHOYS	APS*	VPS**
Gaz Sıcaklığı (°C)	3000	-	4000	3000	12000	12000
Partikül Hızı (m/s)	40	100	800	800	200-400	400-600
Yapışma Mukavemeti (MPa)	8	12	>70	>70	4-70	>70
Oksit İçeriği (%)	10-15	10-20	1-5	1-5	1-3	ppm
Porozite (%)	20-15	10	1-2	1-2	1-5	<0,5
Sprey Hızı (kg/h)	2-6	1-2	0,5	2-4	4-9	4-9
Kaplama Kalınlığı (mm)	0,1-1,5	0,1-50	0,05-0,3	0,1-2	0,1-1	0,1-1

* Atmosferik plazma Sprey, ** Vakum plazma Sprey.



Şekil 2.1 Termal sprej kaplama tekniklerinin sınıflandırılması [50].

2.1.1 Alevle tel sprej

Bu yöntem, tel halinde ve ergime sıcaklığı oksijen-asetilen alev sıcaklığından daha düşük olan bir metalin ergimiş halde kaplanacak yüzeye püskürtülmesinden ibarettir. Bu yöntem, metalik olan sprej malzemesiyle metalik kaplamalar için kullanılabilir [54]. Kaplama malzemesi olarak kullanılan metal tel, sprej tabancasının nozulundan geçerken bir oksijen ve yanıcı gaz aleviyle eritilmektedir. Yakıcı gaz olan oksijenin yanında kullanılan yanıcı gazlar; asetilen, propan ve hidrojen'dir. Yöntemin avantajları olarak; nispeten düşük ekipman maliyeti, yüksek sprej hızları ve tel çapları için adapte edilebilmesi sayılabilir. Diğer yöntemlere göre elde edilen kaplama yoğunluklarının ve yapışma mukavemetinin düşük olması başlıca dezavantajıdır. Tablo 2.3'de alevle sprej kaplamalarda kullanılan gazların özellikleri verilmektedir.

Tablo 2.3 Alevle sprej gazları [55,56].

Gaz Karışımı	Alev Sıcaklığı (°C)	Isıl Değeri (kJ/m ³)	Tutuşma Hızı (cm/s)	Alev Verimi (kJ/cm)
Oksijen-Asetilen	3200	56430	1350	45
Oksijen-Hidrojen	2650	10740	890	11
Oksijen-Propan	2850	93423	370	14

2.1.2 Alevle toz sprej

Bu yöntemde, mikro-pulverize toz alaşımları oksijen ile vakum yapılarak oksijen-asetilen alevi içerisinde kaplanacak yüzeye püskürtülür. Kaplama işlemi esnasında alev sıcaklığı 3300°C ve iş parçasının sıcaklığı ise 200°C civarındadır. Yüksek alaşımlı ve kendinden yağlamalı NiCrBSi malzemelerinin kaplama tozu olarak kullanılması, çubuk veya tel formunda üretilmeyen malzemelerin kaplanmasının mümkün olması, yöntemin başlıca avantajlarındandır. Alevle toz sprej yöntemi başta seramikler olmak üzere, metaller ve sermetlerin (metal + seramik oksit karışımı) kaplama malzemesi olarak püskürtülmesinde uygundur [54,55].

2.1.3 Elektrik ark sprey

Tel halindeki metallerin püskürtülmesinde kullanılan diğer bir yöntemdir. Bu yöntemde, metal tel tabanca içerisine sürülür. Pozitif ve negatif kutuplarla yüklenmiş nozullardan geçen teller birbiri ile temas edince ark meydana gelir. Ark etkisiyle eriyen metal, basınçlı hava ile önceden hazırlanmış yüzeye püskürtülür ve böylece kaplama işlemi gerçekleştirilir.

2.1.4 Detonasyon tabancası tekniği

Bu yöntemde kaplanacak toz tanecikleri yanma odasında oksijen asetilen karışımının infilak ettirilmesiyle ergime sıcaklığına kadar ısınır ve kaplanacak malzeme üzerine püskürtülerek kaplama işlemi gerçekleştirilir [10,57].

Literatürde detonasyon tabancası tekniği adıyla anılan bu yöntemde, sprey hızı 900 m/s, sıcaklık ise 4000 °C'ye kadar çıkabilir ve oksijen asetilen karışımıyla oluşan infilak saniyede 4-8 kez tekrarlanmaktadır [58].

Detonasyon tabancası tekniğinin başlıca avantajları şöyle sıralanabilir [10] :

- Detonasyon tabancasının dizaynı basit ve servis ömrü uzundur,
- Bu teknikle düşük poroziteli ve yüksek bağ mukavemetli kaplamalar elde edilebilir,
- Bu sistemde sıcaklık ve toz hızı değiştirilebilir,
- Detonasyon tabancası tekniği kaplama kalınlığını artırmaya imkan sağlar.

Detonasyon tabancası tekniğinin dezavantajları ise aşağıda verilmiştir :

- Periyoda, çevrime sahip bir işlem olduğundan stabilizasyonu ve kaplama ürünlerinin izlenmesini engeller,

- Sistem çok sesli çalıştığından ses yalıtımına ve kullanıcı personelin güvenliğini sağlayıcı önlemlere gerek vardır,
- Detonasyon ürünleri kompleks, çok sayıda parça ve elemanlarıyla reaktif olup bu durum üretimle ilgili sınır değerleri ve ölçüm ayarlarını etkiler,
- Kaplanacak parçaların distorsiyona uğrama olasılığı fazladır, kaplamanın gerçekleştirilebilmesi için, kaplanacak malzemenin tozların çarpmasına karşı yeterince dayanıklı olması gereklidir.

2.1.5 Yüksek hızlı oksî-yakıt sprey (YHOYS)

Bu metot, yüksek yoğunluğa ve yapışma mukavemetine sahip kaplamalar elde edilmesi amacıyla geliştirilmiştir. Bu yöntemde püskürtülecek malzeme genellikle toz halindedir. Hiper hızlı YHOYS tabancasının yanma odasında yakıt, gaz halinde (Propan, Propilen, Hidrojen, Kenosen, Asetilen) oksijen ile devamlı olarak yanar. 2500-3000 °C sıcaklık aralığındaki bu ortama beslenen toz halindeki kaplama malzemesi, yanıcı gaz basıncı etkisiyle, 350-500 m/s hızla kaplanacak malzeme yüzeyine püskürtülür. Bu yöntemin avantajları arasında; yoğun, iyi yapışmalı ve sert kaplamaların eldesinin mümkün olması ile yüksek sprey hızı sayılabilir. Dezavantajları ise; aşırı gaz tüketimi ve çalışma parçasının diğer yöntemlere nazaran daha fazla ısınmasıdır [47].

2.1.6 Plazma Sprey Kaplama Yöntemi

Plazma, eşit sayıda serbest elektron ve pozitif iyon bulunduran, genellikle maddenin dördüncü hali olarak adlandırılan yoğunlaştırılmış bir gazdır. Plazmanın başlıca iki önemli avantajı vardır. Birincisi, bilinen bütün malzemeleri eritebilecek derecede yüksek sıcaklık eldesinin mümkün olması, ikincisi ise diğer malzemelere daha iyi ısı transferi sağlamasıdır [59]. Plazma sprey tekniğinin yüksek işlem sıcaklığı, ergime noktası yüksek metal ve alaşımlarla çalışmaya imkân sağlamaktadır. Ayrıca, inert ortamlarda kullanılabilmesi yöntemin avantajlarındanır. Toz formunda ve belirli tane boyutlarında üretilen tüm malzemeler bu işlemde başarıyla kullanılabilmektedir.

Plazma sprej yöntemiyle gerçekleştirilen seramik kaplamalar birçok metalden daha iyi aşınma ve erozyon direncine sahiptirler ve dizel motorları da dahil erozyon ve aşınma dirençli uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar. Bununla beraber, alevle sprejdeki kadar olmasa da, poroziteler nedeniyle plazma sprejle oluşturulan kaplamalar korozyon için yetersiz kalabilmektedir.

Plazma sprej kaplama yöntemi, metallerin çeşitli tozlarla kaplanarak aşınmaya, oksitlenmeye, korozyona ve ısıya dayanıklı hale getirilmesinde yaygın olarak kullanılan bir termal sprej kaplama yöntemidir. Bu yöntemle gerçekleştirilen ince bir kaplama sayesinde belirtilen özellikler elde edildiği gibi, ana malzemenin üstün özelliklerinden tokluk ve kolay şekillendirilebilme özellikleri de korunmaktadır. Böylece plazma sprej kaplama, metal ve seramiklerin üstün özelliklerinin yeni bir malzemede toplanmasına imkan sağlamaktadır.

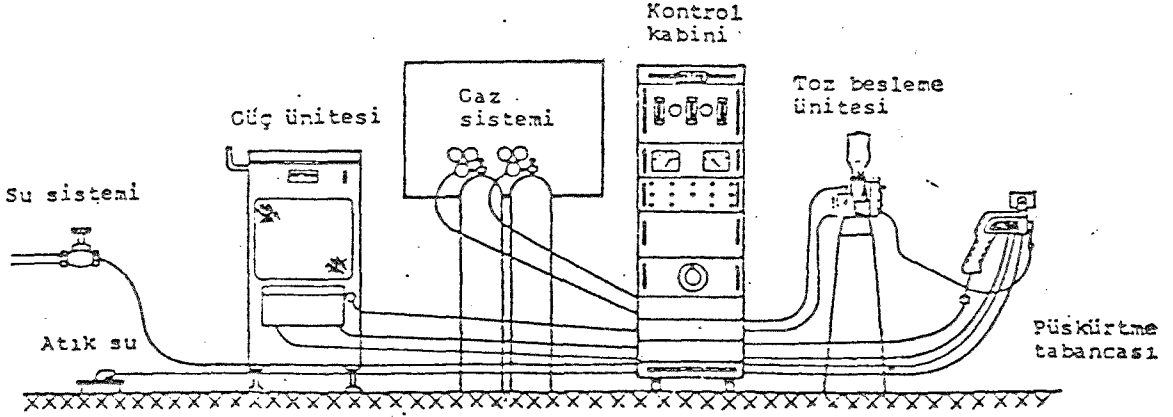
Bu yöntem, özellikle 1960'lı yıllardan itibaren başta havacılık sektörü olmak üzere değişik endüstri kollarında hızlı bir kullanım alanı bulmuştur. Buna karşılık yöntemin bilimsel ve teknik manada analizi, kavranması ve geliştirilmesi aynı hızda olmamıştır. Bu durum; yöntemi kontrol eden parametrelerin sayısının çok fazla (100 civarında) olmasından kaynaklanmaktadır [60].

Plazma kaplama sistemi

Plazma sprej tekniğindeki ana düşünce; pahalı olmayan bir ana malzeme üzerine ince ve koruyucu değeri yüksek bir tabaka meydana getirmektir. İşlem, iyonize olmuş bir gaz içinde erimiş olan toz formundaki malzemenin, kaplanacak yüzeye çok hızlı bir şekilde püskürtülmesi şeklinde uygulanmaktadır. Plazma kaplama sistemi;

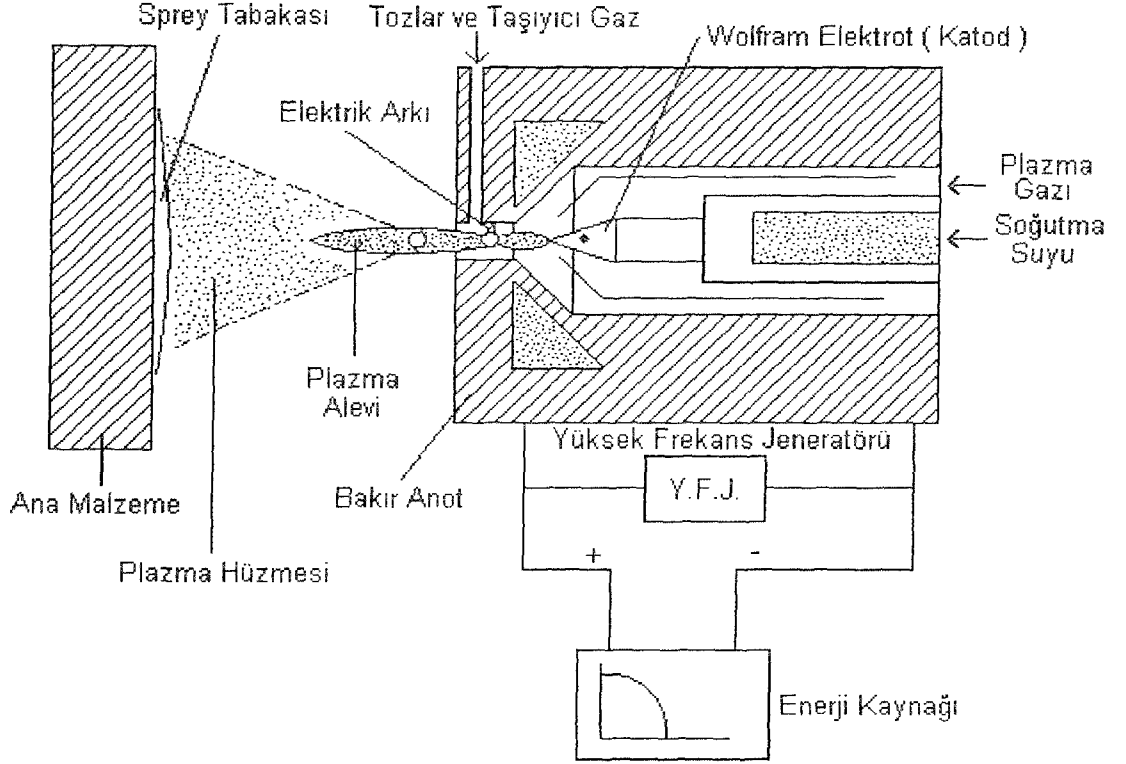
- Sprej tabancası (plazma üfleci),
- Güç ünitesi,
- Gaz besleme ünitesi,
- Toz besleme ünitesi,

- Soğutma ünitesi ve
- Kontrol ünitesinden meydana gelmektedir. Plazma Kaplama Sistemi Şekil 2.2'de şematik olarak verilmiştir [61].



Şekil 2.2 Plazma sprej kaplama sisteminin şematik gösterilişi

Sprej tabancası, kaplama sisteminin en önemli çalışma ünitesidir ve Şekil 2.3'de şematik olarak verilmiştir. Anot olarak saf Cu ve katot olarak da %2 ThO₂ katkılı W'ın kullanıldığı tabancada plazma, bu iki elektrot arasındaki elektrik arkında plazma gazlarının iyonizasyonu ile elde edilir. Kullanılan plazma gazları, katotun etrafından ve aynı zamanda nozul görevini de gören anodun içerisinden geçirilir. Doğru akım arkı, genellikle yüksek frekans akışı ile başlar ve elektrotlar ile devam eder. Katot boyunca verilen plazma gazı, bu ark içerisinde ısıtılmakta ve plazma sıcaklığına erişen gaz, nozul anottan plazma alevi olarak püskürtülmektedir. Ark akımı ve voltajı: anot/katot dizaynı, gaz akış hızı ve gaz bileşimi gibi değişkenlere bağlı olarak değişmektedir. Ark genelde, anot-katot temasıyla ateşlenir. Uygulamada nötr plazma gerektiği için, anot boş bir nozul şeklinde dizayn edilmiş ve ark devresinin nozul içinde tamamlanması sağlanmıştır. Böylece, serbest halde elde edilen plazma, elektrik akımını iletmemektedir [62,63]. Kaplama işleminde gerçekleşen bütün olaylar (disosyasyon, iyonizasyon, plazma hali gibi) sprej tabancası içerisinde meydana gelmektedir.



Şekil 2.3 Plazma sprej tabancasının şematik görünüşü [66]

Tabancaya beslenen plazma gazları, yüksek gerilim veya yüksek frekans yardımıyla tutuşturulur. Plazma gazları, kaplama tozları, çalışma voltajı ve arkı ile ilgili bütün ayarlamalar kontrol ünitesinde manuel olarak veya bilgisayar yardımıyla yapılır.

Plazma spreyle üretilen kaplamaların özellikleri ile güç ünitesinin kapasitesi arasında önemli bir ilişki mevcuttur. Plazma sprej işleminde ana malzeme üzerine püskürtülen partiküllerin hızı, güç kaynağının gücüne bağlıdır. Konvansiyonel kaplama sistemlerinin gücü 40 kW iken günümüzde 80 ve 120 kW'lık sistemler kullanılmakta ve bu sayede partikül hızı artırılarak porozitesi düşük, üstün mekanik özellikli yoğun kaplamalar elde edilmektedir [64].

Plazma gazlarını oluşturan N_2 , Ar, H_2 ve He'un işlem parametrelerine uygun karışımları ve akış hızları, gaz besleme ünitesinde ayarlanır. Bu şekilde plazma hüzmesinin sıcaklığı, büyüklüğü ve arkın stabilizasyonu kaplama tozlarına bağlı olarak kontrol edilmiş olur.

Toz besleme ünitesi, kaplama tozunun Ar taşıyıcı gazı yardımıyla plazma hüzmesine pnömatik olarak beslenmesini sağlar. Tozun özelliklerine (tane boyutu, özgül ağırlığı ve şekli) göre optimum sprej parametreleri seçilmektedir [65].

Plazma kaplama teknolojisinin fiziksel esasları

Plazma, eşit sayıda serbest elektron ile iyon bulunduran ve genellikle maddenin 4. hali olarak adlandırılan yoğunlaştırılmış bir gazdır. Langmuir'e göre ise plazma terimi; içerisinde molekül, atom, iyon, elektron ve kuantum bulunduran malzemenin iyonize edilmiş halini ifade eder [67].

Plazma oluşturmak amacıyla yaygın olarak kullanılan gazlar tek atomlu Ar ve He ile iki atomlu N_2 ve H_2 'dir. Bu gazlara ait temel fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 2.4 'de verilmiştir. Plazma oluşturunca olarak hangi gazın seçileceği, plazma alevi için arzulanan sıcaklık ve hız değerleri ile kaplama malzemesi ve ana malzemenin kararlılıklarına bağlıdır [68].

Plazma gazları tek tek kullanılabildikleri gibi çoğunlukla belli oranlarda karışımlar halinde kullanılırlar. Burada amaç, plazma alevinin entalpisini ve hızını artırmaktır. $Ar+H_2$ ve $Ar+N_2$ sistemleri, yaygın olarak kullanılan gaz karışımlarıdır.

Plazma kaplamaların oluşum işlemi, sprej tabakalarının özelliklerini etkileyen birkaç kademedir meydana gelir. Plazma alevinin yüksek ısı ve kinetik enerjisi, kullanılan tozun ergitilmesini ve ana malzemeye doğru hareketini mümkün kılar. Plazma tabancasına tozun gönderilme biçimi ile tozun şekli ve granülitesi, belli bir hızdaki partiküllerin hareketini etkiler. Plazma alevi ile ergimiş malzeme ve ortam atmosferi arasındaki etkileşim; partiküllerin fiziksel olarak ergime ve kimyasal olarak dönüşüm şeklini etkiler. Ergimiş partiküllerin ana malzeme yüzeyine çarptığında mevcut olan mekanik, kimyasal ve termal şartlar; kaplamanın karakter ve özelliklerini büyük ölçüde etkiler.

Taşınm özellikleri, toz partiküllerinin şekli ve boyutuyla ilişkilidir. Toz boyut dağılımı mümkün olduğunca üniform, şekli ise küresel olmalıdır. Çünkü, plazma alevinde daha ince tozlar buharlaşmaya, iri tozlar ise tam olarak erimemeye neden olurlar. spreyl tozlarının tamamen eriyebilmesi, ancak plazma tabancasının anod ile katodu arasındaki ark bölgesine beslenmeleri ile mümkün olur. Günümüzde kullanılan sistemlerin büyük bir kısmında toz, reaktif olmayan bir gaz vasıtasıyla, nozul dışında plazma alevine radyal olarak enjekte edilmektedir [59,66].

Tablo 2.4 Plazma gazlarının temel fiziksel ve kimyasal özellikleri [68]

ÖZELLİK	PLAZMA GAZLARI			
	Ar	He	N ₂	H ₂
Relatif molar ağırlık	39,944	4,0002	28,016	2,0156
Özgül ağırlık (0 °C, 15 K, 100 kPa'da) (kgm ⁻³)	1,783	0,1785	1,2505	0,0898
Isıl iletkenlik katsayısı (0 °C 'da) (W/m.K)	0,01633	0,14363	0,0238	0,1754
Özgül ısı kapasitesi (20 °C 'da) (kJ/kg.K)	0,511	5,233	1,046	14,268
İyonizasyon potansiyeli (V)				
İlk kademe	15,7	24,05	14,5	13,5
Son kademe	27,5	54,1	29,4	-
Sıcaklık (K)	14 000	20 000	7300	5100
Ark voltajı (V)	40	47	60	62
Ark girişi (kW)	-	50	65	120

Plazma alevinin eksenine dik olarak enjekte edilen bir toz partikülü birçok faktörün belirlediği bir hareket mekanizmasına sahiptir. Ana malzemeye doğru hareket halindeki partikül alevi, belli açılı konik bir şekle sahiptir. Bu açı, plazma alevine partiküllerin beslenme hızının, partikül boyutunun, plazma alev hızı ile dağılımının bir fonksiyonudur. Ayrıca, plazma tabancasıyla ilgili olan tabanca tipi, toz besleyici ve ark randımanı gibi faktörlerde partiküllerin plazma alevindeki hareket mekanizmasını etkiler.

Plazma alevine beslenen toz partikülleri, alevin ısı ve kinetik etkileri sayesinde erir ve ana malzeme yüzeyine püskürtülür. Plazma alevinden toz partikülüne ısı transfer mekanizması çok kompleks bir olaydır ve bugüne kadar tam olarak anlaşılamamıştır. Plazma alevinde eriyen toz partikülleri, yüksek kimyasal aktiviteye sahiptirler. Dolayısıyla, partiküller ile ortam atmosferini oluşturan gazlar arasında; gaz adsorbsiyonu, kimyasal etkiler, oksit tabakalarının oluşumu ve difüzyon işlemleri gibi birçok karşılıklı etkileşim mekanizması söz konusudur [66].

Plazma alevindeki erimiş partiküller ana malzeme yüzeyine çarptığı zaman kinetik enerjileri ısı ve deformasyon enerjisine dönüşür. Partiküller ana malzemeyle temas ettiklerinde ısılarını yüzeye aktarır hızla soğur ve katılırlar. Partiküllerin o andaki davranışları sıcaklıklarına, hızlarına ve soğuma oranlarına bağlıdır.

Plazma alevindeki hareket esnasında yüzey gerilimi nedeniyle küresel şekle sahip oldukları düşünülen erimiş partiküller, ana malzeme yüzeyine çarptıklarında ısı ve kinetik enerjilerini kaybederek deforme olurlar ve sonra 5-15 μm kalınlığında lameller şeklinde katılırlar. Deformasyon miktarı ve dolayısıyla lamellerin şekli: erimiş partiküllerin viskozitesi ve ıslatılabilirliği, toz granülitesi ve ana malzeme yüzeyinin karakteri gibi birçok faktöre bağlıdır [69].

Plazma alev sıcaklığının çok yüksek olması ile mevcut fiziksel ve kimyasal işlemler, erimiş malzemede birçok dönüşüme neden olur. Toz partiküllerinin ortam ve plazma gazları ile reaksiyonunun sonucu olarak, kaplama tabakalarında oldukça yüksek oranlarda oksit oluşmaktadır. Ayrıca az miktarda N_2 'da bulunur [70].

Plazma sprej kaplamaların temel özellikleri

Plazma sprej kaplamalar, aynı tozdan üretilmiş kompakt malzemelere göre birçok farklı özelliğe sahiptir. Bu kaplamaların O_2 ve N_2 içerikleri yüksek, yoğunluk ve plastisiteleri ise düşüktür [71].

Plazma alevinde eriyen partiküller, yüzey gerilimlerinin sonucu olarak küresel şekillerde bulunur. Ergimiş partiküller, sıvı damlacıkları halinde ana malzeme yüzeyine çarptığı anda katılaşarak lamelli bir kaplama tabakası meydana getirirler. Plazma kaplamalarda katılaşma hızı 10^6 °C/s olup, soğuma hızına bağlı olarak kristalin veya amorf yapılarda katılaşma olur. Kaplamaların yapısı heterojen olup, yarı kararlıdır ve genellikle birbirine yapışmış halde bulunan farklı boyutlu tanelerden meydana gelir. Erimiş partiküllerin oluşturduğu kaplamalar, tabakalı bir yapıyla karakterize edilir.

Porozite, plazma sprej kaplamaların karakteristik bir özelliğidir ve yapısal göstergesidir. Viskozitesi yüksek tozlar ve yüksek güçlü plazma üniteleri kullanılarak daha yoğun bir kaplama tabakası elde edilebilir. Gevrek ve sert tozlardan elde edilmiş kaplamalar yüksek porozite oranlarına sahiptirler. Ancak, uygun toz granülitesi ve sprej parametreleri seçildiğinde, sert tozlardan bile yoğun bir kaplama eldesi mümkün olmaktadır. Özellikle, kaplamaların mekanik özellikleri üzerine olumsuz bir etkiye sahip olan yüksek porozite miktarı, termal izolasyon ve filtrasyon gibi uygulamalar için arzu edilen bir durumdur [72]. Yüksek poroziteli kaplamalar, uzun sprej mesafesi ve iri taneli tozlar kullanılmak suretiyle kolaylıkla elde edilebilir.

Plazma kaplamalarda iki tip porozite mevcuttur. Birincisi, çökeltilmiş partiküller arasındaki boşlukların tam olarak doldurulamaması nedeniyle yapıdaki kusurlarla birleşmiş iri (açık) porozitedir. Diğeri ise, kaplamaların doğal bir özelliği olan ince porlar(mikro boşluklar)'dır [73]. Plazma sprej kaplamaların yoğunluğu, aynı tozlardan yapılmış kompakt malzemelerin yoğunluğundan düşüktür ve genellikle teorik yoğunluğun %85-93'ü arasında değişir.

Kaplamanın ana malzemeye yapışması, plazma sprej kaplamaların en önemli özelliklerinden birisidir. Yapışma, mekanik olarak (genellikle seramik esaslı kaplamalar), Vander Waals kuvvetleri (genellikle metal esaslı kaplamalar) ve difüzyon işlemleri ile gerçekleşir. Ana malzeme ile metalik bağlanma göstermeyen seramik kaplamalar, kırılğan yapıları nedeniyle, metal esaslı kaplamalara nazaran daha düşük yapışma mukavemetine sahiptirler [74]. Bütün kaplamalarda yapışma mukavemeti, artan kaplama kalınlığı ile birlikte düşer.

Plazma spreyl kaplamalarda, kaplama işlemi esnasında kaplamanın çatlamasına veya ana malzemeden ayrılmasına yol açan basma ve çekme iç gerilmeleri meydana gelmektedir. Bu iç gerilmelere; spreyl malzemesinin üniform olmayan dağılımı, kaplama ile ana malzeme arasındaki termal genleşme farklılığı, ana malzemenin üniform olmayan bir şekilde ısıtılmasıyla yine ana malzemenin şekil ve boyut özellikleri neden olmaktadır. Ara tabaka uygulaması ve spreyl esnasında ana malzemenin ön ısıtılması veya soğutulması ile bu iç gerilmeler azaltılabilir [62]. Kaplamanın mukavemetini etkileyen temel parametre kaplama kalınlığıdır. Artan kaplama kalınlığı, iç gerilmeleri artıracığından, kaplamanın ana malzemeden ayrılmasını kolaylaştırmakta, yani mukavemeti düşürmektedir. Ayrıca, kaplamanın elastisite modülündeki artışlar ile yüksek porozite ve oksit içerikleri, mukavemeti olumsuz yönde etkileyen diğer parametrelerdir [75].

Sertlik, plazma spreyl kaplamaların diğer önemli bir özelliğidir ve kullanılan kaplama tozuna bağlı olarak 200-1500 HV arasında değişir. Kaplama tabakalarının sertliği; porozite, tabakanın heterojen yapısı ve uygulanan yük değerine bağlıdır.

Yüksek sıcaklıklarda çalışan roket nozulları ve gaz türbinlerinin yanma odalarında kullanılan seramik kaplamaların gösterdiği termal genleşme davranışları, bu tip uygulamalarda, kaplamalardan beklenen performansın elde edilmesinde bilinmesi gerekli en temel özelliktir [76].

Genellikle metalik ana malzemenin termal genleşme katsayısı, seramik kaplamanın termal genleşme katsayısından daha büyüktür. Termal genleşme katsayıları arasındaki fark ne kadar küçükse, kaplama-ana malzeme uyumu o derece iyi olmaktadır. Kaplama-ana malzeme sistemi düşünüldüğünde, termal genleşme davranışı açısından iki durum söz konusu olabilir [77].

- $(\alpha)_{\text{kaplama}} > (\alpha)_{\text{ana malzeme}}$
- $(\alpha)_{\text{kaplama}} < (\alpha)_{\text{ana malzeme}}$

İlk durumda, kaplama-ana malzemeye oranla daha fazla genişleyeceğinden, çekme yükleri altında kalacak ve eğilecektir. Bu ise kaplamada çatlak oluşumuna neden olur. Diğer durumda, ana malzemenin termal genişleme katsayısının daha büyük olması nedeniyle, ana malzemeye termal olarak uyum sağlayamayan seramik kaplama kırılacaktır. Kaplamaların kullanım potansiyelini azaltan bu tip termal uyumsuzluklar, ara tabaka uygulanması veya çok katmanlı kaplamalar oluşturulmasıyla giderilebilir.

Plazma sprej kaplamalarda ısı transferi; metal partiküllerinin elektronları, metal olmayan malzemeler için partiküllerdeki latis veya foton termal iletkenliği, kaplamada mevcut porlardaki yayılmış fotonlar ve hapsedilen gazın ısı iletkenliği sayesinde gerçekleştirilir. Kaplamaların termal iletkenlik katsayıları, kompakt malzemelere nazaran daha düşüktür. Kaplamaların düşük veya minimum termal ve elektrik iletkenlik değerleri, bazı uygulamalar için gereklidir. Bu özellikler temel olarak sprej şartları tarafından belirlenir.

Yüzey hazırlama

Yüzey hazırlama, kaplama işleminin en çok dikkat edilmesi gereken kademelerinden birisidir. Kaplamanın ana malzemeye gerektiği gibi bağlanması, ancak kaplanacak yüzeyin iyi bir şekilde hazırlanmasıyla mümkündür. Bu mekanik bağlanmanın yanında, partiküllerin ana malzeme ile mikro kaynaması ve kimyasal bağ oluşumu gibi diğer bağlanma mekanizmaları da mevcuttur. Bütün bu bağlanma mekanizmaları, temas alanının artırılmasını ve yüzeyin aktivasyonunu gerektirir. Güçlü bir kaplama-ana malzeme bağı oluşturmak için gerekli şartlar; yüzey üzerindeki nem, yağ ve oksit filmlerinin kaldırılması ve uygun bir yüzey pürüzlülüğünün sağlanmasıdır. Uygulanacak kaplamanın cinsine ve kalınlığına bağlı olarak seçilen birçok yüzey hazırlama yöntemi mevcuttur.

Mekanik işleme, özellikle merdane ve şaft gibi dairesel şekilli makina parçalarının yüzeylerinin oluk şeklinde pürüzlendirilmesinde kullanılan bir metottur. Ana malzemenin talaş kaldırılabilir kadar yumuşak olmasının zorunlu olduğu mekanik

işlemede; çok sert, kırılgan ve kompleks geometrili yüzeylerin hazırlanması mümkün değildir. Bu metot, özellikle 500 µm'nin üzerindeki kalın kaplamalar için uygundur.

Üretimleri veya kullanımları sonucu yüzeylerinde yağ ve gres bulunan makina parçalarının kaplanmasında birçok problemle karşılaşılır. Ana malzemenin gözenekli bir yapıya sahip olduğu durumlarda ise, gözeneklere dolan yağ kaplama esnasında buharlaşır ve kaplama tabakalarının yapışma mukavemetini önemli ölçüde düşürür. Ana malzeme yüzeyinden yağları uzaklaştırmak için uygulanan en yaygın yol, kimyasal çözücüler kullanmaktır. Mineral yağlar, parçaların yıkanması veya aseton gibi kimyasal çözücüler kullanılmasıyla kaldırılabilir.

Üzerlerinde mevcut olan yağ, gres ve paslardan temizlenmiş ana malzeme yüzeyleri, bir aşındırıcı kullanılarak pürüzlendirilir. Kumlama adı verilen bu metot, plazma sprey yönteminin keşfinden bu yana sürekli olarak kullanılmış ve halen de kullanılmaktadır.

Kumlamada aşındırıcı olarak dökme demir veya çelik griti, SiC ve Al₂O₃ kullanılır. Ana malzemenin kimyasal bileşimi ve ısıtım işlem koşulları, aşındırıcının türünü, boyutunu ve işlem basıncını belirler. Yumuşak ana malzemeler için çelik veya dökme demir gritler yeterli olurken, sert ana malzemelerde Al₂O₃ veya SiC kullanılır. Kumlamada kullanılan havanın ve kumlama malzemesinin kuru olması gerekir. Ayrıca, kumlama malzemelerinin daha önce başka bir amaç için kullanılmamış olması, yağsız ve temiz olması da önemlidir. İstenen yüzey pürüzlülüğüne, keskin köşeli kumlama malzemeleriyle ulaşılmaktadır. Kumlanmış ana malzemenin yüzeyi pürüzsüz dalgalı olmamalı, keskin değişimli (pikli) olmalıdır. Diğer taraftan aşırı kumlama, piklerin körelmesine ve yüzeyde kum artıklarının kalmasına neden olmaktadır [78].

Ara tabaka uygulaması

Yüzeyleri hazırlanmış metalik ana malzemelerin üzerine bazı özel malzemelerin ara tabaka olarak kaplanmasıyla, daha sonra yapılacak seramik kaplama için uygun bir zemin hazırlanmış olur. İyi bağlanma özelliklerinin yanında ara tabakalar, ana malzeme ile kaplama arasındaki termal genleşme farklılıklarını azaltmak, ana

malzemeyi korozyon, gaz ve yüksek sıcaklık etkilerinden korumak amacıyla da kullanılabilir. Ara tabaka olarak en çok kullanılan malzeme NiAl'dur. En yaygın kullanılanı, %95Ni ve %5 Al içeren kimyasal bir bileşime sahip olan NiAl kompozit tozları, etrafı Ni ile kaplanmış Al partiküllerinden meydana gelir. Kaplama işlemi esnasında Ni ve Al arasında oluşan ekzotermik reaksiyon sonucu açığa çıkan enerji, ana malzeme ile kaplama tabakası arasında metalurjik bir reaksiyon sağlar. Oluşan ara tabaka, NiAl ve Ni₃Al intermetalik bağlarını içerir ve çok düşük porozite ile gaz transferi karşısında yüksek dirence sahiptir. Ara tabakadan beklenen performansın alınması, kaplama kalınlığına bağlıdır ve genellikle 100 µm kalınlık yeterlidir.

Plazma gaz seçimi

Plazma spreyl kaplama yönteminde kullanılacak plazma gazı, kaplama malzemesinin cinsine ve kaplamadan beklenen özelliklere bağlı olarak seçilir. Ayrıca gazın fiyatı da seçimi etkileyen bir başka faktördür. (N₂ + %5-10 H₂) karışımı, minimum maliyet ve kaplama toz partiküllerine maksimum ısı transferi elde etmek için en uygun gaz karışımıdır. Bu karışım, toz malzemeyi çok az etkiler. N₂ ile reaksiyona giren malzemeler kaplanacaksa, bu durumda (Ar + %5-10 H₂) gaz karışımı kullanılır.

Maskeleme

Kaplanacak yüzeyler genellikle bir parçanın belli bir bölümünü oluştururlar. Dolayısıyla, parçanın sadece gerekli kısımlarının kaplanabilmesi için; metal, lastik ve bazı oksit boyalarla maskeleme işlemi kullanılır. Maskeleme, duruma göre kaplama yüzeyinin hazırlanmasından önce veya sonra uygulanır.

Ön ısıtma ve soğutma

Plazma spreyl kaplama yöntemi, soğuk bir işlem olarak bilinmesine ve çoğu uygulamalarda ana malzemenin ön ısıtılmasına ihtiyaç duyulmamasına rağmen, ön ısıtmanın gerekli olduğu birçok durum da söz konusudur. Ana malzemenin ısıtılması için başlıca üç neden vardır:

- Ana malzemeden nemi kaldırmak,
- Bağlanmayı gerçekleştirmek,
- Malzemeler arasındaki farklı termal genleşmeleri dengelemek.

Ön ısıtma sıcaklığı, kullanılan ana malzemeye bağlı olarak 80-320 °C arasında değişir. Kaplama esnasında ana malzeme, yüksek ısı transferi nedeniyle aşırı ısınabilir. Birçok soruna neden olan bu problemi ortadan kaldırmak için, kaplama esnasında ana malzeme basınçlı havayla soğutulur [79].

Kaplama işleminin gerçekleştirilmesi

Yüzey hazırlama, maskeleme, çalışma parametrelerinin ayarlanması, ölçüm aletlerinin hazırlanması, kaplanacak parçanın ilk boyutunun ölçülmesi ve gerekli güvenlik önlemlerinin alınmasından sonra bir sprey tabancası yardımıyla kaplama işlemi gerçekleştirilir.

Yüzeyleri hazırlanmış parçalar, plazma alevine dik olarak yerleştirilir ve sabitlenirler. Yoğun ve iyi kaliteli bir kaplama eldesi için, sprey tozlarının ana malzeme yüzeylerine dik olarak çarpması gerekmektedir.

sprey işlemi esnasında plazma tabancası, elle (manuel) veya otomatik olarak kontrol edilir. El kontrollü tabancayla yapılan kaplama işleminde kaplama kalitesini, doğrudan tabancayı kullanan kişinin el becerisi belirler. Her zaman birtakım problemlere neden olan bu insan faktörünün yerine tabancanın yatay ve dikey hareket edebilen sistemlere veya bir robota bağlanması, uygun bir çözüm olarak görülmüş ve uygulanmıştır.

Plazma kaplama yöntemleri

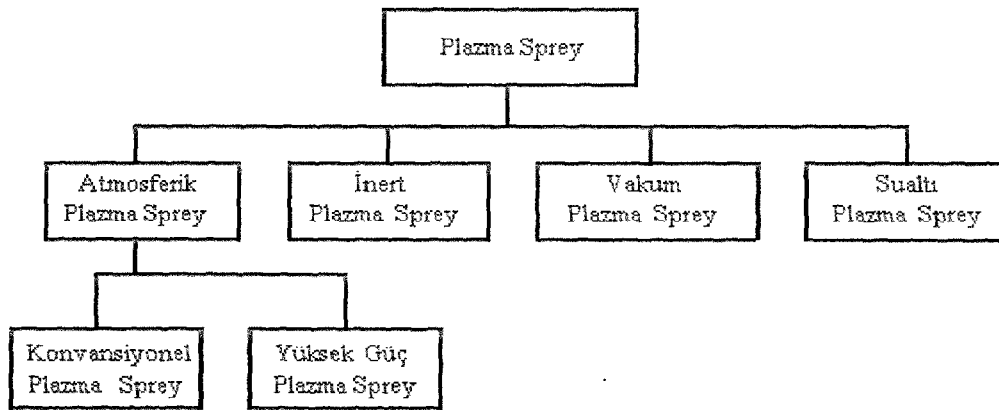
İnert plazma gazları kullanılmasına rağmen atmosferik şartlarda yapılan plazma sprey kaplama işlemi: kaplama alevindeki hareketleri, ana malzemeye çarpmaları ve soğumaları esnasında erimiş partiküller için oksitleyici şartlar oluşturur. Bu durum partiküllerin tam erimemesine, oksitlere, aşırı poroziteye, karbon ve diğer alaşım

elementlerinin yanması ile zayıf bağlanma gibi kaplama hatalarına neden olur. Belirtilen problemleri en aza indirmek için geliştirilen en etkili yol, plazma sprej işleminin koruyucu atmosferlerde yapılmasıdır. Şekil 2.4'de plazma sprej yöntemleri sınıflandırılmıştır.

Atmosferik plazma sprej (APS) hakkında yukarıda detaylı bilgi verilmiştir. İnert plazma sprej (IPS), inert veya koruyucu bir gaz atmosferi altında gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde inert gaz olarak genellikle Ar kullanılır. İnert gaz atmosferi eriyik sprej partiküllerini atmosferin oksitleyici etkisinden korur. Ayrıca atmosferik plazma sprej yöntemiyle kaplanamayan refrakter metaller gibi reaktivitesi yüksek ve parçalanmaya meyilli TiC, TiN veya B4C gibi malzemelerle çalışılma imkanı sağlar.

Vakum Plazma sprej (VPS) yöntemi ise, vakum altında veya düşük basınçlı gaz ortamında gerçekleştirilir. Sprej partikülleri, seyreltilmiş bir ortamdan daha az soğuyarak ve daha az yavaşlayarak geçerler. Dolayısıyla kaplama tabakası, daha yüksek kinetik enerjiye sahip partiküllerle üretilir. Sonuç olarak bu tip kaplamalar, düşük oranlarda porozite ve oksit içerirler.

Plazma sprej teknolojisindeki en son yeniliklerinden birisi de, kaplama işleminin su altında (SPS) gerçekleştirilmesidir.



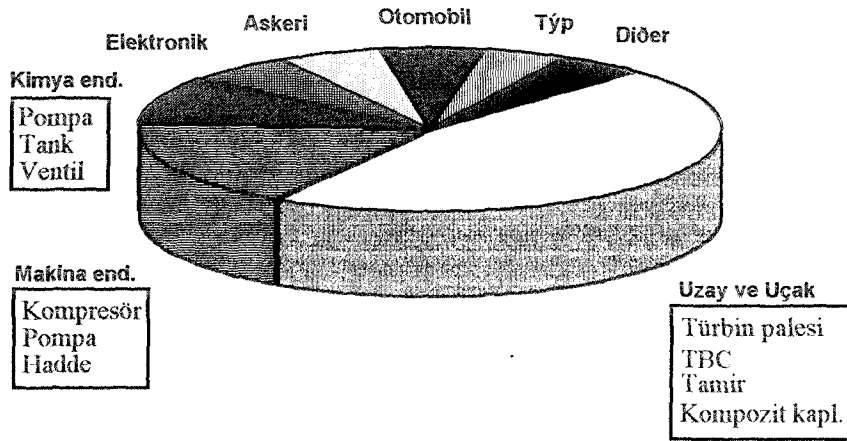
Şekil 2.4 Plazma sprej kaplama yöntemlerinin sınıflandırılması

Kaplamalara uygulanan son işlemler

Plazma sprej yöntemiyle üretilen kaplamalar genellikle yapıları ve içerdikleri poroziteye bağlı olarak karakterize edilirler. Porozite, özellikle termal bariyer uygulamalarında istenmesine rağmen çoğu uygulamalarda kompakt ve düz kaplama yüzeylerine ihtiyaç duyulur. Bu sebeple üretilen kaplamalara: çeşitli vernik ve vakslarla boyama, sıcak izostatik presleme, lazerle ergitme, mekanik işleme ve taşlama gibi son işlemler uygulanır. Ayrıca, kullanım ömrünü uzatmak ve mekanik özellikleri geliştirmek amacıyla kaplamalara ısıl işlem de uygulanabilir.

Plazma sprej kaplamaların uygulama alanları

Plazma sprej yöntemiyle üretilen kaplamalar, endüstride geniş kullanım alanları bulmuştur. Plazma sprej yönteminde, ergime noktası yüksek metal ve alaşımlarla çalışılabilmesi nedeniyle, sayısız kaplama tozlarının ve kombinasyonlarının farklı ana malzemeler üzerine uygulanması söz konusudur. Bu durum, üretilen kaplamaların kullanım potansiyelini artırmaktadır. Şekil 2.5'de kaplamaların kullanıldığı genel endüstri dalları [80,81], Tablo 2.5'de ise uygulama alanına göre aşınmaya dayanım amacıyla kullanılan kaplama malzemeleri ve kaplama işleminin uygulandığı parçalar verilmektedir [82].



Şekil 2.5 Plazma sprej kaplamaların başlıca uygulama alanları [81,82]

Tablo 2.5 Çeşitli endüstrilerde aşınmaya karşı dayanım amacıyla kaplama işleminin uygulandığı parçalar ve kullanılan kaplama malzemeleri [82]

UYGULAMA ALANLARI	KAPLANAN PARÇALAR	KULLANILAN KAPLAMA MALZEMELERİ
Otomotiv	Segmanlar, supaplar, yanma odaları	ZrO ₂ - MgO, Al ₂ O ₃ - ZrO ₂ Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -Y ₂ O ₃
Kimya	Şaftlar, yatak yüzeyleri, borular, brülörler	Al ₂ O ₃ -TiO ₂ ZrSiO ₄ , Cr ₂ O ₃
Tekstil	İplik yönlendirme elementleri, yönlendirme, sarma ve dağıtma silindirleri, germe kasnakları, iplik durdurucuları, iplik kılavuzları	WC-Co Cr ₂ O ₃ Al ₂ O ₃ -TiO ₂
Kağıt ve Matbaacılık	Kağıt kurutma silindirleri, elekler, filtreler	Cr ₂ O ₃ , MnO ₂ Al ₂ O ₃ -TiO ₂
Hidrolik Makinalar	Türbin nozulları, santrifüj pompa gövdeleri, pompa ağızları, piston çubukları	Al ₂ O ₃ Cr ₂ O ₃
Uçak Jet Motorları	Kılavuz yataklar, yakıt nozulları, kompresör bıçakları, yanma odaları	WC - Co Al ₂ O ₃ Al ₂ O ₃ -TiO ₂
Metallurji	Pistonlar, kalıplar, elektrodlar, merdaneler	Al ₂ O ₃ , MgO- ZrO ₂ ZrSiO ₄ Al ₂ O ₃ -TiO ₂

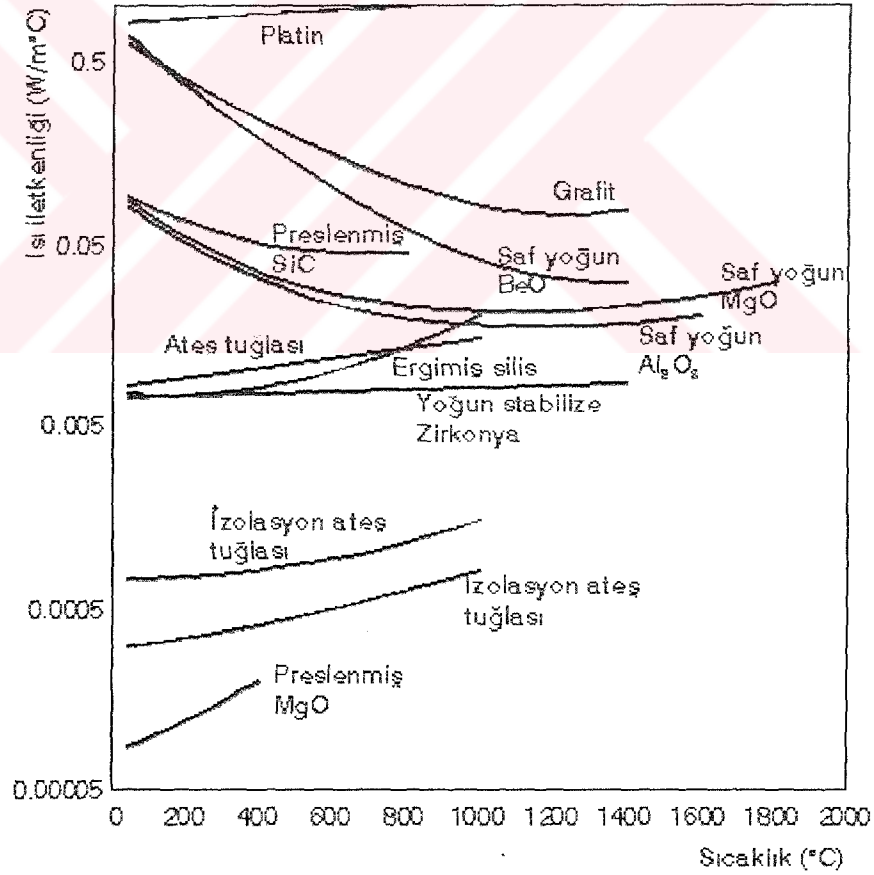
2.2 Seramik Kaplama Malzemeleri

Seramikler, metal ve ametallerden oluşan inorganik bileşiklerdir. Bu malzemeler, geleneksel seramikler ve ileri teknoloji seramikleri olmak üzere iki grup halinde sınıflandırılabilir. Endüstride çeşitli alanlarda kullanılan seramik malzemelerin, kimyasal ve fiziksel kompozisyonları değiştirilerek metallere uygun özellikler göstermeleri sağlanabilmektedir.

Seramik tozları oksit, karbür, nitrür, borür veya karışık formda bulunabilmektedirler. En yaygın kullanılan seramik malzemeleri ise oksit ve karbür formunda olanlarıdır. Oksit formundaki seramikler, diğerlerine kıyasla daha kolay ergidiklerinden daha çok kullanım alanlarına sahiptirler. Şekil 2.6'da çeşitli seramik malzemelerinin ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi verilmektedir [47].

Malzeme özelliklerine göre değişik kullanım alanlarına sahip olan seramiklerin başlıca özellikleri ise aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Yüksek kullanım sıcaklıklarına dayanıklılık,
- Isı iletkenlikleri ve özgül ısılarının düşüklüğü,
- Kimyasal ve mekanik aşınmalara karşı dayanıklılık,
- Düşük yoğunluk,
- İyi bir termal şok direnci,
- Düşük sürtünme kaybı,
- Çok iyi ısı yalıtımı sağlamaları,
- Düşük elastisite modülü.



Şekil 2.6 Çeşitli seramik malzemelerinin ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi [47].

Tablo 2.6'da bazı yüksek teknoloji seramiklerinin özellikleri verilmektedir. Tablodan da görüleceği üzere zirkonya, üstün özellikleriyle en uygun termal bariyer kaplama malzemesidir. 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 [83]. 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 sprey yönteminde sıcaklık fazla önemli olmamasına karşın, çalışma atmosferi çok önemlidir. Seramik esaslı malzemeler, diğer kaplama malzemelerinden daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun tek sebebi ise kolayca eriyebilmeleridir. Zor eriyen malzemeler olarak bilinen borürler, karbürler ve nitrürlerin kaplanması fiziksel buhar çökeltme veya kimyasal buhar çökeltme teknikleriyle gerçekleştirilmektedir.

Aşınma direnci yüksek kaplamalar genellikle statik makina parçalarında kullanılmakta, hareketli parçalarda kullanımı için de 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 yanı sıra, üstün ısı 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 °C sıcaklıklara kadar dayanıklıdır. Ni-CrSi sanayi türbinlerinde kullanılmakta

ve sıvı Sn-Al fazı Mo ve Nb alaşımlarına kaplanan, gözenekli silikat kaplama da 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 TiB₂ kaplamaları başarıyla kullanılmaktadır [83].

Tablo 2.6 Bazı yüksek teknoloji seramiklerinin özellikleri [83].

Malzeme	Ergime Sıcaklığı (°C)	Yoğunluk (g/cm ³)	Mukavemet (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Sertlik kg/mm ²	Tokluk K _{IC}
Cam	500	2,2	48	7,20	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	30-70	1300	5,0
WC	2700	15,7	350-550	54-70	2000	5-8

Seramik kaplama malzemesi olarak zirkonya(ZrO₂), kullanım yerleri ve kendine has özellikleri ile oldukça önemli bir yere sahiptir. Zirkonyanın en önemli özelliği, yüksek sıcaklıklarda kullanılabilmesidir. Zirkonya ihtiva eden seramiklerin ergime noktaları yüksektir ve ısıl şoklara karşı dayanıklıdırlar. Bunun yanında iyi bir korozyon ve erozyon direncine de sahiptirler.

Zirkonya üç farklı kristal yapı gösterir. 1170 °C sıcaklığına kadar monoklinik kristal yapısına sahiptir. Bu sıcaklığın üzerinde monoklinik yapı tetragonal yapıya dönüşür. Tetragonal yapı ise 1170-2370 °C sıcaklıkları arasında karardır. Bu sıcaklıktan sonra kübik yapı meydana gelir [84,85]. Bu faz dönüşümleri esnasında hacimsel değişimler sonucu zirkonya deforme olur. Bu olumsuz durumu önlemek amacıyla, CaO, MgO, Y₂O₃ veya bunların bileşimleri şeklinde stabilize edici oksit ilavesiyle kübik fazın oda sıcaklığında kararlı olması sağlanır [85]. Y₂O₃ ile stabilize edilmiş zirkonya esaslı seramik malzemeler CaO ve MgO ile stabilize edilen malzemelere kıyasla çok daha üstün özelliklere sahip olmasına karşın, Y₂O₃ çok pahalı olduğundan, uygulamalarda daha çok CaO ve MgO kullanılmaktadır [86,87,88]. Tablo 2.7'de çeşitli tipteki zirkonya seramiklerin stabilizör içerikleri verilmektedir.

Termal bariyer kaplamalarda kullanılan ara tabakanın esas fonksiyonu, metal yüzeyi ile seramik tabaka 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'i gösterir) türbin kanatları için geliştirilmiştir. İki veya üç katmanlı kaplamaların yeterli olmadığı, buna karşın bileşimin sürekli olarak değiştiği kaplamalarda, performansın arttığı ve kaplamanın uzun süre özelliklerini koruduğu saptanmıştır. Plazma sprey ile yapılan kaplamada gözeneklerin bulunması, termal şok ve gerilme direncinin gelişmesine katkıda bulunmakla birlikte, poroz yapı, korozyon sıvı ve gazların penetrasyonuna imkan verdiğinden kaplamanın bozulmasına neden olmaktadır.

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 dayanıklılığı tam olarak anlaşılamamıştır. Üç katmanlı 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.

Tablo 2.7 Çeşitli cinsteki zirkonya seramiklerin tipik stabilizör içerikleri [85].

Malzeme Cinsi	Stabilizör Tipi, %mol			Karışım
	CaO	MgO	Y_2O_3	
Tamamen stabilize edilmiş	10-15	12-26	6-9	Uygun kombinasyonlarda
Kısmen Stabilize Edilmiş (KSZ)	4-8	5-8	2-5	Örneğin 2-5 MgO + 2-5 CaO
Toklaştırılmış, kısmen stabilize edilmiş	5-9	7-9	2-4	Uygun kombinasyonlarda
Tetragonal zirkonya polikristali	0-2	0-2	0-1	Uygun kombinasyonlarda

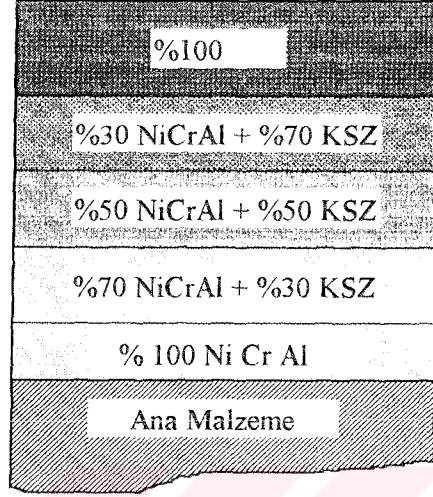
Isı yalıtımı maksadıyla motorlarda kullanılan en önemli kaplama malzemesi kısmi stabilize edilmiş zirkonyum'dur. Bu stabilize işlemi, CaO , MgO ve Y_2O_3 ile yapılır. Özellikle gaz türbinlerinde kullanılan kaplamalarda Yitriya ile stabilize edilmiş zirkonya, çatlak ve kopma dayanımı bakımından en iyi neticeyi vermiş olup, Mg ve Ca ile stabilize edilen ZrO_2 ise daha sonraları geliştirilmiştir. Bu malzemeler daha ekonomik malzemelerdir.

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 tanımlanan kaplamalar ise 5-6 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 olup, termal bariyer amaçlı olarak kullanılan kaplama malzemeleridir. Bağlayıcı tabaka olarak 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. Her şeyden önce, temiz bir yüzey ve iyi bir bağ tabakası gereklidir. Genleşme katsayısı seramik tabakayla çok farklı olan metal yüzeylere çok katlı kaplama tekniği uygulanabilir [89,90]. Şekil 2.7'de bir malzemenin çok tabakalı kaplanmış hali görülmektedir.

Seramik kaplamalardaki termal yorgunluk çatlakları, ısı genleşme katsayısı uyumsuzluğu sebebiyle meydana gelmektedir. Dizel motorlarında başarılı bir termal şok dayanımı sağlayabilmek için, NiCrAlY üzerine $\text{MgO}+\text{ZrO}_2$ 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 yanma odası elemanlarında ve özellikle de pistonlarda kullanılmaktadır [10,91,92].

Fakat seramikten yapılması düşünülen bu parçaların gerek imalat, gerekse imalat sonrası karşılaşılan problemler nedeniyle, seramikle kaplanması işlemine yönelinmiştir. Silindir gömlekleri üzerine yapılan termal bariyer kaplamalar yalnız başlarına

uygulandığında çabuk aşınırlar. Bunu engelleyebilmek için de üç tabakalı bir kaplama sisteminde 0,125 mm'lik bir CrO_2 veya AlTi , zirkonyum üzerine kaplanır [89, 90,93,94].



Şekil 2.7 Çok tabakalı termal bariyer kaplama

BÖLÜM 3

DENEY SONUÇLARININ ANALİZİNDE KULLANILAN İFADELER VE TEORİK ÇALIŞMALAR

3.1 Karakteristik Değerler

Dizel motorlarında pompa krameyerinin konumunun, yağ ve soğutucu akışkan sıcaklığının sabit tutulduğu deney şartlarında krank mili devrine bağlı olarak güç, moment ve yakıt sarfiyatı değişimlerine motor karakteristikleri veya karakteristik eğrileri denir. Motor karakteristiklerinin belirlenmesi motor deneylerinin esasını teşkil eder ve sadece motorun çıplak olarak ve statik performansının bilinmesini sağlamayıp aynı zamanda motorun taşıt üzerinde gerçek hizmet şartlarındaki performansı hakkında da önemli bilgiler verir.

Motor performansının tespiti amacıyla yapılan deneysel çalışmalarda doğrudan bulunamayan değerler, performans karakteristiklerini veren denklemlerle hesaplanır. Efektif güç, ortalama efektif basınç ve özgül yakıt tüketimi bu değerlerin başındadır. Motorun efektif karakteristikleri, herhangi bir tipteki test ünitesinde değişik yük ve devir sayılarında çalıştırılmak suretiyle tespit edilir .

Döndürme momenti

Test edilen bir motorun döndürme momenti;

$$M_d = F \cdot \ell \quad (3.1)$$

ifadesiyle hesaplanır. Burada;

M_d : Döndürme momenti (Nm),

F : Fren terazi kuvveti (N)

ℓ : Fren moment kolu (m)'dur

Efektif güç

Devir sayısı ve uygulanan yük değeri ölçülen bir motorun efektif gücü ise;

$$P_e = M_d \cdot \omega = F \cdot \ell \cdot \frac{\pi \cdot n}{30000} \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada;

P_e : Efektif güç(kW),

ω : Açısal hız,

n : Motor devri (dev/dak)'dir.

Ortalama efektif basınç

Ortalama efektif basınç, motorun gerçek çevrimdekine eşdeğer bir P_e gücünü vermesi için bir strok boyunca pistona etkimesi gereken sabit basınç olarak ifade edilir. W_e , çevrim işi ve V_H , toplam strok hacmi olmak üzere ortalama efektif basınç;

$$P_{me} = \frac{W_e}{10^5 \cdot V_H} = \frac{1000 \cdot P_e}{10^5 \cdot n_\phi \cdot V_H} = \frac{P_e}{10^2 \cdot V_H \cdot n' \cdot i} \quad (3.3)$$

dir. Burada;

P_{me} : Ortalama efektif basınç (bar),

P_e : Efektif güç (kW)

n_ϕ : Motorun çevrim sayısı, $n_\phi = n \cdot i$ (çevrim/s),

n' : Motor devri (dev/s),

i : Bir devirdeki çevrim adedi (çev/dev),

4 zamanlı motorlarda $i=1/2$ 'dir.

Özgül yakıt tüketimi

Laboratuar şartlarında bir motorun yakıt tüketimini hacimsel olarak tespit etmek mümkündür. Belli çalışma şartlarında motorun $\Delta t(s)$ zaman aralığında tükettiği yakıt hacmi $\Delta V(cm^3)$ ve yakıtın yoğunluğu $\rho_y(g/cm^3)$ ise özgül yakıt tüketimini (b_e);

$$b_e = \frac{3600 \cdot \Delta V \cdot \rho_y}{P_e \cdot \Delta t} = \frac{3600 \cdot \dot{m}_y}{P_e} \quad (3.4)$$

ifadesiyle hesaplanır. Bu denklemde;

b_e : Özgül yakıt tüketimi (g/kWh),

ρ_y : Yakıtın yoğunluğu (g/cm³),

Δt : Yakıtın tüketilme zamanı (s),

ΔV : Tüketilen yakıt hacmi (cm³)'dir.

Efektif verim

Efektif verim, motor milinden alınan işin verilen toplam enerjiye oranı şeklinde tarif edilir ve iş veya güç oranları cinsinden;

$$\eta_e = \frac{W_e}{Q_T} = \frac{W_e/t}{Q_T/t} = \frac{P_e}{\dot{m}_y \cdot H_u} \quad (3.5)$$

şeklinde yazılabilir. (3.5) ifadesinden $\dot{m}_y$ çekilip b_e (g/kW.h) ve H_u (kJ/kg) alınırsa (3.6) ifadesi;

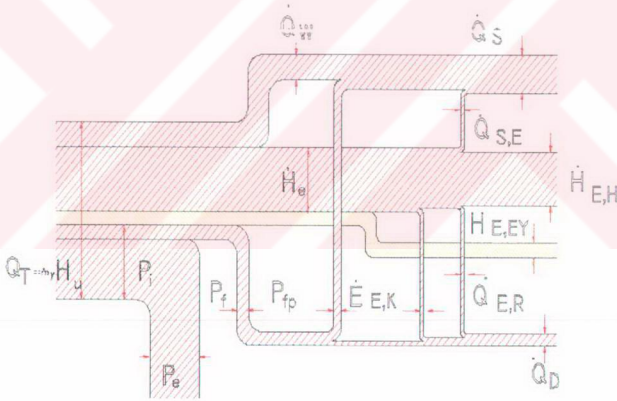
$$\eta_e = \frac{3,6 \cdot 10^6}{b_e \cdot H_u} \quad (3.6)$$

haline gelir.

3.2 Motorlarda Enerji Dağılımı

Bir motorun efektif verimi biliniyorsa, motora yakıtla verilen enerjinin faydalı işe dönüşen yüzdesi de biliniyor demektir. Geriye kalan kısım ise kayıp enerjidir.

Motor verimini artırabilmek için enerji kayıplarının azaltılması gerekir. Dolayısıyla yukarıdaki mekanizmaların her birinin enerji kaybındaki payının bilinmesi son derece önemlidir. Enerji dağılımı deneyleri bu amaçla gerçekleştirilir. Şekil 3.1'de içten yanmalı bir motorun enerji akış diyagramı verilmektedir.



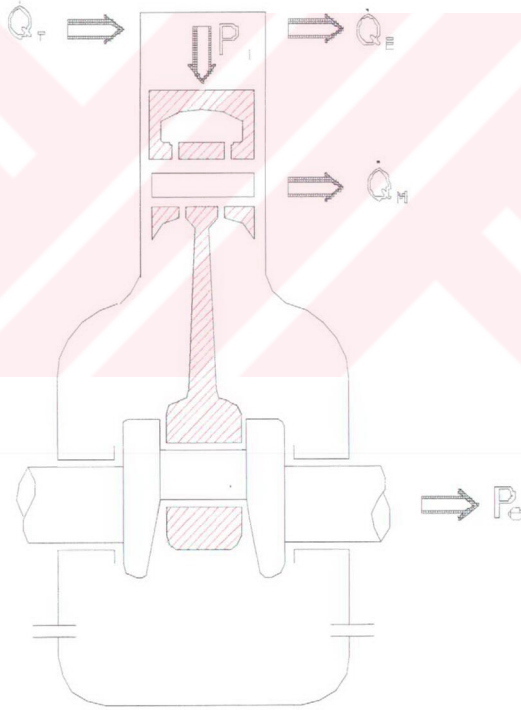
Şekil 3.1 İçten yanmalı motorlarda enerji akış (Sanky) diyagramı [95].

Enerji akışı ifadesinin genel formu;

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T \quad (3.7)$$

şeklindedir. Yukarıdaki ifadeden de kolayca anlaşılacağı gibi bu deneylerde ölçümlerin üç ana hedefi vardır; motora giren ve çıkan akışkanların kütleli debileri, giriş ve çıkış sıcaklıkları ve bu akışkanların özgül ısılarının bilinmesidir.

Toplam enerjinin kullanılabilir enerji ve diğer kayıplar arasında nasıl dağıldığı, devir sayısına karşılık mutlak enerji değerleri veya bunların toplam enerjiye olan oranları şeklinde çizilerek ifade edilebilir [95,96,97]. Şekil 3.2'de motora birim zamanda giren ve çıkan enerjiler görülmektedir.



Şekil 3.2 Motora birim zamanda giren ve çıkan enerjiler [95].

Toplam yakıt enerji akısı,

$$\dot{Q}_T = \dot{m}_y \cdot H_u \quad (3.8)$$

ifadesiyle hesaplanabilir. Yukarıdaki şekillerde,

$\dot{H}_E$: Birim zamanda atılan egzoz entalpisi,

$\dot{H}_{E,H}$: Egzoz gazları ile atılan hissedilebilir entalpi akısı,

$\dot{H}_{E,Y}$: Eksik yanma ile oluşan kimyasal enerji kaybı akısı,

P_f : Toplam sürtünme gücü,

$P_{f,p}$: Piston sürtünme gücü,

$\dot{Q}_M$: Sürtünmelere giden toplam enerji akısı,

$\dot{Q}_W$: Silindir cidarlarından olan ısı akısı,

$\dot{Q}_{E,R}$: Egzoz sisteminden radyasyonla kaybedilen enerji akısı,

$\dot{Q}_S$: Birim zamanda soğutucu akışkana giden enerji,

$\dot{Q}_{S,E}$: Egzoz portlarında soğutucu akışkana geçen enerji akısı,

$\dot{Q}_D$: Diğer kayıp enerji akıları,

Emme Hava debisinin ölçümü

Motor hava debisinin belirlenmesi motor deneylerinin en çok değişken ihtiva eden ve dikkat isteyen ölçümlerinden biridir. Hava debisi, motorun performansını ve emisyon karakteristiklerinin belirlenmesinde en önemli unsurdur. Hava-yakıt oranı, hava fazlalık katsayısı ve volumetrik verim gibi yanma olayının detayları, emisyon özellikleri ve müsaade edilebilir çalışma sınırları hususunda yeterli bilgi elde edebilmek için hava

debisinin mutlaka bilinmesi gerekir. Dolayısıyla hava miktarının hassas bir şekilde ölçülmesi deney sonuçlarının gerçekçi olması açısından son derece zaruridir.

Akışın daimi olması kaydıyla, hava debisinin ölçümünde en hassas sonuç, hava sönümleme tankı, keskin kenarlı lüle ve eğik manometreden oluşan sistemle alınmaktadır. Deneyde kullanılacak hava tankının kapasitesi motor hacminin 50 katından az olmamalıdır [98]. Keskin kenarlı lülenin boyutları, eğik manometredeki basınç düşüşü 10 cmSS'ndan büyük olmayacak şekilde seçilir. Ölçümlerin hassas olması için hafif bir manometre sıvısının kullanılması gerekir.

Hava, lüle dar kesitinden geçerken kısılmaya maruz kaldığından hızı artmakta, basıncı ise düşmektedir. İlk hal olarak, hava tankının bir metre uzağında olduğu kabul edilen durgun havanın şartları alınırsa Bernoulli denkleminde;

$$\rho_H \frac{V^2}{2} = \Delta p = \rho g h \quad (3.9)$$

yazılabilir. Burada V huzmenin en dar kesitindeki hava hızını, Δp ise atmosfer basıncı ile bu kesitteki basınç farkını ifade etmektedir. Ölçüm esnasında manometrenin bir ucunun atmosfere açık diğerinin dar kesit düzleminde olacağı açıktır. Atmosfer şartlarındaki havanın ideal gaz olduğu kabulüyle havanın yoğunluğu için $\rho_H = \frac{p_H M_H}{R T_H}$

ifadesi kullanılabilir. Bu ifadede $\bar{R}=8,1343$ (kJ/kmol K) universal gaz sabiti, $M_H=28,96$ (kg/kmol) havanın mol ağırlığı, T_H (K) hava deposundan bir metre uzaktaki ortalama hava sıcaklığıdır. Manometreden ölçülen seviye farkının Δh (cmSS) olarak okunması halinde p_H için verilen ifade ile birlikte (3.9)'dan;

$$\frac{p_H M_H}{\bar{R} T_H} \frac{V^2}{2} = 98,0665 \Delta h_h \quad (3.10)$$

elde edilir. Lüleden birim zamanda geçen hava miktarı hacimsel olarak (m^3/s);

$$\dot{V}_H = C_{D,H} \left(\frac{\pi d_h^2}{4} \right) \left(\frac{196,133 \bar{R} T_H \Delta h_H}{p_H M_H} \right)^{1/2} \quad (3.11)$$

dir. Bu ifadede $\bar{R}$ ve M_H bağımsız sabitler olup değerleri yukarıdaki ifadede yerine konursa;

$$\dot{V}_H = 186,371 C_{D,H} d_h^2 \left(\frac{T_H \Delta h_H}{p_H} \right)^{1/2} \quad (3.12)$$

ifadesi elde edilir. $C_{D,H}$ hava tankı-lüle sisteminin geometrisine özgü bir sabit olup, delik çapının hava akımının geçtiği ana kanalın ortalama kesit çapına göre çok küçük olması halinde $C_{D,H}=0,6$ alınabilir. Bunun yanında $T_H=298$ K ve $p_H=101325$ (N/m²) olarak (3.13) ifadesi;

$$\dot{V}_H = 6,064 \cdot d_h^2 \cdot (\Delta h_H)^{1/2} \quad (3.13)$$

şeklinde basitleştirilebilir. Burada d_h (m) lüle akış kesitinin çapıdır.

Kütleli hava debisi için (3.13) ifadesini ρ_H ile çarpmak suretiyle;

$$\dot{m}_H = 7,182 \cdot d_h^2 \cdot (\Delta h_H)^{1/2} \quad (3.14)$$

şeklinde yazılabilir.

Volumetrik verim

Volumetrik verim, motorun belli çalışma şartlarında emdiği (gerçek) hava miktarının aynı çalışma şartlarında kapasitesine göre emmesi gereken (teorik) hava miktarına oranıdır.

Strok hacmi V_h (m^3), silindir sayısı z olan ve n (dev/s) hızla dönen bir motorun, volumetrik verimi;

$$\eta_v = \frac{\dot{m}_{H,g}}{\dot{m}_{H,t}} = \frac{\dot{V}_H}{z \cdot V_h \cdot n \cdot i} \quad (3.15)$$

ifadesinden hesaplanabilir.

Hava fazlalık katsayısı

Her bir yakıt için, kimyasal yapısına bağlı olarak tam yanmasını sağlayacak teorik bir hava miktarı vardır. Birim ağırlıktaki yakıtı yakmak için gerekli olan bu hava miktarına kimyasal olarak doğru veya stokiyometrik hava miktarı denir ve $h_{min}=(m_{hava}/m_{yakıt})_{teorik}$ ile gösterilir.

Motorlar çevrim karakterlerine göre ve çalışma şartlarına bağlı olarak çok değişik hava/yakıt oranlarında çalışırlar. Gerçek çalışma durumunu ifade eden bu oran $h=(m_{hava}/m_{yakıt})_{gerçek}$ olarak ifade edilirse hava fazlalık katsayısı için;

$$\lambda = \frac{\left(\frac{\dot{m}_H}{\dot{m}_Y}\right)_g}{\left(\frac{\dot{m}_H}{\dot{m}_Y}\right)_t} = \frac{\left(\frac{\dot{m}_H}{\dot{m}_Y}\right)_g}{h_{min}} \quad (3.16)$$

ifadesi yazılabilir. Dizel yakıtı için ($C_{15}H_{28}$) $h_{min}=14,5$ alınmıştır.

Soğutucu akışkan debisinin ölçümü

Soğutucu akışkan debisi de, hava debisinde olduğu gibi, keskin kenarlı lüleler kullanılarak ölçülür. Burada ideal gaz denklemi söz konusu olmayacağından hesaplama metodu biraz daha farklı olmaktadır. Şekil 3.3'de görüldüğü gibi akımın lüleden geçerken kısılmaya uğraması halinde akış hüzmesi lüle çıkışından hemen sonra minimum bir A_1 kesitine sahip olacaktır. Bu alanın ölçümü çok zor olduğu gibi

$$\dot{m}_s = C_{D,S} \cdot \rho_s \cdot A_1 \cdot V_1 = C_{D,S} \cdot \rho_s \cdot \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2g \cdot \Delta h \cdot \frac{(\rho - \rho_s)}{\rho_s}} \quad (3.19)$$

olur.

Geniş bir uygulama aralığı için $C_{D,S}$ değeri 0,60 olarak alınabilir [95]. (3.19) ifadesindeki sabitler ve değeri bilinen büyüklükler yerlerine konursa sonuç olarak;

$$\dot{m}_s \cong 852.341 d_s^2 (\Delta h_s)^{1/2} \quad (3.20)$$

elde edilir [99,100,101].

3.3 Performans Eğrilerinin Modellenmesi

Performans eğrileri, ortalama efektif basınç ve motor devir sayısı belli iken, özgül yakıt tüketimini hesaplayabilecek şekilde modellenmelidir. Diğer bir ifadeyle, özgül yakıt tüketimi $be = f(P_{me}, n)$ şeklinde tanımlanmalıdır.

Literatürde eğri uydurma ile ilgili yöntemler genellikle tek değişkene bağlı olarak verilmekte olmasına karşın, bu yöntemlerin özünden hareketle iki değişkenli hale geçmek de mümkündür. Bu çalışmada, performans eğrilerinin modellenmesinde Lagrange Enterpolasyonu yöntemi kullanılmıştır.

Lagrange enterpolasyonu;

Lagrange enterpolasyonu polinom formunda bir yöntemdir. Verilerin eşit aralıklarla okunmasını ve simültane denklem sistemlerinin çözümünü gerektirmemesi, "Polinom Yöntemi"ne olan üstünlüğüdür. Tek değişkenli durumda, bilinen (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) noktaları için;

$$y = c_1 (x - x_2) (x - x_3) + c_2 (x - x_1) (x - x_3) + c_3 (x - x_1) (x - x_2) \quad (3.21)$$

şeklinde ifade edilir. Burada;

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{y_1}{(x_1 - x_2)(x_1 - x_3)} \\ c_2 &= \frac{y_2}{(x_2 - x_1)(x_2 - x_3)} \\ c_3 &= \frac{y_3}{(x_3 - x_1)(x_3 - x_2)} \end{aligned} \quad (3.22)$$

dir. n adet bilinen veri için herhangi bir x değerine karşı gelen y 'nin bulunmasında kullanılan denklemin genel formu;

$$y = \sum_{i=1}^n y_i \prod_{j=1}^n \frac{(x - x_j)}{(x_i - x_j)} \quad (3.23)$$

şeklinde dir.

İki değişkenli durumda Lagrange enterpolasyonu n adet bilinen nokta için, bağımlı değişken, iki bağımsız değişkenin bir fonksiyonu olacak şekilde aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\begin{aligned} z &= c_{11} (x-x_2) (x-x_3) \dots (x-x_n) (y-y_2) (y-y_3) \dots (y-y_n) \\ &\quad + c_{1n} (x-x_2) (x-x_3) \dots (x-x_n) (y-y_1) (y-y_2) \dots (y-y_{n-1}) \\ &\quad + c_{n1} (x-x_1) (x-x_2) \dots (x-x_{n-1}) (y-y_2) (y-y_3) \dots (y-y_n) \\ &\quad + c_{nn} (x-x_1) (x-x_2) \dots (x-x_n) (y-y_1) (y-y_2) \dots (y-y_{n-1}) \end{aligned} \quad (3.24)$$

İki değişkenli durumda $be = f(P_{mc}, n)$ için genel formda Lagrange ifadesi;

$$be = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^n be_{ij} \prod_{K=1}^n \prod_{L=1}^n \frac{(P_{me} - P_{me,I})(n - n_1)}{(P_{me,J} - P_{me,I})(n_K - n_1)} \quad (3.25)$$

şeklinde yazılabilir [102,103,104].

3.4 Egzoz Gazlarının Kullanılabilirliğinin Modellenmesi

Bir maddenin sürekli akış ekserjisi, akışın çevre ile termal ve kimyasal olarak etkileşebildiği işlemler vasıtasıyla, tersinir olarak ilk halinden çevre ile termal, mekanik ve kimyasal denge durumuna getirildiğinde elde edilebilecek maksimum iş miktarına eşittir [105,106].

Bu çalışmada, egzoz gazlarının kullanılabilir enerjilerinin hesabında aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

- Yanma tam yanmadır ve yanma ürünleri dört bileşenden (CO_2 , H_2O , N_2 ve O_2) meydana gelmektedir.
- Yanma ürünleri mükemmel gaz kanununa uymaktadır.
- Egzoz gazlarının kimyasal ekserjilerinin hesabında basıncın etkisi ihmal edilmiştir.
- Çalışmada yakıt olarak $C_{15}H_{28}$ kapalı formüllü motorin kullanılmıştır.

Motorlarda kullanılan yakıtın özellikleri Tablo 3.1'de verilmektedir.

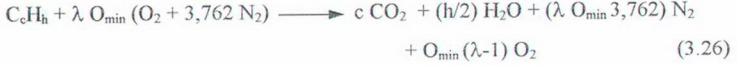
Tablo 3.1 Motor testlerinde kullanılan yakıtın özellikleri [107].

Yakıtın Kapalı Formülü	M_y (kg/kmol)	Yoğunluk (kg/m ³)	Hu (kJ/kg)
$C_{15}H_{28}$	208,221	830	42969

Yanma ürünlerinin özgül ısı, entalpi ve entropi değerleri JANAF termokimyasal tablolarını kullanarak hazırlanan bir alt programdan elde edilmiştir.

Yukarıda yapılan kabuller ve tam yanma durumu hali göz önüne alınarak yanma ürün bileşenleri aşağıdaki ifadeler kullanılarak hesaplanmıştır.

Yanma denklemi;



dir. Burada $\text{O}_{\min} = c + h / 4$ 'dür.

1 kmol yakıtın yanması durumunda oluşan yanma ürünlerinin mol sayıları;

$$\begin{aligned} n_{\text{CO}_2} &= c \\ n_{\text{H}_2\text{O}} &= h/2 \\ n_{\text{N}_2} &= \lambda \cdot \text{O}_{\min} \cdot 3,762 \\ n_{\text{O}_2} &= \text{O}_{\min} \cdot (\lambda - 1) \\ n_{\text{top}} &= n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{N}_2} + n_{\text{O}_2} \end{aligned}$$

yanma ürünlerinin mol oranları ise,

$$x_i = n_i / n_{\text{top}} \quad (3.27)$$

ifadesinden hesaplanmaktadır.

Herhangi bir T sıcaklığındaki egzoz gazlarının enerjisi, egzoz gazlarını oluşturan ürünlerin özgül ısıları yardımıyla,

$$H_e = n_{\text{top}} \sum_{i=1}^n x_i \bar{c}_{p_i} dT \quad (3.28)$$

ifadesiyle hesaplanır.

Bir madde akışının ekserjisini iki temel bileşene ayırmak mümkündür. Bu bileşenler maddenin her bir molü için,

$$\bar{e} = \bar{e}_{\text{im}} + \bar{e}_{\text{kim}} \quad (3.29)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, $\bar{e}_{\text{im}}$ termo mekaniksel ekserji ve $\bar{e}_{\text{kim}}$ ise kimyasal ekserjidir. n bileşenden meydana gelen bir mol gaz karışımı için termo mekaniksel ekserji;

$$\bar{e}_{\text{im}} = \sum_{i=1}^n x_i \left\{ \bar{h}_i(T) - \bar{h}_i(T_0) - T_0 [\bar{s}_i(T) - \bar{s}_i(T_0)] \right\} \quad (3.30)$$

ve kimyasal ekserji;

$$\bar{e}_{\text{kim}} = \sum_{i=1}^n x_i \bar{R} T_0 \ln \frac{x_i \cdot P}{x_{i,0} P_0} \quad (3.31)$$

ifadeleriyle hesaplanır. (3.30) ve (3.31) ifadeleri (3.29)'da yerine yazılırsa, bir mol gaz karışımı için toplam ekserji miktarı;

$$\bar{e} = \sum_{i=1}^n x_i \left\{ \bar{h}_i(T) - \bar{h}_i(T_0) - T_0 [\bar{s}_i(T) - \bar{s}_i(T_0)] + \bar{R} T_0 \ln \frac{x_i P}{x_{i,0} P_0} \right\} \quad (3.32)$$

olur. (3.32) ifadesini egzoz gazlarının mol sayısı ile çarpmak suretiyle toplam ekserji akısı,

$$\dot{E} = \dot{n}_{\text{top}} \cdot \bar{e} \quad (3.33)$$

şeklinde elde edilir [107,108,109]. Hesaplamalarda egzoz gazları ideal gaz olarak kabul edilmiş ve ekserji analizi için esas alınan çevre tanımı aşağıda Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2 Ekserji analizlerinde esas alınan çevre tanımı [110].

Referans Maddeler	Mol Kesri(%)
N ₂	75,67000
O ₂	20,35000
H ₂ O	3,03000
CO ₂	0,03450
SO ₂	0,00020
H ₂	0,00005
T ₀ =298,15 K, p ₀ =101325 N/m ²	

Yukarıda yapılan kabuller ve ifadelere göre hazırlanan bir bilgisayar alt programında, her motor çalışma şartında egzoz gazlarının kullanılabilir enerjileri hesaplanmaktadır. Program, motor testlerinde ölçülen ve hesaplanan değerleri (özellik yakıt tüketimi, efektif güç, hava fazlalık katsayısı ve egzoz gaz sıcaklığı) veri olarak kullanmaktadır.

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1 Deney Motorunun Teknik Özellikleri

Deneyisel çalışmalardan önce yapılan literatür incelemelerinde, termal bariyer kaplamaların türbo doldurmalı motorlarda daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bu sebeple, çalışmada Otosan A.Ş.'nin ülkemizde üretmekte olduğu TCI Ford Cargo motoru test motoru olarak seçilmiştir. Tablo 4.1'de deney motorunun teknik özellikleri verilmektedir. Şekil 4.1'de ise deney motoru görülmektedir.

Tablo 4.1 Deney motoruna ait teknik özellikler

Motor tipi	Ford 6,0 lt. T/C, Ara soğutmalı, Direk püskürtmeli
Strok sayısı	4
Silindir sayısı	6
Silindir çapı (mm)	104,77
Piston stroku (mm)	114,9
Sıkıştırma oranı	16,5/1
Maksimum Motor Gücü(kW)	136 (2400 dev/dak'da)
Maksimum Devri(dev/dak)	2750-2780
Rölanti devri(dev/dak)	665-685
Motor Hacmi(lt)	5,947
Püskürtme avansı ($^{\circ}$ KMA)	20
Püskürtme Sırası	1-5-3-6-2-4
Motor ağırlığı (kg)	500

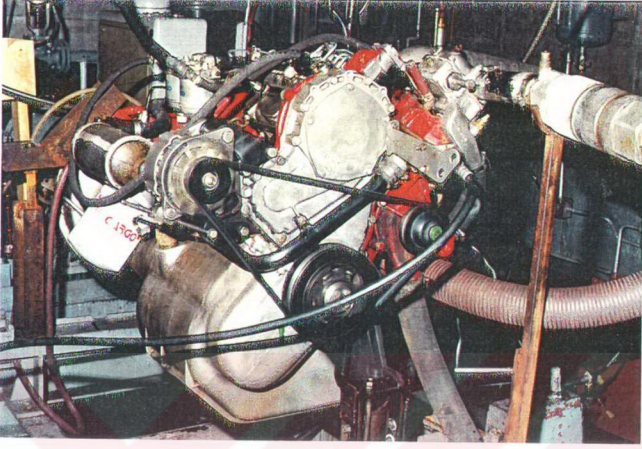
4.2 Deney Donanımı ve Deneylerin Yapılışı

Deneyler 1010. Ana Tamir Fabrikası'nda gerçekleştirilmiştir. Testler esnasında motor, hidrolik fren dinamometresi kullanılarak yüklenmiştir. Test ünitesi; hidrolik fren dinamometresi, motor suyunun soğutulması için ısı değiştirici, yakıt tüketimi ölçüm düzeneği, sıcaklık ve basınç ölçüm düzenekleri, kumanda paneli gibi ana düzenekleri içermektedir. Test kabini üç adet fanla donatılmış olup bu fanlar sayesinde, motorun her iklim şartında istenen sıcaklık değerlerinde çalıştırılması mümkün olmaktadır. Şekil 4.2'de motor test ünitesi kontrol paneli, Şekil 4.3'de ise motor test hücresi ve ölçüm noktalarının şematik görünüşü verilmektedir. Tablo 4.2'de motor testlerinde ölçülen parametreler ve ölçüm cihazları verilmektedir.

Ayrıca, yukarıda belirtilen düzeneklere ilave olarak emme havası ve soğutma suyu ölçüm düzenekleri ile ara soğutucu düzenekleri sisteme eklenmiştir.

Emme havası debisinin ölçümünde, sönümleme tankı-keskin kenarlı sukbe-eğik manometre düzeneği kullanılmıştır. Bu amaçla 300 lt hacimli bir sönümleme tankı imal edilmiştir. Ölçümler esnasında motor çalışma şartlarına bağlı olarak 40-100 mm arasında delik çaplarına sahip sukbelar kullanılmıştır. Eğik manometrede sıvı olarak özel manometre sıvısı kullanılmıştır. Şekil 4.4'de emme hava debisi ölçüm düzeneği görülmektedir.

Motora her bir test kademesinde giren soğutma suyu miktarının ölçümü ise keskin kenarlı sukbe-U manometre düzeneği ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde U manometrede sıvı olarak cıva kullanılmıştır. Sukbe olarak ise motor çalışma şartlarına bağlı olarak 15-30 mm arasında delik çaplarına sahip keskin kenarlı sukbelar kullanılmıştır. Şekil 4.5'de soğutma suyu debisi ölçüm düzeneği görülmektedir.



Şekil 4.1 TCI Ford Cargo motoru



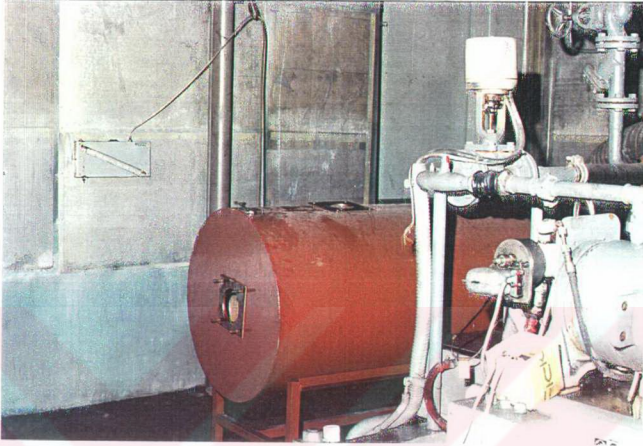
Şekil 4.2 Motor test ünitesi kontrol paneli

Kompresör çıkış havasının soğutulması, su soğutmalı bir ısı değiştirici kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şehir şebeke suyunun sürekli akışı ile çalıştırılan bu ara soğutucu ile kompresör çıkış havasının sıcaklığını 40 °C'ye kadar azaltmak mümkün olmuştur. Şekil 4.6'da deneylerde kullanılan bu ara soğutucu görülmektedir.

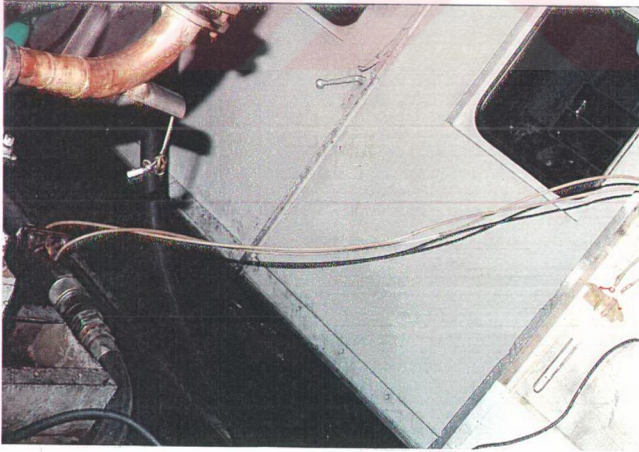
Testler esnasında; motor devri, yük, emme manifold sıcaklığı, egzoz gaz sıcaklığı, soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklıkları, ara soğutucu giriş ve çıkış sıcaklıkları, yağ sıcaklığı, test kabini sıcaklığı, yağ basıncı, emme manifold basıncı, emme havası basınç farkı (eğik manometreden), soğutma suyu basınç farkı (U manometreden) ve yakıt tüketim miktarı değerleri ölçülerek kaydedilmiştir.

Tablo 4.2 Motor testlerinde ölçülen parametreler ve ölçüm cihazları

No	Ölçülen Parametreler	Birim	Ölçüm Aralığı	Ölçüm Aleti	Ölçüm Hassasiyeti
1	Motor devri	dev/dak	0-9999	Dijital takometre	1 dev/dak
2	Yağ giriş sic.	°C	0-150	Termo eleman	1 °C
3	Yağ çıkış sic.	°C	0-150	Termo eleman	1 °C
4	Su giriş sic.	°C	0-150	Termo eleman	1 °C
5	Su çıkış sic.	°C	0-150	Termo eleman	1 °C
6	Ara soğ. gir.	°C	0-150	Termo eleman	1 °C
7	Ara soğ. çık.	°C	0-150	Termo eleman	1 °C
8	E. Manif. Bas.	bar	0-2	Manometre	0,02 bar
9	Türbin giriş	°C	0-1000	Termo eleman	1 °C
10	Türbin çıkış	°C	0-1000	Termo eleman	1 °C
11	Karbonmonoksit	ppm	0-8000	MRU 95/3 CD	1 ppm
	Hidrokarbon	ppm	0-2000	MGA 1200	1 ppm
	Partikül	mg/m ³	0-1966	RTT 100	1 mg/m ³
12	Yakıt tüketim zamanı	s	-	Kronometre	(1/60) s
13	EHBf (Δh_b)	mmSS	0-750	Eğik manometre	1 mmSS
14	SSBF (Δh_b)	mmHg	0-1000	U-Manometre	1 mmHg
15	Yağ basıncı	bar	0-10	Manometre	0.1 bar
16	Fren Terazı kuvveti	kgf	0-100	Su freni	0.5 kgf



Şekil 4.4 Motor emme havası debisi ölçüm düzeneği



Şekil 4.5 Motor soğutma suyu debisi ölçüm düzeneği

Deneyler on devir aralığı ve on farklı yük kademesi için tekrarlanmıştır. Bu ölçüm aralıkları; 1000-1200-1300-1400-1500-1600-1800-2000-2200-2400 dev/dak ve 15-20-25-30-35-40-45-50-55 kgf ve her bir devir sayısı için maksimum yük değerleridir.

Yukarıda belirtilen her bir ölçüm aralığı için ölçülen değerler hazırlanan bir bilgisayar programı kullanılarak motorun normal ve seramik kaplamalı hallerdeki; emme havası miktarı, soğutma suyu debisi, özgül yakıt tüketimi, efektif güç, ortalama efektif basınç, döndürme momenti, hava fazlalık katsayısı, hava/yakıt oranı, volumetrik verim, efektif verim değerleri ile faydalı güce, soğutma suyuna ve egzoz gazlarına giden yakıt enerjileri ve ekserji değerleri hesaplanmış ve daha sonra hesaplanan bu değerler grafikler halinde karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Ölçüm cihazlarının hassasiyetleri Tablo 4.2'de verilmiştir. Bu değerler dikkate alınarak, hesaplanan parametrelerde cihazların hassasiyetlerinden kaynaklanabilecek maksimum hata oranları tespit edilmiştir. Aşağıdaki tabloda, hesaplanan bu parametrelerin maksimum hata yüzdeleri verilmektedir.

Tablo 4.3 Hesaplanan parametrelerdeki maksimum hata oranları

Hesaplanan Parametre	Maksimum Hata
Özgül yakıt tüketimi	% 1
Volumetrik verim	% 0,82
Efektif verim	% 1
Efektif güç	0,71
Döndürme momenti	% 0,67
Ortalama efektif basınç	% 0,67
Soğutucu akışkan enerji akısı	% 3,5
Egzoz gaz enerji akısı	% 1

4.3 Motor Parçalarının Kaplanması

Test motoru yukarıda belirtilen şekilde normal halde(kaplanmamış) çalıştırılıp test sonuçları alındıktan sonra motor parçalarının kaplanması gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, kaplama yapılacak parçaların yüzeylerinden 0,5 mm talaş kaldırılmıştır. Böylece, kaplama sonucunda standart motor ile aynı sıkıştırma oranının sağlayacak boyutlar elde edilmiştir. Kaplama yapılan parçalar; silindir kafası, pistonlar ve supaplardır.

Motor parçalarının seramikle kaplanması işlemi, SAÜ. Mühendislik Fakültesi Plazma Kaplama Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.7'de Plazma Kaplama Laboratuvarı görülmektedir.

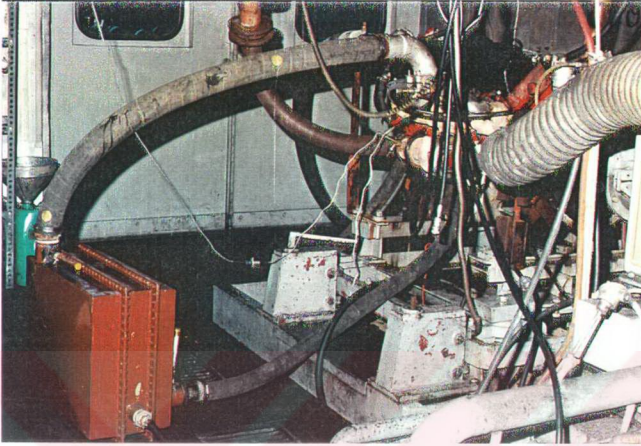
Kaplanacak parçalar 0,5 mm talaş kaldırdıktan sonra, kaplanacak yüzeyler iyi bir şekilde temizlenerek, yağ ve benzeri istenmeyen maddelerden arındırıldıktan sonra kumlama ünitesinde kumlanarak pürüzlendirilmiş ve kaplamaya hazır hale getirilmiştir. Yüzey hazırlama işleminin tamamlanmasından sonra parçalar, plazma ünitesinde 150-200 μm kalınlığında bir bağlayıcı tabaka (NiCrAl) üzerine 300-350 μm kalınlığında seramik malzeme (pistonlarda MgZrO_3 , silindir kafası ve supaplarda ise CaZrO_3) ile kaplanmak suretiyle kaplama işlemi tamamlanmıştır. Tablo 4.4'de kaplamada kullanılan seramik tozların özellikleri, Tablo 4.5'de kaplama işleminde kullanılan püskürtme parametreleri, Şekil 4.8'de ise motor parçalarının kaplanmasında izlenen işlem sırası verilmektedir.

Tablo 4.4 Motor parçalarında kaplanmasında kullanılan tozlarının özellikleri

Toz Cinsi	Kimyasal Bileşimi (%Ağırlık)	Tane Boyutu (μm)	Ergime Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
ZrO_2 (Metco 201 BNS)	Zirkonyumoksit 95,860 Kalsiyumoksit 4,840 Silisyumoksit 0,420 Titanyumoksit 0,220	- 325 + 200	2565
MgZrO_3 (Metco 210 BNS)	Magnezyumoksit 24,0 Zirkonyumoksit 76,0	- 100 + 40	2140
NiCr/Al (Metco 443)	Alüminyum 6,0 Magnezyum 1,0 Silisyum 1,0 Krom 18,0 Demir 1,0 Nikel 72,0 Organik Bağlayıcı 1,0	- 125 + 45	1420

Tablo 4.5 Kaplama işleminde kullanılan püskürtme parametreleri

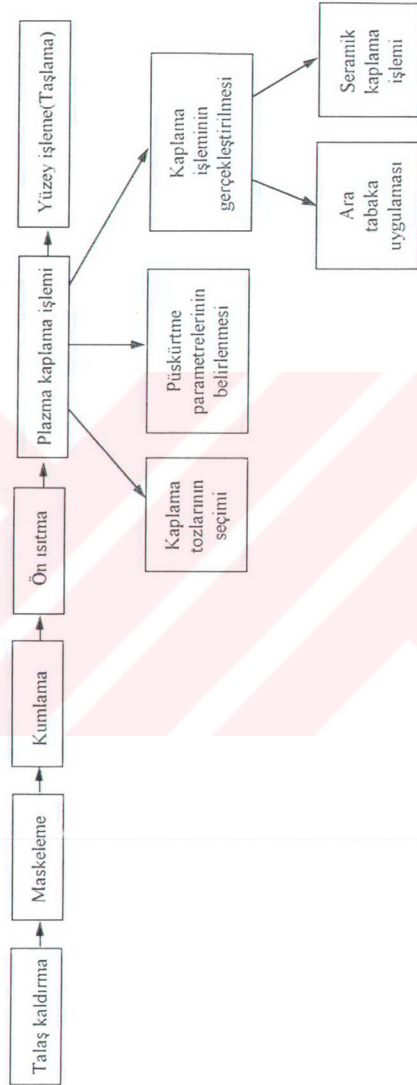
Plazma Gazı : Hidrojen Tabanca Tipi : 3MBN			Taşıyıcı Gaz : Argon Soğutma Tipi : Su		
Kaplama Tozu	Malzeme Cinsi	Voltaj (V)	Akım (A)	Taşıyıcı Gaz	Püskürtme Mesafesi (mm)
METCO 210 BNS	MgZrO_3	64-70	500	Ar	100-150
METCO 201 BNS	ZrO_2	64-70	500	Argon	100-150
METCO 443	NiCr/Al	64-70	500	Ar	100-150



Şekil 4.6 Su soğutmalı ara soğutucu



Şekil 4.7 Plazma kaplama laboratuvarı



Şekil 4 8 Motor parçalarının kaplanmasında ilenen işlem sırası

Kaplama işlemi tamamlandıktan sonra, seramik kaplı parçalar motora monte edilerek, kaplamasız motorun testindeki aynı çalışma şartlarında çalıştırılmak suretiyle deneyler tekrarlanmıştır. Seramik kaplı halde, püskürtme avansı değiştirilmek suretiyle motorun özgül yakıt tüketiminde meydana gelen değişimler de incelenmiştir. Ayrıca, çalışmada egzoz gaz emisyonlarından; karbonmonoksit ve partikül emisyonları da ölçülerek değerlendirilmiştir.

Test motoru, hem kaplamasız ve hem de kaplamalı olarak, turbo doldurucu devre dışı bırakılmak suretiyle, tabi emmeli olarak çalıştırılarak test edilmiş ve böylece, termal bariyer kaplamanın tabi emmeli motor çalışmasına etkisi de irdelenmiştir.

Şekil 4.9 ve 4.10'da seramik kaplı motor parçalarının 250 saatlik çalışma sonundaki görüntüleri verilmektedir.

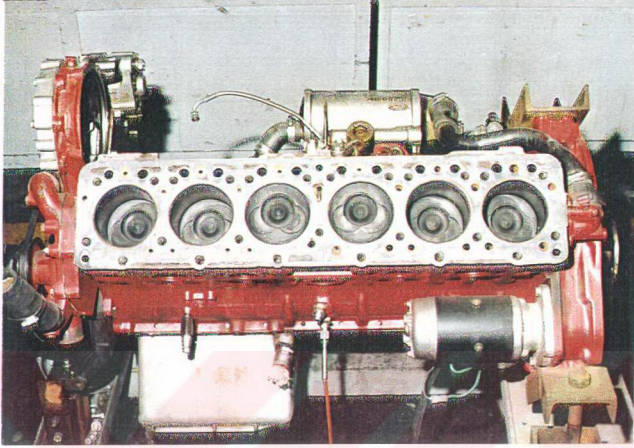
4.4 Bilgisayar Programının Tanıtılması

Deneysel verilerin analizi, Quickbasic bilgisayar programlama dilinde hazırlanan bir program kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu programa ait akış diyagramı Şekil 4.11'de verilmektedir. Program aşağıdaki ana bölümlerden meydana gelmektedir.

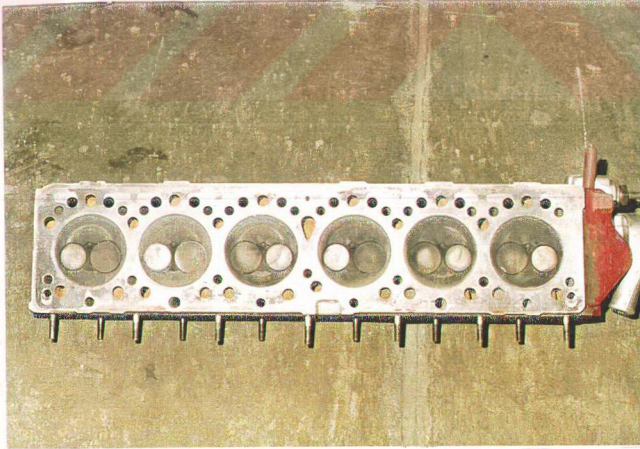
a) Data girişi : Burada, motorun performans hesaplamalarında kullanılmak üzere, deneylerde elde edilen verilerle motor ve su frenine özellikler programa data olarak girilmektedir.

b) Motor performans parametrelerinin hesaplanması : Burada, motorun özgül yakıt tüketimi, ortalama efektif basınç, döndürme momenti, efektif güç, hava fazlalık katsayısı, karışım oranı, volumetrik ve efektif verim değerleri ile soğutmaya, egzozla ve faydalı işe giden enerji miktarları hesaplanmaktadır.

c) Egzoz gazlarının kullanılabilir enerjilerinin hesabı : Burada, motorun her bir çalışma şartında egzoz gazlarının kullanılabilir enerjileri hesaplanmaktadır.



Şekil 4.9 Seramik kaplı pistonların 250 saat çalışma sonundaki görünüŖleri



Şekil 4.10 Seramik kaplı silindir kafası ve supapların 250 saat çalışma sonundaki görünüŖleri



Şekil 4.11 Bilgisayar programı akış diyagramı

d) Özgöl yakıt tüketimi ara değerlerini hesaplanması : Bu kısımda, eş özgöl yakıt tüketimi eğrilerinin çizilebilmesi amacıyla, özgöl yakıt tüketimi ara değerleri Lagrange Enterpolasyonu Yöntemi kullanılarak belirlenmektedir.

e) Özgöl yakıt tüketimi değerlerinin düzenlenmesi : Yukarıda, Lagrange Enterpolasyonu Yöntemi kullanılarak hesaplanan özgöl yakıt tüketimi ara değerleri bu alt programda düzenlenerek eş özgöl yakıt tüketimi ve bunlara karşı gelen ortalama efektif basınç ve devir sayısı değerleri belirlenerek bir dosyaya yüklenmektedir.

f) Sonuçların dosyalanması : Bu kısımda ise, yukarıda hesaplanan bütün sonuçlar, çizim programlarında kullanmaya uygun dosya formatında saklanmaktadır.

Yukarıda tanıtılan bilgisayar programı kullanılarak elde edilen analiz sonuçlarına ait grafikler, Microsoft Excel'de çizilmiştir. Eş özgöl yakıt tüketimi (yumurta) eğrilerinin çizimi ise Winsurf grafik çizim programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

5.1 Türbo Doldurmalı Motor Çalışma Sonuçları

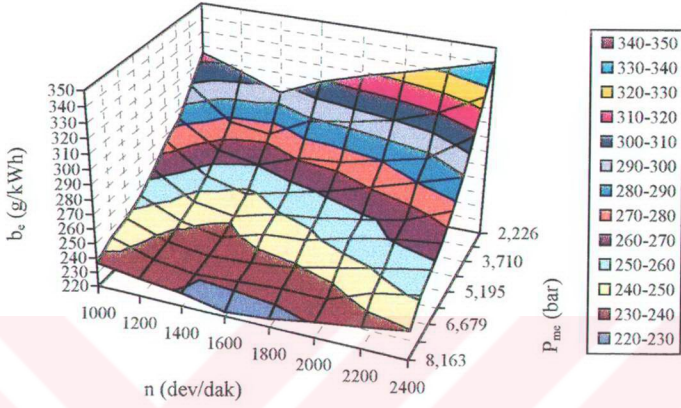
5.1.1 Seramik kaplamanın özgül yakıt tüketimine etkisi

Değişik devir ve ortalama efektif basınç şartlarında motorun çalıştırılması sonucunda elde edilen özgül yakıt sarfıyatı ve ortalama efektif basınç değerlerini kullanarak, normal motor (NM) ve seramik kaplı motor (SKM) için çizilen eş özgül yakıt sarfıyatı eğrileri (yumurta eğrileri) Şekil 5.1, 5.2, 5.3 ve 5.4'de verilmektedir. Şekil 5.5, 5.6 ve 5.7'de motor devrine bağlı olarak, Şekil 5.8, 5.9 ve 5.10'da ise ortalama efektif basınca bağlı olarak özgül yakıt tüketiminde meydana gelen değişim verilmektedir. Tablo 5.1'de de kaplamalı ve normal motora ait özgül yakıt tüketimi değerleri verilmektedir. Şekillerdeki kaplamalı ve normal hale ait eğriler, seramik kaplama sonucunda motorun özgül yakıt tüketiminin önemli ölçüde azaldığını göstermektedir. Bu azalma genelde, düşük ve orta p_{me} çalışma şartlarında bir süreklilik arz etmektedir. Özgül yakıt tüketimindeki azalmanın orta p_{me} ve devirlerde daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Düşük ve orta p_{me} şartlarındaki bu iyileşmenin, artan yanma odası sıcaklıkları sonucu yanma veriminde meydana gelen iyileşme ile egzoz gaz sıcaklıklarının artmasıyla türbo doldurucunun daha verimli olarak çalışmasının bir sonucu olduğu düşünülebilir. Türbo-doldurmalı motorlarda düşük p_{me} ve devir sayılarında, egzoz gazlarının türbo doldurucuyu istenen aşırı doldurmayı sağlayacak derecede enerji veremediği düşünülürse, egzoz gaz sıcaklıklarında kaplama sonucu meydana gelen artışın doldurucu verimini artıracak ve böylece özgül yakıt tüketiminde de bir iyileşmenin olacağı aşikardır. Yüksek p_{me} ve devirlerde ise kaplamalı motorun özgül yakıt tüketimindeki iyileşme azalan bir eğilimle birlikte

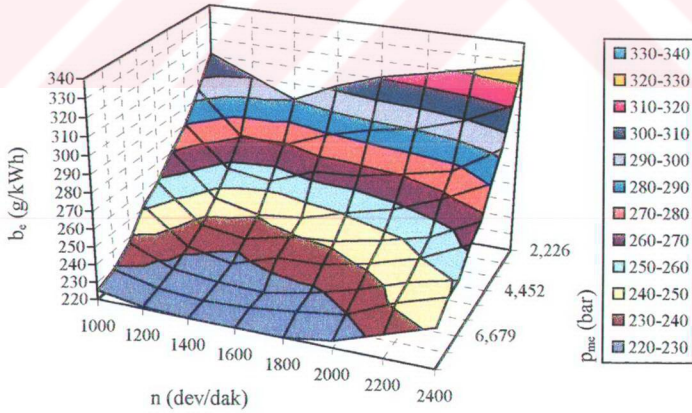
devam etmektedir. Tam yük ve maksimum devir şartlarında ise yakıt tüketiminde çok az da olsa bir artışa rastlanmıştır.

Tablo 5.1 Türbo doldurmalı normal ve kaplamalı motorun özgül yakıt tüketimi değerleri

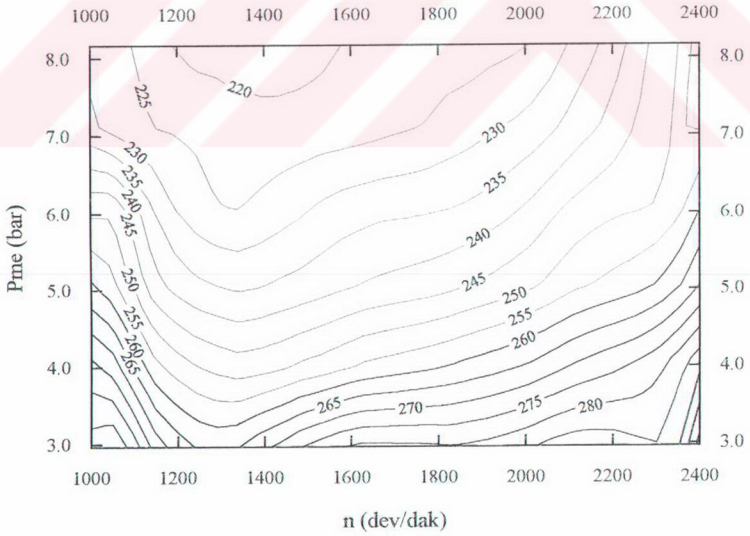
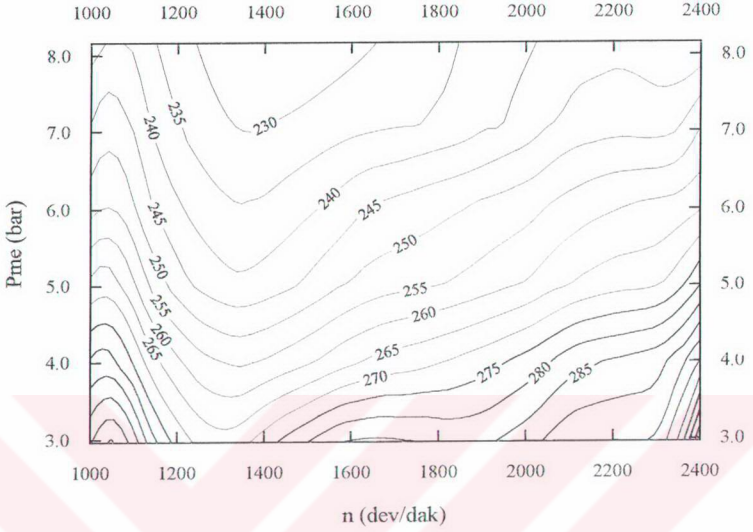
Türbo Doldurmalı Kaplamasız Motorun Özgül Yakıt Tüketimi Değerleri (g/kWh)										
P _{me} (bar)	Motor devri (dev/dak)									
	1000	1200	1300	1400	1500	1600	1800	2000	2200	2400
2,226	314,92	307,06	301,05	295,79	301,93	308,88	316,76	326,30	332,71	339,90
2,298	298,71	277,49	274,12	273,75	285,08	288,53	293,11	299,59	309,83	325,52
3,710	284,09	265,52	263,15	260,25	264,22	270,83	273,56	280,17	287,40	307,76
4,452	275,23	255,31	248,01	248,01	247,33	254,92	262,13	270,83	279,78	289,35
5,194	263,79	246,12	242,62	240,31	245,65	249,29	252,87	257,93	263,79	276,36
5,936	253,90	241,81	240,38	236,30	241,81	245,08	250,77	255,18	260,81	264,48
6,678	247,33	237,32	233,03	231,95	228,84	235,09	238,83	245,32	251,75	257,64
7,420	243,99	235,09	231,48	228,48	230,49	232,94	235,09	241,81	246,21	251,70
8,162	236,74	232,27	230,96	226,43	224,85	223,01	225,47	230,82	234,78	239,50
Türbo Doldurmalı Kaplamalı Motorun Özgül Yakıt Tüketimi Değerleri (g/kWh)										
2,226	311,30	300,92	294,25	290,90	294,54	302,26	310,23	316,39	322,26	328,04
2,298	294,81	270,83	267,09	268,68	279,21	279,01	285,68	290,17	298,80	311,15
3,710	279,69	257,44	255,10	253,98	257,93	263,79	265,52	270,83	276,64	293,10
4,452	270,29	246,39	240,57	240,61	237,57	243,20	250,77	257,44	267,62	280,71
5,194	258,51	237,07	234,96	233,54	236,64	239,42	241,51	246,96	253,65	267,20
5,936	247,71	231,24	229,78	226,70	229,52	235,09	236,08	241,81	249,54	262,03
6,678	236,95	226,60	224,01	223,12	218,85	223,90	227,97	235,09	244,25	250,77
7,420	228,87	223,46	220,84	221,51	221,08	222,72	225,69	229,52	241,38	249,84
8,162	225,19	221,01	221,94	218,92	216,92	216,73	219,44	223,83	233,15	242,33

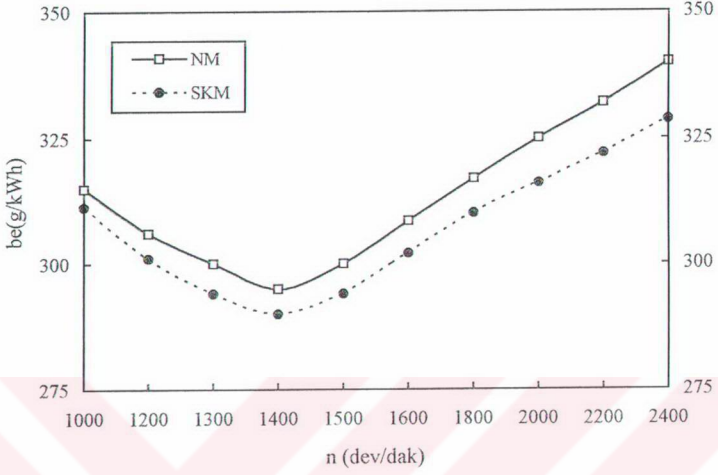


Şekil 5.1 Normal motora ait eş özgül yakıt tüketimi eğrilerinin üç boyutlu gösterimi

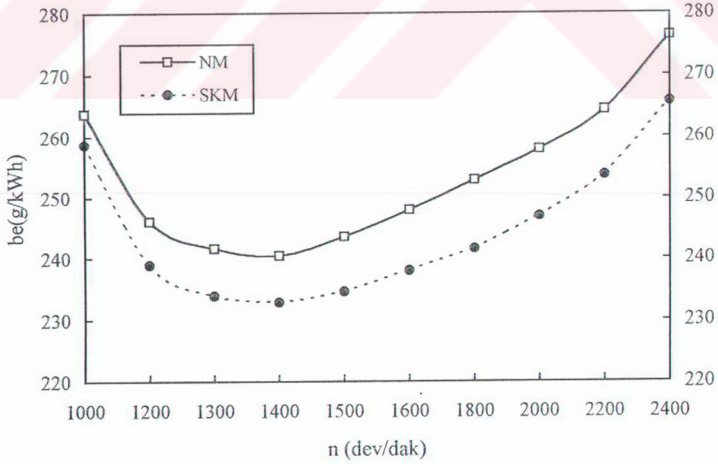


Şekil 5.2 Seramik kaplı motora ait eş özgül yakıt tüketimi eğrilerinin üç boyutlu gösterimi

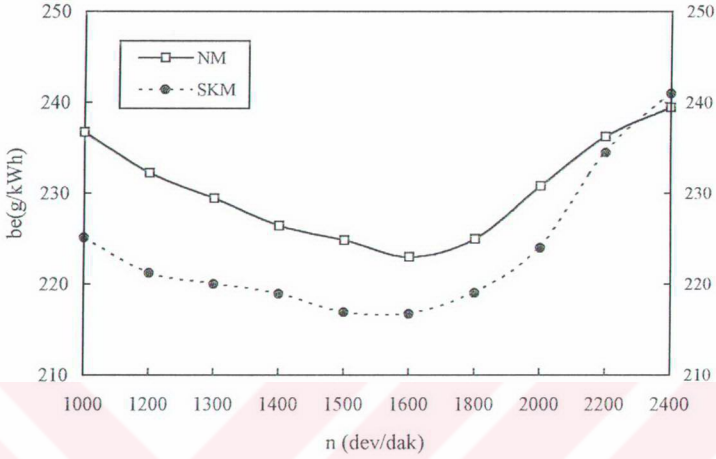




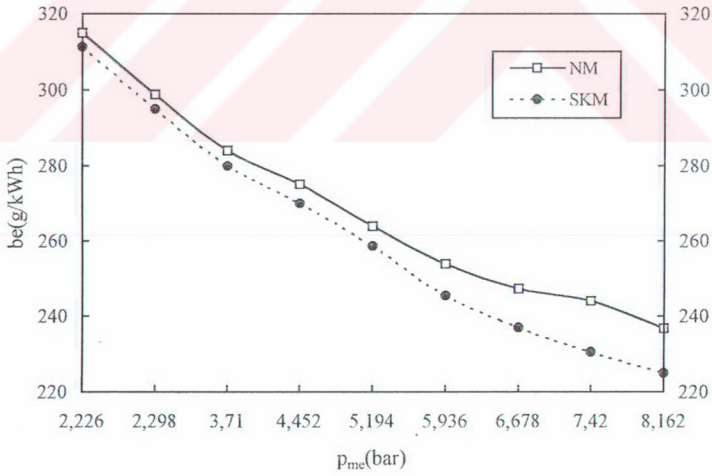
Şekil 5.5 Özgül yakıt tüketiminin devir sayısı ile değişimi ($p_{me} = 2,226$ bar)



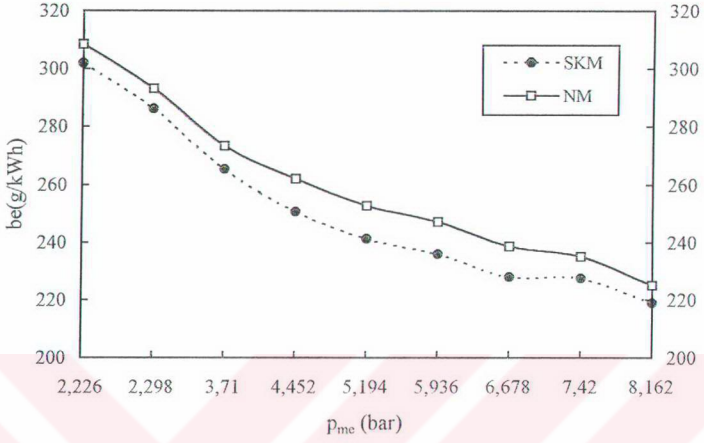
Şekil 5.6 Özgül yakıt tüketiminin devir sayısı ile değişimi ($p_{me} = 5,194$ bar)



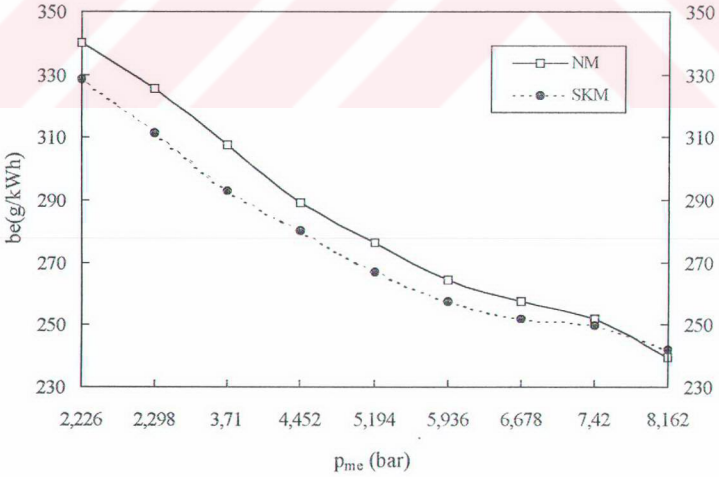
Şekil 5.7 Özgül yakıt tüketiminin devir sayısı ile değişimi ($P_{me}=8,162$ bar)



Şekil 5.8 Özgül yakıt tüketiminin ortalama efektif basınçla değişimi ($n=1000$ dev/dak)



Şekil 5.9 Özgül yakıt tüketiminin ortalama efektif basınçla değişimi
(n=1800 dev/dak)



Şekil 5.10 Özgül yakıt tüketiminin ortalama efektif basınçla değişimi
(n=2400 dev/dak)

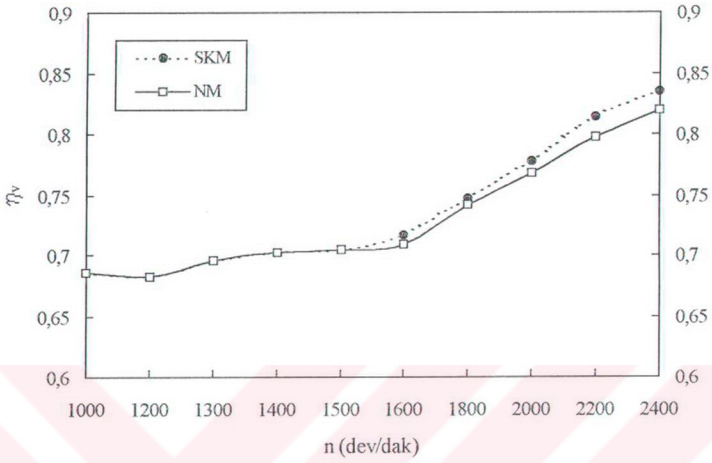
5.1.2 Seramik kaplamanın volumetrik verime etkisi

Şekil 5.11, 5.12, 5.13'de motor devrine bağlı olarak, Şekil 5.14, 5.15 ve 5.16'da ise ortalama efektif basınca bağlı olarak volumetrik verimin değişimi görülmektedir. Tablo 5.2'de de kaplamalı ve normal motora ait volumetrik verim değerleri verilmektedir. Seramik kaplı motorlarda, artan cidar sıcaklıklarının bir sonucu olarak, volumetrik verimde azalma olması doğaldır. Aşağıdaki volumetrik verime ait grafiklerde, düşük, orta p_{me} ve devir sayısı şartlarında, bu beklentiye ters olarak volumetrik verimin normal motora kıyasla arttığı görülmektedir. Bunun sebebi, türbo doldurucunun bu çalışma şartlarında daha verimli olarak çalışması ve bunun sonucu olarak da daha iyi aşırı doldurma yapmasıdır. Bilindiği üzere, türbo doldurmalı motorlarda, özellikle düşük p_{me} ve devir sayılarında, egzoz gazları istenen aşırı doldurmayı gerçekleştirecek enerjiyi sağlayamamaktadır. Termal bariyer kaplama ile egzoz gazlarının enerjileri de önemli ölçüde arttığından, doldurucu verimi de iyileşmektedir. Böylece, doğal emişli motorda her çalışma şartında volumetrik verimde azalma olmasına karşın, türbo doldurmalı motorda düşük, orta p_{me} ve devir sayısı şartlarında volumetrik verim artmakta, yüksek p_{me} ve devir sayılarında ise bir azalma görülmektedir. Seramik kaplı motorda meydana gelen volumetrik verim artışı, düşük p_{me} ve devirlerde çok daha az olmaktadır. Egzoz gazlarının enerjilerinin verildiği grafikler incelendiğinde bunun sebebi açık bir şekilde görülecektir. Çünkü, düşük p_{me} ve devirlerde kaplamalı motorun egzoz sıcaklıkları normal motora göre çok fazla bir artış göstermemektedir. Bunun sonucu olarak da bu çalışma şartlarında volumetrik verimdeki artış sınırlı kalmaktadır. p_{me} ve devir sayısının artmasıyla birlikte volumetrik verimdeki artış da artarak devam etmekte ve artış miktarı %3 değerlerine kadar çıkmaktadır. Örneğin, 1300 dev/dak ve 7,420 bar ortalama efektif basınçta volumetrik verim normal motorda 0,775 iken, bu değer kaplamalı motorda 0,803 olmaktadır. Bu da seramik kaplı motorun volumetrik veriminde normal motora kıyasla yaklaşık %3,6'lık bir artışı ifade etmektedir. Yüksek devir ve p_{me} şartlarında seramik kaplı motorun volumetrik veriminde kaplamasız motora göre %1 değerlerine kadar bir azalma görülmüştür. Bu azalma, silindir cidar sıcaklıklarında meydana gelen artışla açıklanabilir. Bu şartlarda egzoz gazları kaplamasız halde de türbo doldurucu için gerekli olan enerjiye sahip olduklarından, kaplama sonucu egzoz gazlarının

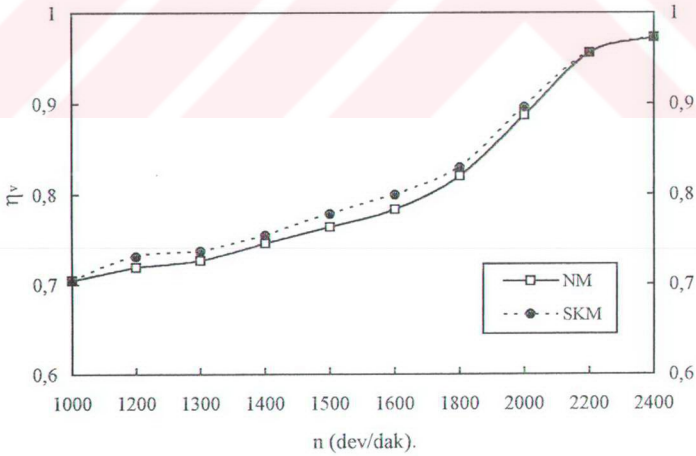
enerjisinde meydana gelen artış doldurucu veriminde herhangi bir artışa sebep olmamakta, artan cidar sıcaklıkları da doğal olarak volumetrik verimin azalması sonucunu doğurmaktadır.

Tablo 5.2 Türbo doldurmalı normal ve kaplamalı motora ait volumetrik verim değerleri

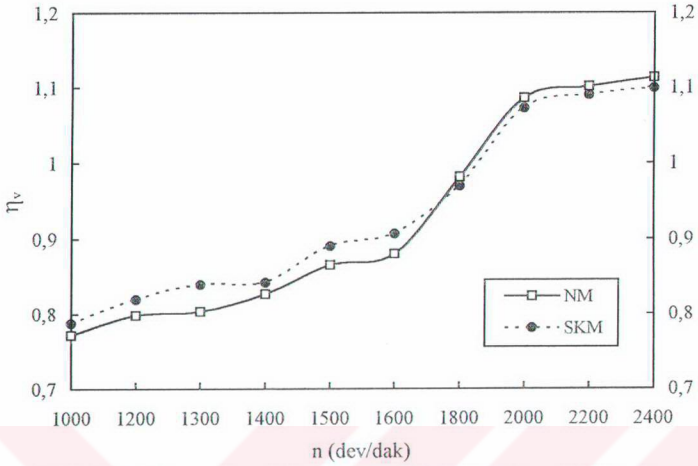
Türbo Doldurmalı Normal Motorun Volumetrik Verim Değerleri										
P _{me} (bar)	Motor devri (dev/dak)									
	1000	1200	1300	1400	1500	1600	1800	2000	2200	2400
2,226	0,686	0,686	0,696	0,702	0,704	0,709	0,742	0,768	0,798	0,820
2,968	0,686	0,694	0,700	0,711	0,712	0,723	0,752	0,787	0,829	0,839
3,710	0,686	0,702	0,706	0,720	0,719	0,734	0,764	0,834	0,866	0,888
4,452	0,690	0,714	0,716	0,729	0,742	0,743	0,792	0,870	0,922	0,934
5,194	0,695	0,723	0,727	0,746	0,764	0,783	0,820	0,887	0,955	0,972
5,936	0,704	0,747	0,746	0,763	0,778	0,799	0,866	0,940	0,994	1,015
6,678	0,721	0,749	0,756	0,779	0,799	0,823	0,892	0,984	1,037	1,050
7,420	0,755	0,787	0,775	0,811	0,826	0,852	0,950	1,029	1,061	1,070
8,162	0,771	0,798	0,803	0,826	0,865	0,880	0,982	1,086	1,101	1,113
Türbo Doldurmalı Kaplamalı Motorun Volumetrik Verim Değerleri										
2,226	0,686	0,686	0,696	0,702	0,704	0,716	0,747	0,778	0,814	0,835
2,968	0,686	0,694	0,706	0,720	0,719	0,730	0,757	0,797	0,844	0,857
3,710	0,686	0,706	0,716	0,729	0,727	0,743	0,772	0,843	0,880	0,893
4,452	0,692	0,719	0,727	0,737	0,757	0,756	0,802	0,878	0,929	0,939
5,194	0,700	0,730	0,737	0,754	0,778	0,799	0,830	0,895	0,955	0,972
5,936	0,715	0,754	0,756	0,771	0,792	0,817	0,870	0,945	0,994	1,004
6,678	0,738	0,765	0,766	0,795	0,820	0,841	0,888	0,976	1,031	1,040
7,420	0,755	0,798	0,803	0,826	0,859	0,874	0,942	1,022	1,055	1,060
8,162	0,787	0,819	0,839	0,841	0,891	0,907	0,970	1,072	1,090	1,099



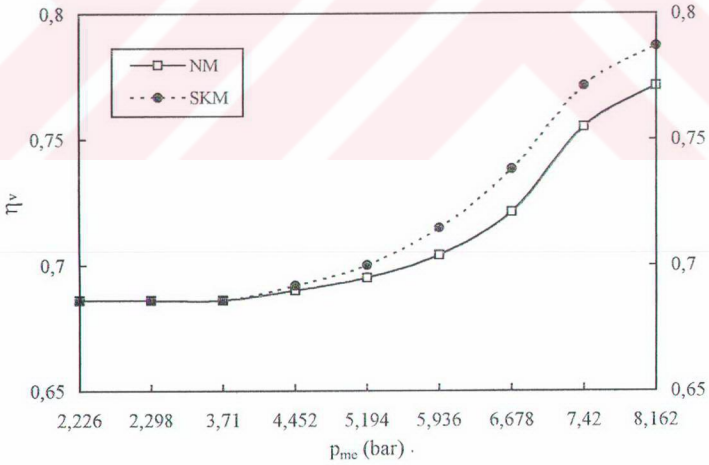
Şekil 5.11 Volumetrik verimin devir sayısı ile değişimi ($p_{mc}=2,226$ bar)



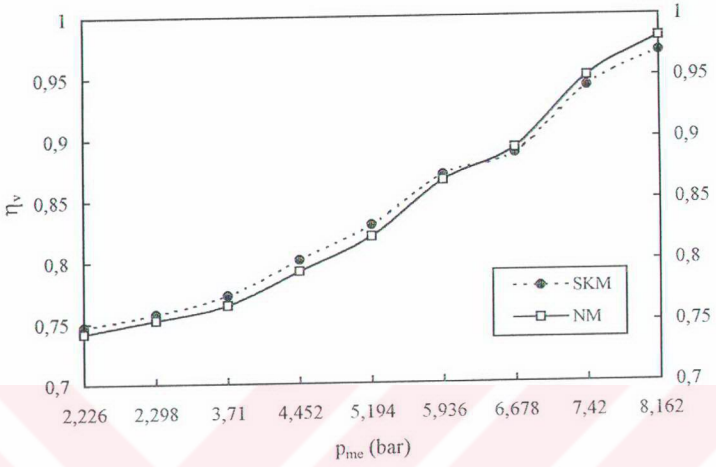
Şekil 5.12 Volumetrik verimin devir sayısı ile değişimi ($p_{mc}=5,194$ bar)



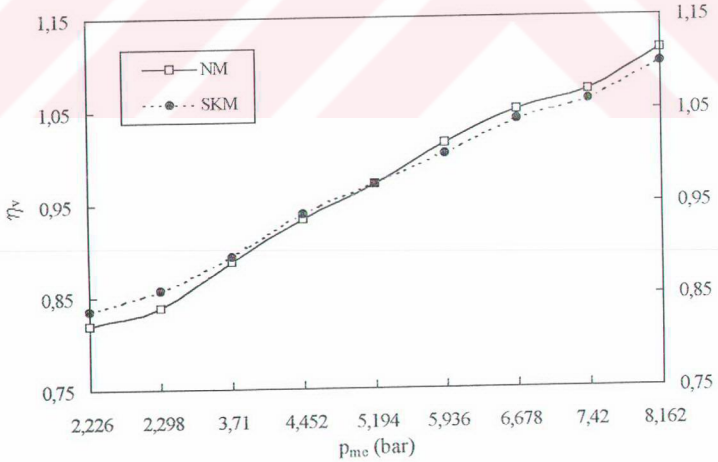
Şekil 5.13 Volumetrik verimin devir sayısı ile değişimi (p_{me}=8,162 bar)



Şekil 5.14 Volumetrik verimin ortalama efektif basınçla değişimi (n=1000 dev/dak)



Şekil 5.15 Volumetrik verimin ortalama efektif basınçla değişimi
($n=1800$ dev/dak)



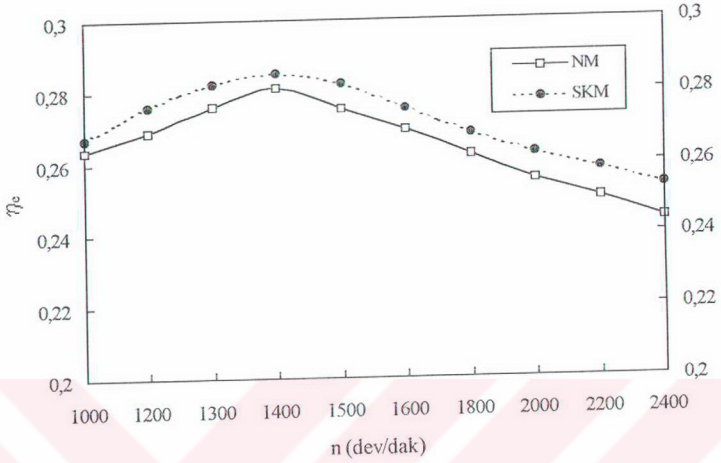
Şekil 5.16 Volumetrik verimin ortalama efektif basınçla değişimi
($n=2400$ dev/dak)

5.1.3 Seramik kaplamanın efektif verime etkisi

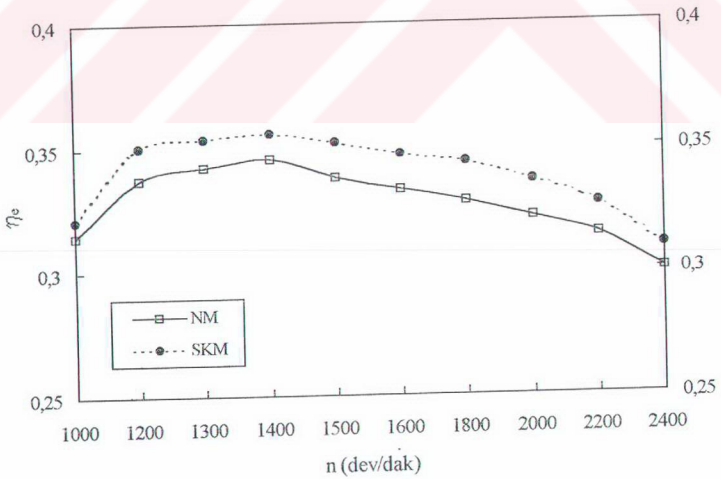
Termal bariyer kaplama sonucu motorun efektif veriminde meydana gelen değişimler Şekil 5.17, 5.18 ve 5.19'da motor devrine bağlı olarak, Şekil 5.20, 5.21 ve 5.22'de ise ortalama efektif basınca bağlı olarak verilmektedir. Tablo 5.3'de de kaplamalı ve kaplamasız motora ait efektif verim değerleri verilmektedir. DeneySEL verilere dayanarak belirlenen efektif verim değerleri normal motorda %23-38, seramik kaplı motorda ise %24-40 arasında değişmektedir. Kaplama sonucu motorun efektif verimi %2'ye kadar bir artış göstermektedir.

Tablo 5.3 Türbo doldurmalı normal ve kaplamalı motora ait efektif verim değerleri

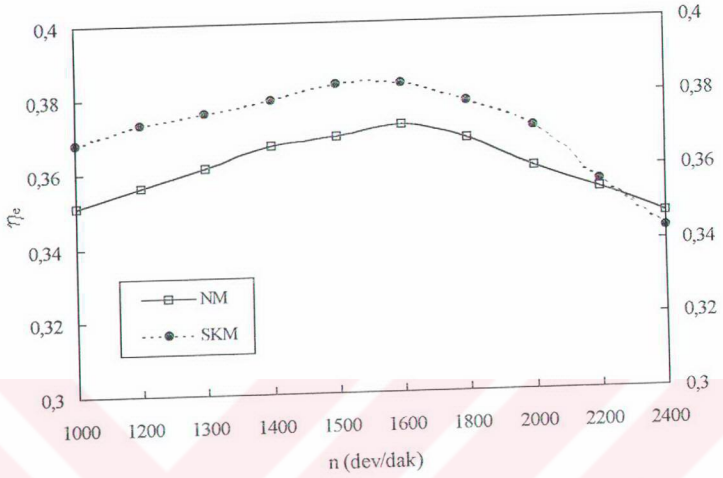
Türbo Doldurmalı Normal Motorun Efektif Verim Değerleri										
P _{me} (bar)	Motor devri (dev/dak)									
	1000	1200	1300	1400	1500	1600	1800	2000	2200	2400
2,226	0,264	0,270	0,276	0,281	0,275	0,269	0,262	0,255	0,250	0,244
2,968	0,278	0,299	0,303	0,303	0,291	0,288	0,283	0,277	0,268	0,255
3,710	0,292	0,313	0,316	0,319	0,314	0,307	0,304	0,296	0,289	0,270
4,452	0,302	0,325	0,335	0,335	0,336	0,326	0,317	0,307	0,297	0,287
5,194	0,315	0,337	0,342	0,346	0,338	0,333	0,328	0,322	0,315	0,300
5,936	0,327	0,343	0,345	0,351	0,343	0,339	0,331	0,325	0,318	0,314
6,678	0,336	0,350	0,356	0,358	0,363	0,353	0,348	0,339	0,330	0,322
7,420	0,340	0,353	0,359	0,363	0,360	0,357	0,353	0,343	0,337	0,330
8,162	0,351	0,356	0,361	0,367	0,369	0,372	0,368	0,360	0,354	0,347
Türbo Doldurmalı Kaplamalı Motorun Efektif Verim Değerleri										
2,226	0,267	0,276	0,282	0,285	0,282	0,275	0,268	0,262	0,258	0,253
2,968	0,282	0,307	0,311	0,309	0,297	0,298	0,291	0,286	0,278	0,267
3,710	0,297	0,323	0,326	0,327	0,322	0,315	0,313	0,307	0,300	0,283
4,452	0,307	0,337	0,345	0,345	0,350	0,341	0,331	0,323	0,310	0,296
5,194	0,321	0,350	0,353	0,356	0,351	0,347	0,344	0,336	0,327	0,311
5,936	0,335	0,359	0,361	0,366	0,362	0,353	0,352	0,343	0,333	0,320
6,678	0,350	0,366	0,371	0,372	0,379	0,371	0,364	0,353	0,340	0,328
7,420	0,363	0,372	0,376	0,375	0,376	0,373	0,368	0,362	0,344	0,332
8,162	0,369	0,373	0,374	0,379	0,383	0,383	0,378	0,371	0,356	0,343



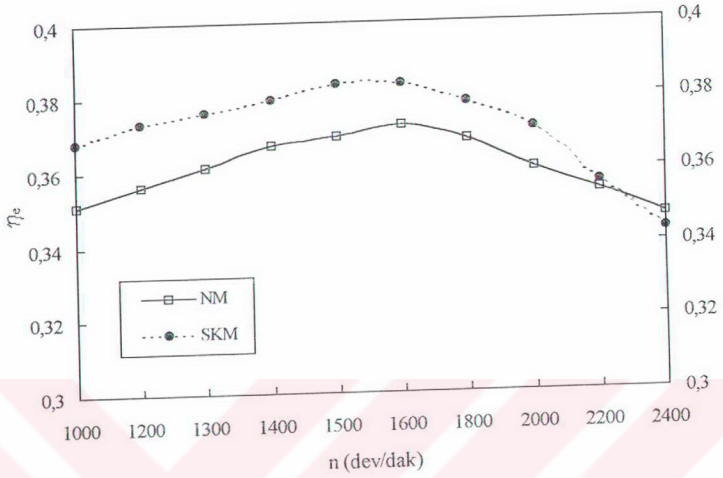
Şekil 5.17 Efektif verimin devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=2,226$ bar)



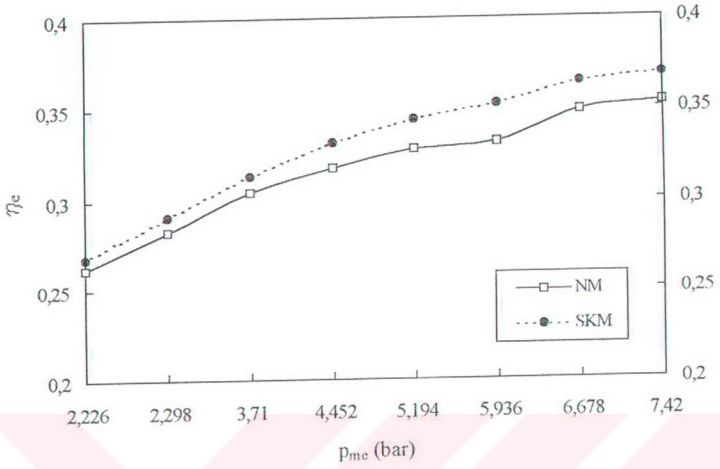
Şekil 5.18 Efektif verimin devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=5,194$ bar)



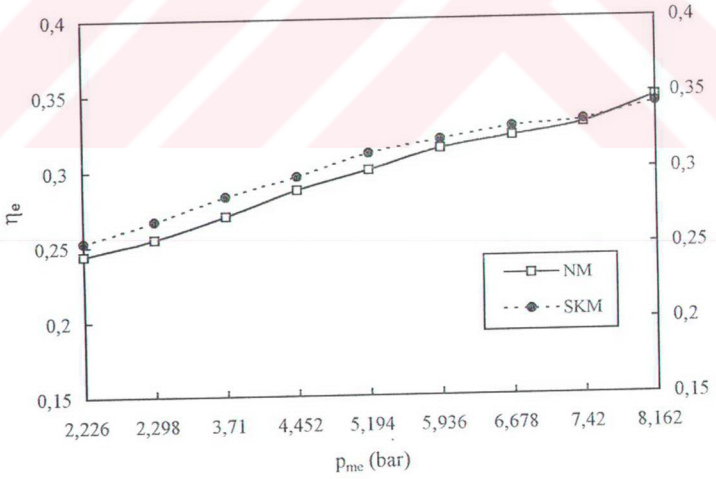
Şekil 5.20 Efektif verimin ortalama efektif basınçla değişimi ($n=1000$ dev/dak)



Şekil 5.19 Efektif verimin devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=8,162$ bar)



Şekil 5.21 Efektif verimin ortalama efektif basınçla değişimi
($n=1800$ dev/dak)



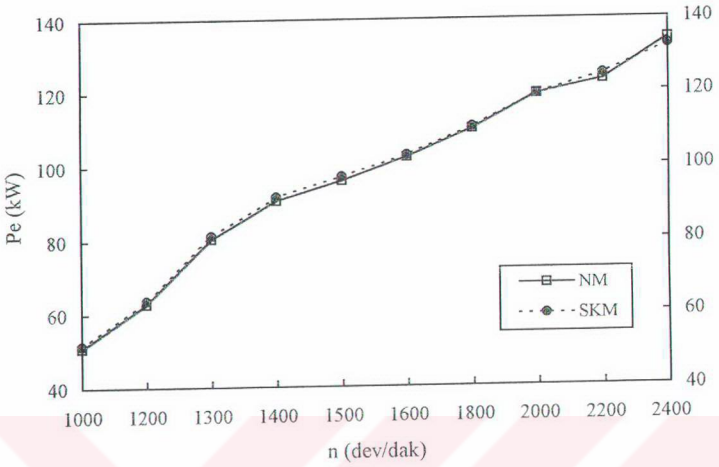
Şekil 5.22 Efektif verimin ortalama efektif basınçla değişimi
($n=2400$ dev/dak)

5.1.4 Seramik kaplamanın efektif güce ve döndürme momentine etkisi

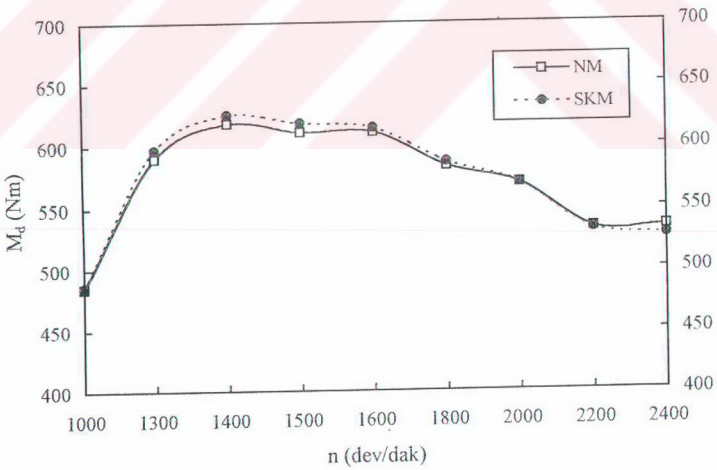
Tablo 5.4'de tam yükte kaplamalı ve kaplamasız motora ait döndürme momenti ve efektif güç değerleri verilmektedir. Şekil 5.23'de tam yükte efektif gücün, Şekil 5.24'de ise döndürme momentinin motor devriyle değişimi görülmektedir. Şekillerden de görüleceği üzere, seramik kaplı halde normal motora kıyasla motorun efektif gücü ve döndürme momenti önemsiz sayılabilecek bir artış göstermektedir. Yüksek devir sayılarında ise bu değerlerde çok az miktarda azalma görülmektedir. Bunun nedeni, yüksek yük ve devir şartlarında silindir cidar ve gaz sıcaklıklarındaki artışın yol açtığı volumetrik verimdeki azalma olarak düşünülmektedir.

Tablo 5.4 Turbo doldurmalı normal ve kaplamalı motorun tam yükte döndürme momenti ve efektif güç değerleri

Motor devri (dev/dak)	M_d (Nm)		P_e (kW)	
	Normal motor	Kaplamalı Motor	Normal motor	Kaplamalı Motor
1000	484,6569	491,6809	50,75085	51,48637
1200	498,7049	505,7289	62,66626	63,54889
1300	590,0171	597,0411	80,31873	81,27491
1400	618,1132	625,1372	90,61600	91,64573
1500	611,0892	618,1132	95,98530	97,08858
1600	611,0892	614,6012	102,38430	102,97270
1800	582,9931	586,5051	109,88660	110,54860
2000	568,9451	568,9451	119,15420	119,15420
2200	533,8250	540,8490	122,97890	124,59700
2400	533,8250	526,8010	134,15880	132,39350



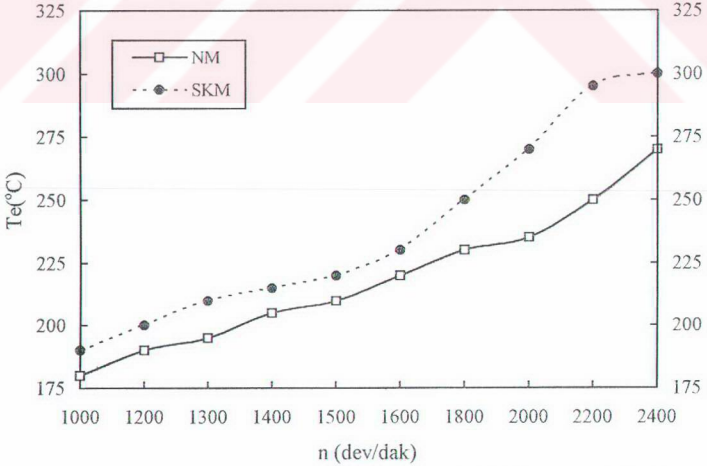
Şekil 5.23 Motor efektif gücünün devir sayısı ile değişimi



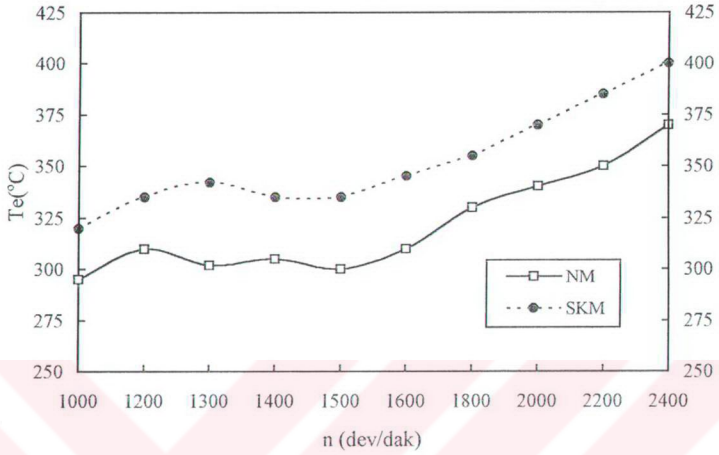
Şekil 5.24 Döndürme momentinin devir sayısı ile değişimi

5.1.5 Seramik kaplamanın egzoz enerjisine etkisi

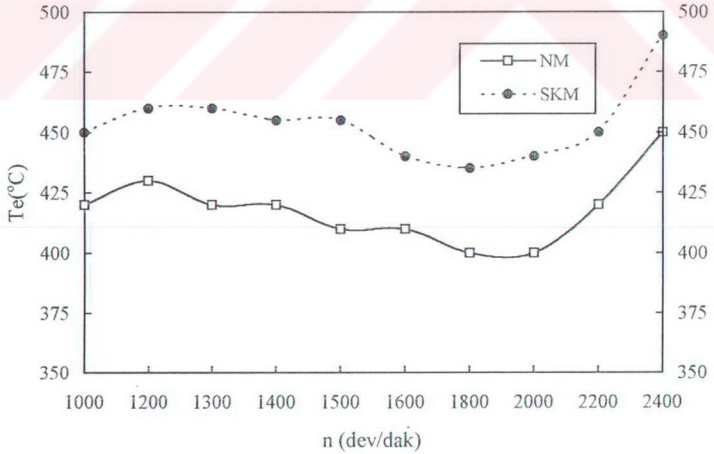
Düşük ısı kayıplı motorlardan elde edilebilecek en belirgin sonuç egzoz gaz sıcaklıklarındaki artıştır. Aşağıda Şekil 5.25, 5.26 ve 5.27'de sabit ortalama efektif basınç değerlerinde devir sayısına bağlı olarak, Şekil 5.28, 5.29 ve 5.30'da ise sabit devir sayılarında ortalama efektif basınca bağlı olarak kaplamalı ve kaplamasız motorlardaki egzoz gaz sıcaklıklarının değişimi verilmektedir. Seramik kaplama sonucu egzoz gaz sıcaklıkları, normal motora göre bütün çalışma şartlarında artmaktadır. Termal bariyer kaplama sonucu, soğutucu akışkana geçmesi engellenen enerjinin bir kısmının egzoz gazlarına geçeceği ve gaz sıcaklıklarını artıracığı beklenen bir olgudur. Deney sonuçları, gaz sıcaklıklarında meydana gelen bu artış değerinin düşük p_{me} ve devir sayılarında daha az olduğunu, p_{me} ve devir sayısının artmasıyla birlikte bu artışın hızlanarak devam ettiğini göstermektedir. Kaplama sonucu gaz sıcaklıklarında meydana gelen bu sıcaklık artışları 10-65 °C arasında değişmektedir. Bu değer, kaplamalı motorda egzoz gaz sıcaklıklarının normal motora göre %5-22 arasında bir artış gösterdiğini ifade etmektedir.



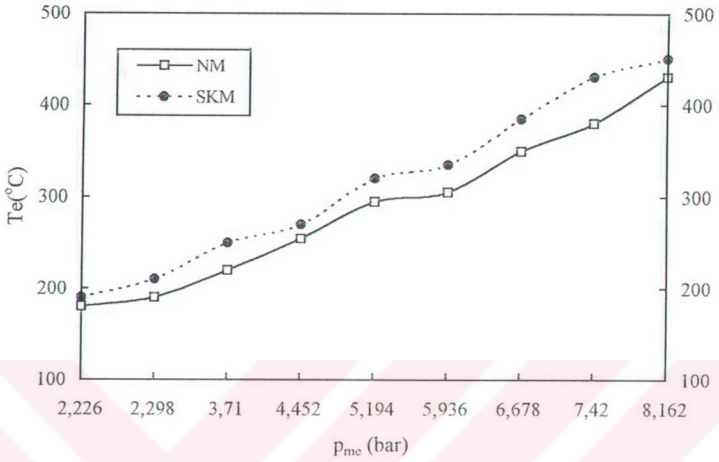
Şekil 5.25 Egzoz gaz sıcaklığının devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=2,226$ bar)



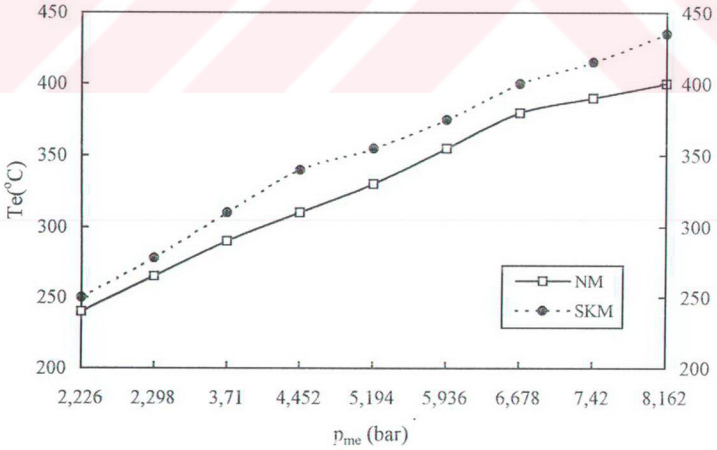
Şekil 5.26 Egzoz gaz sıcaklığının devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=5,194$ bar)



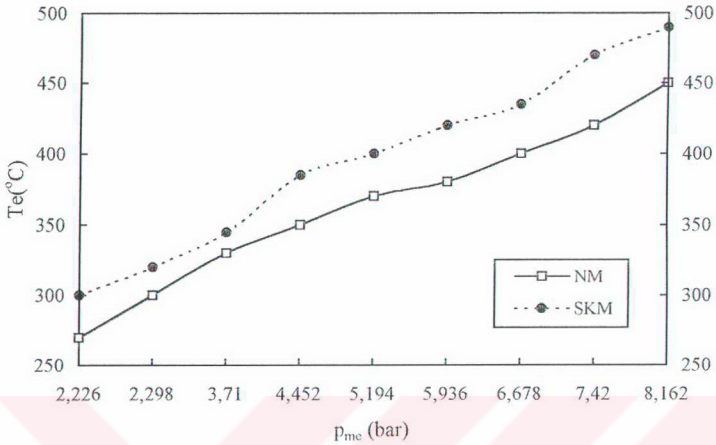
Şekil 5.27 Egzoz gaz sıcaklığının devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=8,162$ bar)



Şekil 5.28 Egzoz gaz sıcaklığının ortalama efektif basınçla değişimi
(n=1000 dev/dak)



Şekil 5.29 Egzoz gaz sıcaklığının ortalama efektif basınçla değişimi
(n=1800 dev/dak)



Şekil 5.30 Egzoz gaz sıcaklığının ortalama efektif basınçla değişimi
($n=2400$ dev/dak)

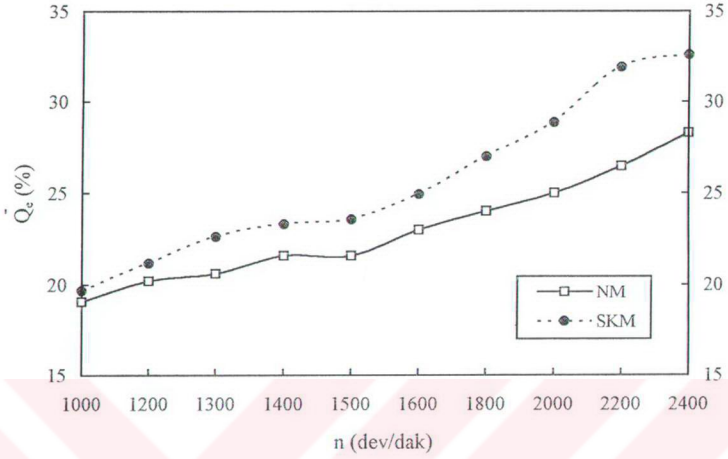
Tablo 5.5'de toplam yakıt enerjisinin yüzdesi, Tablo 5.6'da da (kW) olarak egzoz gaz enerji akısı değerleri verilmektedir. Şekil 5.31, 5.32 ve 5.33'de sabit p_{me} şartlarında devir sayısına bağlı olarak, Şekil 5.34, 5.35 ve 5.36'de ise sabit devir sayılarında p_{me} 'a bağlı olarak kaplamalı ve kaplamasız motorlardaki egzoz enerji akıları, toplam yakıt enerjisinin yüzdesi olarak verilmektedir. Bu enerji yüzdeleri seramik kaplı motorda %18-33, normal motorda ise %16-28 arasında değişmektedir. Şekil 5.37, 5.38 ve 5.39'da ise egzoz gazlarının değişik p_{me} ve devir sayılarındaki enerji akısı değerleri (kW) cinsinden verilmektedir. Şekillerden de görüleceği üzere, devir sayısı ve p_{me} 'in artmasıyla birlikte egzoz gazlarına giden enerji akısı da artmaktadır. Şekillerden, bu artış miktarının yüksek p_{me} ve devir sayısı şartlarında daha da belirgin olduğu görülmektedir.

Tablo 5.5 Türbo doldurmalı normal ve kaplamalı motora ait egzoz enerjileri

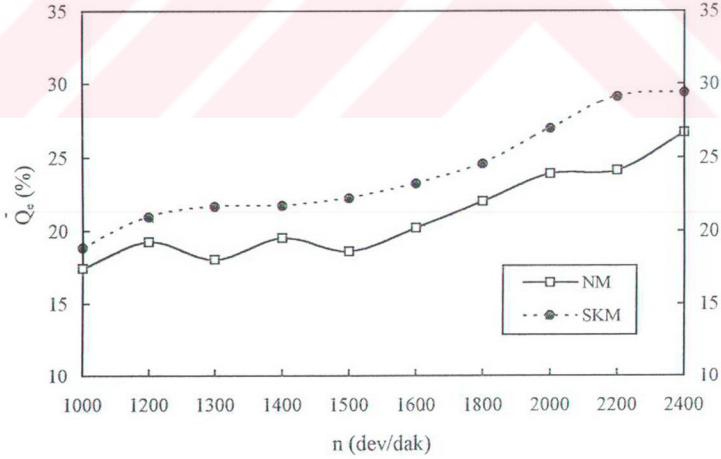
Türbo doldurmalı normal motorun egzoz enerjileri (% yakıt enerjisi)										
P _{me} (bar)	Motor devri (dev/dak)									
	1000	1200	1300	1400	1500	1600	1800	2000	2200	2400
2,226	19,065	20,340	20,602	21,600	21,537	23,075	24,673	25,581	26,509	28,285
2,968	16,008	19,079	18,283	20,658	20,073	21,594	24,315	24,322	25,131	27,107
3,710	15,618	18,445	17,267	20,893	19,914	21,097	23,265	24,647	24,747	26,777
4,452	15,988	18,032	16,834	19,916	19,558	20,737	22,481	23,756	23,784	26,539
5,194	17,371	19,082	18,081	19,712	18,627	20,200	22,007	23,890	24,101	26,683
5,936	15,685	18,740	17,216	20,067	18,629	19,527	22,103	23,763	23,689	25,789
6,678	16,885	19,171	18,243	19,720	19,774	20,369	22,784	24,309	24,748	25,595
7,420	17,544	19,087	18,085	19,840	18,999	20,270	22,797	23,865	23,966	25,287
8,162	19,045	20,194	18,612	20,412	20,414	21,990	22,490	24,229	25,457	26,938
Türbo doldurmalı kaplamalı motorun egzoz enerjileri (% yakıt enerjisi)										
2,226	19,666	21,178	22,600	23,290	23,506	25,353	27,001	29,153	31,927	32,568
2,968	17,186	20,672	21,682	22,438	22,499	24,194	25,720	27,773	31,989	30,744
3,710	17,280	20,181	21,268	22,359	22,295	23,693	25,268	27,860	30,685	29,427
4,452	16,586	19,383	20,545	21,555	23,124	23,303	25,445	27,156	29,639	30,120
5,194	18,887	20,854	21,648	21,822	22,208	23,202	24,542	26,946	29,089	29,234
5,936	17,388	20,228	20,128	21,973	22,294	22,751	24,394	26,145	27,685	28,366
6,678	19,307	20,828	21,913	22,472	23,525	23,580	24,679	25,403	27,126	28,305
7,420	20,894	21,824	21,906	21,907	22,734	23,243	24,643	26,743	27,201	28,247
8,162	21,982	22,184	22,600	22,713	24,183	23,822	24,813	27,111	27,081	28,648

Tablo 5.6 Türbo doldurmalı normal ve kaplamalı motora ait egzoz enerji akıları

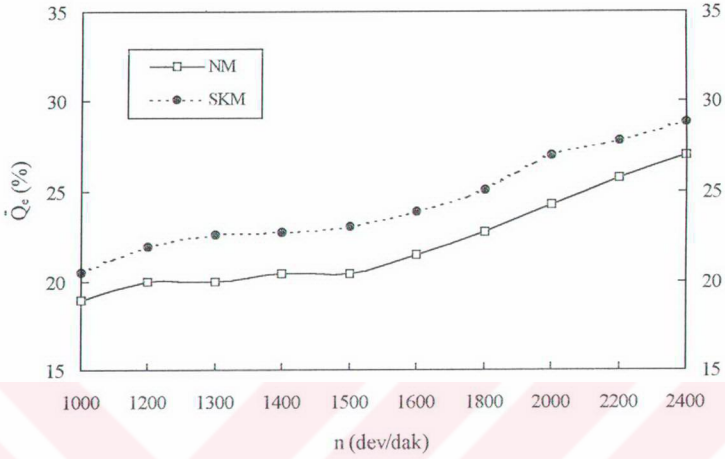
Türbo doldurmalı normal motorun egzoz enerji akısı değerleri (kW)										
P _{me} (bar)	Motor devri (dev/dak)									
	1000	1200	1300	1400	1500	1600	1800	2000	2200	2400
2,226	7,976	9,957	10,947	12,844	13,560	15,807	20,205	22,179	26,352	32,821
2,968	8,470	11,254	11,541	14,024	15,205	17,659	22,724	25,815	30,343	37,512
3,710	9,824	13,013	13,080	16,855	17,476	20,243	25,366	30,580	34,646	43,794
4,452	11,692	14,679	14,422	18,374	19,280	22,473	28,184	34,190	38,898	48,968
5,194	13,387	17,470	17,679	20,558	21,277	24,977	31,052	38,203	43,358	54,860
5,936	14,109	19,265	19,060	23,519	23,938	27,127	35,346	42,966	48,155	57,993
6,678	16,644	21,759	22,026	25,522	27,053	30,537	39,037	47,535	54,629	63,076
7,420	18,957	23,845	24,100	28,104	29,090	33,455	42,721	51,112	57,488	67,646
8,162	21,964	27,419	27,222	31,521	33,540	38,223	44,462	54,485	64,052	75,429
Türbo doldurmalı kaplı motorun egzoz enerji akısı değerleri (kW)										
2,226	8,133	10,160	11,783	13,083	14,355	16,290	20,773	25,937	37,249	36,574
2,968	8,975	11,900	13,336	14,950	16,691	19,132	23,429	28,551	41,350	40,669
3,710	10,701	13,804	15,617	17,603	19,100	22,143	26,740	33,413	46,367	45,836
4,452	11,912	15,227	17,072	19,292	21,895	24,094	30,517	37,151	50,319	53,917
5,194	14,182	18,390	20,498	22,118	24,436	27,552	33,073	41,256	53,844	58,114
5,936	15,259	19,886	21,301	24,706	27,191	30,318	36,725	44,795	58,096	63,198
6,678	18,233	22,572	25,434	27,977	30,779	33,668	40,362	47,604	63,967	67,894
7,420	21,177	25,916	27,852	30,085	33,387	36,680	44,333	54,364	67,665	75,007
8,162	22,687	28,660	31,765	33,909	38,331	40,240	47,743	59,119	75,020	81,164



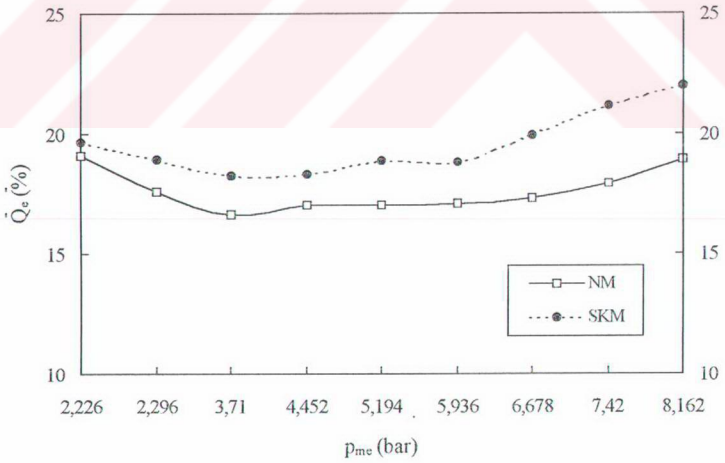
Şekil 5.31 Egzoz enerjisinin devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=2,226$ bar)



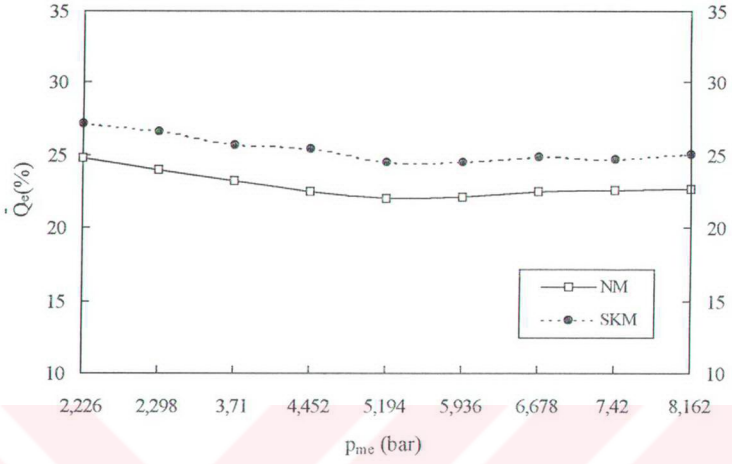
Şekil 5.32 Egzoz enerjisinin devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=5,194$ bar)



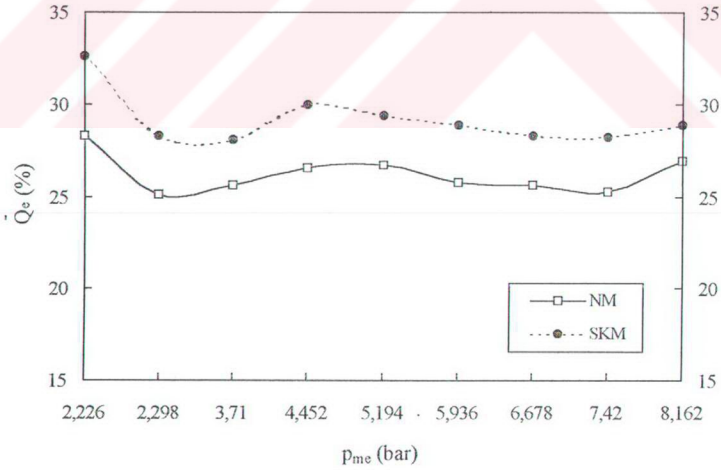
Şekil 5.33 Egzoz enerjisinin devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=8,162$ bar)



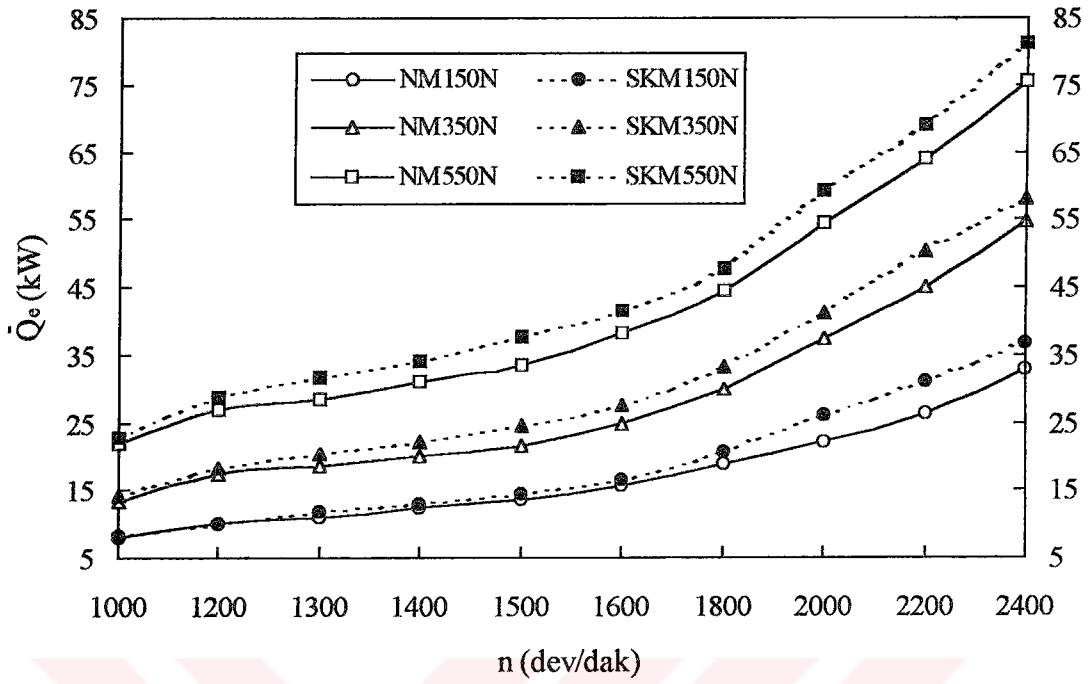
Şekil 5.34 Egzoz enerjisinin ortalama efektif basınçla değişimi ($n=1000$ dev/dak)



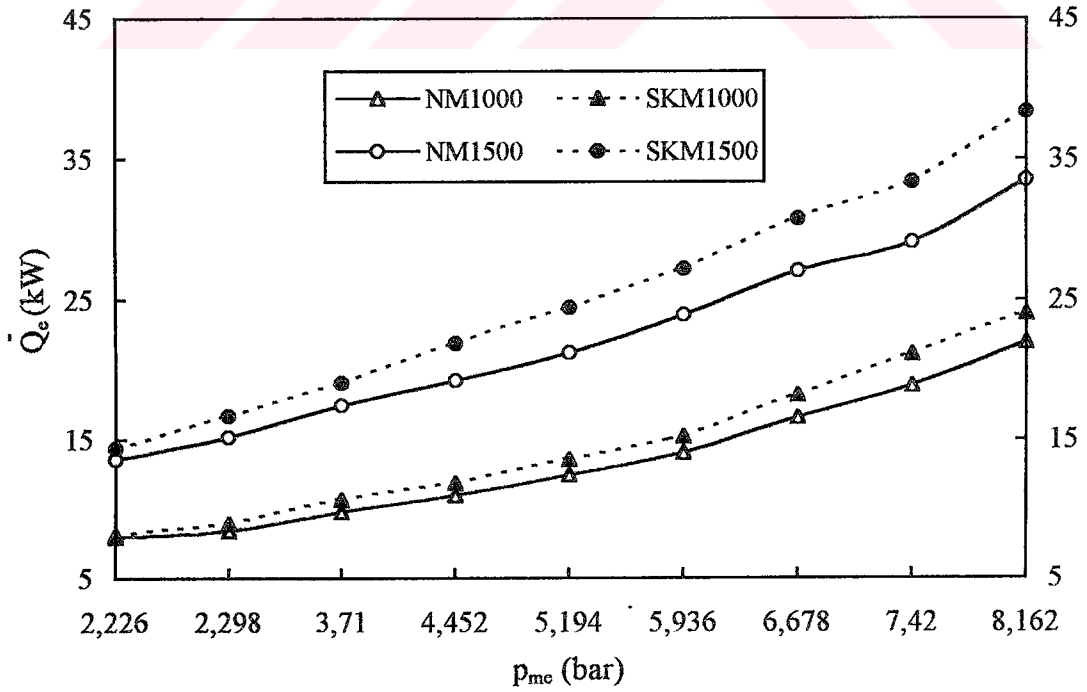
Şekil 5.35 Egzoz enerjisinin ortalama efektif basınçla değişimi
($n=1800$ dev/dak)



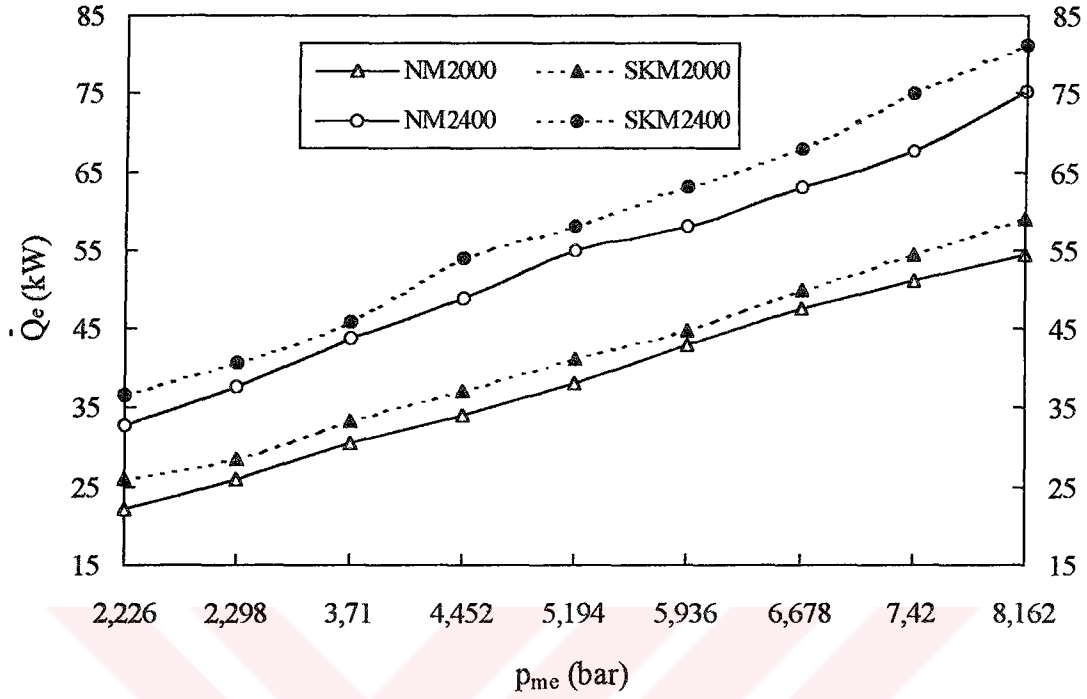
Şekil 5.36 Egzoz enerjisinin ortalama efektif basınçla değişimi
($n=2400$ dev/dak)



Şekil 5.37 Farklı ortalama efektif basınçlarda egzoz enerji akısının devir sayısı ile değişimi



Şekil 5.38 Farklı devir sayılarında egzoz enerji akısının ortalama efektif basınçla değişimi



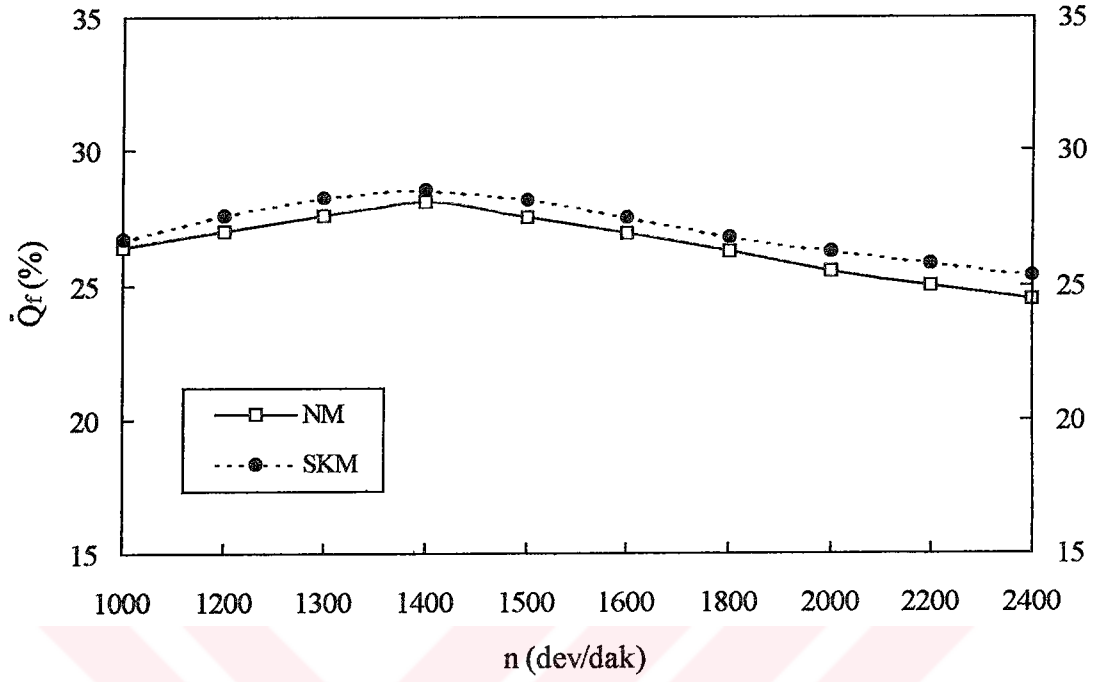
Şekil 5.39 Farklı devir sayılarında egzoz enerji akışının ortalama efektif basınçla değişimi

5.1.6 Seramik kaplamanın faydalı işe dönüşen enerjiye etkisi

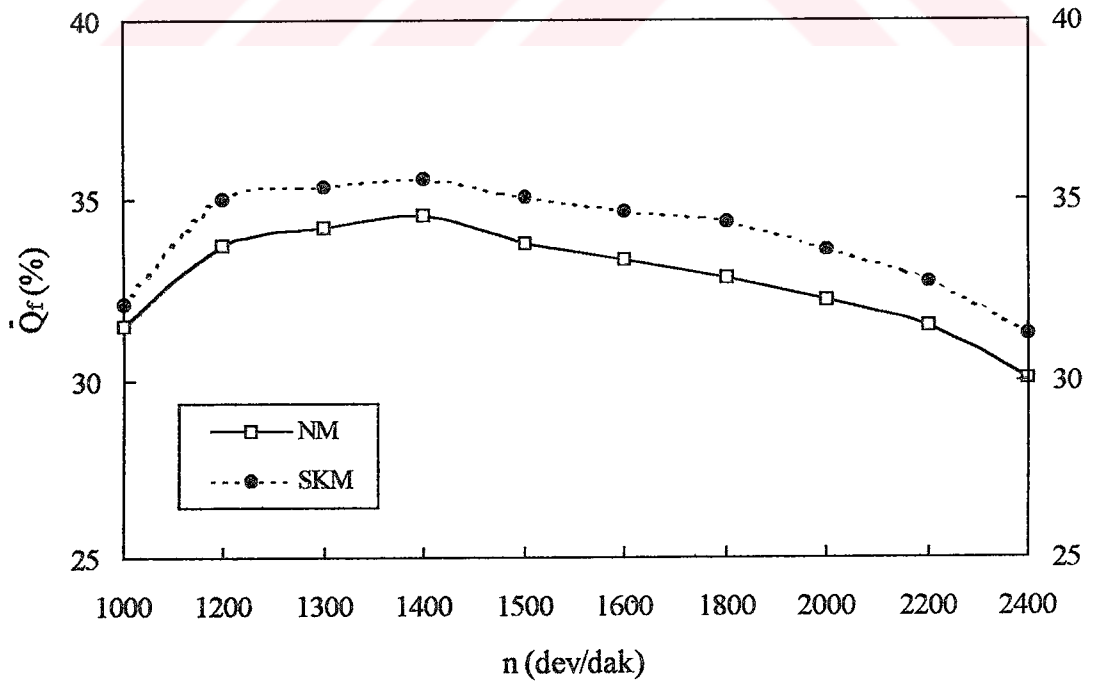
Farklı ortalama efektif basınç ve devir sayısı şartlarında faydalı işe dönüşen enerji miktarları, toplam yakıt enerjisinin yüzdesi cinsinden, Şekil 5.40, 5.41 ve 5.42'de sabit ortalama efektif basınç değerlerinde devir sayısına bağlı olarak, Şekil 5.43, 5.44 ve 5.45'de ise sabit devir sayılarında ortalama efektif basınca bağlı olarak verilmektedir. Tablo 5.7'de faydalı işe dönüşen enerji yüzdesi değerleri verilmektedir. Normal motorda toplam yakıt enerjisinin faydalı işe dönüşen miktarı %22.8-39, kaplamalı motorda ise %23.5-40 arasında değerler almaktadır. Kaplama sonucu, faydalı işe dönüşen enerji yüzdesi özellikle orta p_{me} ve devir sayılarında belirgin bir artış göstermektedir.

Tablo 5.7 Türbo doldurmalı normal ve kaplamalı motorda faydalı işe dönüşen enerji değerleri

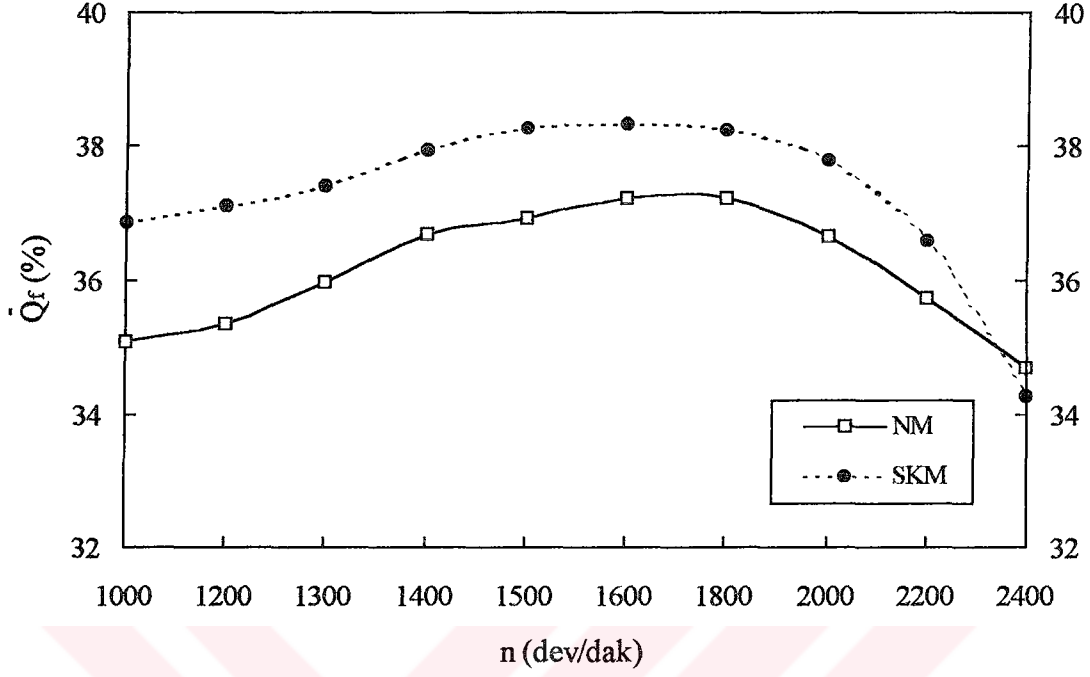
Türbo doldurmalı normal motorun faydalı enerji değerleri (% yakıt enerjisi)										
P _{me} (bar)	Devir sayısı (dev/dak)									
	1000	1200	1300	1400	1500	1600	1800	2000	2200	2400
2,226	26,370	27,045	27,585	28,075	27,505	26,886	26,217	25,451	24,960	24,432
2,968	27,801	29,927	30,295	30,336	29,130	28,783	28,333	27,720	26,804	25,512
3,710	29,232	31,277	31,558	31,910	31,430	30,663	30,357	29,641	28,895	26,984
4,452	30,173	32,528	33,484	33,484	33,576	32,577	31,681	30,663	29,682	28,701
5,194	31,481	33,742	34,228	34,557	33,806	33,313	32,840	32,196	31,481	30,050
5,936	32,707	34,343	34,547	35,144	34,343	33,885	33,116	32,544	31,841	31,399
6,678	33,576	34,993	35,637	35,802	36,290	35,324	34,772	33,852	32,988	32,233
7,420	34,036	35,324	35,876	36,346	36,029	35,651	35,324	34,343	33,730	32,994
8,162	35,078	35,348	35,956	36,675	36,934	37,237	37,237	36,653	35,742	34,674
Türbo doldurmalı kaplı motorun faydalı enerji değerleri (% yakıt enerjisi)										
2,226	26,677	27,597	28,222	28,547	28,195	27,474	26,769	26,248	25,769	25,316
2,968	28,169	30,663	31,093	30,909	29,743	29,764	29,069	28,619	27,793	26,689
3,710	29,692	32,258	32,554	32,697	32,196	31,481	31,277	30,663	30,019	28,333
4,452	30,725	33,705	34,521	34,515	34,956	34,147	33,116	32,258	31,031	29,584
5,194	32,125	35,030	35,345	35,559	35,094	34,686	34,386	33,627	32,740	31,080
5,936	33,525	35,913	36,142	36,632	36,183	35,324	35,177	34,343	33,280	31,694
6,678	35,048	36,649	37,072	37,219	37,946	37,090	36,428	35,324	33,999	33,116
7,420	36,285	37,164	37,603	37,491	37,562	37,287	36,796	36,183	34,404	33,239
8,162	36,877	37,102	37,417	37,935	37,935	38,317	38,249	37,777	36,607	34,269



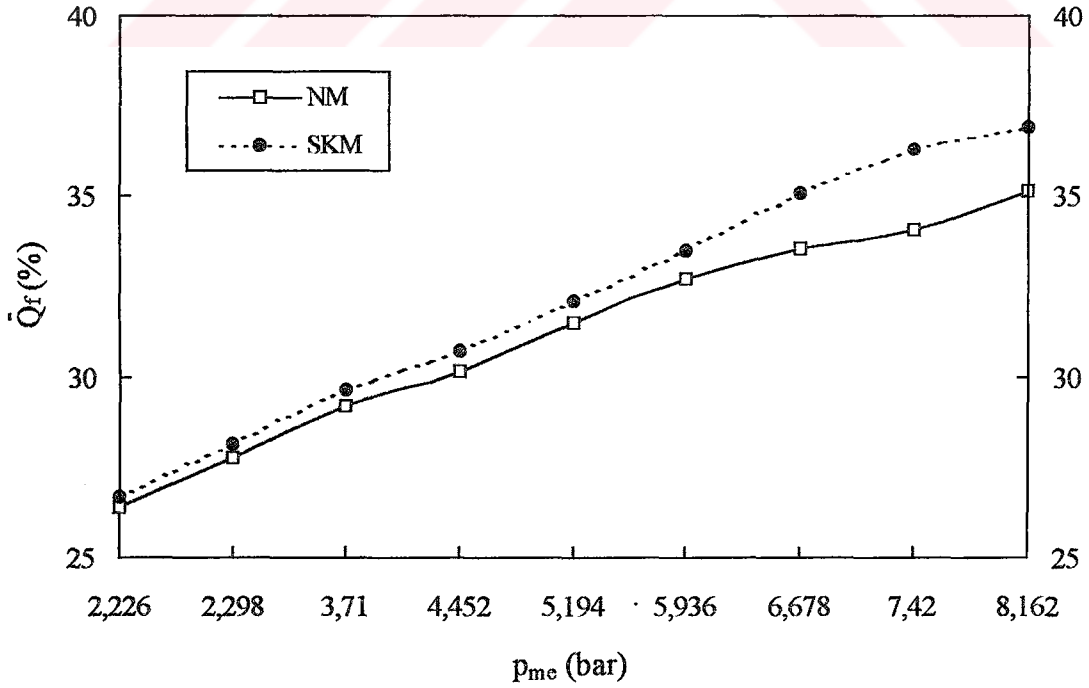
Şekil 5.40 Faydalı işe dönüşen enerjinin devir sayısı ile değişimi ($p_{mc}=2,226$ bar)



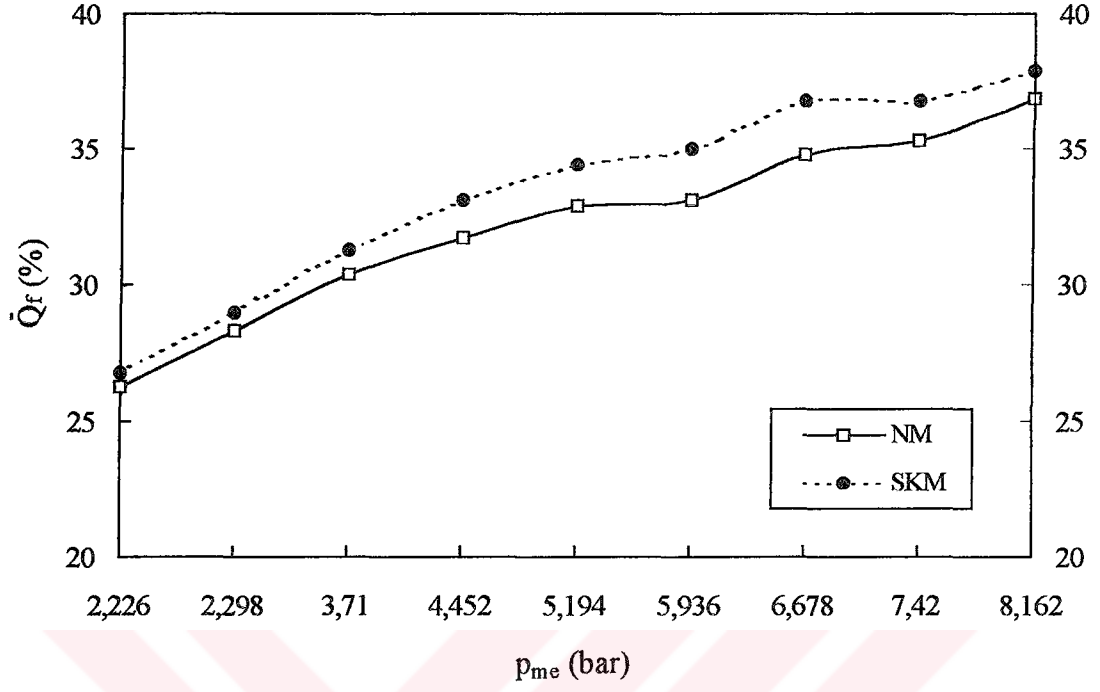
Şekil 5.41 Faydalı işe dönüşen enerjinin devir sayısı ile değişimi ($p_{mc}=5,194$ bar)



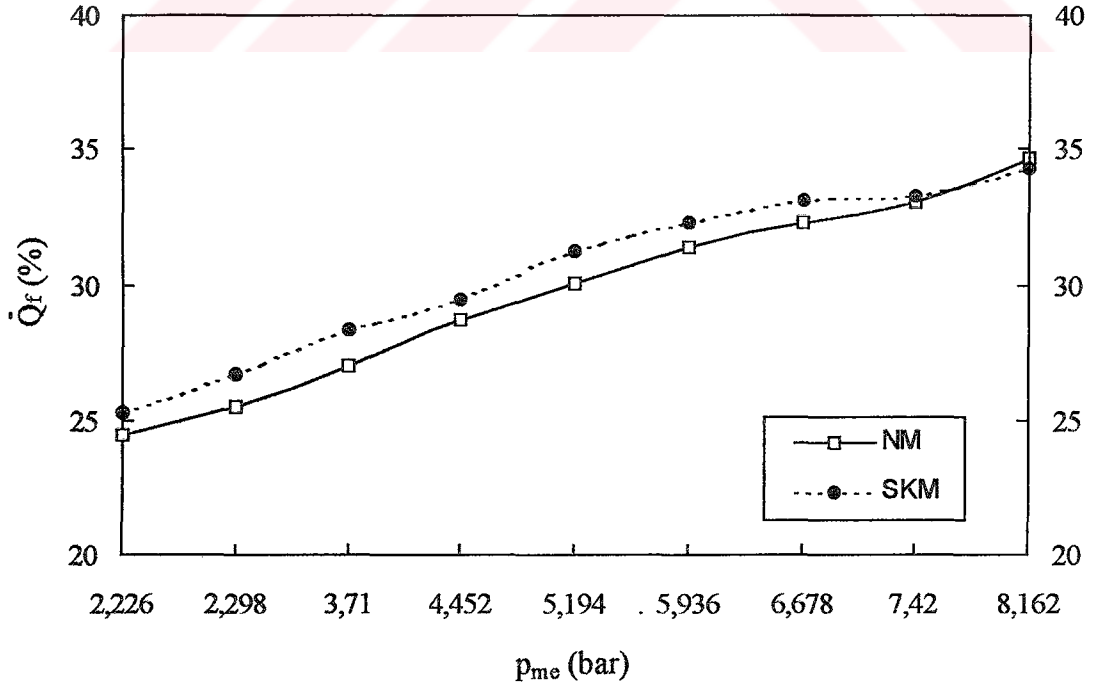
Şekil 5.42 Faydalı işe dönüşen enerjinin devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=8,162$ bar)



Şekil 5.43 Faydalı İşe dönüşen enerjinin ortalama Efektif basınçla değişimi ($n=1000$ dev/dak)



Şekil 5.44 Faydalı işe dönüşen enerjinin ortalama efektif basınçla değişimi
($n=1800$ dev/dak)



Şekil 5.45 Faydalı işe dönüşen enerjinin ortalama efektif basınçla değişimi
($n=2400$ dev/dak)

5.1.7 Seramik kaplamanın soğutma enerjisine etkisi

Tablo 5.8 ve 5.9'da soğutucu akışkana geçen enerji değerleri toplam yakıt enerjisinin yüzdesi ve (kW) olarak verilmektedir. Şekil 5.46, 5.47 ve 5.48'de sabit ortalama efektif basınç değerlerinde devir sayısına bağlı olarak, Şekil 5.49, 5.50 ve 5.51'de ise sabit devir sayılarında ortalama efektif basınca bağlı olarak soğutucu akışkana geçen enerji akıları, toplam yakıt enerjisinin yüzdesi olarak, Şekil 5.52, 5.53 ve 5.54'de ise (kW) verilmektedir.

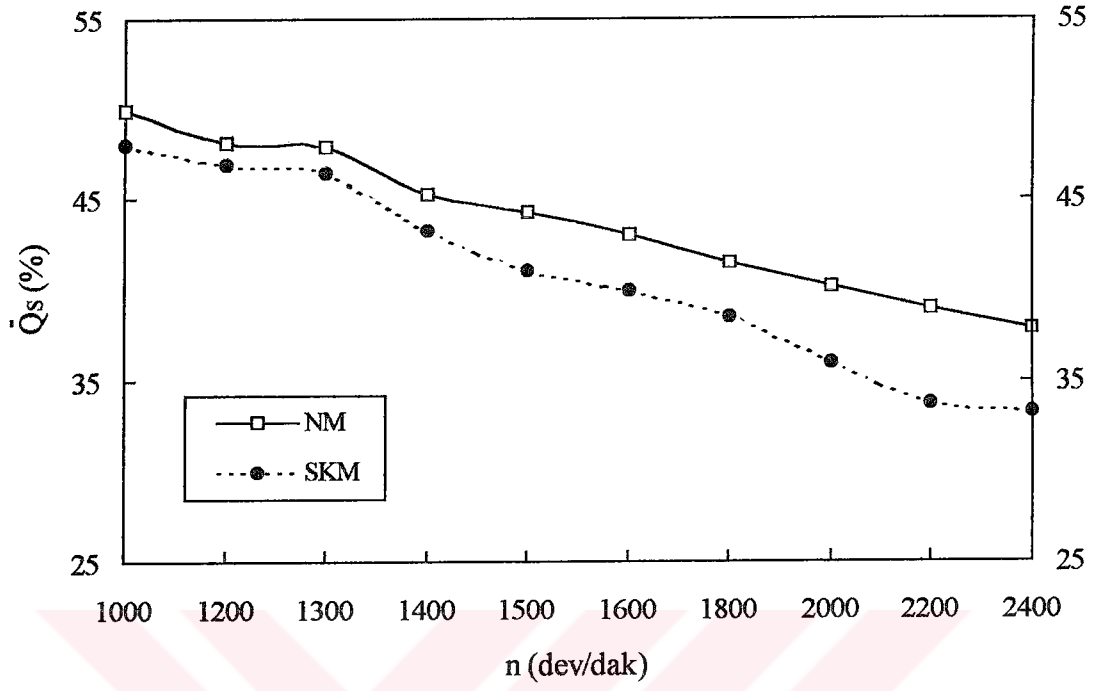
Tablo 5.8 Türbo doldurmalı normal ve kaplamalı motorun soğutucu akışkan enerji yüzdeleri

Türbo doldurmalı normal motorun soğutma enerjileri (% yakıt enerjisi)										
P _{me} (bar)	Devir sayısı (dev/dak)									
	1000	1200	1300	1400	1500	1600	1800	2000	2200	2400
2,226	49,860	48,150	47,947	45,238	44,248	43,084	41,522	40,212	38,956	37,835
2,968	44,780	45,068	46,926	44,914	42,403	38,858	37,396	39,751	39,141	36,708
3,710	40,099	41,720	44,030	42,701	39,713	38,516	38,696	36,730	36,731	35,279
4,452	37,574	37,405	41,819	42,873	38,082	38,369	38,370	36,358	33,936	32,969
5,194	38,696	37,692	39,181	40,455	38,329	37,942	37,085	34,707	32,519	31,398
5,936	36,163	37,530	38,304	40,504	36,705	37,176	37,171	34,030	32,266	31,049
6,678	34,701	35,991	37,529	38,032	35,757	34,986	35,323	31,919	30,034	30,040
7,420	34,272	35,424	36,351	37,532	34,636	34,612	35,000	30,955	30,206	28,804
8,162	36,124	34,702	34,028	33,306	32,616	31,149	31,017	29,616	28,588	26,857
Türbo doldurmalı kaplı motor soğutma enerjileri (% yakıt enerjisi)										
2,226	47,901	46,874	46,424	43,239	41,097	40,208	38,501	36,131	33,759	33,354
2,968	43,190	43,217	41,281	41,197	38,300	40,216	36,575	36,383	33,523	32,258
3,710	39,334	39,076	39,938	37,272	36,077	38,159	35,577	33,224	32,411	30,891
4,452	36,430	35,685	38,654	36,287	35,242	34,761	33,775	32,694	28,835	28,427
5,194	36,824	35,988	36,113	36,386	34,756	34,113	33,474	31,230	28,212	26,385
5,936	34,482	35,405	35,473	35,261	34,004	33,850	33,121	31,276	28,308	25,942
6,678	33,607	33,037	34,633	33,888	32,936	30,612	31,221	29,604	26,845	25,335
7,420	33,796	32,233	31,283	33,798	30,930	30,319	30,404	29,772	26,991	25,120
8,162	32,639	31,424	30,087	29,236	28,459	29,374	27,491	27,294	25,625	25,012

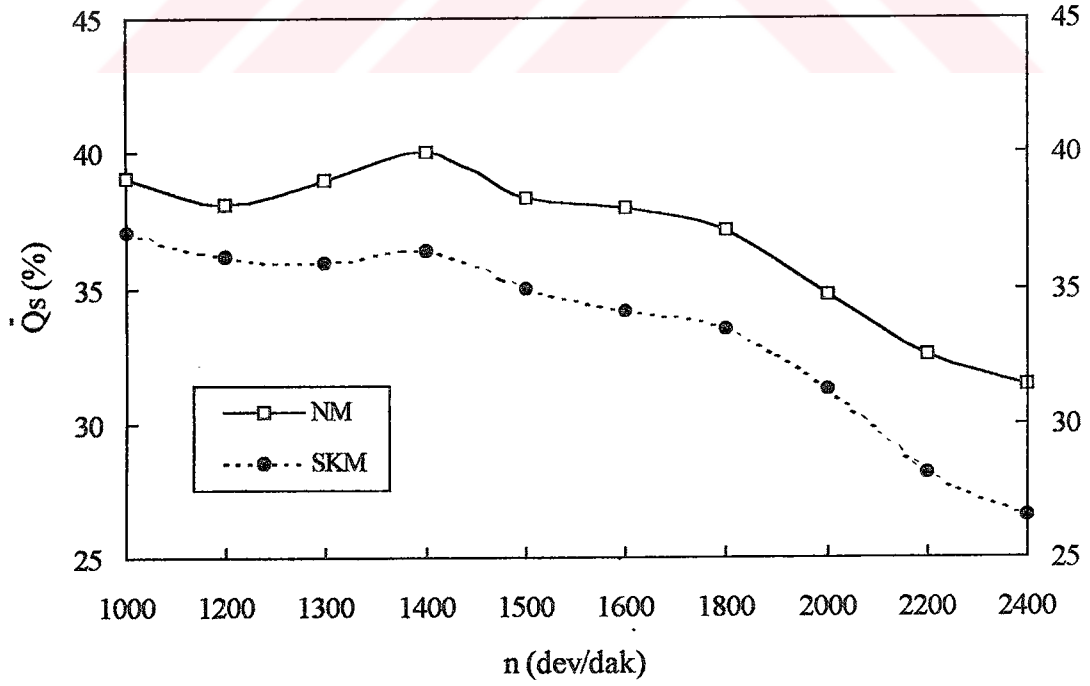
Şekillerden de görüleceği üzere, hem kaplamalı ve hem de normal motorda, devir sayısı ve ortalama efektif basıncın artması sonucu soğutma sistemine transfer edilen enerji, miktar olarak artmakta, yüzde olarak ise azalmaktadır. Bu sonuçlar, Wallace ve diğ. [39]'nin çalışmasıyla da uygunluk arz etmektedir. Deneysel çalışma sonuçları, seramik kaplama sonucu soğutma sistemine geçen enerji miktarında %19'a kadar bir azalma olduğunu göstermektedir. Silindir gömlek cidarlarının da yalıtılması durumunda bu değerin daha da yükseleceği aşıkardır.

Tablo 5.9 Türbo doldurmalı normal ve kaplamalı motorda soğutucu akışkan enerji akısı değerleri

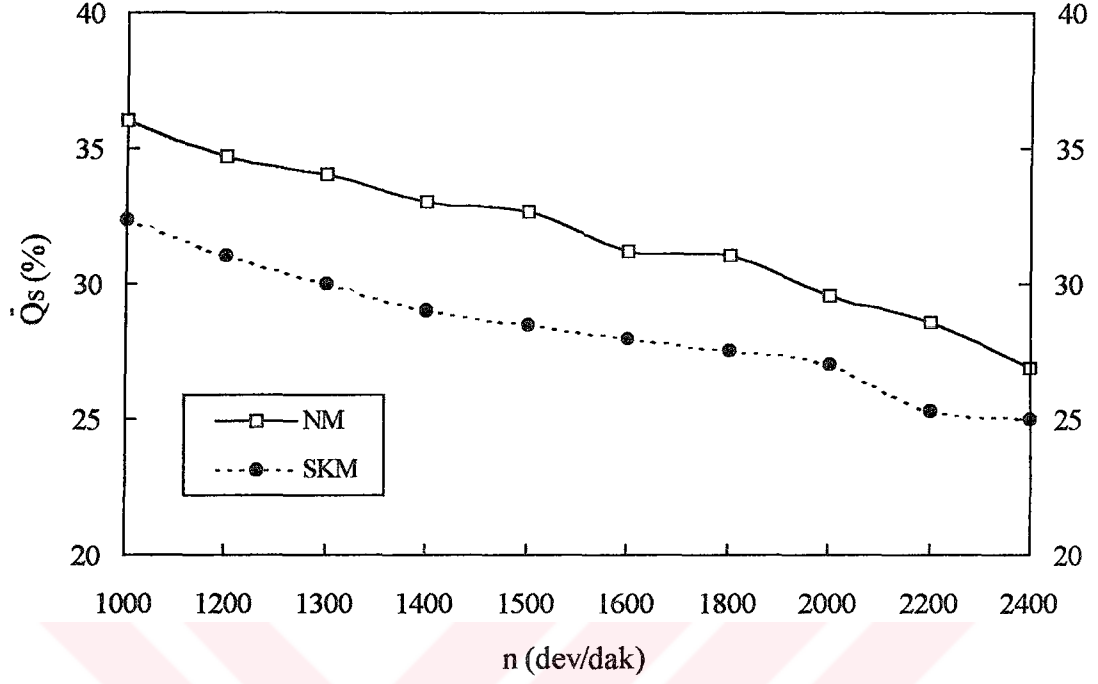
Türbo doldurmalı normal motor soğutucu akışkan enerji akısı değerleri (kW)										
P _{me} (bar)	Devir sayısı (dev/dak)									
	1000	1200	1300	1400	1500	1600	1800	2000	2200	2400
2,226	21,095	23,732	25,612	25,836	27,449	28,707	32,402	37,158	40,628	43,914
2,968	22,467	26,583	29,621	30,491	32,120	34,949	34,949	42,191	47,259	55,033
3,710	25,474	29,434	33,352	34,449	35,185	39,066	42,191	45,571	51,424	60,447
4,452	26,369	30,449	35,826	39,554	37,801	42,196	48,103	52,327	55,501	58,988
5,194	29,885	34,509	38,587	42,191	43,753	46,914	51,627	55,501	58,503	64,550
5,936	33,401	38,582	42,406	47,470	48,947	51,673	59,442	61,529	65,590	69,822
6,678	36,077	40,851	45,313	49,223	48,918	52,451	60,520	62,416	66,297	74,031
7,420	39,875	44,255	48,441	53,167	53,587	57,127	65,590	66,297	72,454	77,054
8,162	41,773	45,060	50,233	53,838	56,087	59,142	63,087	67,103	73,241	77,989
Türbo doldurmalı kaplı motor soğutucu akışkan enerji akısı değerleri (kW)										
2,226	19,848	22,404	24,208	24,308	25,051	26,156	29,933	34,183	34,416	37,500
2,968	21,295	24,880	25,390	27,450	28,413	31,802	32,096	37,403	39,034	46,415
3,710	23,456	26,730	29,327	29,345	30,906	35,662	38,284	39,847	43,677	50,522
4,452	24,358	28,034	32,120	32,479	33,969	35,940	40,508	44,728	45,109	49,759
5,194	27,707	31,737	34,194	37,088	38,898	40,508	45,109	47,816	50,502	52,151
5,936	30,260	34,806	37,540	39,647	39,066	45,109	52,106	53,587	55,055	57,127
6,678	31,737	35,804	40,197	42,191	39,033	43,708	49,425	55,477	57,494	60,772
7,420	34,253	38,276	39,773	46,415	43,024	47,846	55,813	60,520	63,474	66,704
8,162	35,804	40,598	44,287	48,020	43,309	51,120	53,895	61,247	61,529	67,028



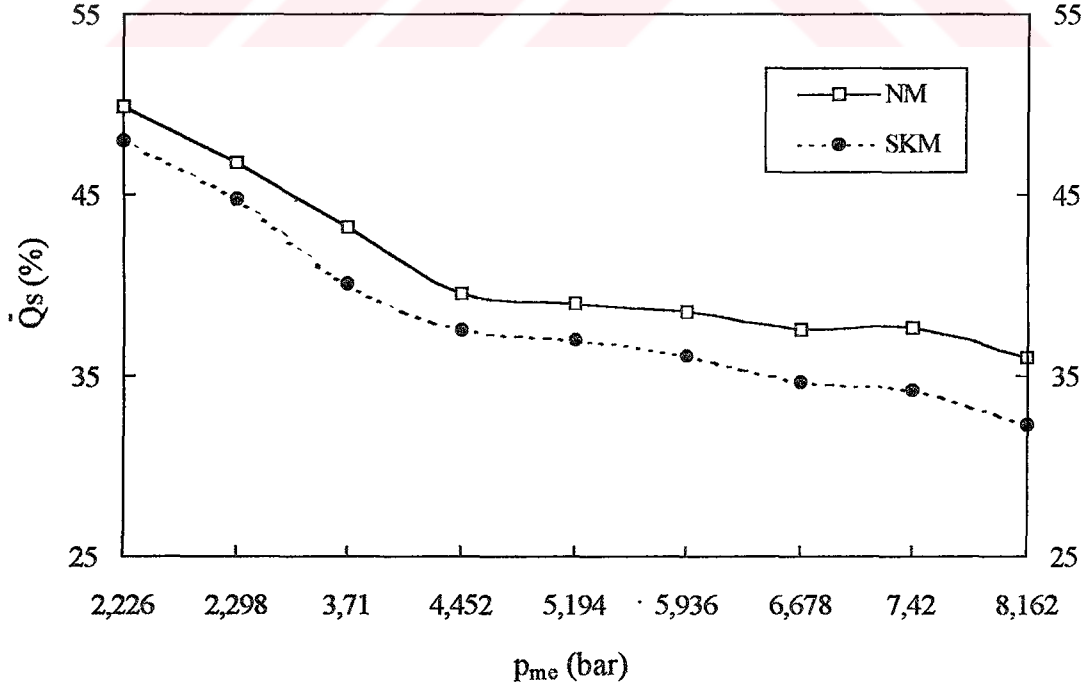
Şekil 5.46 Soğutma enerjisinin devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=2,226$ bar)



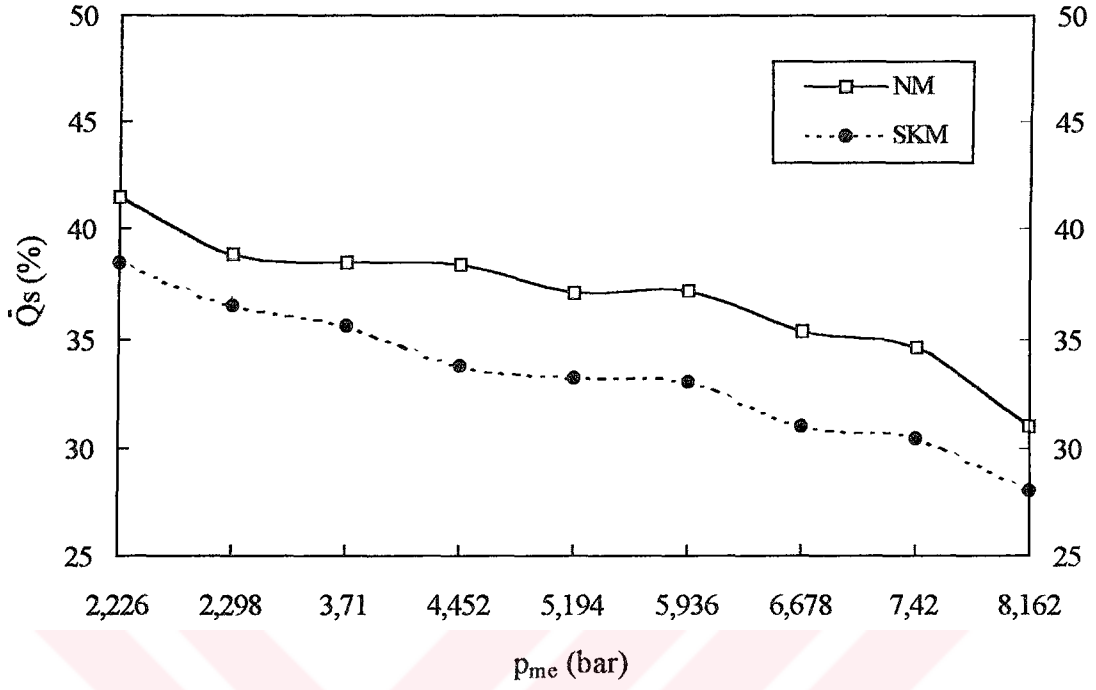
Şekil 5.47 Soğutma enerjisinin devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=5,194$ bar)



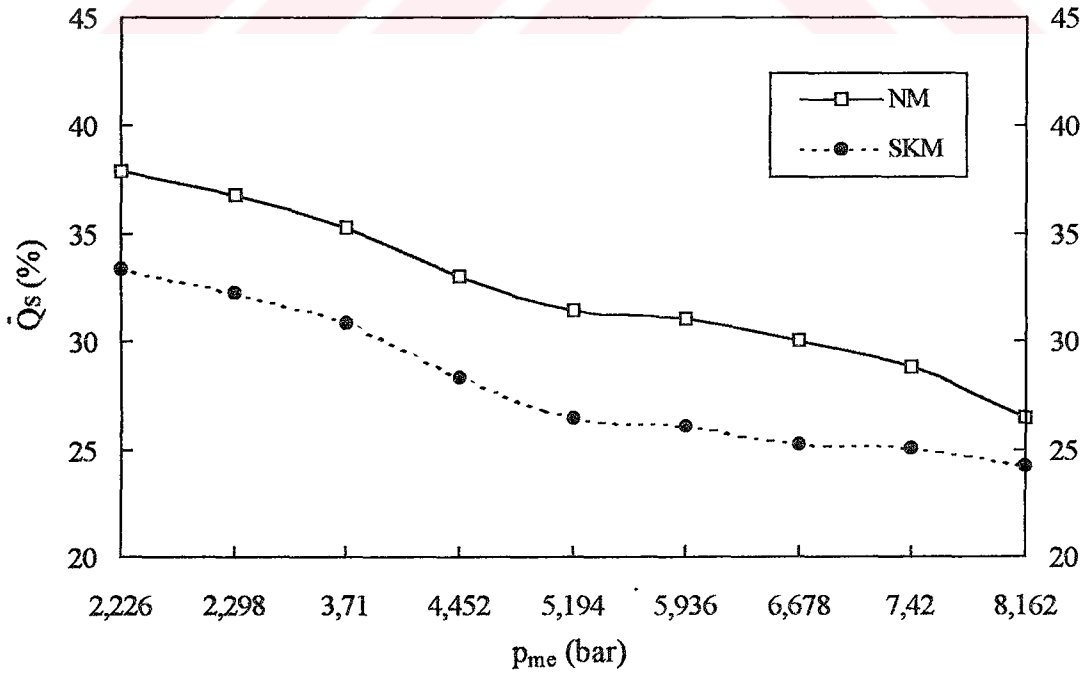
Şekil 5.48 Soğutma enerjisinin devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=8,162$ bar)



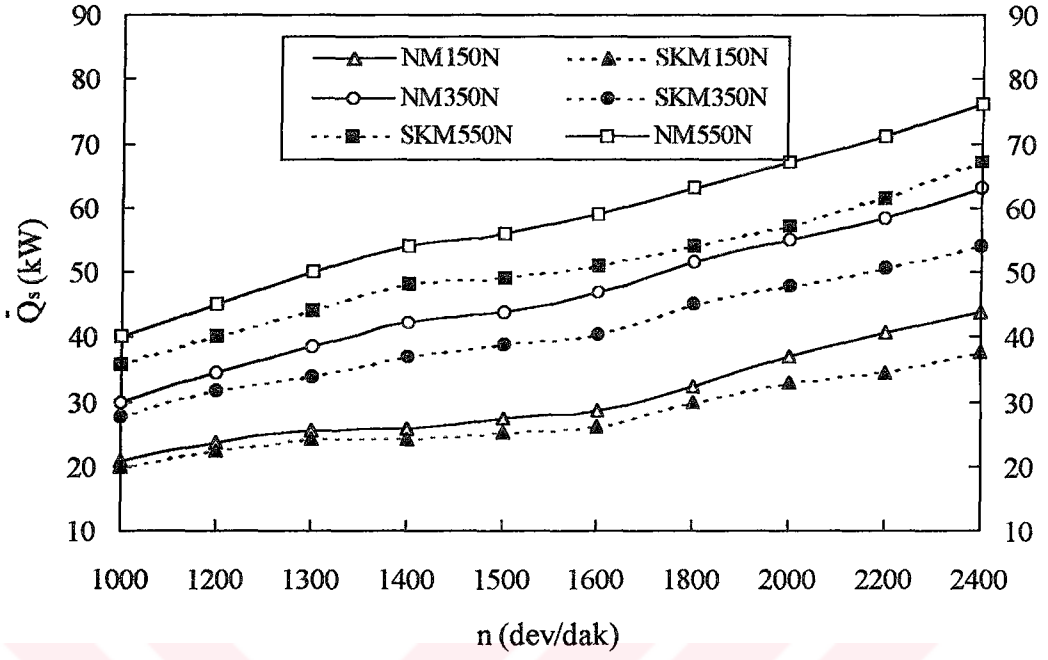
Şekil 5.49 Soğutma enerjisinin ortalama efektif basınç ile değişimi ($n=1000$ dev/dak)



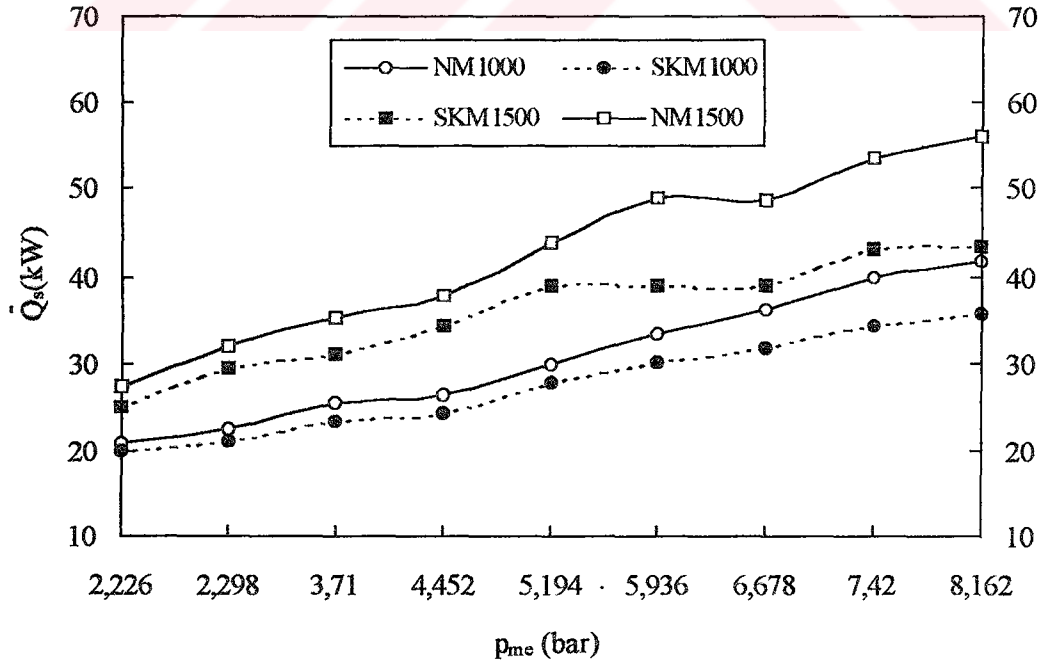
Şekil 5.50 Soğutma enerjisinin ortalama efektif basınçla değişimi
($n=1800$ dev/dak)



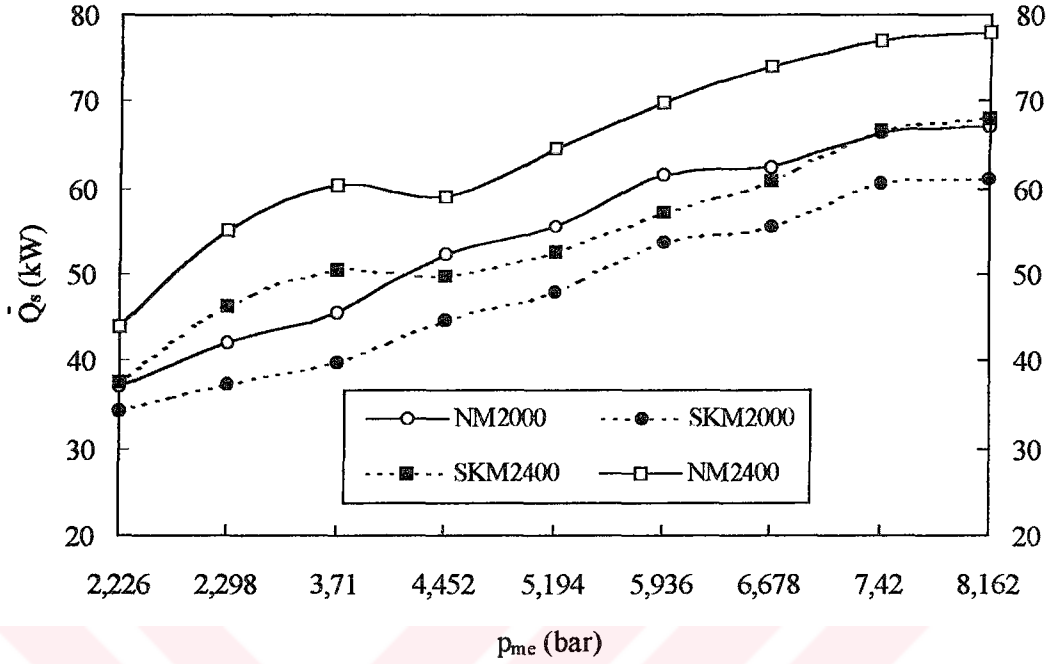
Şekil 5.51 Soğutma enerjisinin ortalama efektif basınçla değişimi
($n=2400$ dev/dak)



Şekil 5.52 Farklı ortalama efektif basınçlarda soğutucu akışkan enerji akılarının devir sayısı ile değişimi



Şekil 5.53 Farklı devir sayılarında soğutucu akışkan enerji akılarının ortalama efektif basınç ile değişimi



Şekil 5.54 Farklı devir sayılarında soğutucu akışkan enerji akılarının ortalama efektif basınçla değişimi

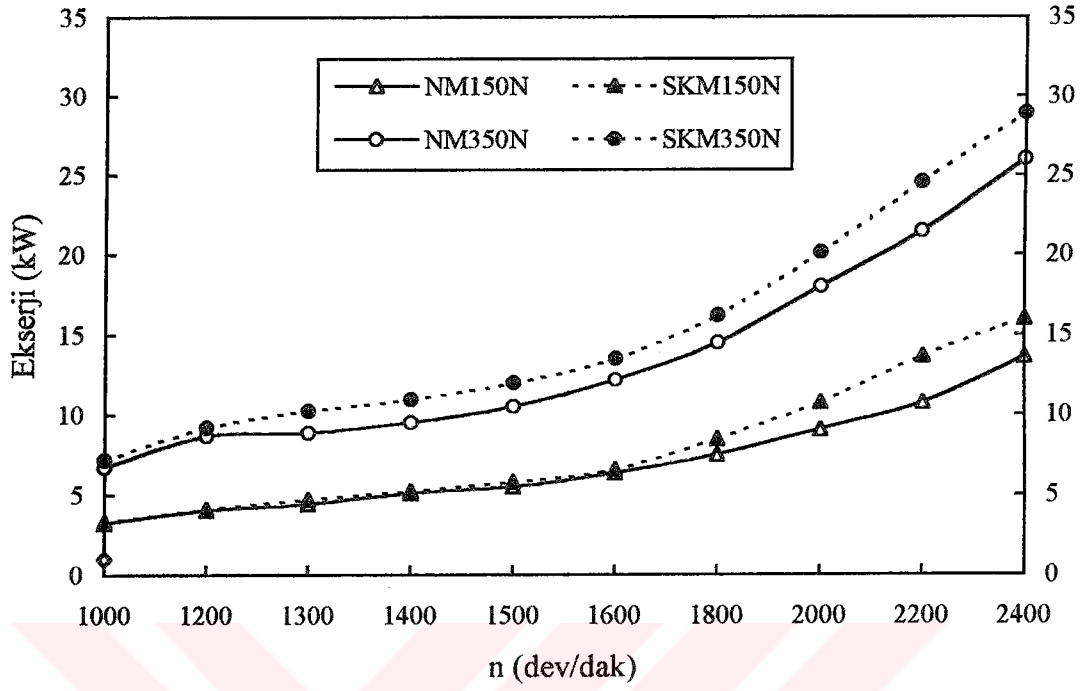
5.2 Egzoz Gazlarının Ekserji Analiz Sonuçları

Düşük ısı kayıplı motorda soğutma sistemine gitmesi engellenen enerjinin bir kısmı faydalı işe dönüşürken, diğer bir kısmı da egzoz gazlarına gitmektedir. Böylece, seramik kaplı motorun egzoz enerjisi de belirgin bir şekilde artmaktadır. Bu nedenle, artan egzoz gaz enerjisinin geri kazanımı önem kazanmaktadır. Bu sebeple, tezin giriş bölümünde de özetlendiği üzere, bu konuda çalışmalar yapan araştırmacıların büyük bir bölümü çalışmalarını bu konuda yoğunlaştırmışlardır. Bilindiği üzere, termodinamiğin birinci kanunu egzoz gazlarına geçen enerjinin miktarını vermekte, bu enerjinin ne kadarının geri kazanılabileceği noktasında ise herhangi bir fikir vermemektedir. İşte bu noktada ikinci kanun analizlerinin yapılması gerekmektedir. Bu sebeple çalışmada egzoz gazlarının kullanılabilirlik (ekserji) analizleri yapılmıştır. Tablo 5.9'da egzoz gaz ekserji analiz sonuçları, Şekil 5.55 ve 5.56'da sabit ortalama efektif basınç şartlarında devir sayısına bağlı olarak, Şekil 5.57 ve 5.58'de ise değişik devir sayılarında ortalama efektif basınca bağlı olarak egzoz gazlarının ekserjileri

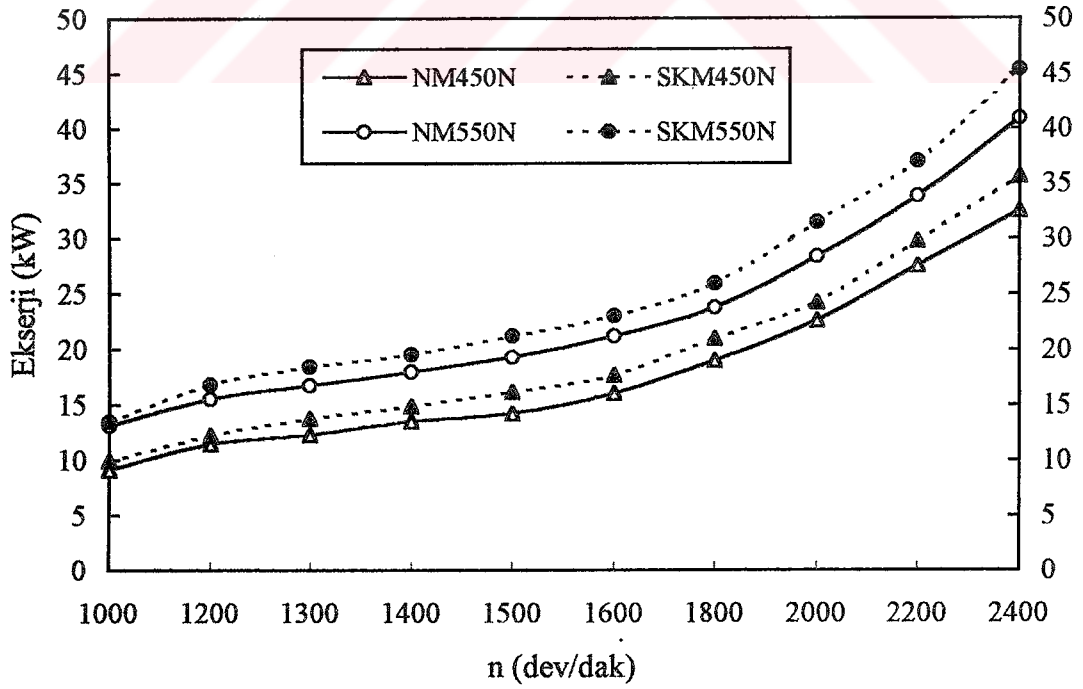
verilmektedir. İkinci kanun analiz sonuçları, egzoz gazlarının kullanılabilirliğinin normal motorda 3,2-40 kW, seramik kaplı motorda ise 3,3-45 kW arasında değiştiğini göstermektedir. Bu sonuçlara göre, kaplamalı motorda egzoz gazlarının kullanılabilir enerji miktarları normal motora göre %3-27 arasında artış göstermektedir.

Tablo 5.10 Türbo doldurmalı normal ve kaplamalı motorda egzoz gaz ekserji akıları

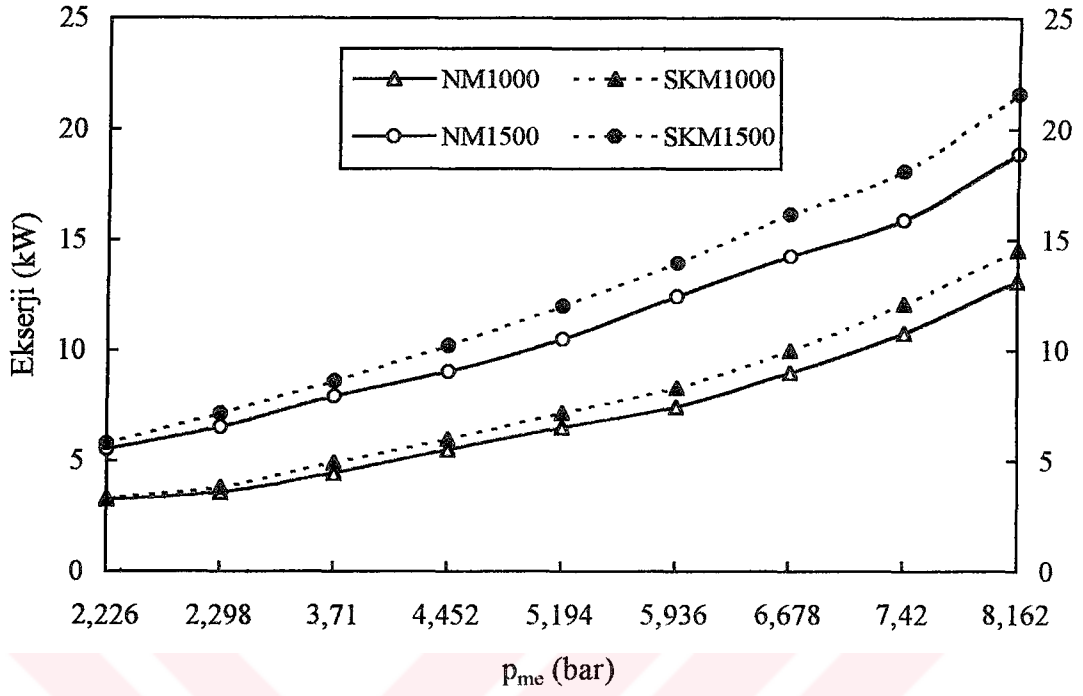
Türbo doldurmalı normal motor egzoz gaz ekserjileri (kW)										
P _{me} (bar)	Devir sayısı (dev/dak)									
	1000	1200	1300	1400	1500	1600	1800	2000	2200	2400
2,226	3,259	4,031	4,412	5,089	5,465	6,342	8,129	8,885	10,562	13,418
2,968	3,742	4,784	4,946	5,890	6,546	7,538	9,734	10,972	12,881	16,478
3,710	4,589	5,864	5,952	7,503	7,933	9,126	11,443	13,566	15,353	20,191
4,452	5,722	6,946	6,847	8,583	9,065	10,600	13,252	15,809	17,842	23,304
5,194	6,924	8,692	8,869	10,027	10,517	12,171	15,156	18,451	20,424	26,829
5,936	7,564	9,957	9,961	12,029	12,401	13,802	17,881	21,403	23,663	29,028
6,678	9,267	11,839	11,865	13,537	14,228	16,005	20,272	24,199	27,665	32,523
7,420	10,859	13,284	13,526	15,313	15,883	18,083	22,495	26,532	29,803	35,948
8,162	13,047	16,126	15,878	17,972	18,862	21,221	23,843	28,544	33,973	40,931
Türbo doldurmalı kaplı motor egzoz gaz ekserjileri (kW)										
2,226	3,329	4,115	4,710	5,205	5,735	6,541	8,386	10,562	13,431	15,201
2,968	3,967	5,073	5,642	6,307	7,145	8,207	10,085	12,277	16,353	17,874
3,710	5,027	6,238	7,022	7,888	8,620	10,090	12,149	15,026	18,861	21,107
4,452	5,881	7,217	8,015	9,053	10,206	11,377	14,476	17,320	21,936	26,130
5,194	7,384	9,209	10,242	10,907	11,982	13,525	16,201	20,124	24,587	28,946
5,936	8,195	10,295	10,965	12,707	13,918	15,529	18,545	22,338	27,001	32,563
6,678	10,111	12,255	13,758	14,904	16,159	17,663	21,030	24,263	29,884	35,686
7,420	12,133	14,522	15,483	16,500	18,086	19,863	23,581	28,630	34,188	41,197
8,162	13,397	16,714	18,407	19,493	21,595	22,346	26,016	31,624	36,666	45,486



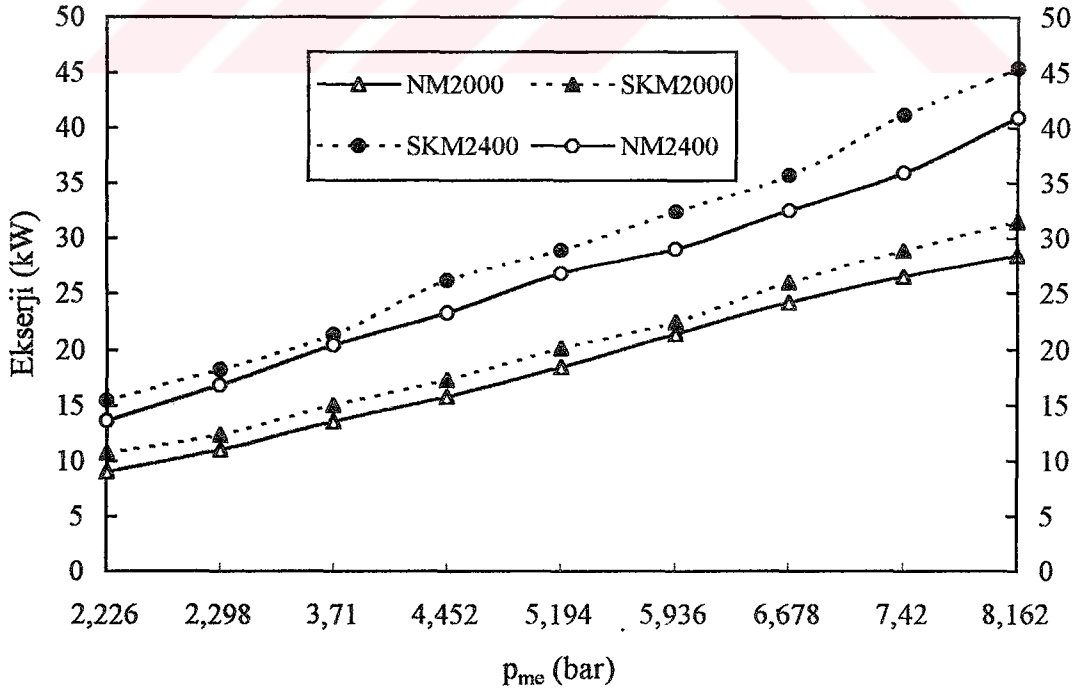
Şekil 5.55 Sabit p_{me} şartlarında egzoz gazlarının ekserjilerinin devir sayısı ile değişimi



Şekil 5.56 Sabit p_{me} şartlarında egzoz gazlarının ekserjilerinin devir sayısı ile değişimi



Şekil 5.57 Sabit devir sayısı şartlarında egzoz gaz ekserji akısı değerlerinin ortalama efektif basınçla değişimi



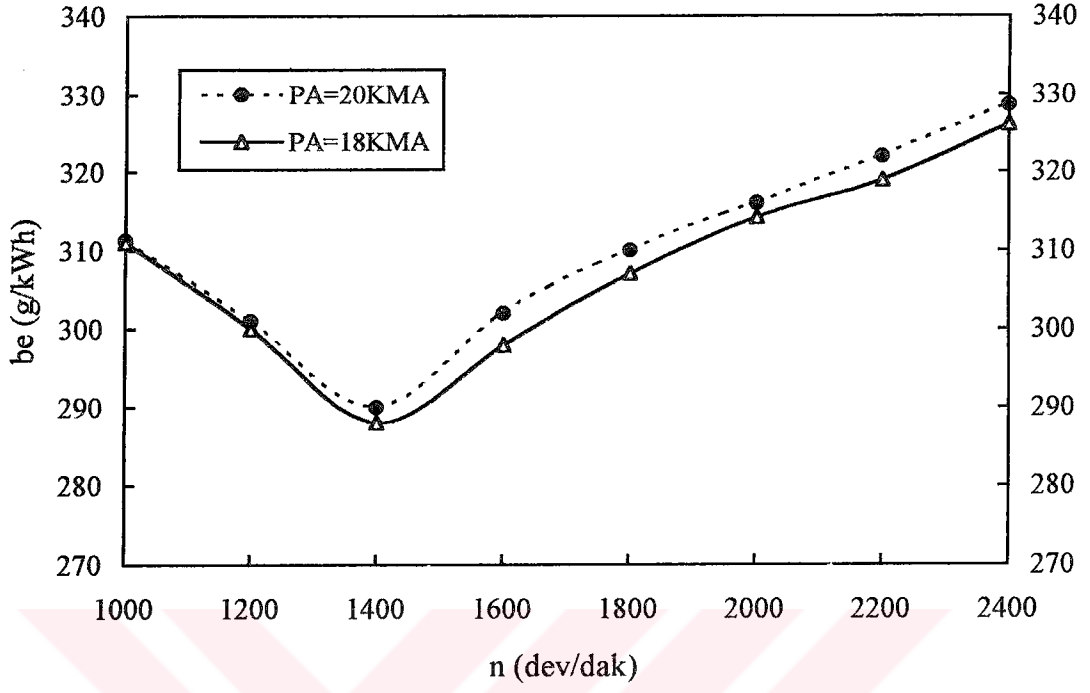
Şekil 5.58 Sabit devir sayısı şartlarında egzoz gaz ekserji akısı değerlerinin ortalama efektif basınçla değişimi

5.3 Püskürtme Avansının Değiştirilmesinin Özgül Yakıt Tüketimine Etkisi

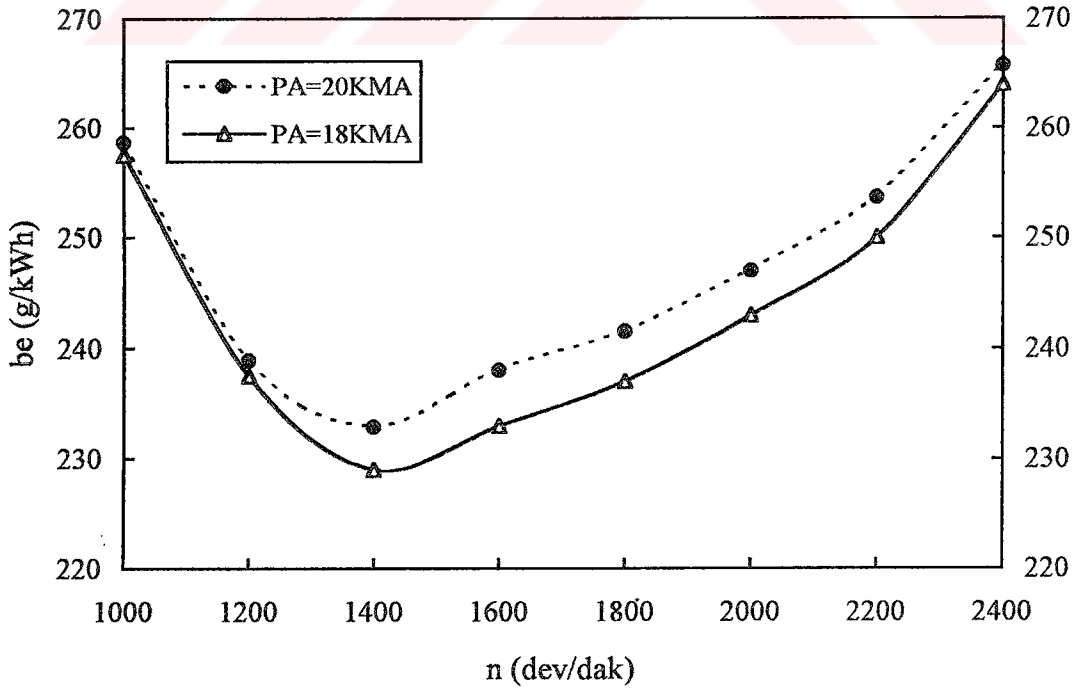
Seramik kaplamalı motorlarda yanma odası sıcaklığı artmakta ve bunun sonucu olarak da tutuşma gecikmesi süresi ise kısalmaktadır. Bu sebeple, literatürde de belirtildiği üzere, seramik kaplamalı motorlarda daha iyi bir yakıt ekonomisi sağlanması için püskürtme parametrelerinde değişiklik yapmak gereklidir. Bunun için dizayn değişikliklerine gitmeksizin yapılabilecek şey, püskürtme avansının azaltılmasıdır. Bu çalışmada, test motorunun püskürtme avans değeri 20^0 KMA standart değerinden, 18^0 KMA değerine düşürülerek motor tekrar test edilmiştir. Tablo 5.11'de standart ve değiştirilmiş motorun özgül yakıt tüketimi değerleri, Şekil 5.59, 5.60 ve 5.61'de motor devrine bağlı olarak, Şekil 5.62, 5.63 ve 5.64'de ise ortalama efektif basınca bağlı olarak değiştirilmiş püskürtme avansının özgül yakıt tüketiminde meydana getirdiği değişim görülmektedir. Püskürtme avansının azaltılması durumunda, seramik kaplı motorun özgül yakıt tüketiminde %2'ye kadar bir azalma tespit edilmiştir. Böylece, seramik kaplı motorda püskürtme avansının azaltılması sonucu hem tam yük ve devir sayısı şartlarında kaplama sonucu ortaya çıkan yakıt tüketimi artışı önlenmekte, hem de ilave bir iyileşme sağlanmaktadır. Elde edilen bu sonuçlar, termal bariyer kaplamalı motorlardan daha iyi sonuçlar sağlanması için, motorun püskürtme ve yakıt sisteminde bir takım değişiklikler yapılması ve hatta yeniden dizaynını gerektirmektedir. Bu durum Reddy [9] tarafından da vurgulanmaktadır.

Tablo 5.11 Türbo doldurmalı standart ve değiştirilmiş püskürtme avanslı seramik kaplı motorun özgül yakıt tüketimi değerleri

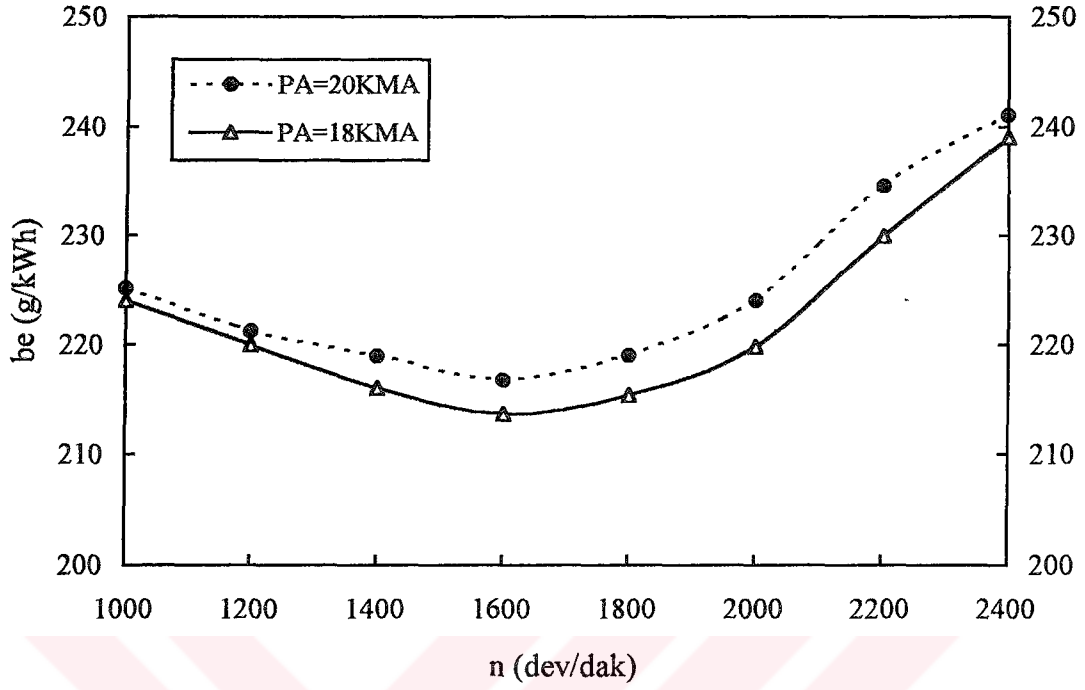
Türbo doldurmalı kaplı motorun özgül yakıt tüketimi değerleri (PA = 18^0 KMA) (g/kWh)								
P _{me} (bar)	Devir sayısı (dev/dak)							
	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
2,226	311,30	300,00	288,00	298,00	307,00	314,187	318,92	326,14
5,194	257,50	237,50	229,00	233,05	237,04	243,03	250,02	264,00
8,162	224,00	220,02	216,00	213,72	215,40	219,83	229,96	239,00
Türbo doldurmalı kaplı motorun özgül yakıt tüketimi değerleri (PA = 20^0 KMA) (g/kWh)								
2,226	311,29	300,92	290,90	302,26	310,23	316,39	322,26	328,64
5,194	258,64	238,90	232,86	238,02	242,50	246,95	253,64	265,72
8,162	225,19	221,24	218,92	216,73	219,44	223,83	233,15	242,33



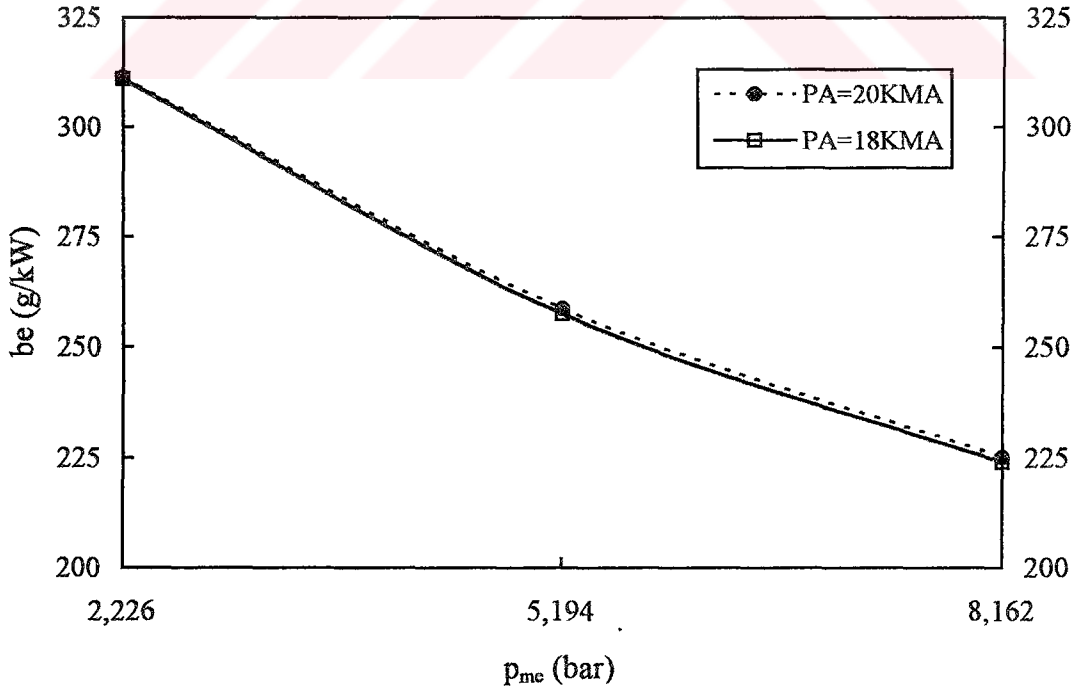
Şekil 5.59 Özgöl yakıt tüketiminin devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=2,226$ bar)



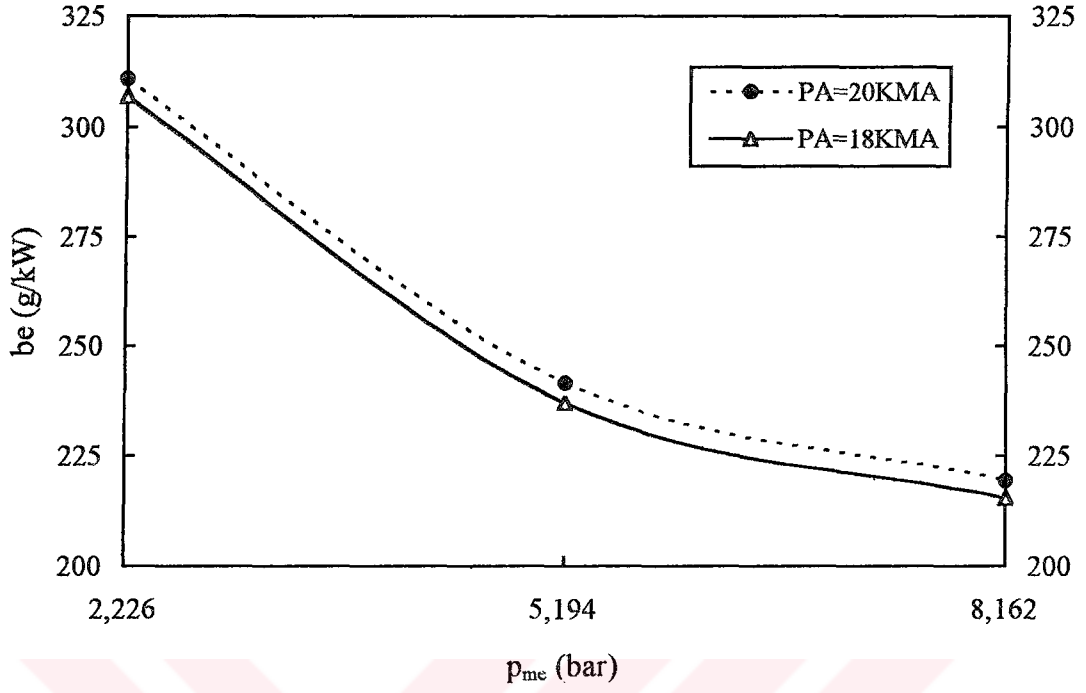
Şekil 5.60 Özgöl yakıt tüketiminin devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=4,195$ bar)



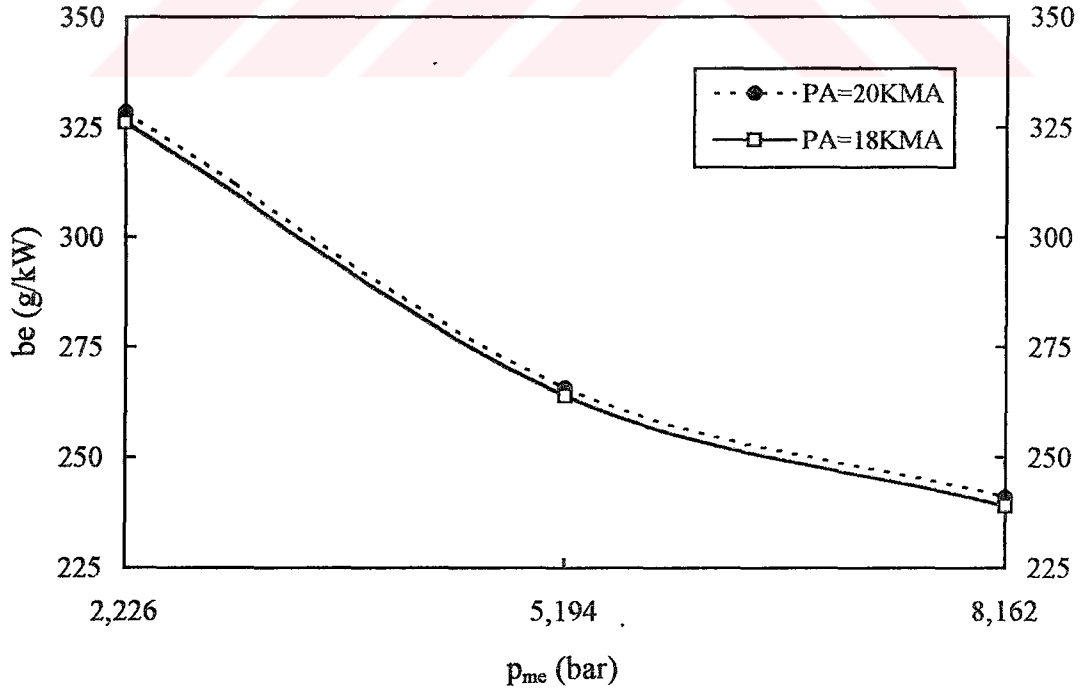
Şekil 5.61 Özgül yakıt tüketiminin devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=8,162$ bar)



Şekil 5.62 Özgül yakıt tüketiminin ortalama efektif basınçla değişimi ($n=1000$ dev/dak)



Şekil 5.63 Özgöl yakıt tüketiminin ortalama efektif basınçla değişimi
($n=1800$ dev/dak)



Şekil 5.64 Özgöl yakıt tüketiminin ortalama efektif basınçla değişimi
($n=2400$ dev/dak)

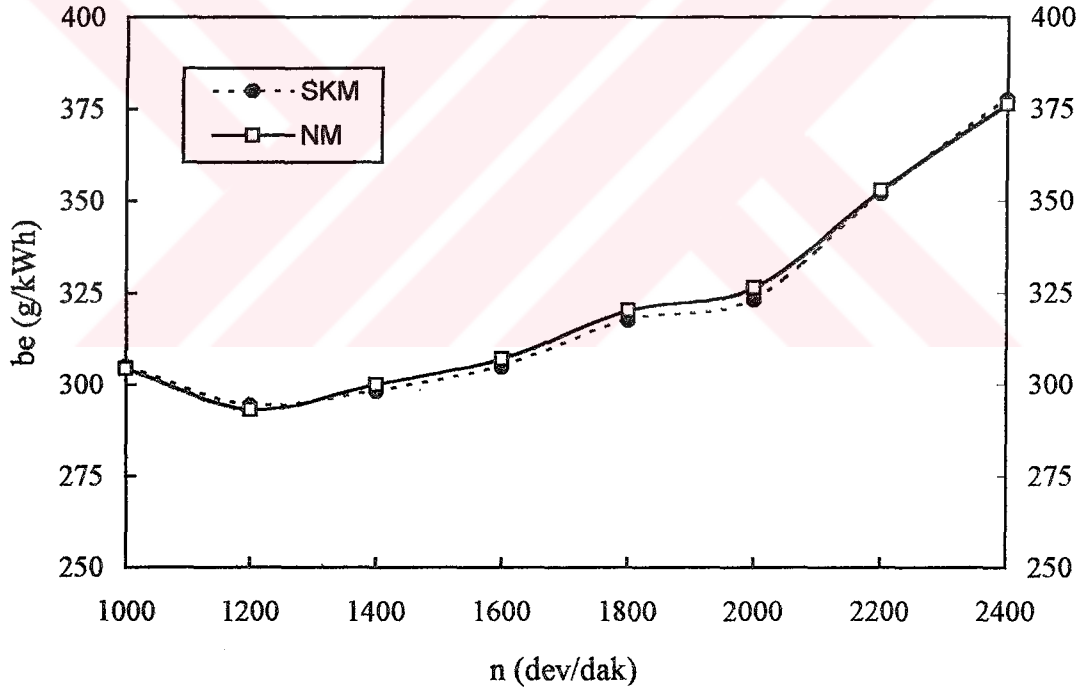
5.4 Doğal Emişli Motor Çalışması Halinde Özgül Yakıt Tüketimi Sonuçları

Tablo 5.12'de doğal emişli motorun özgül yakıt tüketimi değerleri, Şekil 5.65, 5.66 ve 5.67'de motor devrine, Şekil 5.68, 5.69 ve 5.70'de ise ortalama efektif basınca bağlı olarak doğal emişli motor çalışması durumunda özgül yakıt tüketiminde meydana gelen değişim verilmektedir. Şekillerdeki kaplamalı ve normal hale ait eğriler, doğal emişli halde seramik kaplama sonucunda; düşük p_{me} -düşük devir ve yüksek p_{me} -yüksek devir sayısı şartlarında motorun özgül yakıt tüketiminde artış, diğer çalışma

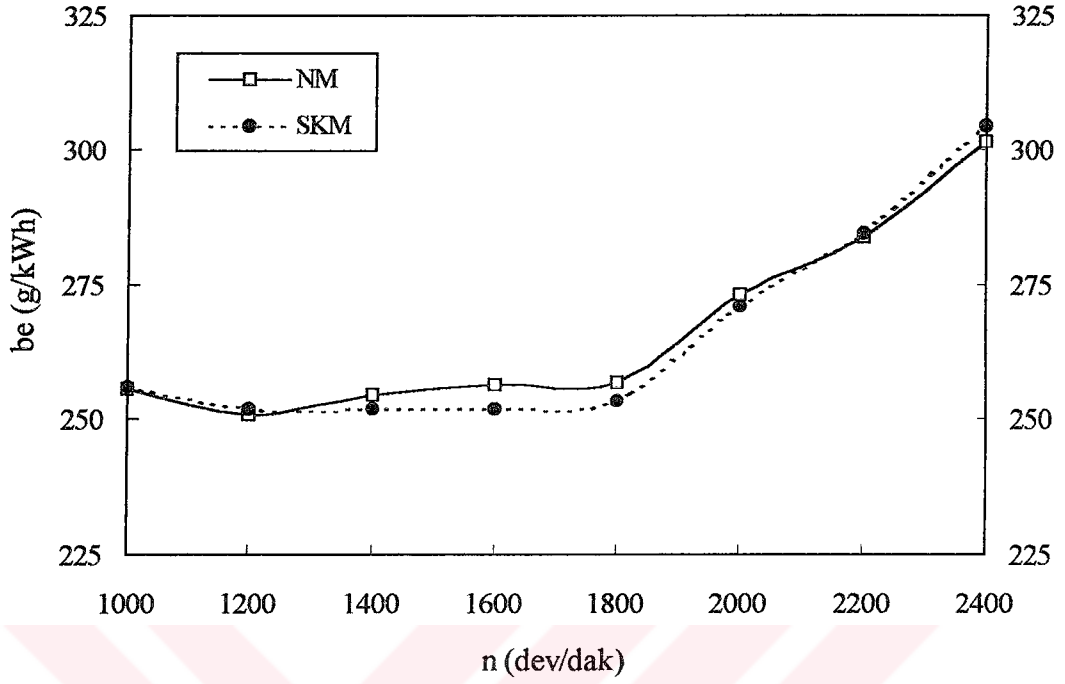
Tablo 5.12 Doğal emişli normal ve kaplamalı motorun özgül yakıt tüketimi değerleri

Doğal Emişli Normal ve Kaplamalı Motor Özgül Yakıt Tüketimi Değerleri (g/kWh)								
p_{me} (bar)	Motor devri (dev/dak)							
	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
2,226	304,300	293,105	300,387	307,760	320,129	326,300	352,734	376,151
2,968	270,830	267,406	273,749	275,981	275,233	317,378	318,373	338,536
3,710	262,095	258,919	257,932	267,265	267,882	280,168	307,760	314,917
4,452	255,499	250,768	254,539	256,467	255,885	273,013	283,650	301,726
5,195	246,956	243,639	240,310	241,812	248,012	252,325	263,794	286,168
5,937	241,810	240,438	234,011	235,095	245,316	253,902	256,467	282,114
6,679	243,992	242,678	243,332	245,316	244,651	257,932	264,740	278,631
7,421	253,922	252,639	241,812	253,902	241,381	274,489	284,086	-
Doğal Emişli Kaplı Motor Özgül Yakıt Tüketimi Değerleri (g/kWh)								
2,226	304,988	294,251	298,073	304,988	317,427	323,185	351,726	377,409
2,968	271,917	268,680	273,749	279,013	273,897	294,379	312,976	339,896
3,710	262,516	260,413	255,098	263,795	263,966	280,168	284,086	316,389
4,452	255,982	251,887	251,887	251,887	253,301	270,829	284,963	304,988
5,195	245,390	243,027	243,844	245,910	243,332	257,932	263,794	289,595
5,937	240,097	238,406	241,812	248,924	241,123	260,413	279,782	285,926
6,679	242,028	240,352	240,609	243,201	241,123	258,671	267,327	281,761
7,421	251,544	250,768	252,325	253,902	238,826	270,829	295,450	-

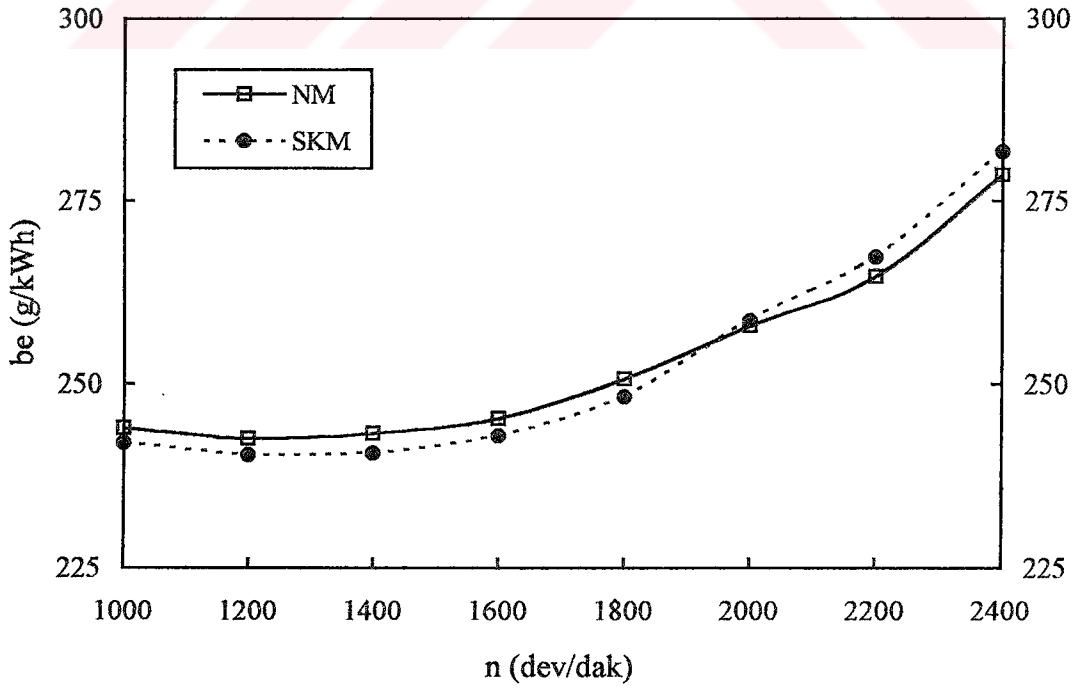
şartlarında ise azalma olduğu görülmektedir. Seramik kaplamalı çalışma durumunda düşük p_{me} ve devir sayılarında özgül yakıt tüketiminde meydana gelen artış önemsiz miktarlarda iken, yüksek p_{me} ve devir sayılarında ise daha belirgin hale gelmektedir. Özgül yakıt tüketiminde meydana gelen bu artış %2'nin altında kalmaktadır. Yine doğal emişli seramik kaplı motorda diğer çalışma şartlarında özgül yakıt tüketiminde meydana gelen azalma da %2'nin altında kalmaktadır. Bu sonuç, Çelik [47]'in sonuçlarıyla uygunluk arz etmektedir. Şekillerden de görüleceği üzere, doğal emişli motorda termal bariyer kaplama sonucu özgül yakıt tüketimi açısından elde edilen kazanımlar türbo doldurmalı motora kıyasla çok daha az olmaktadır.



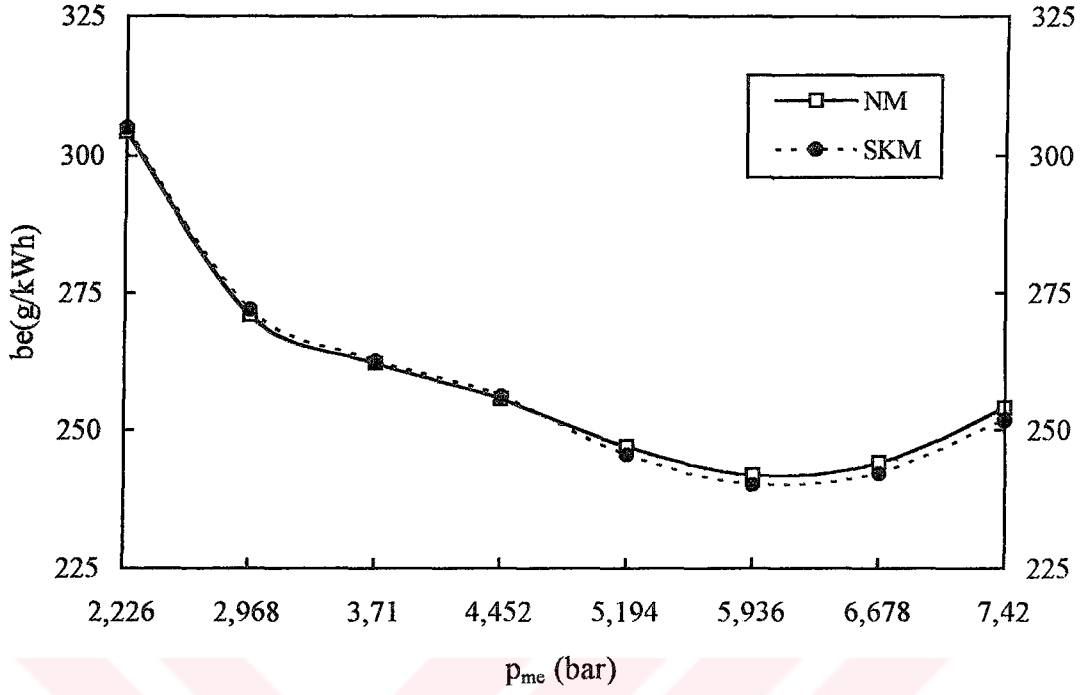
Şekil 5.65 Özgül yakıt tüketiminin devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=2,226$ bar)



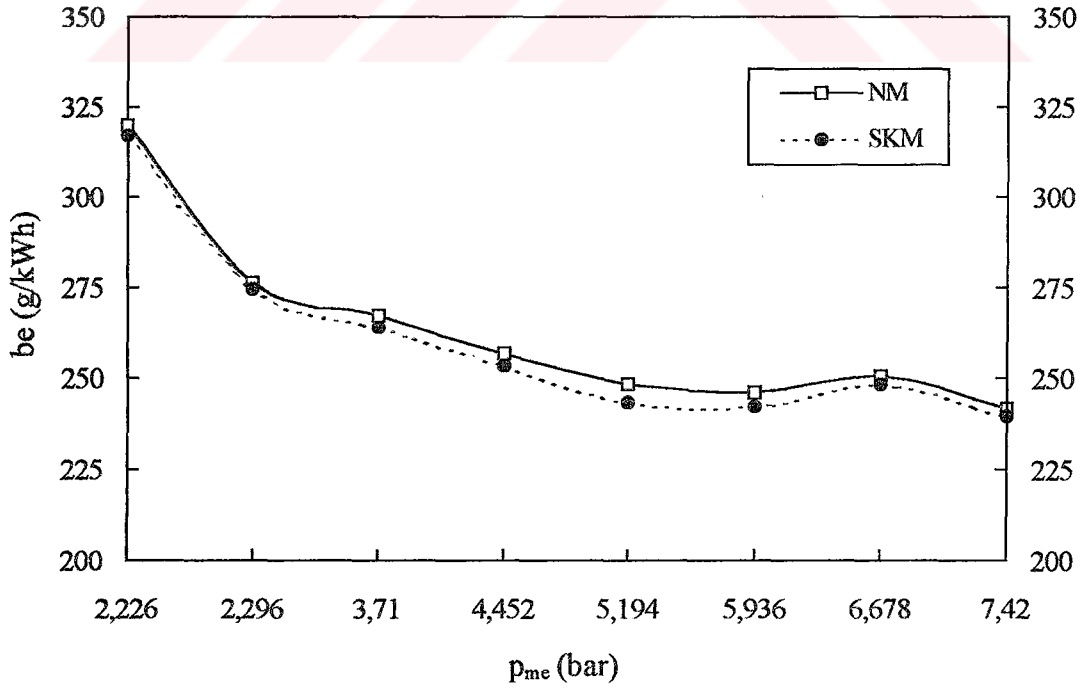
Şekil 5.66 Özgöl yakıt tüketiminin devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=4,452$ bar)



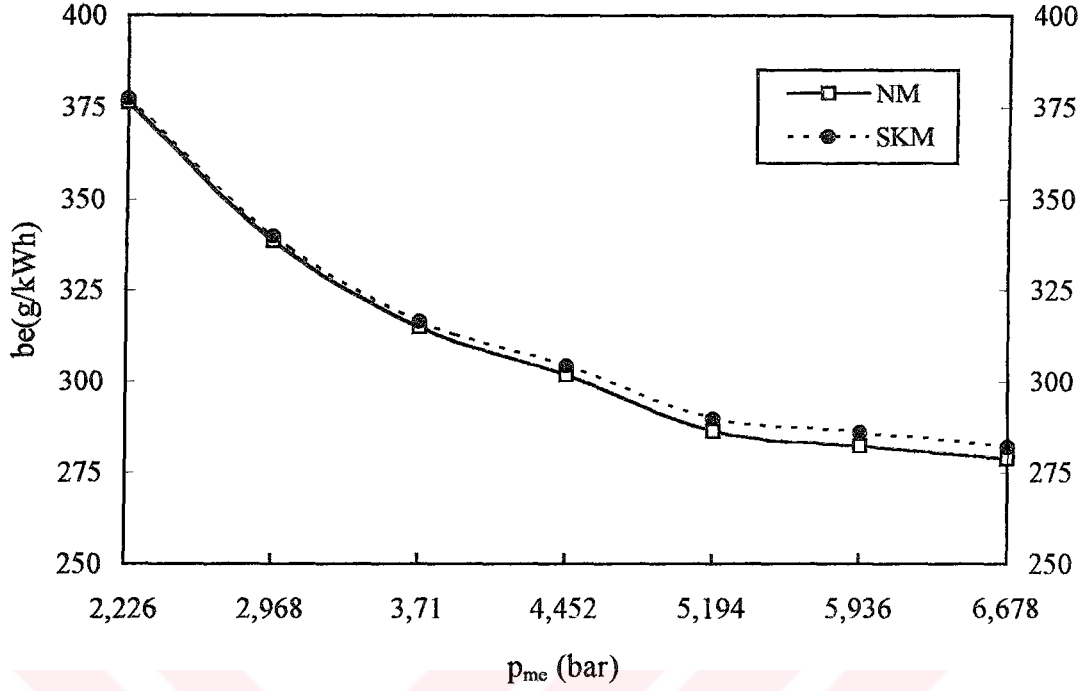
Şekil 5.67 Özgöl yakıt tüketiminin devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=6,678$ bar)



Şekil 5.68 Özgöl yakıt tüketiminin ortalama efektif basınçla değişimi
($n=1000$ dev/dak)



Şekil 5.69 Özgöl yakıt tüketiminin ortalama efektif basınçla değişimi
($n=1800$ dev/dak)



Şekil 5.70 Özgül yakıt tüketiminin ortalama efektif basınçla değişimi
($n=2400$ dev/dak)

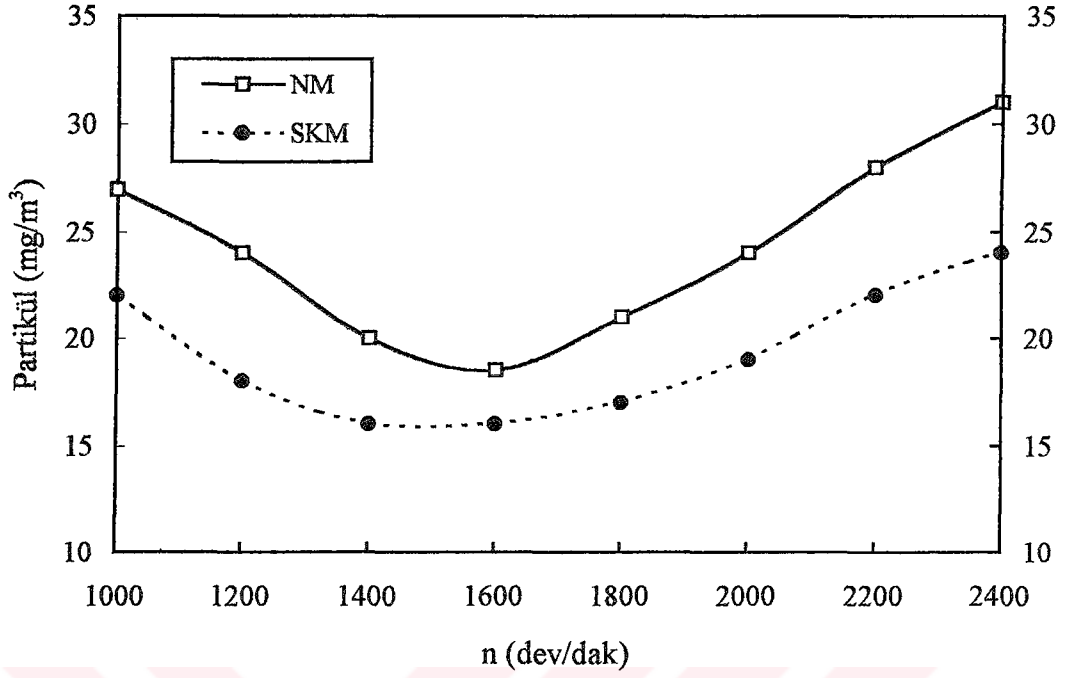
5.5 Seramik Kaplamanın Egzoz Emisyonlarına Etkisi

Termal bariyer kaplamalı motorlarda yanma verimi iyileşmekte ve bunun tabii bir sonucu olarak da CO, HC ve Partikül emisyonları azalmaktadır. Bu çalışmada, özellikle motorun yanma veriminde meydana gelen iyileşmenin bir göstergesi de olması açısından CO, HC ve Partikül ölçüm sonuçları verilmektedir. Tablo 5.13'de egzoz gaz emisyonu ölçüm sonuçları verilmektedir.

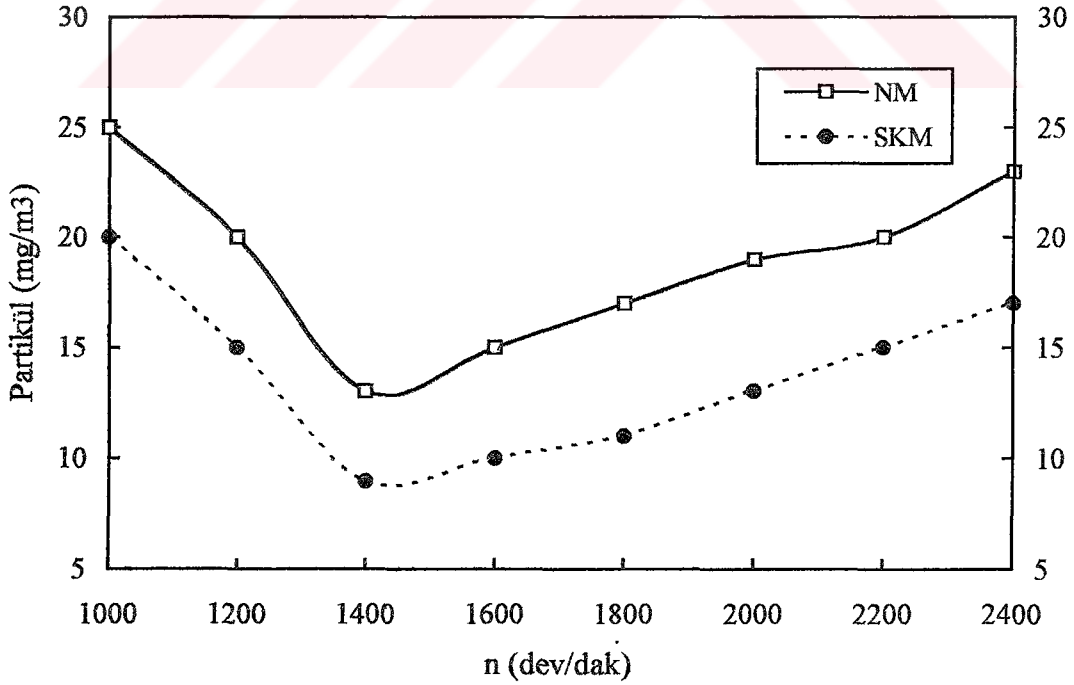
Aşağıda, Şekil 5.71, 5.72 ve 5.73'de partikül, Şekil 5.74, 5.75 ve 5.76'da karbonmonoksit, Şekil 5.77, 5.78 ve 5.79'da ise hidrokarbon emisyonlarının motor devriyle değişimi verilmektedir. Şekillerden de görüleceği üzere, kaplamalı motorda emisyon değerleri genel olarak azalmaktadır. Bu azalma miktarları, partikül emisyonlarında %48, karbonmonoksit emisyonlarında %35 ve hidrokarbon emisyonlarında ise %40 oranlarına ulaşmaktadır. Düşük ortalama efektif basınç ve devir sayısı şartlarında, karbonmonoksit emisyonlarında fazla bir değişim gözlenmemiştir.

Tablo 5.13 Türbo doldurmalı normal ve kaplamalı motor egzoz gaz emisyon ölçüm değerleri

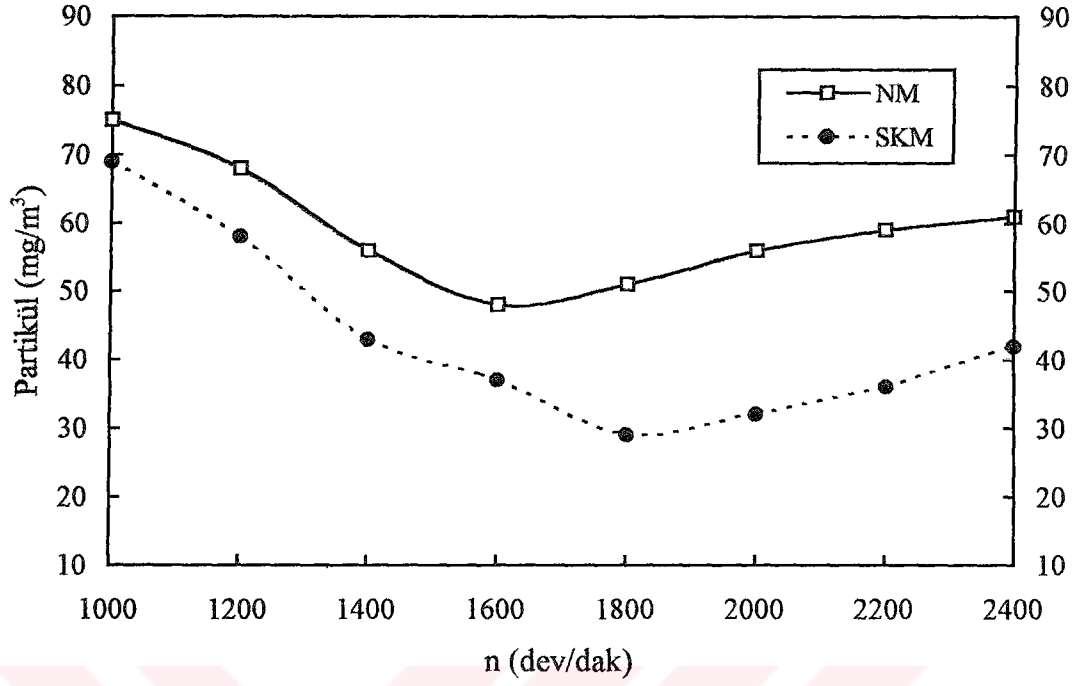
Türbo doldurmalı normal motor emisyon değerleri									
Emisyon cinsi	P _{me} (bar)	Motor devri (dev/dak)							
		1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
Partikül (mg/m ³)	2,968	27	24	20	18,5	21	24	28	31
	5,194	25	20	13	15	17	19	20	23
	7,420	75	68	56	48	51	56	59	61
CO (ppm)	2,968	338	296	271	254	235	208	198	195
	5,194	265	255	210	156	142	138	158	183
	7,420	975	206	155	130	125	110	137	197
HC (ppm)	2,968	10	7	6	6	6,5	7	7,5	8
	5,194	8	8	7	6	5	5	5	5
	7,420	7	6,5	6	6	6	5,5	5	5
Türbo doldurmalı kaplı motor emisyon değerleri									
Partikül (mg/m ³)	2,968	22	18	16	16	17	19	22	24
	5,194	20	15	9	10	11	13	15	17
	7,420	69	58	43	37	29	32	36	42
CO (ppm)	2,968	343	295	270	245	220	192	185	169
	5,194	245	241	196	149	133	122	124	127
	7,420	581	194	144	119	114	103	107	132
HC (ppm)	2,968	7	5	4	4	4	4	4,5	5
	5,194	6	6	5	4	3	3	3	3
	7,420	6	5,5	5	5	5	4	3,5	3



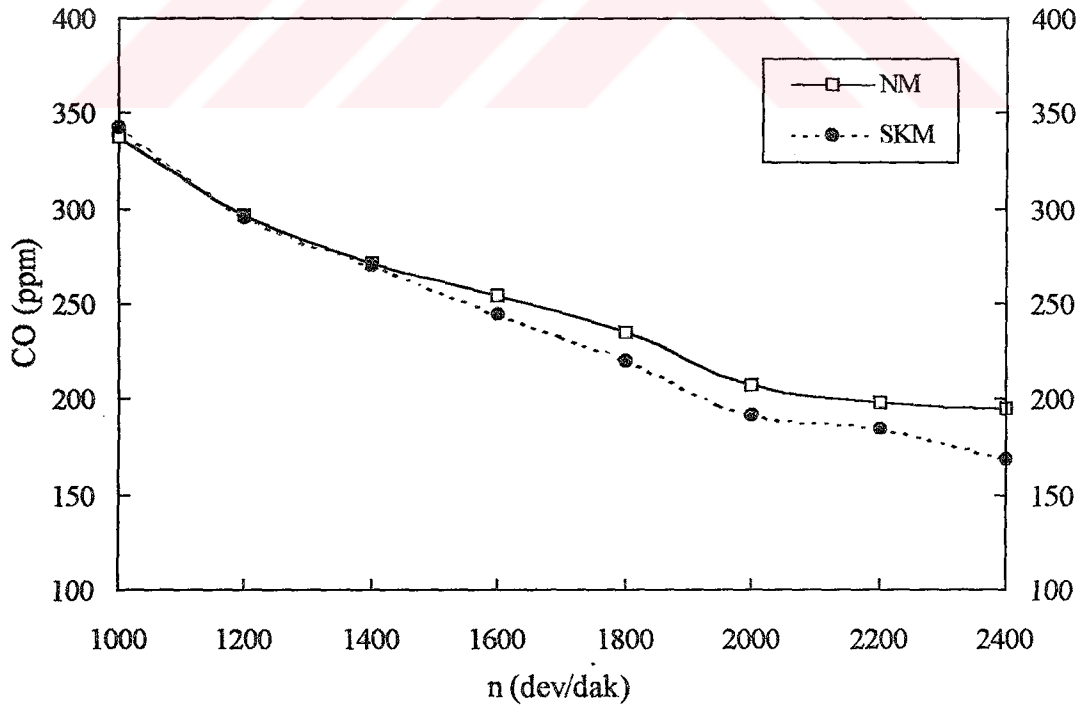
Şekil 5.71 Partikül miktarının devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=2,968$ bar)



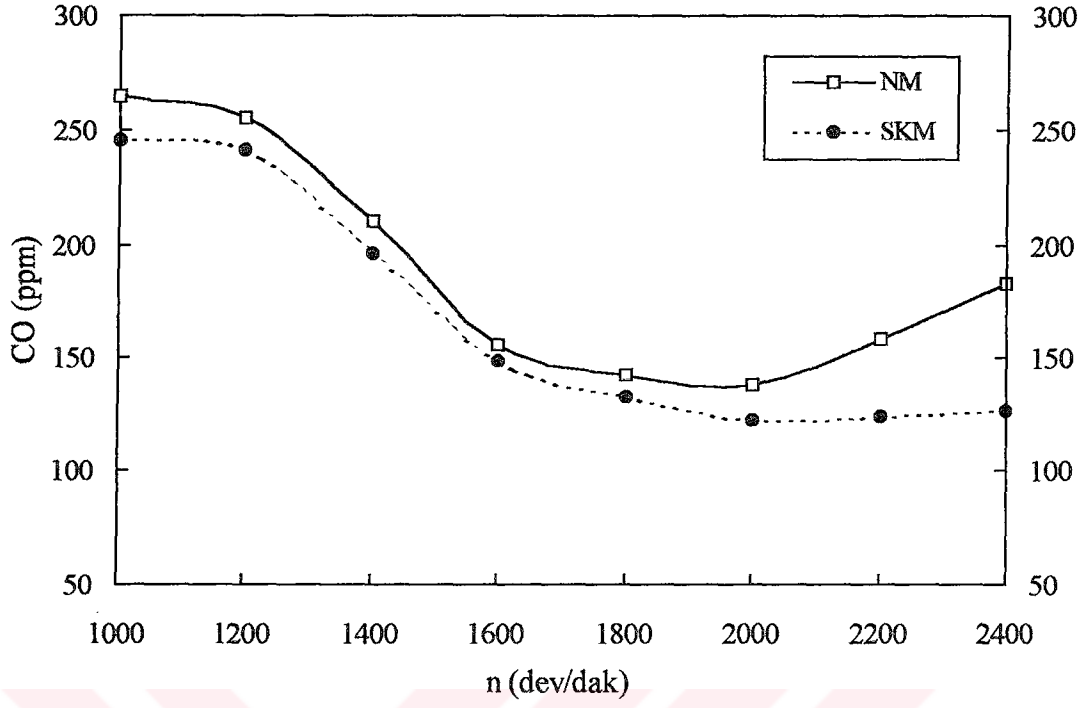
Şekil 5.72 Partikül miktarının devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=5,194$ bar)



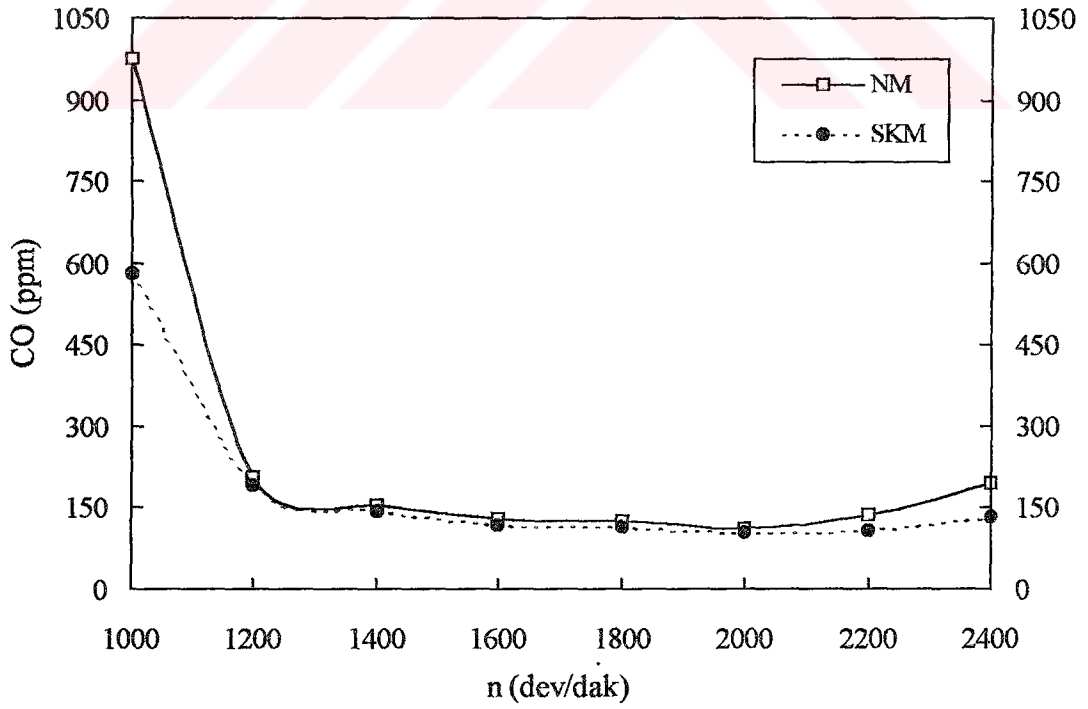
Şekil 5.73 Partikül miktarının devir sayısı ile değişimi ($p_{mc}=7,420$ bar)



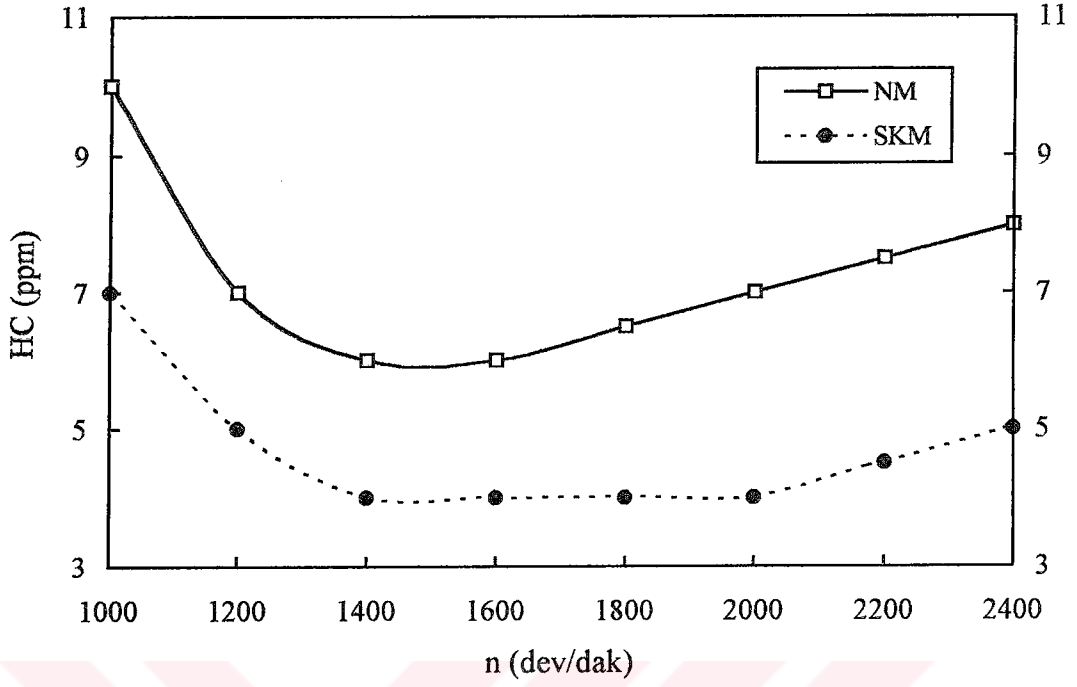
Şekil 5.74 Karbonmonoksit miktarının devir sayısı ile değişimi ($p_{mc}=2,968$ bar)



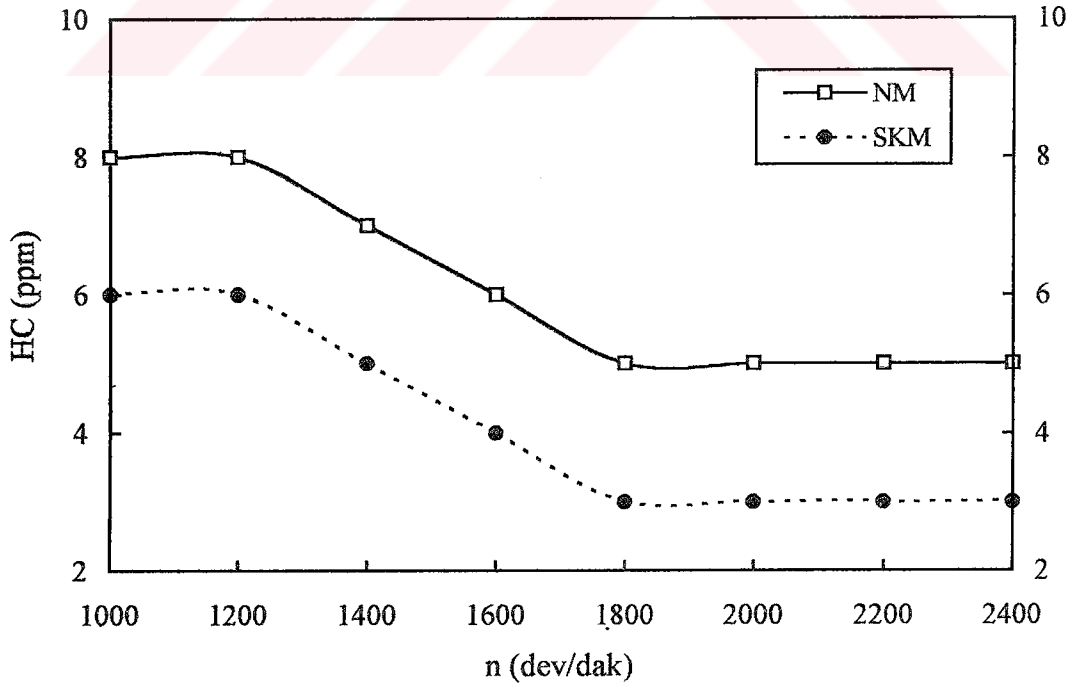
Şekil 5.75 Karbonmonoksit miktarının devir sayısı ile değişimi ($p_{mc}=5,194$ bar)



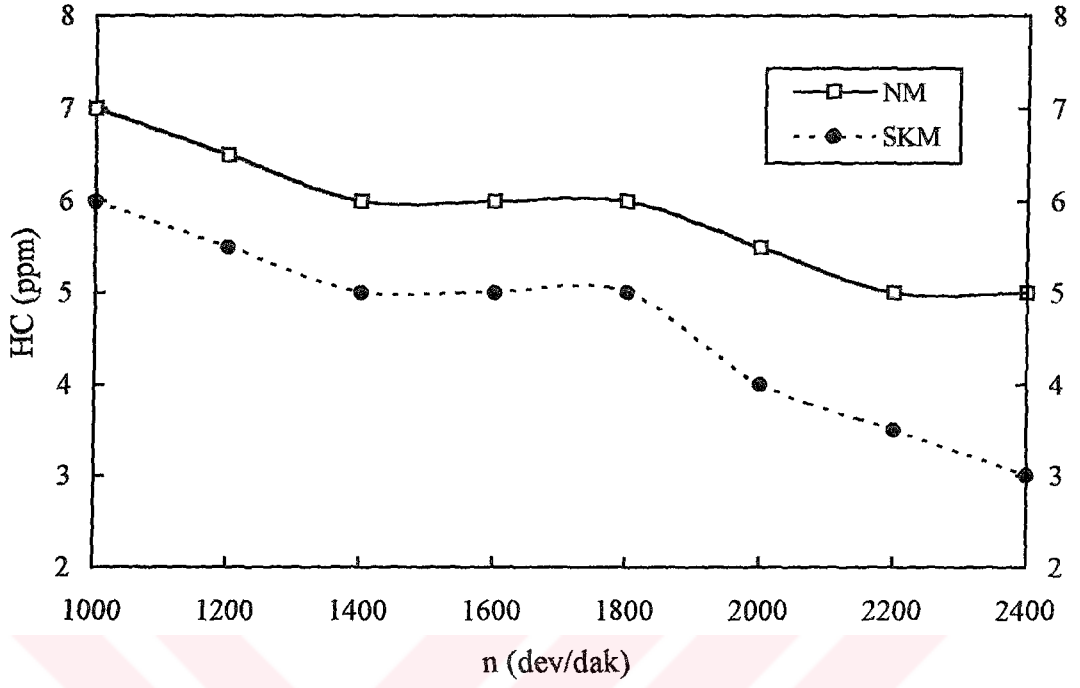
Şekil 5.76 Karbonmonoksit miktarının devir sayısı ile değişimi ($p_{mc}=7,420$ bar)



Şekil 5.77 Hidrokarbon miktarının devir sayısı ile değişimi ($p_{mc}=2,968$ bar)



Şekil 5.78 Hidrokarbon miktarının devir sayısı ile değişimi ($p_{mc}=4,195$ bar)



Şekil 5.79 Hidrokarbon miktarının devir sayısı ile değişimi ($p_{me}=7,420$ bar)

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, dört zamanlı su soğutmalı direkt püskürtmeli altı silindirli türbo doldurmalı ve ara soğutuculu bir dizel motorunda termal bariyer kaplamaların, motor performansında meydana getirdiği değişimler incelenmiştir.

Deneyisel çalışmalarda kullanılan cihazların hassasiyetlerinden kaynaklanabilecek hata oranları Bölüm 4, Tablo 4.3'de verilmişti. Buna göre, kaplamalı ve kaplamasız motorda deneyisel ölçüm sonuçlarına dayanarak hesaplanan değerler arasındaki farklılaşmalar genellikle hata sınırlarının dışında kalmaktadır. Ancak, volumetrik verimde düşük p_{me} -düşük devir çalışma şartlarında, püskürtme avans açısı değerinin değiştirilmesi durumunda düşük p_{me} -düşük devir ve yüksek devirlerde, doğal emişli motor çalışması durumunda düşük p_{me} -düşük devir ve yüksek p_{me} -yüksek devir çalışma şartlarında hesaplanan değerlerin ya hata sınırlarına çok yakın olduğu, ya da hata sınırlarının içinde kaldığı görülmektedir.

Yapılan deneyisel ve bilgisayar simülasyonu çalışmaları sonucunda elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda sunulmaktadır.

Alüminyum-silisyum alaşımlı pistonlar üzerine yapılan kaplamalarda, ana malzeme-kaplama malzemesi arasındaki termal genleşme uyumsuzluğu sebebiyle bazı problemler ortaya çıkabilmektedir. Bu problemlerin giderilmesi konusunda yapılan çalışmalar sonucunda pistonlarda, MgO ile stabilize edilmiş ZrO_2 'in daha iyi sonuç vereceği belirlenmiştir. Bu malzeme kullanılarak yapılan kaplamalar sonucunda, motorun seramik kaplamalı olarak yaklaşık 250 saat süreyle düşük yük ve devir şartlarından maksimum yük ve devir şartlarına kadar çalıştırılması sonucunda herhangi bir sorunla karşılaşılmamıştır. Deneyisel çalışmaların tamamlanmasından sonra motor

sökülerek kaplanan parçalar üzerinde yapılan incelemelerde herhangi bir çatlama ve kopmaya rastlanmamıştır (Şekil 4.9-4.10). Bu sonuç, Levy [20] tarafından da vurgulanmaktadır.

Termal bariyer kaplama sonucu, düşük ve orta devirlerde motorun efektif gücünde düşük bir artış olmakla birlikte, devir sayısının artmasıyla bu artış yavaşlamakta, yüksek devir sayılarında ise volumetrik verimdeki azalmanın bir sonucu olarak motorun efektif gücü çok az miktarda bir düşme göstermektedir.

Seramik kaplama sonucunda özellikle düşük, orta yük ve devir sayısı şartlarında motorun özgül yakıt tüketiminde önemli ölçüde azalma görülmektedir. Yakıt tüketimindeki bu azalma orta yük ve devir sayılarında daha da belirgin hale gelmektedir. Bu çalışma aralıklarında seramik kaplı motorda özgül yakıt tüketiminde %1 ile %6 arasında bir iyileşme sağlanmıştır. Bu iyileşmenin sebepleri; termal bariyer kaplama sonucu cidar sıcaklıklarının artması sonucu tutuşma gecikmesinin azalması ve bunun tabi bir sonucu olarak da yanma veriminin iyileşmesi ile egzoz gaz sıcaklıklarının artması sonucunda türbo doldurucunun veriminde meydana gelen iyileşmedir. Türbo doldurmalı motorlarda özellikle düşük yük ve devirlerde egzoz gazları türbo doldurucuya istenen aşırı doldurmayı yapabilecek miktarda enerji verememekte ve bunun sonucu olarak da bu çalışma şartlarında yeterli aşırı doldurma gerçekleştirilememektedir. Bu çalışmada deney motoru olarak türbo dolduruculu bir motorun seçilmesinin nedeni, türbo doldurmanın bu şartlarda ne şekilde etkilendiğinin belirlenmesidir. Ayrıca literatürde diğer araştırmacılar tarafından elde edilen çalışma sonuçları da, termal bariyer kaplama ile türbo doldurucu veriminin arttığını teyit eder niteliktedir. Bu konuda gerçekleştirilen bütün deneysel ve analitik çalışma sonuçları; tabi emmeli motorda seramik kaplama sonucunda motor performansında ya çok az bir artışı, veya bir miktar azalmayı göstermektedir. Türbo doldurmalı ve/veya türbokombine sistem içeren dizel motorlarda ise termal bariyer kaplama sonucu motorun performansının iyileştiği hemen hemen bütün araştırmacılar tarafından da vurgulanmaktadır. Leising ve diğ. [34], yalıtımdan istenen sonuçların alınabilmesi için dizel motorlarının türbo doldurmalı ve ara soğutuculu olması gerektiğini ve mevcut

dizayn şartlarında yakıt ekonomisinde %6 civarında bir iyileşmenin mümkün olduğunu söylemektedirler. Çalışma sonuçları, yazarın görüşünü doğrulamaktadır.

Yüksek yük ve devir sayısı şartlarında termal bariyer kaplama sonucu motorun özgül yakıt tüketimindeki iyileşmenin azalarak devam ettiği ve maksimum yük ve devir sayısı şartlarında normal motora göre çok az da olsa bir artış olduğu gözlenmiştir. Bu artışa, bu noktalarda cidar sıcaklıklarındaki yüksek artış sonucu volumetrik verimde meydana gelen azalmanın yol açtığı düşünülmektedir. Volumetrik verime ait grafiklerin incelenmesi sonucunda bu çalışma şartlarında volumetrik verimin azaldığı açık bir şekilde görülmektedir. Maksimum yük ve devir şartlarında motorun özgül yakıt tüketiminde meydana gelen bu artış %1 değerinin altında kalmaktadır. Pratikte bir motorun maksimum yük ve devir sayısında çalıştırılmasının sık rastlanan bir durum olmadığı dikkate alınırsa bu artışın fazla bir önem arz etmediği açıktır.

Motorun püskürtme avans açısının 2^0 KMA azaltılarak test edilmesi sonucunda, bütün çalışma şartlarında özgül yakıt tüketiminde, standart ayarlı seramik kaplı motora göre % 1-2 arasında ilave bir iyileşme gözlenmiştir. Böylece, hem maksimum yük ve devir sayısı şartlarında ortaya çıkan yakıt tüketimi olumsuzluğu giderilmiş ve hem de seramik kaplama sonucu motorda sağlanan özgül yakıt tüketimi iyileşmesinin % 8 değerlerine kadar artışı temin edilmiştir. Literatürde, püskürtme avansının değiştirilmesine ilişkin deneysel çalışma sonuçlarına rastlanmamıştır. Ancak, düşük ısı kayıplı bir motorda yakıt ekonomisini iyileştirmek için sadece yalıtımın yeterli olmadığı, bunun yanında yakıt püskürtme sistemini optimize etmek için bir takım değişiklikler yapılmasının gerekli olduğu bazı araştırmacılar tarafından belirtilmektedir [18,26,28,43]. Çalışmada elde edilen sonuçlar, düşük ısı kayıplı bir motordan daha iyi bir verim elde edilebilmesi için, püskürtme avansının optimize edilmesi gerektiği düşüncesini doğrulamaktadır.

Literatürde düşük ısı kayıplı motorlar konusunda yapılan çalışmalarda, termal bariyer kaplama sonucu özgül yakıt tüketiminde meydana gelen azalmalarla ilgili oldukça farklı sonuçlar verilmektedir. Örneğin termal bariyer kaplama sonucu; Badgley ve diğ. [13], %5, Havstad ve diğ. [14], %4-9, Leising ve diğ. [34], %6, Coers ve diğ. [12],

%14 özgül yakıt tüketimi azalması elde etmişlerdir. Deneysel çalışmalarda elde edilen %1-6 arasındaki özgül yakıt tüketimi azalmasının literatürdeki limitler arasında kaldığı görülmektedir.

Deneysel çalışma sonuçları, düşük yük ve devir sayılarında volumetrik verimin ya aynı kaldığını ya da çok az bir miktarda arttığını, orta yük ve devir sayısı şartlarında ise volumetrik verimin belirgin bir şekilde arttığını göstermektedir. Bu aralıkta volumetrik verimde meydana gelen artış %3 değerlerine kadar çıkmaktadır. Volumetrik verimde meydana gelen bu artış yalnızca artan egzoz enerjisi sonucu türbo doldurucu veriminin iyileşmesiyle izah edilebilir. Yüksek yük ve devir sayılarında ise volumetrik verimde %1-1,3 arasında bir azalma görülmüştür. Bu çalışma şartlarında, cidar sıcaklıkları iyice artmakta ve egzoz gazlarının enerjisinde meydana gelen artış önemini kaybetmektedir. Seramik kaplı motorlarda volumetrik verimde meydana gelecek değişim kaplama tabakasının kalınlığına bağlı olarak değişmektedir. Literatürde, düşük ısı kayıplı motor çalışmalarında verilen volumetrik verimdeki azalmalar %10'lara kadar çıkmaktadır [21,24].

Ölçüm sonuçlarına dayanılarak hesaplanan efektif verim değerleri %26-38 arasında değişmektedir. Termal bariyer kaplama sonucu motorun efektif verimi %2 mertebesinde artış göstermektedir. Bilindiği üzere, motorun efektif verimi özgül yakıt tüketiminin bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Bu sebeple, kaplama sonucu efektif verimde meydana gelen değişim, özgül yakıt tüketimi ile aynı eğilimi göstermektedir. Burada yine, düşük, orta yük ve devir sayısı şartlarında efektif verimdeki iyileşmenin daha fazla olduğu, maksimum yük ve devir şartlarında ise çok az bir azalmanın söz konusu olduğu görülmektedir.

Seramik kaplama sonucunda, egzoz gaz sıcaklıklarının bütün çalışma şartlarında arttığı tespit edilmiştir. Sıcaklık artışları, düşük yük ve devir sayısı şartlarında daha az olup, devir sayısı ve yükün artmasıyla birlikte yükselmektedir. Egzoz sıcaklıklarında meydana gelen artış değerleri 10-65 °C arasında değişmektedir. Bu artış değerleri %5-22 arasında bir sıcaklık artışını ifade etmektedir. Enerji bazında düşünüldüğünde, seramik kaplama sonucu düşük ısı kayıplı motorun egzoz enerjisini toplam yakıt

enerjisindeki yüzdesi %18-32 arasında değişmektedir. Seramik kaplı motorda egzoz enerjisinde normal motora kıyasla meydana gelen artış %23 değerlerine kadar yükselmektedir. Kaplama sonucu egzoz gazlarının enerjisinde meydana gelen bu artışın, türbokombine veya rankin alt çevrimlerinin sisteme ilavesiyle geri kazanımı mümkündür. Egzoz enerjisinin ne kadarının faydalı işe dönüştürülebileceğini belirlemek için de, termodinamiğin ikinci kanun analizlerine (ekserji analizleri) gerek vardır. Bu amaçla çalışmada, bir bilgisayar programı geliştirilerek egzoz gazlarının kullanılabilir enerjileri (ekserji) hesaplanmak suretiyle, egzoz gazlarının içerdiği enerjinin ne kadarının faydalı işe dönüştürülebileceği hesaplanmıştır. İkinci kanun analiz sonuçları, egzoz gazlarının kullanılabilirliğinin normal motorda 3,2-40 kW, seramik kaplı motorda ise 3,3-45 kW arasında değiştiğini göstermektedir. Bu sonuçlara göre, kaplamalı motorda egzoz gazlarının kullanılabilir enerji miktarları normal motora göre %3-27 arasında artış göstermektedir.

Alkidas [106], seramik kaplı bir motorda türbokombine sistem ilavesiyle elde edilebilecek gücün, egzoz gazlarının ekserji akısının %30'u civarında olduğunu, Assanis [29], rankin alt çevriminin, egzoz gazlarının enerjilerinin %17-24'ünü faydalı işe çevirebileceğini ve rankin çevriminin kombine çevrimden %10-14 daha verimli çalıştığını, Sun ve diğ. [40], tam yükte türbo doldurmalı motora kombine çevrim ilavesiyle 11,6 kW ilave güç elde ettiğini, bunun da toplam motor gücünün %6,49'una karşı geldiğini söylemektedirler.

Yukarıdaki değerlendirmelere göre, termal bariyer kaplı deney motoruna kombine sistem eklenmesiyle 13 kW civarında ilave faydalı güç elde edilebilir. Rankin alt çevriminin eklenmesi durumunda ise bu değerin 15 kW'a kadar çıkması mümkündür. Bu ise motorun efektif gücünde yaklaşık %11'lik bir artışı ifade etmektedir.

Seramik kaplamalı motorlardan beklenen diğer bir olumlu sonuç da, soğutma sistemine verilen kayıp enerji miktarının ve böylece soğutma yükünün azaltılmasıdır. Deneysel sonuçlar, izolasyon sonucu motorun soğutma sistemine verilen enerji miktarında %6 mertebesine kadar azalma olduğunu göstermektedir. Bu değer, termal bariyer kaplama ile soğutucu akışkana giden enerji akısında %19 civarında bir azalma

sağlandığını göstermektedir. Soğutma yükünde meydana gelen bu %19'luk azalmanın bir sonucu olarak, düşük ısı kayıplı motorlarda soğutma sisteminin önemli ölçüde küçültülebileceği, bunun da motorun toplam ağırlığında ve hacminde bir azalmayla birlikte motorun performansına ilave bir katkı sağlayacağı aşikardır.

Çalışmada, motor performansının yanında, karbon monoksit, hidrokarbon ve partikül emisyonları da ölçülerek, termal bariyer kaplama sonucu bu emisyonlarda meydana gelen değişimler de incelenmiştir. Ölçüm sonuçları ile, seramik kaplı motorda karbon monoksit emisyonlarında %35, partikül emisyonlarında %48 ve hidrokarbon emisyonlarında da %40'lara varan azalmalar olduğu tespit edilmiştir.

Literatürde, termal bariyer kaplama sonucu motorun hidrokarbon, karbon monoksit ve partikül emisyonlarının azaldığı bir çok araştırmacı tarafından da vurgulanmaktadır [11,18,21,111,112,113]. Assanis [21], termal bariyer kaplama sonucunda; karbon monoksit emisyonlarının %30-60 ve hidrokarbon emisyonlarının ise %35-40 arasında azalma gösterdiğini belirtmektedir. Deneysel çalışmalarda elde edilen ölçüm sonuçlarının Assanis [21]'in sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir.

Deney motorunun tabi emmeli halde test edilmesi sonucunda seramik kaplı halde; düşük yük-düşük devir ve yüksek yük-yüksek devir çalışma şartlarında motorun özgül yakıt tüketiminde artış olduğu, diğer çalışma şartlarında ise azalma olduğu belirlenmiştir. Seramik kaplamalı çalışma durumunda düşük yük ve devir sayılarında yakıt tüketiminde meydana gelen azalma önemsiz miktarlarda iken yüksek yük ve devir sayılarında ise daha belirgindir. Özgül yakıt tüketiminde meydana gelen bu azalma miktarı %2'nin altında kalmaktadır. Yine tabi emmeli kaplamalı motorda yukarıda belirtilen çalışma şartlarında meydana gelen yakıt tüketimi artışı da % 2 civarında olmaktadır. Bu sonuç, Çelik [47]'in sonuçlarıyla uygunluk arz etmektedir.

Yukarıda yapılan değerlendirmelerden aşağıdaki sonuçlara varılmıştır;

- İçten yanmalı motorlarda silindir kafası ve supaplar üzerine yapılacak termal bariyer

amaçlı kaplamalarda bağlayıcı ara tabaka malzemesi olarak NiCrAl, kaplama malzemesi olarak CaO ile stabilize edilmiş ZrO₂ uygun kaplama malzemesi olarak tespit edilmiştir.

- Düşük ısı kayıplı motorlarda alüminyum alaşım malzemesinden imal edilen pistonlar üzerine yapılacak seramik kaplamalar en problemli kaplamaları oluşturmakta olup, pistonlar üzerine yapılan kaplamalarda, NiCrAl ara tabaka üzerine MgO ile stabilize edilmiş ZrO₂'in iyi sonuç verdiği belirlenmiştir.
- Literatürde, yitriya ile stabilize edilmiş ZrO₂'in motorlar için en uygun termal bariyer kaplama malzemesi olduğu belirtilmektedir [20]. Fakat, bu malzeme diğerlerine kıyasla çok daha pahalı olması sebebiyle ekonomik görülmemektedir. Seramik kaplama tozlarının yerli üretimi ile kaplama maliyeti istenen ekonomik değerlere çekilebilir.
- Termal bariyer kaplamaların kalitesini artırmaya yönelik çalışmalar sürdürülmelidir. Bu noktada özellikle pistonlarda meydana gelen termal genleşme uyumsuzluklarının giderilebilmesi için, çok tabakalı kaplamalar üzerinde çalışılmalıdır.
- Motordan olan ısı kayıplarını daha da azaltmak için silindir gömleklerinin de kaplanması gereklidir.
- Düşük ısı kayıplı motorlarda kaplama sonucu motorun performansı belirgin bir şekilde iyileşmektedir. Motorun püskürtme sisteminde bir takım değişiklikler yapılması veya yeniden dizaynı ile performanstaki bu iyileşmelerin daha da artması beklenmektedir.
- Termal bariyer kaplamalar, artan egzoz enerjisi sonucu, doldurucu verimini artırdığından, özellikle türbo doldurmalı motorlarda iyi sonuçlar vermektedir.

- Tabi emmeli motorda termal bariyer kaplamaların, motorun performansında meydana getirdiği iyileşmeler, türbo doldurmalı motora kıyasla çok daha az olmaktadır.
- Motora türbokombine veya Rankin alt çevrimi eklenmesiyle motorun egzoz enerjisinde meydana gelen artışın bir kısmının faydalı işe dönüştürülmesi mümkündür.
- Termal bariyer kaplamalı motorlarda karbon monoksit, hidrokarbon ve partikül emisyonları kaplamasız motorlara kıyasla önemli ölçüde azalmaktadır.
- Seramik kaplı motorlarda, düşük setan sayılı alternatif yakıtların yakılması mümkündür.
- Bu çalışmanın sonucunda, türbo doldurmalı ağır yük dizel motorlarında seramik kaplamanın uygulanabilir olduğu, kaplama kalitesinin artırılması ve maliyetin azaltılmasıyla önümüzdeki yıllarda yaygın bir uygulama alanı bulabileceği, yakıt tüketiminin azaltılması yönüyle ekonomik yararları yanında hava kirliliğinin azaltılmasında da önemli katkıları olacağı sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] **WOODS, M.E., and ODA, I.**, "Ceramic Insulating Components for the Adiabatic Engine", SAE Government Industry Meeting & Exposition, Washington, May (1984)
- [2] **WOODS, E.S., SCHWARZ, E., and BRYZIK, W.**, "Advances in High Temperature Components for the Adiabatic Engine", SAE paper No. 910457, (1991)
- [3] **ÇELİK, H., ÇELİK, V., ve AVCI, E.**, "Effect of Ceramic Coatings on Combustion and Performance of Engines in Combustion Chambers", 3.Yanma Sempozyumu, Bursa, 19-21 Temmuz (1993)
- [4] **WACKER, E., SANDER, W.**, "Piston Design for High Combustion Pressures and Reduced Heat Rejection to Coolant", SAE International Congress, Michigan, (1982)
- [5] **CROUSE, H.W., Çev. ARVUZ, V., TAŞKAYA, Y., KARASU, T.**, "Otomobil Motorları, Yakıt, Yağlama, Soğutma Sistemleri", ETYÖÖ Matbaası, Ankara, (1971)
- [6] **SIEGLA, C.S., and AMANN, C.A.**, "Exploratory Study of the Low-Heat - Rejection Diesel for Passenger - Car Applications", SAE International Congress & Exposition, Detroit, Michigan, February-March, (1984)
- [7] **LEISING, C.J., PUROHIT, G.P., DEGREY, S.P., and FINEGOLD, J.G.**, "Waste Heat Recovery in Truck Engines", SAE paper No. 780686, (1978)
- [8] **HUNTER, C.E., HAVSTAD, P.H., GARWIN, I.J., and DABY, E.E.**, "The Effect of Reduced Chamber Heat Loss on Combustion and Emissions of Alternative Fuels in a Light-Duty DI Diesel", SAE paper No. 881628, (1988)
- [9] **REDDY, C.S., DOMINGO, N., and GRAVES, R.L.**, "Low Heat Rejection Engine Research Status: Where Do We Go from Here?", SAE paper No.900620, (1990)
- [10] **HOCKING, M.G., VASATASREE, V., SIDKY, P.S.**, "Metallic and Ceramic Coatings, Production High Temperature and Applications", Longman Scientific & Technical, London (1989)

- [11] **SUDHAKAR, V.**, "Performance Analysis of Adiabatic Engine", SAE International Congress & Exposition, Detroit, Michigan, February-March, (1984)
- [12] **COERS, R.B., FOX, L.D., and JONES, D.J.**, "Cummins Uncooled 250 Engine", SAE International Congress & Exposition, Michigan, February-March (1984)
- [13] **BADGLEY, P., KAMO, R., BRYZIK, W., and SCHWARZ, E.**, "Nato Durability Test of an Adiabatic Truck Engine", SAE paper No. 900621, (1990)
- [14] **HAVSTAD, P.H., GERVIN, I.J., and WADE, W.R.**, "A Ceramic Insert Uncooled Diesel Engine", SAE paper No. 860447, (1986)
- [15] **HAVSTAD, P.H., WADE, W.R., OUNSTED, E.J., TRINKER, F.H., and CARVIN, I.J.**, "Fuel Economy Opportunities with an Uncooled DI Diesel Engine", SAE paper No. 841286, (1984)
- [16] **MIYAIRI, Y., MATSUHISA, T., OZAWA, T., OIKAWA, H., and NAKASHIMA, N.**, "Selective Heat Insulation of Combustion Chamber Wall, for a DI Diesel Engine with Monolithic Ceramics", SAE paper No. 890141, (1989)
- [17] **TOYAMA, K., CHENG, W.K., WONG, V.W. and CAO, F.**, "Heat Transfer Measurement Comparisons in Insulated and Non-Insulated Diesel Engines", SAE paper No. 890570, (1989)
- [18] **ALKIDAS A.C.**, "Performance and Emissions Achievements with an Uncooled Heavy Duty, Single Cylinder Diesel Engine", SAE paper No. 890144, (1989)
- [19] **SIEGLA, D.C., and ALKIDAS, A.C.**, "Evaluation of the Potential of a Low-Heat Rejection Diesel Engine to Meet Future EPA Heavy-Duty Emission Standards", SAE paper No. 890291, (1989)
- [20] **LEVY, A.V.**, "The Performance of Ceramic Coatings on Diesel Engine Combustion Zone Components", National Thermal Spray Conference: New Ideas and Processes, Ohio-USA., 24-27 October, (1988)
- [21] **ASSANIS, D., WLESE, K., SCHWARZ, E., and BRYZIK, W.**, "The Effects of Ceramic Coatings on Diesel Engine Performance and Exhaust Emissions", SAE paper No. 910460, (1991)
- [22] **SUDHAKAR, V.**, "Performance Analysis of Adiabatic Engine", SAE International Congress & Exposition, Detroit, Michigan, February-March, (1984)

- [23] **KVERNES, I., NORHOLM, O., and SVARTDAL, J.,** "Ceramic Coatings' Influences on Medium Speed Diesel Engine Performance and Reliability", Marine Management, Paper 10, (1990)
- [24] **ALKIDAS, A.C.,** "On the Performance and Emissions of an Uncooled Heavy-Duty Single-Cylinder Diesel Engine", SAE paper No. 880013, (1988)
- [25] **WOODS, M.E., BRYZIK, W., and SCHWARZ, E.,** "100 Hour Endurance Testing of a High Output Adiabatic Diesel Engine", SAE paper No. 940951, (1994)
- [26] **WANG, Y., YANG, C., SAU, G., JU, Y., and ZHAO, K.,** "An Observation of High Temperature Combustion Phenomenon in Low Heat Rejection Diesel Engines", SAE paper No. 940949, (1994)
- [27] **WOSCHNI, G., SPINDLER, W.,** "Heat Transfer with Insulated Combustion Chamber Walls and Its Influence on the Performance of Diesel Engines", Transactions of the ASME, Vol.110, July (1988)
- [28] **MIYAIRI, Y.,** "Computer Simulation of an LHR DI Diesel Engine", SAE paper No. 880187, (1988)
- [29] **ASSANIS, D.N.,** "Effect of Combustion Chamber Insulation on the Performance of a Low Heat Rejection Diesel Engine with Exhaust Heat Recovery", Heat Recovery Systems & CHP, Vol.9, No.5, (1989)
- [30] **KOUREMENOS, D.A., RAKOPOULOS, C.D., and HOUNTALAS, D.T.,** "Prechamber and Main Chamber Insulation Effects on the Performance of an IDI Diesel Engine Coupled to Power Turbine", Heat Recovery Systems & CHP, Vol.12, No.3, (1992)
- [31] **KAMO, R., BRYZIK, W.,** "Adiabatic Turbocompound Engine Performance Predictions", SAE International Congress & Exposition, Detroit, Michigan, February-March, (1978)
- [32] **MOREL, T., KERIBAR, R., BLUMBERG, P.N., and FORT, E.F.,** "Examination of Key Issues in Low Heat Rejection Engines", SAE paper No. 860316, (1986)
- [33] **MOREL, T., FORT, E.F., and BLUMBERG, P.N.,** "Effect of Insulation Strategy and Design Parameters on Diesel Engine Heat Rejection and Performance", SAE paper No. 850506, (1985)
- [34] **LEISING, C.J., PUROHIT, G.P., DEGREY, S.P., and FINEGOLD, J.G.,** "Waste Heat Recovery in Truck Engines", SAE paper No. 780686, (1978)

- [35] **HOAG, K.L., Brando, M.C., and BRYZIK, W., "Cummins/TACOM Adiabatic Engine Program", SAE paper No. 850356, (1985)**
- [36] **TOVELL, J.F., "The Reduction of Heat Losses to the Diesel Engine Cooling System", SAE paper No. 830316, (1983)**
- [37] **FRENCH, C.C.J., "Ceramics in Reciprocating Internal Combustion Engines", SAE paper No. 841135, (1984)**
- [38] **BRUNS, L., BRYZIK, W., and KAMO, R., "Performance Assessment of U.S. Army Truck with Adiabatic Diesel Engine", SAE paper No. 890142, (1989)**
- [39] **WALLACE, F.J., WAY, R.J.B., and VOLLMERT, H., "Effect of Partial Suppression of Heat Loss to the Coolant on the High Output Diesel Engine Cycle", SAE paper No. 790823, (1979)**
- [40] **SUN, X, WANG, W.G., BATA, R.M., GAO, X., "Performance Evaluation of Low Heat Rejection Engines", Transactions of the ASME, Vol.116, October (1994)**
- [41] **RAKOPOULOS, C.D., ANDRITSAKIS, E.C., and HOUNTALAS, D.T., "The Influence of the Exhaust System Unsteady Gas Flow and Insulation on the Performance of a Turbocharged Diesel Engine", Heat Recovery Systems & CHP, Vol.15, No.1, (1995)**
- [42] **RAKOPOULOS, C.D., TAKLIS, G.N., and TZANOS, E.I., "Analysis of Combustion Chamber Insulation Effects on the Performance and Exhaust Emissions of a DI Diesel Engine Using a Multi-Zone Model", Heat Recovery Systems & CHP, Vol.15, No.7, (1995)**
- [43] **CHENG, W.K., WONG, V.W. and CAO, F., "Heat Transfer Measurement Comparisons in Insulated and Non-Insulated Diesel Engines", SAE paper No. 890570, (1989)**
- [44] **WOSCHNI, G., SPINDLER, W. And KOLESA, K., "Heat Insulation of Combustion Chamber Walls-A Measure to Decrease the Fuel Consumption of I.C. Engines", SAE paper No. 870339, (1987)**
- [45] **DICKEY, D.W., "The Effect of Insulated Combustion Chamber Surfaces on Direct-Injected Diesel Engine Performance, Emissions and Combustion", SAE paper No. 890292, (1989)**
- [46] **KIMURA, S., MATSUI, Y., and ITOH, T., "Effect of Combustion Chamber Insulation on the Heat Rejection and Thermal Efficiency of Diesel Engines", SAE paper No. 920543, (1992)**

- [47] ÇELİK, H.A., "Bir Dizel Motorunda Seramik Kaplamanın Motor performansına Etkilerinin İncelenmesi", Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (1991)
- [48] ASSANIS, D.N., and MATHUR, T., "The Effect of Thin Ceramic Coatings on Spark-Ignition Engine performance", SAE paper No. 900903, (1990)
- [49] KAMO, R., ASSANIS, D.N., and BRYZIK, W., "Thin Thermal Barrier Coatings for Engines", SAE paper No. 890143, (1989)
- [50] ESSCHNAUER, H., LUNGSCHIEDER, E., "Fortschritte beim Thermischen Spritzen", Metall, Heft 3, 218-224, (1985)
- [51] ÜSTEL, F., "Plazma Sprey Teknolojisi", Yüksek Lisans Tezi, İTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, (1994)
- [52] KVERNES, I., LVGSCHIEDER, E., LINDBLOM, Y., "Protection Materials Coatings Thermal Barrier and Wear Resistance", Proc. 2.th Euro Symp. On Engineering Ceramics, (1987)
- [53] VUORISTO, P.M.J., "Wear Resistant Coatings By Thermal Spray Techniques", Workshop On Anti-Wear Coatings, TÜBİTAK-MAM., (1993)
- [54] INGLAM, H.S., SHEPARD, A.P., "Metco Flame Spray Handbook: Powder Process", New York, (1967)
- [55] WOODS, W.G., SHEPARD, A.P., "Metals Handbook: Surface Cleaning, Finishing, and Coating", 9th Ed. V.5, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, USA., (1982)
- [56] THORPE, L.M., "Thermal Spray Industry in Transition", Advanced Materials and Processes, Vol.143, (1993)
- [57] KHARLAMOV, Y.A., "Materials Engineering Forum, Detonation Spraying of Protective Coatings", Voroshilavgrad Machine Building Institute, Voroshilavgrad, U.S.S.R., 9 September (1986)
- [58] THORPE, L.M., "Thermal Spraying Becomes a Design Tool", Machine Design, Vol.55, October-December (1983)
- [59] FAUCHAIS, P., "Plasma Spraying of Ceramic Particles in Argon-Hydrogen DC Plasma Jets: Modeling and Measurements of Particles in Flight Correlation with Thermophysical Properties of Sprayed Layers", Metal. Trans., 20b, 4/(1989)

- [60] PFENDER, E., "Fundamental Studies Associated with the Plasma Spray Process", National Thermal Spray Conference: Advances in Coating Technology, Florida-USA, (1987)
- [61] ÜÇİŞİK, A.H., AVCI, E., ZEYTİN, S., VURAL, M., "Metallerin Seramik Kaplanması ve Metalografik İncelenmesi", TÜBİTAK-MAM, Malzeme Bölüm Raporu, 031619006, (1991)
- [62] CHAGNON, P., FAUCHAIS, P., "Thermal Spraying of Ceramics", Ceramics International, 10, 4/(1984)
- [63] "Metco Technical Information Bulletins", 269, Westbury-USA, (1995)
- [64] "Thermal Spraying", GE Commercial Engines, Standard Practices Manual, (1982)
- [65] KVERNES, L., LVGSCHIEDER, E., and LINDBLOM, Y., "Protection Materials Coatings Thermal Barrier and Wear Resistance", Proc. 2th Euro. Symp. on Eng. Ceramics, (1987)
- [66] PEDWARD, I., KUBEL, J.R., "Thermal Spraying Technology: From Art to Science", Adv. Materials & Proc., Vol.12, (1987)
- [67] INGLAM, H.S., SHEPARD, A.P., "Metco Flame Spray Handbook", Metco Inc., New York, (1965)
- [68] MATEJKA, D., BENKO, B., "Metallic Spraying of Metallic and Ceramic Materials", John Wiley & Sons, West Sussex-England, (1989)
- [69] SANGHAM, M., NIKITICH, J., "Designing for Optimum Use of Plasma Coatings", Journal of Metals, 9/(1985)
- [70] GILL, B.J., TUCKER, R.C., "Plasma Spray Coating Processes", Material Science & Tech., 2, 3/(1986)
- [71] FILMER, H.L., "Plasma Spray Deposition of Alumina-Based Ceramic Coatings", Ceramic Bulletin, 69, 12/(1990)
- [72] STECURA, S., "Optimization of the Ni-Cr-Al-Y/ZrO₂-Y₂O₃ Thermal Barrier System", Advanced Ceramic Materials, 1, (1986)
- [73] MCPHERSON, R., "A Review of Microstructure and Properties of Plasma Sprayed Ceramic Coatings, Surface & Coating Tech., 39/40, (1989)
- [74] ÜSTEL, F., ÇELİK, E., SOYKAN, Ş. ve AVCI, E., "Seramik Kaplamaların Yapışma Mukavemetinin İncelenmesi", VIII. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul-Türkiye, 6/(1995)

- [75] GRUNDLING, H.W., "Mechanical Properties of Coated Systems", Material Science & Tech., 88, (1987)
- [76] BALTING, U., "Untersuchung des Eigendehnungsverhaltens Plasmagespritzter Al_2O_3 -Schicht-Substrat-Verbundsysteme-mit Hilfe der Simulation", Metall., 5/(1995)
- [77] BECHTLOFF, G., "Untersuchung zur Wärmeleitfähigkeit von Thermischen Spritzschichten", Metall., 39, 8/(1985)
- [78] WIGREN, J., "Grit Blasting as Surface Preparation Before Plasma Spraying", National Thermal Spray Conference: New Ideas and Processes, Ohio-USA., 24-27 October, (1988)
- [79] BUNSHAH, R.F., "Deposition Technologies for Films and Coatings", Noyes Publ., New Jersey-USA., (1982)
- [80] BERNDT, C.C., "Mechanical, Thermomechanical and Tribological Applications of ceramic Coatings", 7th. CIMTEC, World Ceramic Congress, Montecatani-Italy, 7/(1990)
- [81] LUNGSCHEIDER, E., "Plasmapritzen, Verfahren, Anwendungen, Entwicklungen", Metall, 47, 3, 3/(1993)
- [82] ÇELİK, V., BÜYÜKKAYA, E., YAŞAR, H., SOYKAN, Ş., "Termal Sprey Teknolojisi ve Motorlarda Uygulanması", IV. Uluslararası Yanma Sempozyumu, Bursa-Türkiye, (1995)
- [83] ÇEVİK, İ., "Zirkonya Esaslı Seramik Kaplamaların Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerinin Değiştirilmesi", Doktora Tezi, İ.T.Ü., (1990)
- [84] BISELLI, C., CHOLLET, L., "Young's Modulus of TIN and TIC Coatings", Mechanics of Coatings, Lyon, France, 217-223, (1989)
- [85] MORRELL, R., "Handbook of Properties of Technical and Engineering Ceramics: Part I, An Introduction for the Engineer and Designer", National Physical Laboratory, London, England, May (1985)
- [86] SCHMITT, K.G., DIETL, T.U., "Thermal Barrier Coatings with Improved Oxidation Resistance", Surface and Coating Technology, 113-115, (1994)
- [87] STEPKA, F.S., LIEBERT, C.H., and STECURA, S., "Summary of NASA Research on Thermal Barrier Coatings", SAE International Automotive Engineering Congress & Exposition, Detroit, Michigan, (1977)

- [88] NOVAK, R.C., MATARESE, A.P., HUSTON, R.P., "Development of Thermal Barrier Coating for Diesel Applications", National Thermal Spray Conference: New Ideas and Processes, Ohio-USA., 24-27 October, (1988)
- [89] MARMACH, M., and HANNINK, R.H., "Toughened PSZ Ceramics Their Role as Advanced Engine Components", SAE International Congress, Michigan, (1983)
- [90] LUTZ, J.C., HARRIS, D.H., "Development of Thermal Barrier Coating for the Internal Combustion Engine", National Thermal Spray Conference: New Ideas and Processes, Ohio-USA., 24-27 October, (1988)
- [91] YONUSHONIS, T.M., "Diesel Engine Evaluation of Thermal Barrier Coatings", National Thermal Spray Conference: New Ideas and Processes, Ohio-USA., 24-27 October, (1988)
- [92] WOODS, M.E., ODA, I., "PSZ Ceramics for Adiabatic Engine Components", SAE International Congress, Michigan, (1982)
- [93] GODFREY, D.J., "Silicon Nitride Ceramics for Engineering Applications", SAE Automotive Engineering Congress, Michigan, (1974)
- [94] BERNARD, D., GITZHOFFER, F., FAUCHAIS, P., MARTIN, C., "Thermal Diffusivity and Expansion Coefficient of Stabilized Zirconia Coatings; Changes with Temperature", National Thermal Spray Conference: New Ideas and Processes, Ohio-USA., 24-27 October, (1988)
- [95] BORAT, O., SÜRMEN, A., BALCI, M., "İçten Yanmalı Motorlar", Cilt 1, Teknik Eğitim Vakfı Yayınları, Ankara, (1994)
- [96] GÜNGÖR, O., "Dizel Teknolojisi", Yargıçoğlu Matbaası, Ankara, (1976)
- [97] LILLY, L.R.C., "Diesel Engine Reference Book", Butterworth and Co (Publishers) Ltd, London, (1984)
- [98] TAYLOR, F.C., "The Internal Combustion Engine: In Theory and Practice", Vol. II, The M.I.T. Press, Massachusetts Institute of Technology, USA., May (1986)
- [99] "Project Technology Handbook/5", Heinemann Educational Books, School Council, Tandon, August, (1972)
- [100] HOLMAN, J.P., "Experimental Methods for Engineers", McGraw Hill Kogagusha Ltd., Tokyo, (1984)

- [101] **DOEBELIN, E.O.**, "Measurement Systems; Applications and Design", Fourth Edition, McGraw Hill International Editions, (1990)
- [102] **TEKİN, M.**, "Motorlu Araçların Seyir Çevrimi ve Yakıt Sarfıyatının Simülasyonu", Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (1992)
- [103] **GOLVERK, A.A.**, "The Method for Development of a Diesel Engine Universal Performance Map", SAE paper No. 941928, (1994)
- [104] **STOECKER, W.F.**, "Design of Thermal Systems", Second Edition, McGraw-Hill Book Company, (1980)
- [105] **HEYWOOD, J.B.**, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill Book Company, Singapore (1988)
- [106] **ALKIDAS, A.C.**, "The Application of Availability and Energy Balances to a Diesel Engine", Transactions of The ASME, Vol.110, July, (1988)
- [107] **KOLİP, A., ÇELİK, V., TEKİN, M.**, "İkinci Kanun Analizinin Bir Dizel Motoru Çalışmasına Uygulanması", IV. Uluslararası Yanma Sempozyumu, Bursa-Türkiye, (1995)
- [108] **BOZZA, F., NOCERA, R., SENATORE, A., and TUCCILLO, R.**, "Second Law Analysis of Turbocharged Engine Operation", SAE paper No.910418, (1991)
- [109] **KOLİP, A., ÇELİK, V.**, "İçten Yanmalı Motorlarda Optimum Çalışma Aralığının Ekserji Analizi Yöntemi İle Belirlenmesi", Termodinamiğin İkinci Kanunu Çalışma Toplantısı, Erciyes Üniv., T.I.B.T.D., 27-30 Ağustos, (1990)
- [110] **MORAN, M.J.**, "Availability Analysis: A Guide to Efficient Energy Use", Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J. 076 32, (1982)
- [111] **AMANN, C.A.**, "Promises and Challenges of the Low-Heat Rejection Diesel", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 110, July (1988)
- [112] **BRYZIK, W., and KAMO, R.**, "TACOM/Cummins Adiabatic Engine Program", SAE paper No. 830314, (1983)
- [113] **MATSUOKA, H., AND KAWAMURA, H.**, "Structure of Heat Insulated Ceramic Engine and Heat Insulating Performance", JSAE Review, Vol. 14, 9303474, (1993)

EK Türbo doldurmalı normal ve seramik kaplı motora ait deney ölçüm sonuçları

n (d/dak)	F (kg)	Türbo doldurmalı normal motor						Türbo doldurmalı kaplı motor					
		T _e (°C)	T _{sg} (°C)	T _{sc} (°C)	Δh _h (cmS S)	Δh _s (cmH g)	Δt (s)	T _e (°C)	T _{sg} (°C)	T _{sc} (°C)	Δh _h (cmS S)	Δh _s cmHg	Δt (s)
1000	15	181	58	70	0,95	0,3	86	191	52	73,5	0,95	0,4	87
1000	20	189	58	73,5	0,95	0,25	68	209	53	78	0,95	0,4	68,9
1000	25	220	57	73	0,95	0,28	57,2	251	51	78	0,95	0,4	58,1
1000	30	255	55	71,5	1	0,3	49,2	272	50	79	1	0,4	50,1
1000	35	295	54	72	1	0,3	44	321	50	80	1	0,45	44,9
1000	40	304	54	73	1	0,3	40	335	50	80	1,05	0,5	41
1000	45	349	56	75	1,05	0,35	36,5	384	48	78	1,1	0,55	38,1
1000	50	381	56	77	1,15	0,35	33,3	432	47	78	1,2	0,6	35,5
1000	55	429	54	76	1,2	0,35	31,2	450	45	75	1,25	0,7	32,8
1200	15	190	56,5	70	1,35	0,3	73,5	201	50	74,5	1,35	0,4	75
1200	20	209	57	71	1,4	0,35	61	230	50	76	1,4	0,45	62,5
1200	25	238	55,5	70	1,43	0,4	51	262	52	78,5	1,45	0,5	52,6
1200	30	265	55	70	1,48	0,4	44,2	283	52	78,5	1,5	0,55	45,8
1200	35	308	55	72	1,52	0,4	39,3	334	50	80	1,55	0,55	40,8
1200	40	330	55	72	1,62	0,5	35	352	47	78,5	1,65	0,6	36,6
1200	45	368	55	73	1,63	0,5	31,7	393	50	80	1,7	0,7	33,2
1200	50	385	54	73,5	1,8	0,5	28,8	425	51	81	1,85	0,8	30,3
1200	55	439	55	76	1,85	0,5	26,5	461	50	80	1,95	0,9	27,85
1300	15	195	50	74,5	1,65	0,5	69,2	211	50	73,5	1,65	0,5	70,8
1300	20	205	50	78	1,67	0,55	57	235	50	74	1,7	0,55	58,5
1300	25	231	50	79	1,7	0,65	47,5	272	51	76,5	1,75	0,65	49
1300	30	248	50	79	1,75	0,75	42	289	51	77	1,8	0,75	43,3
1300	35	302	50	79,5	1,8	0,85	36,8	342	51	77	1,85	0,85	38
1300	40	315	50	80,5	1,9	0,95	32,5	345	51	78	1,95	0,95	34
1300	45	350	50	81	1,95	1,05	29,8	401	51	78,5	2	1,05	31
1300	50	375	50	81	2,05	1,2	27	420	52,5	78,5	2,2	1,15	28,3
1300	55	411	50	81,5	2,2	1,3	24,6	462	53	79	2,4	1,3	25,6
1400	15	205	52	72	1,95	0,15	65,4	215	50	71	1,95	0,6	66,5
1400	20	219	55	74	2	0,25	53	241	51	74	2,05	0,7	54
1400	25	258	53	77	2,05	0,2	44,6	278	51	74	2,1	0,8	45,7
1400	30	279	54,5	77	2,1	0,3	39	302	52	76	2,15	0,9	40,2
1400	35	305	52	76	2,2	0,3	34,5	335	52	78	2,25	1	35,5
1400	40	341	52	77	2,3	0,35	30,7	366	52,5	79	2,35	1,1	32
1400	45	358	52	80	2,4	0,3	27,8	395	53	80	2,5	1,2	28,9
1400	50	381	53	81	2,6	0,35	25,4	412	53	80,5	2,7	1,4	26,2
1400	55	419	53	81	2,7	0,4	23,3	455	53,5	81	2,8	1,6	24,1
1500	15	210	52	76	2,2	0,6	59,8	221	52	73	2,25	0,65	61,3
1500	20	231	52	78	2,3	0,75	47,5	252	52	75	2,35	0,75	48,5
1500	25	262	52,5	79	2,35	0,85	41	282	52	75,5	2,4	0,85	42
1500	30	278	52	79	2,5	0,95	36,5	310	52	76	2,6	0,95	38
1500	35	301	51	79,5	2,65	1,1	31,5	336	52	77	2,75	1,15	32,7
1500	40	330	51	80	2,75	1,3	28	365	52	77,5	2,85	1,3	29,5
1500	45	354	52	80	2,9	1,5	26,3	394	52	78	3,05	1,35	27,5

1500	50	372	51	79	3,1	1,8	23,5	412	52,5	78,5	3,35	1,5	24,5
1500	55	411	51	79	3,4	1,8	21,9	456	53,5	78,5	3,6	1,6	22,7
1600	15	221	50	72	2,6	0,85	54,8	232	51,5	72	2,65	0,8	56
1600	20	239	50	74,5	2,7	1	44	265	51	74,5	2,75	0,9	45,5
1600	25	271	50	75	2,78	1,2	37,5	302	51	76	2,85	1	38,5
1600	30	295	51	76	2,85	1,4	33,2	321	54	77	2,95	1,2	34,8
1600	35	309	51	77	3,17	1,6	29,1	345	54	78	3,3	1,4	30,3
1600	40	331	52	79	3,3	1,8	25,9	372	54	79	3,45	1,6	27
1600	45	358	54	80	3,5	2	24	395	56	79,5	3,65	1,7	25,2
1600	50	379	54	81	3,75	2,2	21,8	416	55	80	3,95	1,8	22,8
1600	55	420	56,5	81	4	2,4	20,7	442	52	79,5	4,25	1,6	21,3
1800	15	239	52	75,5	3,6	0,9	47,5	250	53	75	3,65	0,85	48,5
1800	20	265	52	76,5	3,7	1	38,5	278	53,5	76	3,75	1	39,5
1800	25	289	51	78	3,82	1,2	33	311	52	76,5	3,9	1,2	34
1800	30	310	51	79,5	4,1	1,4	28,7	340	53	77	4,2	1,4	30
1800	35	330	51	80	4,4	1,6	25,5	355	53	78	4,5	1,6	26,7
1800	40	355	50	81,5	4,9	1,75	22,5	375	53	79,5	4,95	1,9	23,9
1800	45	381	51	81	5,2	2	21	402	55,5	80	5,15	2	22
1800	50	390	51	82	5,9	2,2	19,2	415	54	81	5,8	2,1	20
1800	55	400	53	82	6,3	2,4	18,2	437	56	81	6,15	2,2	18,7
2000	15	230	52	75,5	1,95	1,1	41,5	271	52	74	2	1	42,8
2000	20	261	51	78	2,05	1,2	33,9	292	53	78	2,1	1,1	35
2000	25	289	52	79	2,3	1,4	29	320	53	78,5	2,35	1,2	30
2000	30	310	51	80	2,5	1,6	25	342	53	79,5	2,55	1,4	26,3
2000	35	339	51	80	2,6	1,8	22,5	371	53,5	80	2,65	1,6	23,5
2000	40	360	51	81,5	2,92	2	19,9	382	53	81	2,95	1,8	21
2000	45	380	52,5	82	3,2	2,2	18,4	393	54	81,5	3,15	2	19,2
2000	50	391	52,5	82,5	3,5	2,4	16,8	426	51	81	3,45	2	17,7
2000	55	400	56	83	3,9	2,6	16	440	56	82	3,8	2,3	16,5
2200	15	240	51	76	2,55	1,2	37	295	53	74,5	2,65	1,1	38,2
2200	20	265	51	79	2,75	1,4	29,8	325	54	78	2,85	1,3	30,9
2200	25	290	51,5	80	3	1,6	25,7	345	53	78	3,1	1,5	26,7
2200	30	306	52	81	3,4	1,8	22	366	54	79	3,45	1,6	23
2200	35	325	53	82	3,65	2	20	385	54,5	80	3,65	1,8	20,8
2200	40	352	52	83	3,95	2,2	17,7	397	54	82	3,95	1,9	18,5
2200	45	380	53	83	4,3	2,4	16,3	411	54	82,5	4,25	2	16,8
2200	50	391	52,5	84	4,5	2,6	15	442	53	83	4,45	2,2	15,3
2200	55	420	55,5	83	4,85	2,8	14,3	450	51	81,5	4,75	2	14,4
2400	15	269	54	79,5	3,2	1,3	33,2	300	53	76	3,25	1,2	34,4
2400	20	301	50,5	82	3,35	1,5	26	322	52	79,5	3,5	1,4	27,2
2400	25	330	50,5	83	3,75	1,7	22	345	52,5	80	3,8	1,6	23,1
2400	30	350	53	83	4,15	1,9	19,5	386	54	80	4,2	1,8	20,1
2400	35	374	51	83	4,5	2	17,5	400	54	80	4,5	2	18,1
2400	40	381	50	83	4,9	2,2	16	422	54	81	4,8	2,2	16,15
2400	45	398	50	83,5	5,25	2,4	14,6	435	54	81,5	5,15	2,4	15
2400	50	421	50	83,5	5,45	2,6	13,45	472	53	82	5,35	2,6	13,55
2400	55	450	52	83,5	5,9	2,8	12,85	491	54	82,5	5,75	2,8	12,7

ÖZGEÇMİŞ

Halit YAŞAR, 1962 yılında Trabzon'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Trabzon'da tamamladı. 1985 yılında İTÜ. Sakarya Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 1987 yılında İTÜ. Sakarya Mühendislik Fakültesi'nde Araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. 1992 yılında İTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Anabilim Dalı Enerji Programı'nda Yüksek lisansını tamamladı. 1992 yılında İTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Anabilim Dalı Enerji Programı'nda doktora öğrenimine başladı. Halen Sakarya Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak çalışmalarına devam etmektedir. Evli ve iki çocuk babasıdır.

