

**ÇİFT YER DEĞİŞTİRME PİSTONLU V TİPİ KÜÇÜK GÜÇLÜ BİR  
STİRLİNG MOTORUNUN TASARIM VE İMALİ**

**Süleyman ÜSTÜN**

**DOKTORA TEZİ  
MAKİNA EĞİTİMİ**

93506

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TC YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

**NİSAN 2000**

**ANKARA**

Süleyman ÜSTÜN tarafından hazırlanan ÇİFT YER DEĞİŞTİRME PİSTONLU V  
TİPİ KÜÇÜK GÜÇLÜ BİR STİRLİNG MOTORUNUN TASARIM VE İMALİ adlı  
bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarız.



Doç.Dr. Selim ÇETİNKAYA  
Tez Yöneticisi

Doç.Dr. Halit KARABULUT  
Tez Yöneticisi



Bu çalışma, jürimiz tarafından Makina Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak  
kabul edilmiştir.

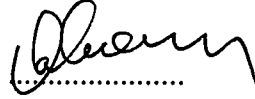
Başkan : Prof.Dr. Doğan ERDOĞAN



Üye : Doç.Dr. Selim ÇETİNKAYA



Üye : Doç.Dr. M. Sahir SALMAN



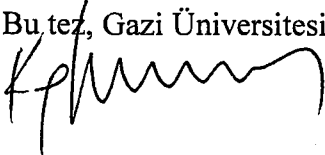
Üye : Doç.Dr. Halit KARABULUT



Üye : Yrd.Doç.Dr. İhsan BATMAZ



Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.



# **ÇİFT YER DEĞİŞTİRME PİSTONLU V TİPİ KÜÇÜK GÜÇLÜ BİR STİRLİNG MOTORUNUN TASARIM VE İMALİ**

**(Doktora Tezi)**

**Süleyman ÜSTÜN**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Nisan 2000**

## **ÖZET**

İçten yanmalı motorların 19. Yüzyıl da icadından sonra pek fazla gelişme gösteremeyen Stirling motorları 1970' lerdeki enerji krizinden sonra tekrar ilgi odağı haline gelmiştir.

Bu çalışmada, Türkiye' nin enerji potansiyeli gözönünde bulundurularak tahmini gücü 500 W olan çift ısıtıcılı bir Stirling motoru tasarlanarak optimize edildi ve imalatı yapıldı. Prototip motor laboratuvar şartlarında elektrikli bir ısıtma sistemi kullanılarak test edildi.

Testler 650-1000 °C sıcaklık aralığında 50 °C' lik artışlarla yapıldı. Her sıcaklık kademesinde şarj basıncı atmosferik basınçtan 2 bar' a kadar 0,5 bar aralıklarla artırıldı. Maksimum güç 1000 °C ısıtıcı sıcaklığında ve 1,5 bar şarj basıncında 65 W olarak belirlendi. Araştırmanın sonuçları diyagram ve tablo olarak takdim edildi.

Bilim Kodu : 626.10.01  
Anahtar Kelimeler : Stirling motoru, V tipi çift yer değiştirme pistonlu stirling motoru, V tipi stirling motoru,  
Sayfa Adedi : 156  
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Selim ÇETİNKAYA- Doç. Dr. Halit KARABULUT

**DESIGN AND CONSRUCTION OF A V-TYPE LOW POWER STIRLING  
ENGINE WITH AND DOUBLE DISPLACERS**

**(Ph.D.Thesis)**

**Süleyman ÜSTÜN**

**GAZİ UNIVERSITY  
INSTUTITE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

**April 2000**

**ABSTRACT**

Stirling engines became the focus of interest after the energy crisis in 1970' s which was left out of development after the invention of Internal Combustion Engines on 19<sup>th</sup> century.

In this study, considering the solar energy potential of Turkey, a V type Stirling engine having two heater has been designed, optimized by computer and manufactured. The prototype engine has been tested in laboratory conditions using an electrical heating system. Tests were conducted within the temperature range of 650-1000 °C by 50 °C increments. The pressure ranged from the atmospheric condition to 2 bar with 0,5 bar increment at each stage of temperature.

The maximum power was obtained at 950 °C heater temperature and 1,5 bar charge pressure as 65 W. The results of the study were presented by diagrams and tables.

Science Code : 626.10.01

Key Words : Stirling engine, Stirling engine with V-type and double displacer  
V-type stirling enine

Page Number : 156

Adviser : Doç. Dr. Selim ÇETİNKAYA - Doç.Dr.Halit KARABULUT

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmamda beni yönlendiren, her türlü destek ve yardımlarını esirgemeyen, her zaman değerli bilgilerinden yararlandığım danışmanım Sayın Doç. Dr. Selim ÇETİNKAYA' ya ve Sayın Doç.Dr.Halit KARABULUT' a, Otomotiv Anabilim Dalı Başkanı Sayın Yrd.Doç.Dr. İhsan BATMAZ' a ve tüm Anabilim Dalı personeline teşekkür ve şükranlarımı sunarım.



## İÇİNDEKİLER

|                                                                     | <u>Sayfa</u> |
|---------------------------------------------------------------------|--------------|
| ÖZET.....                                                           | I            |
| ABSTRACT.....                                                       | II           |
| TEŞEKKÜR.....                                                       | III          |
| İÇİNDEKİLER.....                                                    | IV           |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....                                             | VII          |
| TABLoların LİSTESİ.....                                             | XIII         |
| SEMBOLLER.....                                                      | XIV          |
| 1. GİRİŞ.....                                                       | 1            |
| 2. LİTERATÜR ÖZETLERİ.....                                          | 5            |
| 2.1. Stirling Motorlarının Tarihi Gelişimi.....                     | 5            |
| 2.2. Stirling Motor Tipleri.....                                    | 10           |
| 2.2.1. Tek etkili tasarımlar.....                                   | 11           |
| 2.2.1.1. Tek etkili diğer tasarımlar.....                           | 13           |
| 2.2.2. Çift etkili tasarımlar.....                                  | 16           |
| 2.2.3. Geliştirilen diğer tipler.....                               | 17           |
| 2.2.3.1. Sıvılı tip (Fluidyne) stirling motorları.....              | 17           |
| 2.2.3.2. Harwell termo-mekanik (titreşim diyaframlı) jeneratör..... | 18           |
| 2.3. Hareket İletim Mekanizmaları.....                              | 19           |
| 2.3.1. Rhombic mekanizması.....                                     | 19           |
| 2.3.2. Eğik plaka döndürme mekanizmalı stirling motorları.....      | 20           |
| 2.3.3. Sallanan sürücü mekanizma.....                               | 21           |
| 2.4. Stirling Motorlarında Sızdırmazlık Problemi.....               | 22           |
| 2.5. Stirling Motorlarının Kullanıldığı Yerler.....                 | 28           |
| 2.5.1. Otomotiv alanında.....                                       | 28           |
| 2.5.2. Tarımsal alanda.....                                         | 31           |
| 2.5.3. Elektrik üretiminde.....                                     | 37           |
| 2.5.4. Deniz Taşıtlarında.....                                      | 40           |

|        |                                                             |    |
|--------|-------------------------------------------------------------|----|
| 2.5.5. | Soğutucularda.....                                          | 40 |
| 2.6.   | Stirling Motorlarının Avantaj ve Dezavantajları.....        | 41 |
| 2.6.1. | Avantajları.....                                            | 41 |
| 2.6.2. | Dezavantajları.....                                         | 43 |
| 3.     | TERMODİNAMİK ANALİZ.....                                    | 44 |
| 3.1.   | Stirling Çevrimi.....                                       | 44 |
| 3.2.   | Regeneratörlü Stirling Çevrimi.....                         | 47 |
| 3.3.   | Carnot Çevrimi.....                                         | 51 |
| 3.4.   | Stirling Motorunun Çalışma Prensibi.....                    | 53 |
| 3.5.   | Stirling Motorlarının Pratik (gerçek) Çevrimi.....          | 55 |
| 3.6.   | Stirling Motorlarının Performansı.....                      | 57 |
| 3.6.1. | Güç ve verim.....                                           | 57 |
| 3.6.2. | Tork-hız.....                                               | 58 |
| 3.6.3. | Periyodik tork değişimi.....                                | 58 |
| 3.6.4. | Isıtıcı ve soğutucu sıcaklıkları.....                       | 59 |
| 3.6.5. | Özgül yakıt tüketimi.....                                   | 60 |
| 3.6.6. | Sürtünme ve pompalama kayıpları.....                        | 61 |
| 3.6.7. | Enerji dengesi.....                                         | 61 |
| 3.7.   | Farklı Çalışma Maddelerinin Motor Performansına Etkisi..... | 62 |
| 3.8.   | Stirling Motorlarında Termodinamik Analiz Yöntemleri.....   | 64 |
| 3.8.1. | Nodal analiz.....                                           | 65 |
| 3.8.2. | İzotermal analiz.....                                       | 69 |
| 3.8.3. | Schmidt analizi.....                                        | 72 |
| 3.9.   | Motorun Boyutlandırılması.....                              | 74 |
| 3.9.1. | Piston çapı ve kurs boyunun belirlenmesi.....               | 75 |
| 3.9.2. | Isıtıcı ve soğutucu ısı transferi analizi hesapları.....    | 77 |
| 3.9.3. | Motor verimi.....                                           | 85 |
| 4.     | MATERYAL VE METOD.....                                      | 88 |
| 4.1.   | İmal Edilen Motor Parçaları.....                            | 88 |
| 4.1.1. | Motor bloğu ve yan sızdırmazlık kapakları.....              | 88 |
| 4.1.2. | Silindir gömleği.....                                       | 90 |
| 4.1.3. | Güç pistonu ve uzantısı.....                                | 90 |

|        |                                                                                         |     |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1.4. | Biyel.....                                                                              | 91  |
| 4.1.5. | Krank mili.....                                                                         | 92  |
| 4.1.6. | Yer değiştirme ünitesi.....                                                             | 93  |
| 4.1.7. | Soğutucu.....                                                                           | 94  |
| 4.1.8. | Su ceketini.....                                                                        | 94  |
| 4.2.   | Deney Yeri.....                                                                         | 94  |
| 4.3.   | Deneyde Kullanılan Ölçü Cihazlarının Tanıtımı.....                                      | 96  |
| 4.3.1. | Termometre.....                                                                         | 96  |
| 4.3.2. | Barometre.....                                                                          | 96  |
| 4.3.3. | Vibrometre.....                                                                         | 96  |
| 4.3.4. | Terazi.....                                                                             | 96  |
| 4.3.5. | Motor momenti ölçme aparatı.....                                                        | 96  |
| 4.3.6. | Isı kaynağı.....                                                                        | 97  |
| 5.     | DENEY SONUÇLARI.....                                                                    | 98  |
| 5.1.   | Deney Yöntemi.....                                                                      | 98  |
| 5.2.   | Sonuçlar ve Tartışma.....                                                               | 98  |
| 5.2.1. | Isıtıcı sıcaklığının motor hızına etkisi.....                                           | 98  |
| 5.2.2. | Isıtıcı sıcaklığının tork ve güce etkisi.....                                           | 100 |
| 5.2.3. | Şarj basıncının tork ve güce etkisi.....                                                | 103 |
| 5.2.4. | Farklı şarj basınç ve sıcaklıklarında motor devrinin<br>Motor gücüne etkisi.....        | 107 |
| 5.2.5. | Farklı ısıtıcı sıcaklıklarında motor devrinin tork ve<br>güce etkisi.(şarjsız).....     | 110 |
| 5.2.6. | Farklı ısıtıcı sıcaklıklarında motor devrine göre tork<br>ve güç ilişkisi (şarjlı)..... | 114 |
| 5.2.7. | Motor devrine göre titreşim değişimi.....                                               | 129 |
| 6.     | SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....                                                               | 130 |
|        | KAYNAKLAR.....                                                                          | 132 |
|        | EKLER.....                                                                              | 136 |
|        | ÖZGEÇMİŞ.....                                                                           | 154 |



## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

|                                                                                                          | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1. Üretilen ilk Stirling motoru.....                                                             | 5     |
| Şekil 2.2. Rider motoru.....                                                                             | 7     |
| Şekil 2.3. Tek etkili Stirling motor konfigürasyonlarının şematik görünümü...                            | 11    |
| Şekil 2.4. Çift silindirli piston-yer değiştirme piston' lu motorların<br>değişik konfigürasyonları..... | 13    |
| Şekil 2.5. Tek etkili çift pistonlu motorlar.....                                                        | 14    |
| Şekil 2.6. Serbest pistonlu stirling motorunun şematik resmi<br>ve çalışma prensibi.....                 | 15    |
| Şekil 2.7. Çift etkili stirling motorları.....                                                           | 16    |
| Şekil 2.8. Fluidyne motoru.....                                                                          | 18    |
| Şekil 2.9. Harwell thermo-mekanik jeneratör.....                                                         | 19    |
| Şekil 2.10. Rhombic motor ve süücü mekanizma.....                                                        | 20    |
| Şekil 2.11. 200 W' lık basit sallanma sürücülü mekanizmalı batarya<br>şarjlı stirling motoru.....        | 22    |
| Şekil 2.12. Rulon sızdırmazlık elemanı.....                                                              | 24    |
| Şekil 2.13. Sekman tipi sızdırmazlık elemanı.....                                                        | 25    |
| Şekil 2.14. Piston-sekman kesiti.....                                                                    | 25    |
| Şekil 2.15. Stirling motorlarında sekman genişliğine bağlı sızıntı ve<br>sürtünme kayıpları.....         | 26    |
| Şekil 2.16. Küçük toleranslı sızdırmazlık elemanı.....                                                   | 26    |
| Şekil 2.17. Yuvarlak diyaframlı sızdırmazlık elemanı.....                                                | 27    |
| Şekil 2.18. MOD II motorunun motor devrine göre tork ve gücü.....                                        | 30    |
| Şekil 2.19. Çift etkili 4-215 D.A. Philips motorunun performans eğrileri.....                            | 31    |

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.20. Güneş enerjili ilk ericsson motoru.....                                                                     | 32 |
| Şekil 2.21. Sodyumlu ısı borusu.....                                                                                    | 33 |
| Şekil 2.22. Kuvars camlı ısıtıcı kafası.....                                                                            | 34 |
| Şekil 2.23. TNT-2 motorunun maksimum gaz sıcaklıkları ve güç çıkışı.....                                                | 35 |
| Şekil 2.24. TNT-3 motoru.....                                                                                           | 35 |
| Şekil 2.25. TEF 07/95-3 proje motorunun motor devrine göre tork ve güç değişimi.....                                    | 36 |
| Şekil 2.26. Çıkış gücünün güneş radyasyon yoğunluğuna bağlı değişimi.....                                               | 37 |
| Şekil 2.27. Parabolik geniş membranlı yansıtıcılar kullanılan serbest pistonlu stirling motoru.....                     | 38 |
| Şekil 2.28. AS özbek SSR motorunun ortalama çalışma basıncına göre motor verimi.....                                    | 39 |
| Şekil 2.29. Küçük bir stirling soğutucu.....                                                                            | 41 |
| Şekil 3.1. Stirling çevriminin P-V ve T-S diyagramları.....                                                             | 44 |
| Şekil 3.2. Regeneratörlü stirling çevriminin T-S diyagramı.....                                                         | 47 |
| Şekil 3.3. Pseudo- stirling çevrimi.....                                                                                | 50 |
| Şekil 3.4. Carnot çevrimi.....                                                                                          | 52 |
| Şekil 3.5. Carnot ve stirling çevrimlerinin P-V ve T-S diyagramları.....                                                | 53 |
| Şekil 3.6. Stirling motoru.....                                                                                         | 55 |
| Şekil 3.7. Pratik stirling çevrimi.....                                                                                 | 56 |
| Şekil 3.8. Tek silindirli bir Philips stirling motorunun motor gücü ve termal verimin motor devrine bağlı değişimi..... | 57 |
| Şekil 3.9. Motor torkunun motor devrine bağlı değişimi.....                                                             | 58 |
| Şekil 3.10. Dört silindirli bir stirling ve benzin motorunun periyodik tork değişimi.....                               | 59 |
| Şekil 3.11. Motor gücü ve termal verimin ısıtıcı ve soğutucu sıcaklıklarına bağlı değişimi.....                         | 60 |

|                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.12. Özgöl yakıt tüketiminin ortalama çalışma basıncına ve motor devrine bağlı değişimi.....                                     | 60 |
| Şekil 3.13. Motor devrine bağlı sürtünme ve pompalama kayıpları.....                                                                    | 61 |
| Şekil 3.14. 3 kW' lık bir stirling motorunun enerji akışı (sankey) diyagramı.....                                                       | 62 |
| Şekil 3.15. Farklı çalışma maddelerinin motor verimine ve özgöl güce etkisi.....                                                        | 63 |
| Şekil 3.16. Helyum ve hava kullanılan stirling motorunda güç ve verim ilişkisi.....                                                     | 64 |
| Şekil 3.17. Termodinamik incelemesi yapılan stirling motoru.....                                                                        | 66 |
| Şekil 3.18. Bilgisayar Programı ile elde edilen PV diyagramı.....                                                                       | 68 |
| Şekil 3.19. Beş hacimli model üzerinde stirling motorunun termal analizi.....                                                           | 70 |
| Şekil 3.20. İncelenen yer değiştirme silindiri.....                                                                                     | 77 |
| Şekil 3.21. Körükleme (deplasma) zamanı.....                                                                                            | 80 |
| Şekil 3.22. Akış kesiti.....                                                                                                            | 82 |
| Şekil 3.23. Yer değiştirme pistonu ile silindiri arasındaki mesafe değişimine bağlı basınç değişimi,.....                               | 83 |
| Şekil 3.24. Yer değiştirme pistonu uzunluğuna bağlı olarak değişik geçiş kesitlerindeki gaz sıcaklığı ile duvar sıcaklığı değişimi..... | 84 |
| Şekil 3.25. Motor veriminin ısıtıcı sıcaklığına bağlı değişimi.....                                                                     | 87 |
| Şekil 4.1. İmal edilen çift yer değiştirme pistonlu V tipi stirling motorunun şematik resmi.....                                        | 89 |
| Şekil 4.2. Motor bloğu ve yan sızdırmazlık kapakları.....                                                                               | 89 |
| Şekil 4.3. Silindir gömleği ve kapağı.....                                                                                              | 89 |
| Şekil 4.4. Güç pistonu ve uzantısı.....                                                                                                 | 91 |
| Şekil 4.5. Biyel şematik resmi.....                                                                                                     | 92 |

|                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 4.6. İki parçalı krank mili.....                                               | 92  |
| Şekil 4.7. Yer değiştirme ünitesi.....                                               | 94  |
| Şekil 4.8. Su ceket.....                                                             | 95  |
| Şekil 4.9. Deney tesisatının şematik resmi.....                                      | 95  |
| Şekil 4.10. Motor momenti ölçme aparatı.....                                         | 97  |
| Şekil 5.1. Isıtıcı sıcaklığına göre motor devri değişimi (şarjsız).....              | 99  |
| Şekil 5.2. Isıtıcı sıcaklığına göre motor devri değişimi (şarjlı).....               | 99  |
| Şekil 5.3. Isıtıcı sıcaklığına bağlı tork ve güç değişimi (şarjsız).....             | 100 |
| Şekil 5.4. Isıtıcı sıcaklığına bağlı tork-güç değişimi (0.5 bar şarj basıncında).... | 101 |
| Şekil 5.5. Isıtıcı sıcaklığına bağlı tork-güç değişimi (1.0 bar şarj basıncında).... | 102 |
| Şekil 5.6. Isıtıcı sıcaklığına bağlı tork-güç değişimi (1.5 bar şarj basıncında).... | 102 |
| Şekil 5.7. Isıtıcı sıcaklığına bağlı tork-güç değişimi (2.0 bar şarj basıncında).... | 103 |
| Şekil 5.8. Şarj basıncına göre tork ve güç değişimi (750 °C).....                    | 104 |
| Şekil 5.9. Şarj basıncına göre tork ve güç değişimi (800 °C).....                    | 104 |
| Şekil 5.10. Şarj basıncına göre tork ve güç değişimi (850 °C).....                   | 105 |
| Şekil 5.11. Şarj basıncına göre tork ve güç değişimi (900 °C).....                   | 105 |
| Şekil 5.12. Şarj basıncına göre tork ve güç değişimi (950 °C).....                   | 106 |
| Şekil 5.13. Şarj basıncına göre tork ve güç değişimi (1000 °C).....                  | 106 |
| Şekil 5.14. Motor devrine bağlı güç değişimi (750 °C, şarjlı).....                   | 107 |
| Şekil 5.15. Motor devrine bağlı güç değişimi (800 °C, şarjlı).....                   | 108 |
| Şekil 5.16. Motor devrine bağlı güç değişimi (850 °C, şarjlı).....                   | 108 |
| Şekil 5.17. Motor devrine bağlı güç değişimi (900 °C, şarjlı).....                   | 109 |
| Şekil 5.18. Motor devrine bağlı güç değişimi (950 °C, şarjlı).....                   | 109 |

|                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5.19. Motor devrine bağlı güç değişimi (1000 °C, şarjlı).....                           | 110 |
| Şekil 5.20. Motor devrine göre tork ve güç değişimi (750 °C, şarjsız).....                    | 111 |
| Şekil 5.21. Motor devrine göre tork ve güç değişimi (800 °C, şarjsız).....                    | 111 |
| Şekil 5.22. Motor devrine göre tork ve güç değişimi (850 °C, şarjsız).....                    | 112 |
| Şekil 5.23. Motor devrine göre tork ve güç değişimi (900 °C, şarjsız).....                    | 112 |
| Şekil 5.24. Motor devrine göre tork ve güç değişimi (950 °C, şarjsız).....                    | 113 |
| Şekil 5.25. Motor devrine göre tork ve güç değişimi (1000 °C, şarjsız).....                   | 113 |
| Şekil 5.26. Motor devrine göre tork ve güç değişimi<br>(750 °C, 0.5 bar şarj basıncında)..... | 114 |
| Şekil 5.27. Motor devrine göre tork ve güç değişimi<br>(750 °C, 1.0 bar şarj basıncında)..... | 115 |
| Şekil 5.28. Motor devrine göre tork ve güç değişimi<br>(750 °C, 1.5 bar şarj basıncında)..... | 115 |
| Şekil 5.29. Motor devrine göre tork ve güç değişimi<br>(750 °C, 2.0 bar şarj basıncında)..... | 116 |
| Şekil 5.30. Motor devrine göre tork ve güç değişimi<br>(800 °C, 0.5 bar şarj basıncında)..... | 117 |
| Şekil 5.31. Motor devrine göre tork ve güç değişimi<br>(800 °C, 1.0 bar şarj basıncında)..... | 117 |
| Şekil 5.32. Motor devrine göre tork ve güç değişimi<br>(800 °C, 1.5 bar şarj basıncında)..... | 118 |
| Şekil 5.33. Motor devrine göre tork ve güç değişimi<br>(800 °C, 2.0 bar şarj basıncında)..... | 118 |
| Şekil 5.34. Motor devrine göre tork ve güç değişimi<br>(850 °C, 0.5 bar şarj basıncında)..... | 119 |
| Şekil 5.35. Motor devrine göre tork ve güç değişimi<br>(850 °C, 1.0 bar şarj basıncında)..... | 120 |
| Şekil 5.36. Motor devrine göre tork ve güç değişimi<br>(850 °C, 1.5 bar şarj basıncında)..... | 120 |

|                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5.37. Motor devrine göre tork ve güç değişimi<br>(850 °C, 2.0 bar şarj basıncında).....  | 121 |
| Şekil 5.38. Motor devrine göre tork ve güç değişimi<br>(900 °C, 0.5 bar şarj basıncında).....  | 122 |
| Şekil 5.39. Motor devrine göre tork ve güç değişimi<br>(900 °C, 1.0 bar şarj basıncında).....  | 122 |
| Şekil 5.40. Motor devrine göre tork ve güç değişimi<br>(900 °C, 1.5 bar şarj basıncında).....  | 123 |
| Şekil 5.41. Motor devrine göre tork ve güç değişimi<br>(900 °C, 2.0 bar şarj basıncında).....  | 123 |
| Şekil 5.42. Motor devrine göre tork ve güç değişimi<br>(950 °C, 0.5 bar şarj basıncında).....  | 124 |
| Şekil 5.43. Motor devrine göre tork ve güç değişimi<br>(950 °C, 1.0 bar şarj basıncında).....  | 125 |
| Şekil 5.44. Motor devrine göre tork ve güç değişimi<br>(950 °C, 1.5 bar şarj basıncında).....  | 125 |
| Şekil 5.45. Motor devrine göre tork ve güç değişimi<br>(950 °C, 2.0 bar şarj basıncında).....  | 126 |
| Şekil 5.46. Motor devrine göre tork ve güç değişimi<br>(1000 °C, 0.5 bar şarj basıncında)..... | 127 |
| Şekil 5.47. Motor devrine göre tork ve güç değişimi<br>(1000 °C, 1.0 bar şarj basıncında)..... | 127 |
| Şekil 5.48. Motor devrine göre tork ve güç değişimi<br>(1000 °C, 1.5 bar şarj basıncında)..... | 128 |
| Şekil 5.49. Motor devrine göre tork ve güç değişimi<br>(1000 °C, 2.0 bar şarj basıncında)..... | 128 |
| Şekil 5.50. Motor devrine göre titreşim değişimi.....                                          | 129 |

**TABLULARIN LİSTESİ**

| <b>Tablo</b>                                                                                                            | <b><u>Sayfa</u></b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Tablo 1.1. Ülkemizde bazı illerde birim alana gelen günlük ortalama güneş enerjisi miktarının aylara göre dağılımı..... | 2                   |
| Tablo 2.1. Ford motor şirketi tarafından geliştirilen stirling motorunun emisyon değerleri.....                         | 28                  |
| Tablo 2.2. Stirling ve dizel motorlarının karşılaştırılması.....                                                        | 29                  |
| Tablo 3.1. Hesaplanan ve ölçülen motor değerleri.....                                                                   | 69                  |



## SİMGELER

| Simgeler | Açıklama                                     |
|----------|----------------------------------------------|
| A        | Alan, m <sup>2</sup>                         |
| B        | Piston-sekman genişliği                      |
| C        | Özgül ısınma ısısı, J/kg K, Karbon,          |
| Ç        | Çelik,                                       |
| D        | çap, m                                       |
| f        | Frekans, s <sup>-1</sup>                     |
| h        | Entalpi, J/kg                                |
| K        | Süpürme hacmi,                               |
| M        | Metrik,                                      |
| m        | Kütle, kg                                    |
| n        | Motor devri, 1/min                           |
| P        | Güç, W, Potasyum                             |
| Q        | Isı, J                                       |
| q        | Özgül ısı, J/kg                              |
| R        | Gaz sabiti, J/kg K, Regeneratör              |
| S        | Entropi, J/ K, düzeltilmiş ölü hacim, Kükürt |
| T        | Sıcaklık, K                                  |
| T        | Zaman, s                                     |
| V        | Hacim, m <sup>3</sup>                        |
| v        | Kinematik viskozite, m <sup>2</sup> /s       |
| W        | İş, J                                        |
| $\alpha$ | Faz açısı, °                                 |
| $\phi$   | Açı, °                                       |
| $\theta$ | Açı, °                                       |
| $\eta$   | Verim                                        |
| $\rho$   | Yoğunluk, kg/m <sup>3</sup>                  |
| $\tau$   | Sıcaklık oranı,                              |
| $\pi$    | Pi sayısı,                                   |



**ALT İNDİSLER**

|     |                |
|-----|----------------|
| C   | soğuk, Carnot  |
| D   | Ölü            |
| e   | Sıcak silindir |
| H   | Sıcak          |
| in  | Giren          |
| k   | Soğutucu       |
| out | Çıkan          |
| P   | Basınç         |
| R   | Atılan         |
| s   | Sürtülen       |
| t   | Termik         |
| v   | Hacim          |

**KISALTMALAR**

|     |                              |
|-----|------------------------------|
| ASE | Automotive Stirling Engine   |
| AÖN | Alt ölü nokta                |
| CVS | California Vehicle Standards |
| HC  | Hidrokarbon                  |
| ÜÖN | Üst ölü nokta                |
| TMJ | Termo-mekanik jeneratör      |

## 1. GİRİŞ

Günümüzde kömür, petrol, doğalgaz gibi tükenebilir enerji kaynaklarının rezervleri giderek azalmakta, üretim sırasında meydana gelen maliyet girdileri de hızla artmaktadır. Bu kaynakların 35 ile 200 yıl arasında bitecekleri tahmin edilmektedir (Uyarel, Öz, 1987). Dolayısıyla bu durum, ülkeleri yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına yönlendirmekte, maksimum enerji kullanımı ve minimum çevre kirliliği anlayışını ön plana çıkarmaktadır. Fosil enerji kaynaklarımızın, kaynağından nihai tüketim aşamasına kadar en rasyonel bir biçimde değerlendirilmesinin yanı sıra, yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarımızın da mevcut potansiyelinin ortaya konulması ve teknolojik gelişmelere uygun olarak giderek artan oranda milli enerji politikasında yerini alabilmesi, ülkemiz enerji dengesi açısından son derece önemlidir. Son yıllarda kullanmaya başladığımız enerji kaynaklarımızdan bir tanesi de güneş enerjisidir. Ülkemiz güneş enerjisi potansiyeli yüksek olan ülkeler arasında bulunmaktadır. Özellikle yaz aylarında birim alana düşen güneş enerjisi miktarı oldukça fazladır (Meteoroloji Bülteni 1984). Bazı illerimizde birim alana gelen güneş enerjisi miktarı Tablo 1.1' de verilmiştir. Ülkemizin güneş enerjisi bakımından zengin bir potansiyele sahip olması ve bu teknolojinin tüm dünyada belirli bir gelişim düzeyine erişmiş olması nedeniyle, güneş enerjisi kullanımı ülkemizde de araştırma-geliştirme projelerine konu olmakta ve bazı ticari uygulamalara vesile teşkil etmektedir. Güneş enerjisi teknolojisindeki hızlı aşamalar, 1970' li yıllarda yaşanan dünya enerji bunalımı ile görülmeye başlanmış ve günümüzde iletişimden, tarıma, endüstri, elektrik santralleri ve askeri hizmetlerden uzay çalışmalarına kadar çok çeşitli uygulama alanları bulmuştur. Fosil yakıtların yakılması sonucu ortaya çıkan ve çevre sorunlarına yol açmayan güneş enerjisi uygulamaları bu özelliğinden dolayı araştırma çalışmalarında ön sıraları almaktadır.

Çok değişik alanlarda doğrudan kullanılabilen güneş enerjisinin, ericsson veya stirling motorları ile mekanik enerjiye dönüştürülmesi çalışmaları da yapılmaktadır. Bu alanda yapılacak bir uygulama sayesinde, ön maliyet ve bakım giderleri dışında

hiç bir masrafı bulunmayan ve çevre kirliliğine sebep olmayan alternatif bir enerji kullanılmış olacaktır.

Tablo 1.1 Ülkemizde Bazı İllerde Birim Alana Gelen Günlük Ortalama Güneş Enerji Miktarının Aylara Göre Dağılımı ( $W/m^2$ ) (Meteoroloji Bülteni, 1984).

| İl / Ay   | Mayıs  | Haziran | Temmuz | Ağustos | Eylül  |
|-----------|--------|---------|--------|---------|--------|
| Adana     | 496.6  | 436.8   | 448.8  | 451.12  | 471.24 |
| Adıyaman  | 503.81 | 457     | 419.26 | 397.25  | 396    |
| Ankara    | 666.39 | 587.78  | 514.62 | 519.74  | 503.81 |
| Konya     | 534.5  | 513.46  | 551.12 | 449.15  | 439    |
| Siverek   | 676.4  | 615.2   | 550.28 | 563.47  | 569.28 |
| Gaziantep | 520    | 486.83  | 460.78 | 490.55  | 454.61 |

Sıcak hava motoru olarak adlandırılan ve bugün pek kullanılmayan stirling ve ericsson motoru gibi motorlar, 19. yüzyılın son zamanları boyunca bir çok değişik çeşidi çok sayıda üretilmiş ve çeşitli alanlarda kullanılmıştır. Yüksek hızlı modern içten yanmalı motorların geliştirilmesi ve daha yüksek özgül güç elde edilmesiyle, bu motorlar içten yanmalı motorlarla yer değiştirmiştir (Finkelstein, I. 1959).

Robert Stirling' in 1816 yılında tasarladığı ve yaptığı motor, dışarıdan ısı vermeli ilk sıcak hava motoru olarak bilinmektedir. Orijinal patent numarası 4081 ve yılı 1816 olarak kayıtlara geçen bu motorun teorik çevrimi iki sabit sıcaklık ve iki sabit hacim işleminden oluşmaktadır. Daha sonra bu çevrime göre çalışan motorlar “stirling motoru” olarak adlandırılmıştır (Yücesu, H.S., 1996).

Stirling motorları ısı makinası olarak kullanılabildiği gibi, dışarıdan hareket verilerek ısı pompası veya soğutma makinası olarak da kullanılabilir. Sessiz çalışma ve çevreci özelliğinden dolayı uzay teknolojisinde, denizaltılarda vb. yerlerde kullanıma müsaittir.

Stirling motorları çalışma maddesi olarak değişik gazlar kullanılabilmekte, özellikle helyum ve hidrojen gibi ısı iletkenlik katsayıları yüksek gazlar kullanıldığında termik verimleri % 40' a kadar çıkabilmektedir. Kapalı sistemde optimum şarj basınçlarında yüksek motor momenti ve yüksek özgül güç elde edilebilmektedir. Malzeme teknolojisindeki gelişmeler de stirling motorlarının gelişmesine etki etmiştir. Özellikle yüksek sıcaklığa dayanıklı, ısı iletkenlik katsayıları yüksek ve atalet kuvvetleri düşük metallerin kullanımı bu gelişmeyi hızlandırmıştır.

Bugün stirling motorlarının en önemli problemleri, sızdırmazlık ve ölü hacimleri olarak gösterilmektedir. Stirling motorlarında ısıtıcı, soğutucu, birleştirme kanalları ve regeneratör boşluğu gibi ölü hacimlerin büyük olması, motor veriminin ve gücünün düşmesine neden olmaktadır (Gang, 1991). Tasarımda bu ölü hacimlerin minimize edilmesi gerekmektedir. Ölü hacimlerin minimize edilmesi büyük ölçüde malzeme teknolojisindeki iyileşmeye bağlıdır. Stirling motorlarında kullanılacak olan soğutucu ve ısıtıcıların boru et kalınlıklarının mümkün olduğunca az, ısı iletim katsayılarının, paslanmaya ve korozyona karşı dayanımlarının yüksek olması gerekmektedir.

Ülkemiz petrol bakımından dışa bağımlı bir haldedir. Bu bakımdan, fosil yakıtlarla çalışan içten yanmalı motorlara alternatif motorların geliştirilmesi, hem enerji hem de çevre kirlenmesi bakımından olumlu etkiler meydana getirecektir. Tarımsal potansiyeli yüksek olan ülkemizde, tarımsal sulamada ve diğer alanlarda alternatif enerjilere ihtiyaç vardır. Güneş enerjisi ile çalışan stirling motorlarının diğer içten yanmalı motorlara alternatif olarak geliştirilmesi ve bu alanlarda kullanılmasının ülkemizin enerji tasarrufu açısından önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

Daha önce Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi' nde TEF 07/95-3 kodu ile başlatılan güneş enerjisi projesi kapsamında biri V diğeri  $\beta$  tipi olmak üzere iki adet stirling motoru yapılmış ve atmosferik basınçta çalışan bu motorlardan 15 W civarında güç elde edilmiştir. Yapılan bu çalışma, güneş enerjisi projesinin devamı niteliğinde olup, çalışmanın amacı, güneş enerjisiyle çalışan 500 W' lık bir stirling

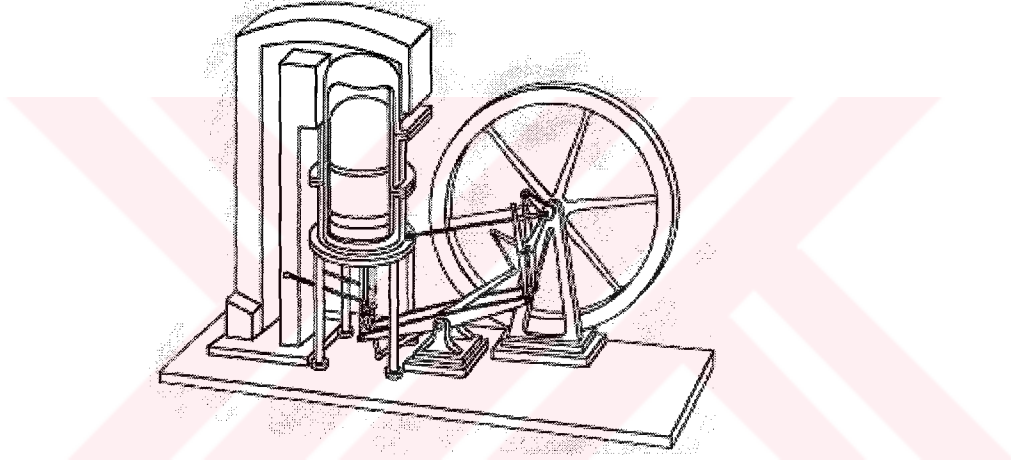
motorunu tasarlayarak imal etmek ve piyasa şartlarında uygulanabilirliğini araştırmaktır. Güneş enerjisini stirling motorunun ısıtıcısına odaklamak için bir güneş kollektörü tasarlanmıştır. İmalatta kolaylık sağlaması açısından, ısıtma yüzeyini artırarak etkinleştirmek ve sızdırmazlık problemlerini en aza indirmek için V tipi stirling motoru seçilmiştir. Motorda g artırımı sağlamak için çift yer değiştirme pistonu kullanılmış ve motor atmosfer ve atmosfer şt basınçlarda denenebilecek şekilde tasarlanmıştır.



## 2. LİTERATÜR ÖZETLERİ

### 2.1. Stirling Motorlarının Tarihi Gelişimi

İlk stirling motoru; İskoç' lu papaz (Reverend) Robert STIRLING tarafından 1816 yılında imal edilmiş ve 4081 orijinal patent numarası ile ilk üretimi gerçekleştirilmiştir (Finkelstein, T). Şekil 2.1' de ilk üretilen motorun şematik resmi görülmektedir.



Şekil 2.1. Üretilen ilk stirling motoru (1818 yılına kadar su pompalarını çalıştırmak için kullanılmıştır) (Phillips, 1994).

Bu motorlarda;

- Hareketli port kapakları ve valfler kullanılmamıştır.
- Kapalı çevrim olduğu için çalışma maddesi defalarca kullanılmaktadır. Bu özellik, atmosfer üstü basınçlarda motorun çalışmasına imkan tanıdığından, çıkış gücü artmıştır.
- Güç pistonu tamamıyla soğuk tarafa yerleştirilmiştir.
- Isıyı çevrimin bir bölümünde depolayıp diğer bölümünde tekrar sisteme veren bir regeneratör geliştirilmiştir.

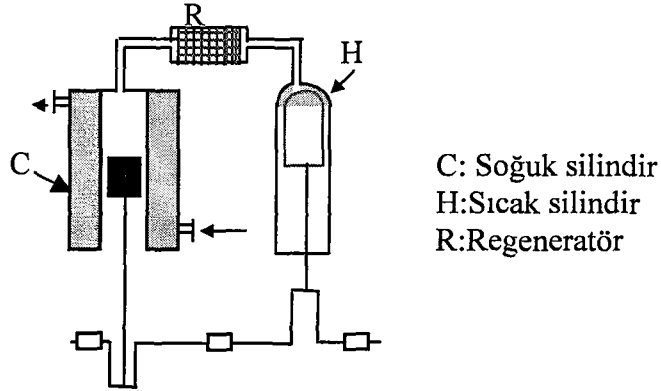
Bunu takip eden 100 yıl içerisinde, stirling icadının en önemli boyutu olan regeneratorün önemi göz ardı edilerek benzer motorlar icat edilmiştir.

1850' ye kadar daha çok iki veya üç silindirli yer değiştirme-piston tipi stirling motorları geliştirilmiştir. Ancak; bu motorlar temelde stirling motor tipleri arasında en başarılı olarak kabul edilen ilk tek silindirli motorlar kadar iyi değildi. Bunun en önemli nedeni tek silindirli modellerle karşılaştırıldığında ölü hacimlerin fazlalığı idi (Urieli, Rallis, 1975).

1853 yılında İsveç' li John Ericsson' un yaptığı motorlar, 19. Yüzyılda, dikkate değer sayıda imal edilmiş ve kullanılmıştır. Bu motorlar, açık sistemdi. 2200 tonluk bir gemi için yapılan dört adet motor, o güne kadar yapılan en büyük motorlardı. Bu motorların güç pistonlarının çapı 4,2 m ve stroku da 1,8 m kadardı. Motorların 478 kW indike güç vermeleri planlanmış, ancak yapılan denemelerde bunun ancak yarısını verebildikleri görülmüştür. Buna rağmen, yakıt tüketimleri o dönemlerde kullanılan denizcilik buhar motorlarına oranla önemli ölçüde daha az olmuştur (Çetinkaya, 1999).

1860 yılında Lehman Almanya' da oldukça ilgi gören regeneratorsüz yatay tek silindirli yer değiştirme-piston tipi motoru tanıtılmıştır.

19. yüzyıl boyunca çok çeşitli bir çok stirling motorları imal edilmiştir. Ancak; stirling motorlarının Philips, Eindhoven serilerinin piyasaya girdiği 1947' ye kadar tek önemli yenilik Philadelphiya' lı Rider' dan gelmiştir. Şekil 2.2' de görülen rider motorunda birbirlerine bir regenerator vasıtasıyla bağlı ayrı sıkıştırma ve genişleme silindirleri bulunmaktadır. Bu motorun en önemli özelliği beş hareketli parçanın olması, kolay çalıştırma, bakım basitliği ve sessizliği olmuştur.



Şekil 2.2. Rider Motoru

20. yüzyılda içten yanmalı motorların hızlı gelişimi, piyasayı heinrici tip küçük modellerle sınırlı tutmuştur. Bu motorlarda görülen temel problem; sürekli yüksek dış sıcaklık ve iç basıncın, dökme demir ve bronz malzemelerin ömürlerini ve motor performansını sınırlamasıdır. 1923 itibarı ile en iyi stirling motorları yaklaşık 800 kg ağırlığında olup, 25 litrelik süpürme hacmi ve 1.5 kW'lık çıkış gücüne erişirken yaklaşık %3' lük termal verime sahipti (Urieli, Rallis, 1975).

Philips, bir çok değişik model üzerinde çalışmış, yüksek ısıya dayanıklı çelik alaşımlar kullanmıştır. 1947 de yayımlanan sonuçlar daha önceki modellerle kıyaslandığında; 1.5 kW'lık bir motor için % 50' lik bir ağırlık azalması ve % 125' lik hacim azalması sağlanmıştır (Urieli, Rallis, 1975).

1950' li yıllarda başlıca üç kavram geliştirildi. Bunlar:

- 1-V tipi Rider sistemi,
- 2-Yer değiştirme-piston tipi,
- 3-Eğik plakalı, çok silindirli, çift etkili rinia tipidir.

Bunların hepsi, yüksek çıkış gücü verebilecek şekilde yüksek ortalama basınçta çalışmıştır. V tipi rider sisteminde; sürtünme ve basınç kayıplarından meydana gelen



güç kaybını azaltmak için basınçlı blok kullanılmıştır. Silindir aralarındaki  $90^\circ$  lik açısı farkı sayesinde yer değiştirme ve güç pistonlarının bağlantı kolları ile kolay şekilde krank miline bağlanması sağlanmıştır. Bu tasarım krank milinin kolay şekilde dengelenmesini mümkün kılmaktadır.

Yer değiştirme-piston düzenlemesinin Rider sisteminden farkı; ısıtıcı, soğutucu ve regeneratörün silindir etrafına yerleştirilmesidir. Bu düzenlemede, blok bir kompresör tarafından sürekli basınçlı hava ile sarj edilmektedir. Bu motorlar balans problemleri yüzünden, yüksek güç ve yüksek hız için uygun değildi. Serileri birkaç kW ve yaklaşık 30 Hz ile sınırlı idi (Urieli, Rallis, 1975).

Çok silindirli, çift etkili Rinia tipinde ise, genellikle dört paralel silindir bir kare şeklinde dizilmiştir ve tamamıyla kompakt ve yüksek güç sistemlerinde kullanılmaktadır. Pistonların her biri çift etkili olduğundan, şarj basıncına ihtiyaç yoktur. Silindirlerin her biri üzerinde sıcak ve soğuk hacimler mevcuttur. Sistemin dezavantajlarından biri, her bir pistonun aralarında büyük basınç farklılıkları oluşan sıcak ve soğuk alanlar arasındaki gaz kaçaklarıdır.

1953' de Philips Eindhoven elemanlarından R. J. Meijer, stirling motorlarında yer değiştirme-piston konfigürasyonlarında kullanılmak üzere Rhombic sürücü mekanizmasını icat etmiş ve büyük bir teknolojik buluş gerçekleştirmiştir. Bu sürücü iki senkronize dişli çark tarafından birleştirilen ve karşıt yönlerde dönen rot mekanizması ile dengeli dönen krank milinden oluşur. Bu sistemin avantajları;

1-Piston üzerindeki net yatay güç bileşeni yoktur. Piston sürtünmesi ve aşınması azdır. Şarj basıncına ihtiyaç yoktur.

2-Her bir dişli çarkın zıt dönmesi sonucu, harmonik hareketler dinamik dengeye ulaşır. Dolayısıyla bu motorlar hem küçük, hem de büyük güç çıkışları için uygun, titreşimsiz ve sessizdirler.

Stirling motorları, kapalı çevrim esasına göre çalıştığından, çalışma maddesi olarak değişik gazlar kullanılabilir. Meijer; hava, helyum ve hidrojen kullanmak suretiyle elde edilen deneysel sonuçları yayınlamıştır (Walker, 1980).

1958' de ruhsat alan General Motors, özellikle Rhombic sürücü mekanizmalı motorlar üzerinde askeri amaçlı denizaltı ve torpil sürücülerinde kullanmak üzere araştırma ve geliştirme çalışmaları yapmıştır (Walker, 1980).

1967' de ruhsat alan Stuttgart MAN-MWM, ağır vasıtalar için yüksek güçlü Rhombic sürücü mekanizmalı sistemleri geliştirme çalışmaları içerisine girmiştir. 1968' de İsveç' teki United Stirling' de ruhsat almış ve dört silindirli çift hareketli V tipi stirling motorları üzerinde çalışmıştır (Urieli, Rallis, 1975).

1972' de ruhsat almış olan Detroit' deki Ford Motor Company, otomotivde kullanım için Rinia eğik plaka sistemini geliştirme üzerinde çalışmalar yapmıştır. Bu tip motorlar, içten yanmalı motorlar ile karşılaştırıldığında termal verimi yüksek olan basınçlı kompakt tasarımlardır (Urieli, Rallis, 1975).

1974 yılında, Zacharias MAN/MWM ortaklığında sualtı güç sistemleri için 370 kW(500 hp) ile 740 kW(1000hp) arası güçlerinde çok çeşitli motor geliştirmeleri için yoğun bir çalışma içerisine girilmiştir. 1975 yılında Amerika' da NASA-Levis araştırma merkezinde otomotiv uygulamaları için iki stirling motor projesi başlatılmıştır (Walker, 1980).

1987' de Kuczera tarafından Avrupa Uzay Ajansı programları çerçevesinde, serbest pistonlu, güneş enerjili bir stirling motorunun, fotovoltaik enerji sistemlerinin yerine konması üzerine çalışmaların yapılmakta olduğu bildirilmiştir (Koca, 1997).

Bütün bu gelişmeler, regeneratif çevrimli makinaların kullanımının gün geçtikçe yaygınlaşacağını göstermektedir (Urieli-Rallis, 1975).

## 2.2. Stirling Motor Tipleri

1816 yılında Robert Stirling' in imal ettiği ilk motordan sonra benzer birçok motor imal edilmiştir. Çalışma prensipleri aynı olan bu motorların tasarım farklılıklarının temel nedeni; ölü hacmin azaltılması, imalat ve bakım masraflarının en aza indirilmesi ve termik verimlerinin artırılması olarak görülmektedir. Sıcak hava veya sıcak gaz motorları olarak adlandırılan stirling motorları, tasarımcılarının isimleri ile de adlandırılırlar (Heinrici, Rider, Robinson...gibi). Stirling motorlarında akış kontrolü iki tiptedir. Bunlar;

- 1- Valf ile akış kontrolü,
- 2-Hacim değişimi ile akış kontrolüdür.

Akış kontrolü valf ile gerçekleştirilen motorlar ericsson motoru olarak adlandırılır. İmalat karmaşıklığı ve maliyet yüksekliği bu motorların kullanımını diğerlerine oranla azaltmıştır. Yine de 19. Yüzyılda bu motorlar uzun süre kullanılmıştır. Akış kontrolü hacim değişimi ile yapılan motorlar; sessiz çalışmaları, az maliyet, imalat kolaylığı ve işin sınırlanabilmesi gibi özelliklerinden dolayı tercih edilmiştir. Genelde stirling motoru olarak adlandırılan bu motorlar, içten yanmalı motorların gelişmesi ve birim ağırlık başına daha yüksek özgül güç elde edilmesi sonucu bu motorlarla rekabet edememiştir. Ancak; alternatif yakıt ile çalışabilmeleri, sessiz oluşları, termik verimlerinin yüksek oluşu gibi bir çok cazip yanları bulunan bu motorların değişik bir çok tasarımla 21. Yüzyıla damgasını vuracağı tahmin edilmektedir. Stirling motorlarının herhangi bir tasarımında; sıkıştırma ve genişleme alanları, uygun ısı transfer alanları, regeneratör bağlantısı, imalat kolaylığı gibi özellikler göz önünde bulundurulmalıdır (Rix, 1996). Küçük stirling motorlarının tasarımları çok geniş bir yelpaze gösterir, ancak genel anlamda aşağıdaki şekilde sınıflandırılırlar:

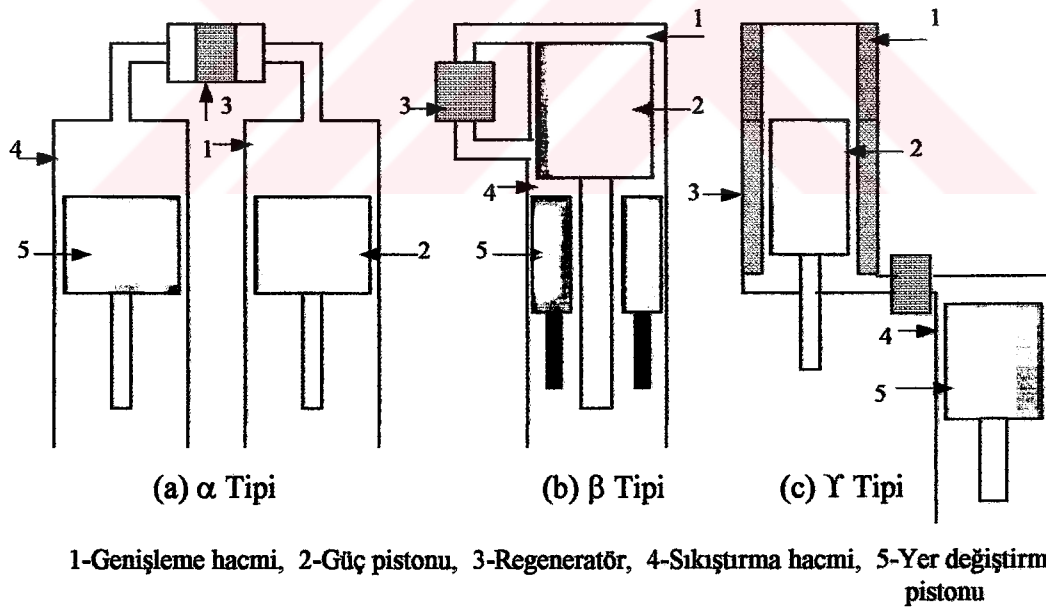
- a) Tek etkili stirling motorları,
- b) Çift etkili stirling motorları

Tek etkili stirling motorları, sıkıştırma ve genişleme hacimleri ile bir regeneratörden meydana gelir. Silindir içerisinde çalışan elemanların her ikisi de piston olabileceği gibi, bir piston ve bir yer değiştirme pistonu (displacer) da olabilir. Krank mekanizmalı veya ayrı bir hareket mekanizması da kullanılabilir (Walker, 1980).

### 2.2.1. Tek etkili tasarımlar

Tek etkili ve piston-süpürme pistonlu stirling motorlarını üç grupta toplamak mümkündür. Bunlar;  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\gamma$  tipleridir, Şekil 2.3.

Piston-Yer değiştirme piston' lu tip stirling motorlar döndürme mekanizması, imalat kolaylığı ve tek veya çok silindirli uygulamalarda kullanım kolaylığı açısından krank-biyel mekanizmalı olarak imal edilmektedir, Şekil 2.3 ( Spigt and Daniels, 1974).



Şekil 2.3. Tek Etkili Stirling Motor Konfigürasyonlarının Şematik Görünümü.

$\alpha$  tipi motorda, Şekil 2.3 ( a )' da görüldüğü gibi birbirinden ayrı iki silindir; ısıtıcı, soğutucu ve regeneratör (3) vasıtasıyla birleştirilmiştir. Soğuk silindir “sıkıştırma hacmi” (4), sıcak silindir “genişleme hacmi” (1) olarak adlandırılır. Kapalı hacim

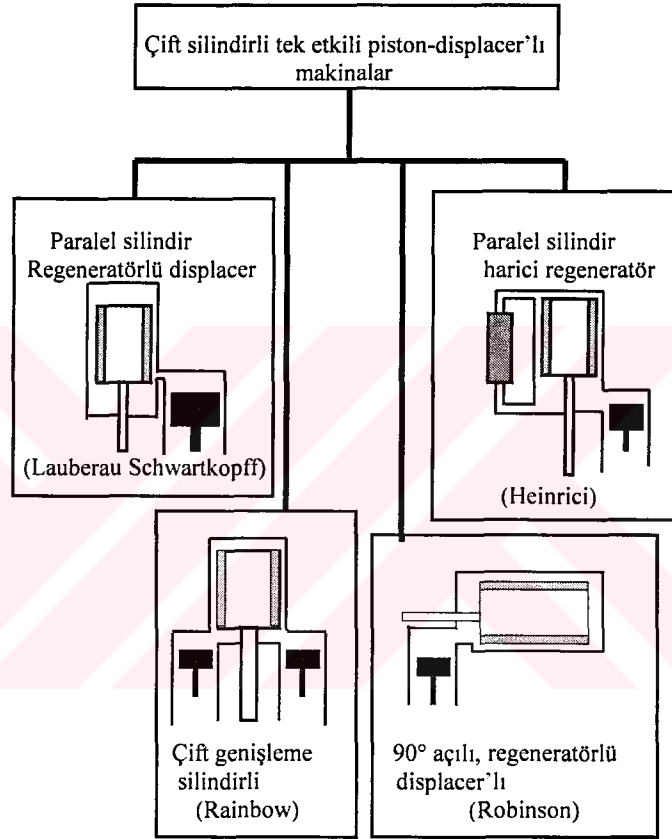
içerisinde sıkıştırma ve genişleme işlemlerinin gerçekleşebilmesi için silindirler arasında belirli bir faz açısı olması gerekir. Bu ise genellikle  $90^\circ$  olduğundan, bu tip motorlara V tipi motorlar da denmektedir. Kompresyon pistonu (5) genişleme pistonunu (2) çalışma maddesi vasıtası ile iter. Bu mekanik düzenlemenin güç/ağırlık oranının artırılması, çift etkili piston kullanmakla mümkündür. Dört bağımsız çalışma hacmini oluşturmak için silindirler birbirlerine  $90^\circ$  açı ile birleştirilerek, çalışma maddesinin silindirler arasında gidip gelmesi sağlanır.

$\beta$  tipi motorlar Şekil 2.3 (b)' de görüldüğü gibi, tek silindirli, çift pistonlu kapalı tip motorlardır. Yer değiştirme pistonu olarak adlandırılan merkezi piston (5) çalışma maddesini sıcak bölgeden (1) soğuk bölgeye (4) doğru regeneratör (3) üzerinden gönderir. Güç pistonu (2) gazlar soğuk iken sıkıştırma görevi yapar. Sıcak gazların etkisi ile güç pistonu silindir içerisinde itilerek krank milinden güç elde edilir. Düşük basınçlı motorlarda regeneratör yer değiştirme pistonunun etrafına yerleştirilebilir fakat gaz kütlesi artırılmış yüksek basınçlı motorlarda, ısı transfer yüzey alanının artırılması gerekir ve ayrı bir ısıtıcı, soğutucu ve regeneratöre ihtiyaç duyulur. Bu düzenlemeler; hem krank-biyel mekanizmalılarda, hem de serbest pistonlu elektrik güç çıkışlı motorlarda kullanılmaktadır (Rix, 1996).  $\beta$  tipi motorların regeneratörlü displacer kullanılanları “stirling tip”, dıştan ayrı regeneratör kullanılanları ise “Rankine-Naipier tip” olarak adlandırılır (Walker, 1980).

$\gamma$  tipi motorlarda ise Şekil 2.3 (c)' de görüldüğü gibi, iki silindir mevcuttur. Birinci silindir çalışma gazının genişleme ve sıkıştırılmasını sağlar. İkinci silindir yer değiştirme pistonu (5) aracılığıyla çalışma maddesinin soğutulmasını ve ısıtılmasını sağlar. İki silindir birbirlerine bir boru vasıtasıyla birleştirilmiştir. Böylece ısıtma ve soğutma sureti ile basınç değişimi güç pistonuna (2) aktarılır. Regeneratör (3) silindir içerisine veya dışarısına yerleştirilebilir (Martini, 1978).

$\gamma$  tipi motorların değişik konfigürasyonları mevcut olup, bazıları Şekil 2.4 ' de verilmiştir. Bu motorlar regeneratörlü yer değiştirme pistonu' na sahipse “Laubereau-Schwartzkopff motoru”, harici regeneratöre sahipse “Heinrici motor”, silindirler

arasında 90 derece faz farkı bulunanlar ise “Robinson motoru” olarak bilinirler. 1971 yılında; H. Rainbow tarafından yapılan düzenlemede ise, iki iş pistonu ve bir yer değiştirme pistonu vardır. Bu tiplerde sürücü mekanizmalarında, soğutma ve sızdırmazlık problemlerinin giderilmesi kolaydır (Walker, 1980).



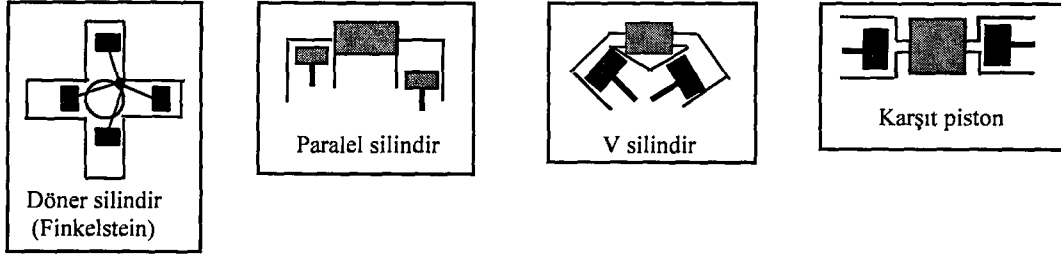
Şekil 2.4. Çift Silindirli, Piston – Yer Değiştirme Piston' lu Motorların Değişik Konfigürasyonları

#### 2.2.1.1. Tek etkili diğer tasarımlar

Tek etkili stirling motorlarının çok çeşitli düzenlemeleri olmasına karşın geniş anlamda dört grupta toplamak mümkündür:

- a) Piston - silindirli tip,
- b) Döner pistonlu (Wankel),
- c) Körüklü- diyaframlı tip,
- d) Serbest pistonlu tip.

Şekil 2.5' de tek etkili çift pistonlu motorların değişik düzenlemeleri görülmektedir.

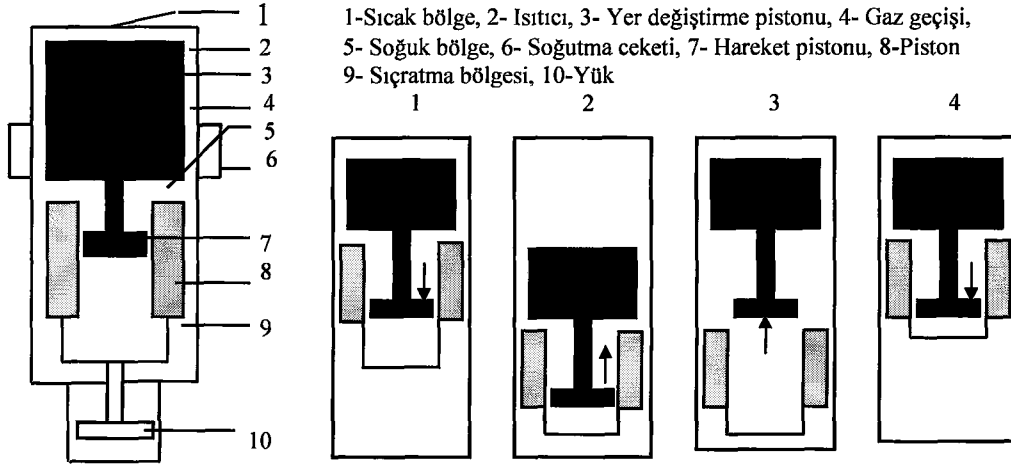


Şekil 2.5. Tek Etkili Çift Pistonlu Motorlar

Bu motorlardan sadece Rider olarak adlandırılan paralel silindirli olanları uygulama alanı bulmuştur. Pistonların bağlantıları krank biyel mekanizma ile yapılmıştır. Döner pistonlu, diyaframlı ve körüklü tip olanlar tasarlanmış, ancak sızdırmazlık ve dengeleme problemleri yüzünden ticari amaçla üretimleri yapılamamıştır.

Serbest pistonlu stirling motoru ilk olarak Ohio Üniversitesinden William Beale tarafından geliştirilmiştir. Bu motor her iki ucu kapalı bir silindir, ağır bir piston ve hafif bir yer değiştirme pistonu olmak üzere, temelde üç elemandan meydana gelmektedir. Serbest pistonlu motorlarda yer değiştirme pistonu krank mekanizmasına bağlı değildir. Silindir cidarları hem ısıtıcı, hem soğutucu ve hem de regeneratör olarak çalışmaktadır. Blok tamamen ısı iletim katsayısı yüksek gazlarla doldurulmuştur. Piston ağırlıklarının farklı olması sebebiyle, pistonların hareketleri de farklı olmakta, sıkıştırma ve genleşme süreçleri meydana gelmektedir. Yapı itibarıyla çok az parça ihtiva ettiğinden imalatı kolaydır. Hacimce ve kütlece diğerlerinden küçüktür. Güneş enerjisi ve pompalamada tercih edilmektedir (Urieli and Rallis,1975).

Şekil 2.6' da bu motorların çalışma prensibi şematik olarak gösterilmiştir (Beale, Holmes and Levis vd., 1973). Şekil 2.6' nın yardımıyla çalışma prensibi şöyle açıklanabilir:



Şekil 2.6. Serbest Pistonlu Stirling Motorunun Şematik Resmi ve Çalışma Prensibi

1-2 işleminde, çalışma maddesi genişlerken iş pistonunu aşağıya iter. Bu durumda yer değiştirme pistonu güç pistonunun üzerindedir.

2-3 işleminde, sıçratma bölgesindeki basınç, iş bölgesindeki basınçtan daha büyüktür. Basınç farkından dolayı yer değiştirme pistonu sıcak bölgeye doğru hareket eder. Bu durumda çalışma maddesi soğuk bölgeye dolar ve basınç düşer.

3-4 işleminde, sıçratma bölgesindeki basıncın etkisiyle güç pistonu soğuk bölgeye doğru itilir.

4-1 işleminde, sıcak ve soğuk bölge arasındaki basınç farkından dolayı (sıcak bölge basıncı, soğuk bölgeden daha büyüktür) yer değiştirme pistonu soğuk bölgeye doğru hareket eder.

Serbest pistonlu stirling motorlarından birkaç yolla iş elde edilebilir (Beale, Holmes and Levis vd., 1973). Bunlar;

- 1 Hareketli piston, kalıcı mıknatıslı endüvi ve etrafına bobin sarılmış silindirden oluşan lineer bir alternatörde elektrik üretilir,

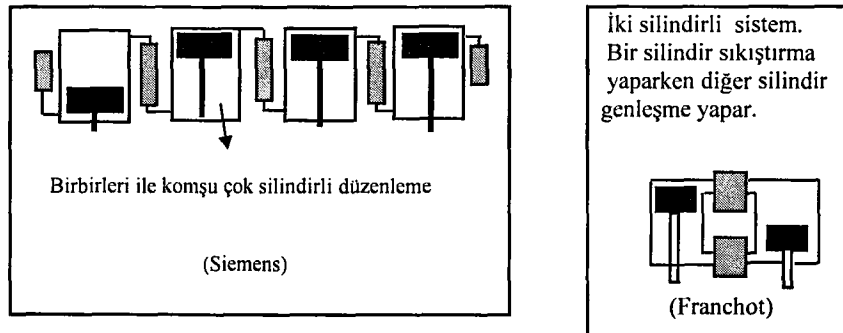


- 2 Tamamen sızdırmaz olan bir silindirin avantajından faydalanılarak sıvı pompası olarak kullanılabilir. Bu silindiri oldukça hafifletmek suretiyle sıvı pompasının pistonu olarak kullanmak suretiyle yapılır.
- 3 Termal olarak çalışan bir soğutucu olarak kullanılabilir.

Düşük güçlü ve düşük verimli motorların tercih edildiği durumlarda serbest pistonlu stirling motorları tavsiye edilebilir.

### 2.2.2. Çift etkili tasarımlar

Çift etkili stirling motorlarının çok çeşitli düzenlemeleri vardır. Bu tasarımlardan birinde motor, bir silindirin genişleme hacmi ile diğer silindirin sıkıştırma hacmi arasına regeneratör (ısı değiştirgeci) yerleştirmek suretiyle oluşturulur. Burada stirling motoru sayısı silindir sayısına eşittir. Çift etkili stirling motorlarının en büyük avantajı tek etkili stirling motorlarına göre daha az parça sayısına sahip olmalarıdır (Walker, 1980). Şekil 2.7.' de çift etkili stirling motorlarının şematik resmi görülmektedir.



Şekil 2.7 Çift Etkili Stirling Motorları

Çift etkili stirling motorlarının temeli 1853 yılında Fransız mühendis Charles Louis Franchot tarafından ortaya atılmış ve 1885 yılında Babcock böyle bir motor imal etmiştir. Yüz yıl sonra, Finkelstein ve Polanski, çift etkili Stirling motorunu tekrar tasarladılar. İngiliz bilim adamı Sir William Siemens tarafından genel anlamda çift

etkili çok silindirli bir model tasarlamıştır. Bu motor dört silindirli ve her silindirde tek piston ve ona bağlanmış eğik plaka mekanizması mevcut idi. Motor 80 yıl sonra Philips programı çerçevesinde Van Weenan tarafından yapılmıştır. Avrupa da ve Amerika da Siemens motorunun farklı dizaynları yapılmıştır. Philips-Ford otomobil motorunda dört silindirli eğik plaka sürücü mekanizmalı Siemens motoru kullanılmıştır. Almanya' da üretilen MAN/MWM motorları, çift etkili V tipi Siemens motorunun değişik bir konfigürasyonudur.

### 2.2.3. Geliştirilen diğer tipler

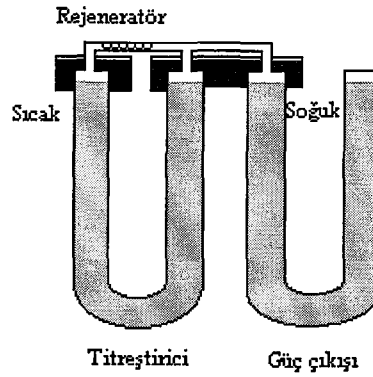
Buraya kadar olan bölümlerde, uygulamada en çok kullanılan stirling motorları sıralanmıştır. Bu motorlardan çoğunun ticari amaçla üretimleri yapılmıştır. Bunun dışında; laboratuvar araştırmalarında kullanılan ve ticari üretime henüz dönüştürülemeyen bir çok araştırma motoru mevcuttur. Bu motorlardan bazıları; Sıvılı tip (Fluidyne) motorlar, Harwell termo-mekanik jeneratör (titreşim diyaframı), sallanma mekanizmalı motorlar olarak sıralanabilir.

#### 2.2.3.1. Sıvılı tip (Fluidyne) Stirling motorları

Harwell tarafından geliştirilen stirling motorunun değişik bir konfigürasyonu da Fluidyne motorudur. Fluidyne motorunun temel prensibi; hem displacer hem de iş pistonu gibi görev yapan, U tipi bir tüpün içerisinde sıvının hareketinden faydalanılarak çevrimin tamamlanmasından ibarettir. Tüpler uygun şekilde birbirlerine bağlanmış ve hareketi kolaylaştırmak için kısmen suyla doldurulmuştur. Sistemde hareket eden ve dönen hiçbir katı parça mevcut değildir (Reader, 1987) Şekil 2.8.

Sol taraftaki tüpte bulunan sıcak bölgeye ısı uygulamak suretiyle; sıkıştırılmış gaz yayılmakta ve tüp içerisinde bulunun sıvı hareket ederek (titreşerek) gazı regeneratörden, sıcak ve soğuk alanlardan geçirmektedir. Gazın genleşmesi ve yoğunlaşması sağ tarafta bulunan diğer çıkış tüpündeki sıvının hareket etmesini

sağlamakta ve çevrim tamamlanmaktadır. Fluidyne motorunda hareket çıkışı sıvı ile gerçekleştiğinden, motoru ısı pompasına dönüştürmek oldukça kolaydır.



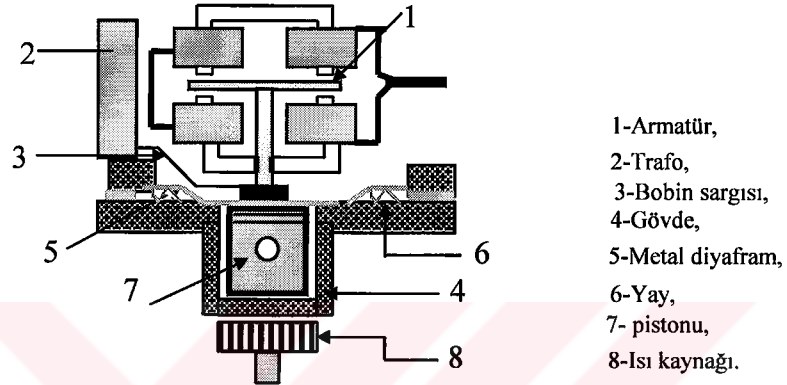
Şekil 2.8. Fluidyne Motoru (Reader, 1987)

#### 2.2.3.2. Harwell termo-mekanik (titreşim diyaframlı) jeneratör

Şekil 2.9' da görüldüğü gibi, bu motorlarda yer değiştirme pistonu mevcut, ancak güç pistonu mevcut değildir. Bunun yerini, çalışma maddesinin basıncı altında salınan ve paslanmaz çelikten imal edilen bir diyafram almıştır. Bu diyaframın hareketi çok küçük olup (yalnızca 35  $\mu\text{m}$ ) yorulma dayanımının oldukça altında olan basınçlara neden olmaktadır. Diyafram, titreşim esnasında salınan kalıcı mıknatıslı armatürden oluşan bir çıkış bobinini kontrol etmektedir. Makine üzerine yerleştirilen yer değiştirme pistonu, doğal sıklıkta titreşim serbestisine sahiptir (Walker, 1980).

Sıcak uca uygulanan ısı etkisiyle, çalışma maddesi genleşmekte, diyaframın ve alternatörün sapmasına neden olmaktadır. Makine bu durumda ters yönde hızlanmakta ve ters fazda küçük genlik vibrasyonu sağlamaktadır. Yer değiştirme pistonu, elastiki bir şekilde makinaya eklenmiş olup, doğal rezonans sıklığında doğru fazda titreşime geçer. Yer değiştirme pistonu, aşağı doğru hareket ettikçe, çalışma maddesi yukarıdaki soğuk bölgeye hareket eder ve basınç azalarak diyafram ve armatürün geri dönmesini sağlar. Yer değiştirme pistonu' nun yukarı hareketi, çalışma sıvısını sıcak alana hareket ettirir ve çevrim böylece tekrar eder.

Denemelerde 110 Hz' de çalışan bir jeneratörde %13,5' lik bir verimle 27 W' a ulaşılmıştır. Daha küçük TMJ' lerle yapılan deneyler sonucunda nükleer enerji ile çalışan 200 W' lık bir model uygulamaya sokulmuştur ( Reader, 1987). Bu değerler, kıyaslanabilir termoelektrik makinaların iki veya üç katı kadar olup, ilave geliştirmelerle daha da yükseltilebilmesi muhtemeldir.

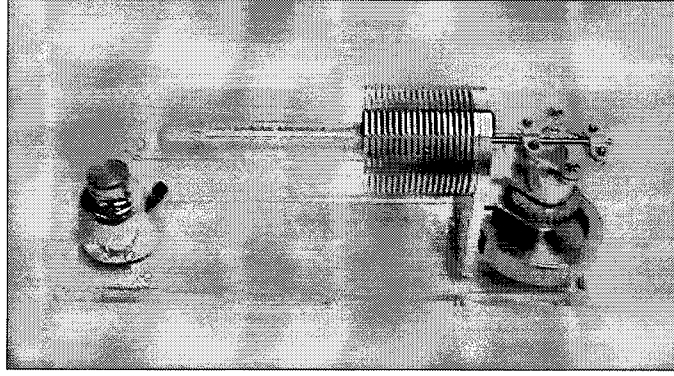


Şekil 2.9. Harwell Thermo-Mekanik Jeneratör (Cooke, 1982)

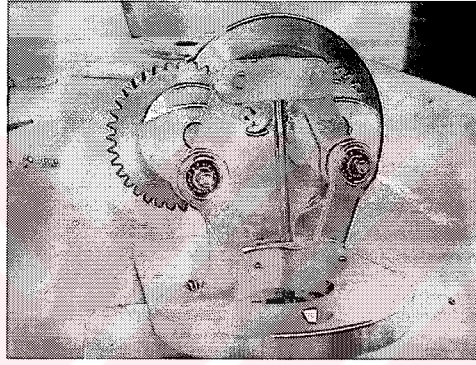
### 2.3. Hareket İletim Mekanizmaları

#### 2.3.1. Rhombic mekanizması

Motor boyutlarını küçültmek, mekanik bağlantıları azaltmak dolayısıyla sürtünme ve mekanik kayıplardan doğan verim kaybını ortadan kaldırmak amacıyla Rhombic sürücü mekanizmalı motorlar kullanılır. Tek silindirli ve çift silindirli karşıt pistonlu uygulamaları mevcuttur. Çoğunlukla tek silindirli uygulamalarda tercih edilir. Şekil 2.10.a' da 1200 1/min' de 0,3 kW güç veren bir rhombic sürücü mekanizmalı motor görülmektedir. Motorun ısıtıcı kafası kuvars camdır. Şekil 2.10.b' de ise rhombic sürücü mekanizmalı motorun mekanizma resmi görülmektedir. Bu motorlarda yer değiştirme pistonunun bağlantı ucu, iş pistonunun ortasından geçmektedir. Balanslama ve sızdırmazlığın çok iyi olması gerekmektedir.



( a )



( b )

Şekil 2.10. Rhombic Motor ve Sürücü Mekanizma (Rhombic,1998)

### 2.3.2. Eğik plaka döndürme mekanizmalı stirling motorları

Genellikle kompresörlerde ve hidrolik pompalarda kullanılan eğik plaka mekanizması (swash-plate), stirling motorlarına da başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Eğik plakalı motorlar aslında çok silindirli düzenlemeler olmakla birlikte, yüksek güç seviyelerinde, motor boyutları ve ağırlığı Rhombic sürücü mekanizmalı motorlardan daha küçük ve daha hafiftir (Michels, 1976). Philips, Ford ve stirling termal motorlarındaki eğik plaka geliştirme çalışmaları, oldukça başarılı bir çalışma olan STM-120 motorunun geliştirilmesi ile sonuçlanmıştır. Motor basit olarak hidrolik bir motora eğik açılı bir plakanın yerleştirilmesi ile meydana gelmiştir. Tasarımda, biyeller eğik plakadan gelen çapraz kuvvetleri karşılamak amacıyla, uzun klavuzlara sahiptir. Motor boyutlarını küçültme imkanı, kolay motor dengelemesi, bir çok

uygulama için tork karakteristiğinin uygun olması ve seri üretime uygunluğu gibi avantajlarının yanı sıra, mevcut uygulama problemleri şunlardır:

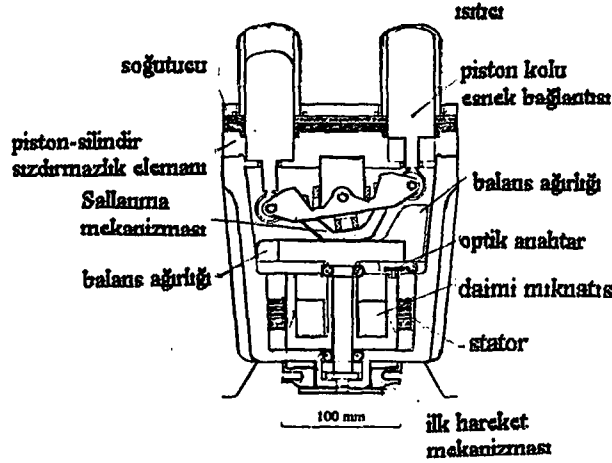
- 1) Elektromanyetik dolgular ve piston klavuzları, iyi geliştirilmiş hidrodinamik yağlama maddeleri gerektirmektedir.
- 2) Tam anlamıyla geliştirilemeyen hidrodinamik yağlama nedeniyle, düşük hızlarda sürtünme problemleri ortaya çıkmaktadır.
- 3) Yatakların yağlanması gerekliliği, çalışma maddesi olarak havanın kullanılmasını uygun kılmamaktadır. Aksi takdirde, yağlama yağının klavuz yataklarından çalışma maddesine karışması sonucu, yanma ve is meydana gelecek ve ısı transferini etkileyecektir.
- 4) Eğik plakaya karşı olan reaksiyon kuvveti nedeniyle, piston kollarının yan yükleri artacaktır.
- 5) Tasarım hassas işlemeyi gerektirmektedir (Claus, 1994).

### **2.3.3. Sallanan sürücü mekanizma**

Bu mekanizmanın temeli, küresel külbütör manivelasına benzeyen bir mekanizmanın salınım yapması sonucu, her iki uçtaki piston bağlantı rotlarını hareket ettirmesi sebebiyle çevrim süreçlerinin oluşumunun gerçekleştirilmesidir. Şekil 2.11.' de görülen deneme motoru, 200 W' lık bir jeneratör ünitesi olarak çalıştırılan, dört silindirli, çift etkili bir stirling motor tasarımında kullanılan yeni bir mekanizmadır. Bu tasarımın ana özelliği, diğer stirling motorlarının avantajlarını sunabilecek düşük maliyetli sallanma sürücü mekanizmasıdır. Buharlı veya içten yanmalı motor ve kompresörler gibi diğer uygulamalara da uyarlanabileceği ifade edilmektedir (Claus, 1994).

Stirling motorlarını geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Bu çalışmaların temel amacı, daha uzak gelecekte stirling motorlarının, içten yanmalı motorlara rekabetçi olarak kendini gösterebilmesi için kullanılabilirliğini yaygınlaştırmaktır. Teorik bağlamda daha tatminkar optimizasyonlara ulaşılması isteniliyorsa, daha gerçekçi modeller ve analizler üzerinde çalışmalar hızlandırılmalıdır (Urieli, Rallis, 1975)





Şekil 2.11. 200 W' lık Basit Sallanma Sürücü Mekanizmalı Batarya Şarjlı Stirling Motoru (Claus, 1994).

#### 2.4. Stirling Motorlarında Sızdırmazlık Problemi

Sızdırmazlık ve ölü hacim stirling motorlarında görülen en önemli dezavantajlardan birisidir. Stirling motorlarında güç artışı, çalışma maddesinin basıncını artırmakla, yani motora daha fazla çalışma maddesini şarj etmekle gerçekleştirilir. Ancak, basınçlı çalışma maddesinin, çalışma boşluklarından krank muhafazasına veya atmosfere kaçması önlenmelidir.

Şarj basınçlı stirling motorlarında, sistem kaçaklarını elimine etmek için çalışma maddesini takviye eden yardımcı sistemler kullanılmıştır. Sistemdeki kaçaklar önlenemediği takdirde motor birkaç çevrim sonunda durur (White, Eming, Riggle 1987).

Motorun krank muhafazasına (bloğa), basınçlı çalışma maddesi doldurulacaksa, statik sızdırmazlık elemanlarının yanı sıra, dinamik sızdırmazlık elemanlarının da kullanılması gerekmektedir. Motor eğer elektrik jeneratörü olarak kullanılacaksa, jeneratör krank muhafazası içerisine yerleştirilebilir. Bu durumda sadece statik sızdırmazlık elemanları kullanılmalıdır. Büyük motorlar, yapı itibarıyla basınca

dayanıklı kalın malzemelerden yapıldıkları ve ağır oldukları için pek tercih edilmezler. Bunun için, sızdırmazlık elemanları tarafından basınç farkını ( $P_{\max}-P_{\text{atm}}$ ) ile ( $P_{\min}-P_{\text{atm}}$ ) arasında tutulması gerekmektedir. Burada  $P_{\text{atm}}$  atmosfer basıncını ifade eder (Walker, 1980).

Philips firması, başlangıçta küçük toleranslı sızdırmazlık elemanları, daha sonra ise döner diyaframlı tip sızdırmazlık elemanları üzerinde birçok çalışma yapmıştır. Diğer firmalar alternatif yuvarlak sızdırmazlık elemanları geliştirmişlerdir. United Stirling firması bu konu üzerinde çok gayret sarfetmiş ve çok bölümlü kaymalı sızdırmazlık elemanlarını geliştirmiştir. Bu konuda benzer bir çalışma, Ford Motor Co. tarafından Siemens çift etkili ve eğik plaka sürücü mekanizmalı otomotiv motorlarında kullanılmak üzere yapılan sızdırmazlık elemanıdır. Bu program NASA Lewis Araştırma Merkezi tarafından finanse edilmiştir.

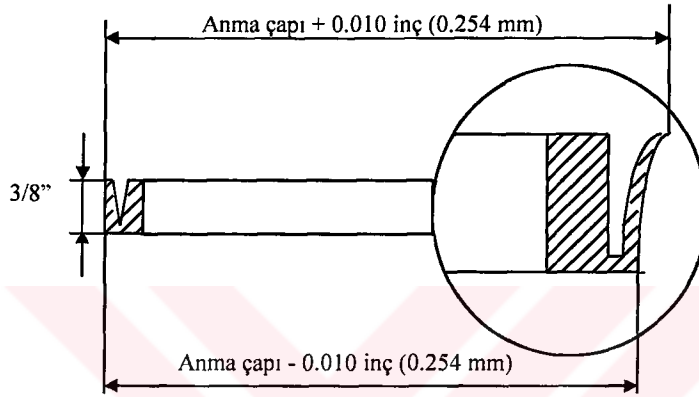
Kaymalı sızdırmazlık elemanlarında kuru tip yağlama gerektirmeyen fluorocarbon malzemeler tercih edilir. Özellikle polytetrafluoroethylene, genel olarak PTFE olarak bilinen yada ticari adıyla Teflon olan malzeme tercih edilmektedir. PTFE çok düşük sürtünme katsayısı özelliğine sahiptir. PTFE malzemenin “Rulon A” diye bilinen özel bir bileşimi, daha dayanıklıdır ve teflona göre daha iyi özelliklere sahiptir. Bu sebeple, Stirling motorlarında sızdırmazlık elemanı olarak daha fazla tercih edilir (Walker, 1980).

William Beale tarafından geliştirilen piston sızdırmazlık elemanlarından biri (Rulon sızdırmazlık elemanı) Şekil 2.12.’de görülmektedir.

Sızdırmazlık elemanı, sızdırmazlık levhaları üst üste konularak ya da blok malzemeden imal edilmiştir. Sızdırmazlık elemanın üst ucu anma çapından 0.0254 cm (0.010 inç) daha büyük yapılmıştır. Anma çapı 5.08 cm (2 inç) ’ dir. Alt ucu ise anma çapından 0.0254 cm (0.010 inç) küçük yapılmıştır. Esnek kenar uzunluğu 0.95 cm (3/8 inç) dir. Sızdırmazlık elemanı epoxy-cement denilen bir yapıştırıcı ile piston üzerine yapıştırılmış ve silindir içerisinde bir gün bekletilmiştir. Çalışma öncesinde



pistonun silindir içerisinde aşağı yukarı bir kaç kez hareketi ile sızdırmazlık elemanının serbest hale geçeceği bildirilmiştir. Bu sızdırmazlık elemanlarının çalışacağı silindirler oldukça sert malzemelerden yapılmış, yüzeyleri honlanarak polisaj yapılmıştır.

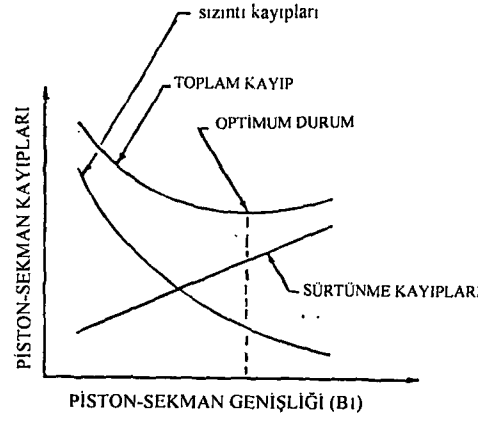


Şekil 2.12. Rulon Sızdırmazlık Elemanı (Walker, 1980).

Piston sızdırmazlık elemanlarının diğer bir örneği Şekil 2.13’ de görülmektedir. Bu sızdırmazlık elemanları, içten yanmalı motorlarda kullanılan sızdırmazlık elemanlarına benzemektedir. 0.24 cm (3/32 inç) 0.35 cm (1/8 inç) ye ince yapılı, dikdörtgen kesitli rulon sızdırmazlık elemanlarının altında bulunan metal yaylar vasıtasıyla dışa açılmaları ve silindir cidarına tam temas etmeleri sağlanmıştır.

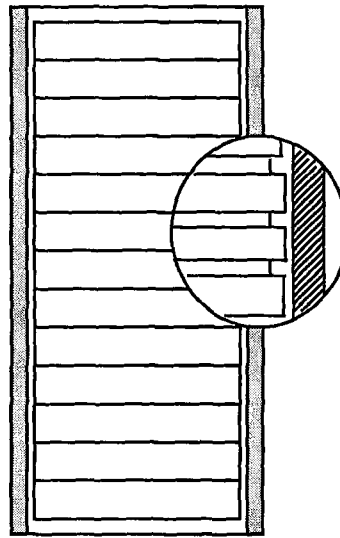


bağımlı değişimi görülmektedir.  $B_1$  için optimum değer grafikten açıkça görülmektedir (Pedroso, 1976).



Şekil 2.15. Stirling Motorlarında Sekman Genişliğine Bağlı Sızıntı ve Sürtünme kayıpları (Pedroso, 1976)

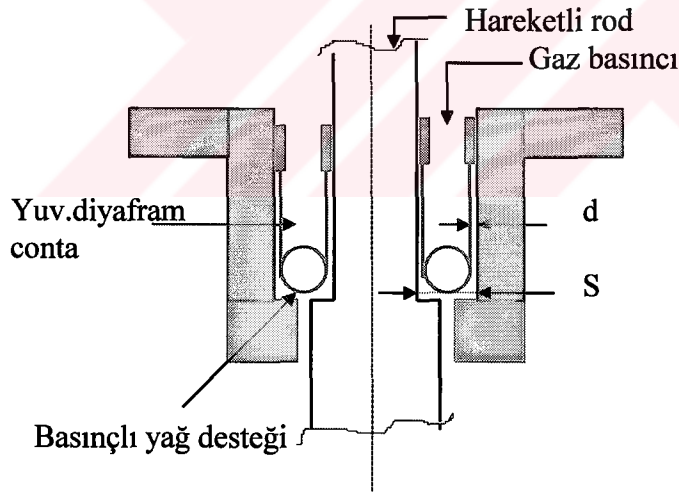
Şekil 2.16.' da görülen çok küçük toleranslı sızdırmazlık elemanları özellikle serbest pistonlu stirling motorlarında iyi sonuç vermektedir. Bu sızdırmazlık elemanında en iyi sonuçlar, piston boyu silindir boyunun yaklaşık iki katı olduğu zaman alındığı belirtilmektedir.



Şekil 2.16. Küçük Toleranslı Sızdırmazlık Elemanı (Walker, 1980)

Şekilde görülen oluk derinliğinin 0.16 cm ve yüksekliğinin ise 0.24 cm olduğu belirtilmiştir. Oluklar arasındaki blok kısımların boylarının düzenli ve yaklaşık 1 cm civarında olması gerekmektedir. Sızıntı miktarı tolerans miktarı kadardır. Böyle bir elemanda sıkışma olmaması için silindir yüzeyleri çok iyi işlenmelidir. Yüzey alıştırma işleminde yüzeyleri molibden disülfid ile ovalamanın iyi sonuç verdiği belirtilmiştir.

Şekil 2.17' de ise önemli boyutları ile birlikte yuvarlak diyaframlı sızdırmazlık elemanı görülmektedir.  $d/S$  oranı contanın ömrünü belirlemede önemli bir parametredir. Yüksek basınçlı bazı stirling motorlarında piston kolu ile krank muhafazası arasındaki çalışma maddesinin kaçaklarını önlemek için, sızdırmazlık elemanının bir ucu hareketli kol üzerine, diğer ucu ise kola yataklık eden yuvaya yerleştirilmiştir (Walker, 1980).



Şekil 2.17. Yuvarlak Diyaframlı Sızdırmazlık Elemanı (Walker, 1980)

Yüksek elastikiyete sahip bu conta karter yağlama sisteminden gelen yağ ile desteklenir. Bu durumda, 100 atmosfere kadar olan basınçlara kadar çalışabilir. Yağ destek basıncının gerçek değerini elde etmek için bir kontrol sistemi gerekmektedir. Karmaşık düzenli bu kontrol sistemi, yuvarlak conta sızdırmazlık elemanının güvenilirliğini belirlemede bir faktördür (Pedreso, 1976).

## 2.5. Stirling Motorunun Kullanıldığı Yerler

İçten yanmalı motorların icadına kadar stirling motorlarının değişik bir çok konfigürasyonları üretilmiş ve güç gerektiren işlemlerde kullanılmıştır. 1930' lu yıllarda Philips' in tekrar bu motorları ele alması ve geliştirme çalışmaları sonuç vermiş ve bugün birçok araştırmacı bu konu üzerinde çalışmalarını yoğunlaştırmıştır. Bu motorlara ilginin yeniden artması, hem enerji ve kirliliğinin artmasının getirdiği ihtiyaçlardan, hem de mevcut teknolojilerden kaynaklanmaktadır (Urieli, Rallis, 1975). Yeni teknolojik imkanlarla imal edilen stirling motorlarının kullanım alanları aşağıda sıralanmıştır.

### 2.5.1. Otomotiv alanında

Otomotiv alanında, stirling motorlarının içten yanmalı motorlarla ekonomik anlamda rekabet edip edemeyeceği hususunda bazı şüpheler vardır. İçten yanmalı motorların zararlı eksoz emisyonları ile ilgili kısıtlamalar, mali açıdan oldukça yüklü oldukları için, uygulanabilir olmaktan uzak olarak görünebilir. Diğer taraftan, dıştan yanmalı olan stirling motorunun kirlilik oranı daha düşüktür (Urieli, Rallis, 1975). Tablo 2.1' de, otomotiv uygulaması için Ford Motor Company tarafından geliştirilen stirling motorunun CVS (California Vehicle Standards) test simülasyon sonuçları verilmiştir (Meijer, 1974).

Tablo 2.1. Ford Motor şirketi tarafından geliştirilen stirling motorunun emisyon değerleri (Meijer, 1974).

| Gaz bileşeni                     | Stirling emisyon miktarı<br>(g/mil) | 1977 U.S. Federal<br>standartı |
|----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| Yanmamış hidrokarbonlar          | 0.20                                | 0.41                           |
| Karbonmonoksit                   | 1.20                                | 3.40                           |
| Azotoksitleri (NO <sub>x</sub> ) | 0.14                                | 0.40                           |

Otomotiv alanındaki uygulamalarda dikkat çeken ilginç bir olasılık da, stirling motorunun termodinamik tersinirlik özelliğidir. Regeneratif frenleme esnasında motor, bir ısı pompasına dönüşmekte ve böylece ileriki hızlanmalarda bu enerji tekrar kullanılmaktadır. Tablo 2.2’ de bir dizel motoru ile Genesis I Stirling araştırma bölümü tarafından geliştirilen motorunun 1979 yılında yapılan karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 2.2. Stirling ve Dizel motorlarının karşılaştırılması ( Devins, 1982).

| Ölçümler                                     | Stirling<br>Genesis I | Dizel<br>Taşıt | İleri Stirling                 |
|----------------------------------------------|-----------------------|----------------|--------------------------------|
| Test ağırlığı (kg)                           | 1531                  | 1550           | 1406                           |
| Güç (kW)                                     | 33                    | 44             | 63                             |
| Yakıt                                        | Benzin                | Dizel          | Wide-cut*                      |
| Birleşik CVS çevrimi<br>(mil/galon)          | 19.4                  | 24.8           | 44.2                           |
| Ortalama şehir içi emisyon değerleri (g/mil) |                       |                |                                |
| CO                                           | 0.43                  | 1.6            | Genesis I ile<br>yaklaşık aynı |
| HC                                           | 0.12                  | 0.32           |                                |
| NO <sub>x</sub>                              | 0.37                  | 1.48           |                                |

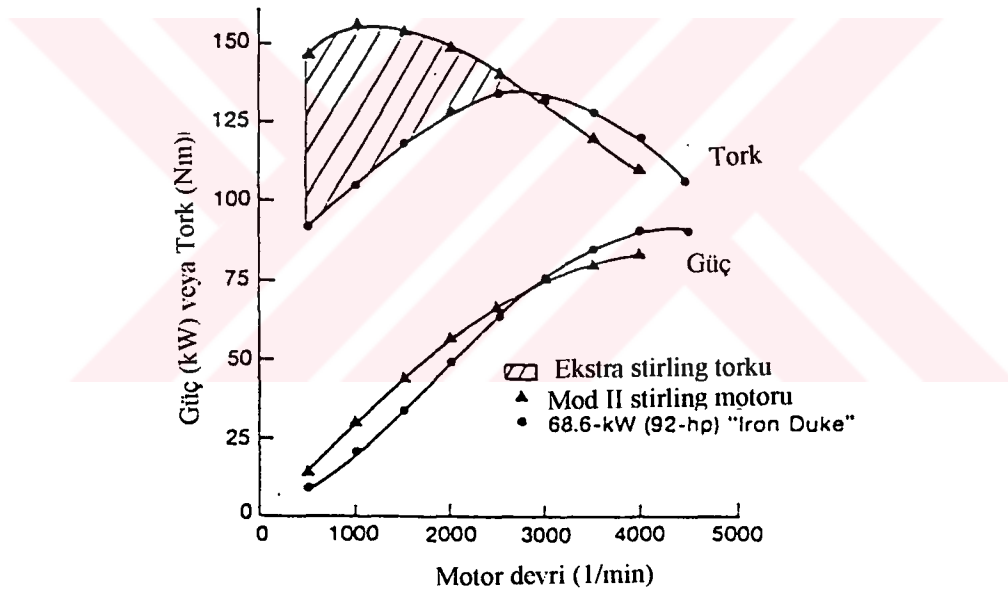
\* Dizele benzer yakıt

Stirling motorunun ASE (Automotive Stirling Engine) program çerçevesinde ilk otomotiv uygulaması “MOD I” dir (Richkey, 1987). Üretim aşamasında birtakım aksaklıklar görülmüştür. Bu aksaklıklar Nasa tarafından ve özellikle birim maliyet azaltılması ve motor performansının iyileştirilmesi üzerinde çalışmalar yoğunlaştırılarak giderilmeye çalışılmıştır (Simetkosky, 1985). Bu motor, Siemens-Rinia çift etkili tip olarak üretilmiştir. Silindir hacmi 120 cm<sup>3</sup> tür ve çalışma maddesi olarak 190 bar basınçta hidrojen kullanılmıştır. Isıtıcı kafa sıcaklığı 1000 °C iken çalışma maddesi sıcaklığı 750° C civarındadır.

MOD I motorundan sonra, ASE programı çerçevesinde MOD II motoru imal edilmiştir. Bu motor V tipli, 4 silindirli, tek krank milli, çift etkili bir motordur ve her silindirin etrafında soğutucu ve regenerator bulunmaktadır. Isıtıcı kafası, ısıtıcı tüplerden oluşmaktadır. Bu motor düşük hız ve yüksek torkta çalışmaktadır. Güç

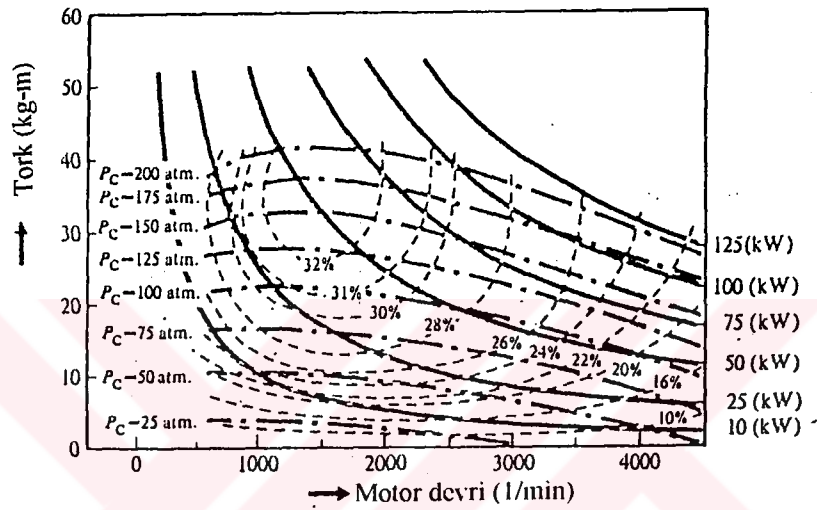
kontrolü çalışma gaz basıncı kontrol edilerek ayarlanmaktadır. Şekil 2.18' de bu motorun tork ve güç değişimi 68.6 kW' lık "Iron Duke" motoru ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Richkey, 1987). Motor şekilde görüldüğü gibi, düşük hızlarda yüksek tork geliştirme yeteneğine sahiptir.

1971 yılında Philips firması DAF ve MAN otobüslerinde kullanılmak üzere 4-235 tip motoru imal etmiştir. Bu motor, 4 silindirli, silindir çapı 8.28 cm, kursu 5.00 cm, ortalama basıncı  $21.6 \text{ MN/m}^2$ , dakikada 3000 devir yapabilen, 147 kW gücünde Rhombic sürücü mekanizmasına sahip ve termal enerji depolamalı bir motordur (Walker, 1980).



Şekil 2.18. MOD II Motorunun, Motor Devrine Göre Tork ve Gücü (Richkey, 1987)

1973 yılında Philips ve Ford firmasının ortaklaşa yaptıkları 4-215 tip motor, 3 vitesli ve otomatik transmisyona sahip Ford Torino' larda kullanılmıştır. Bu motor çift etkili ve 4 silindirli, 125 kW gücünde bir motordur. Bu motorun 60-73 kW arası güçlerdeki değişik konfigürasyonları Philips firması tarafından üretilmiştir. Motorun performans eğrileri Şekil 2.19' da görülmektedir.



Şekil 2.19. Çift Etkili, 4-215 D.A. Philips Motorunun Performans Eğrileri

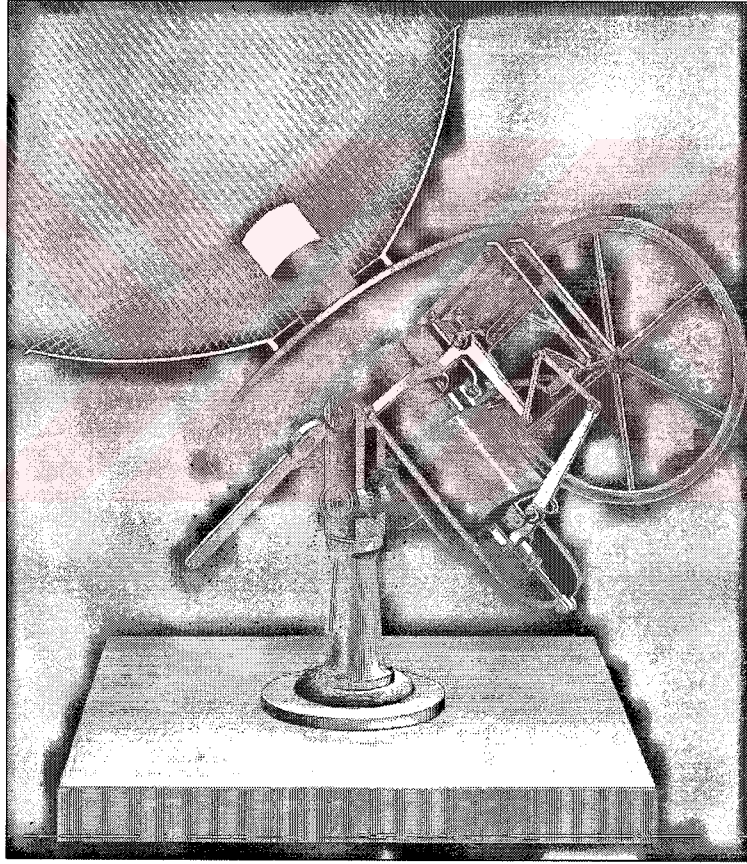
Daha sonra, yine Philips ve Ford firmaları tarafından, ortaklaşa olarak, 1976 Ford Pinto araçlarda kullanılan çift etkili Philips 4-98 D.A. motoru imal edildi. Bu motor 4-215 motoruna nazaran daha küçük güçte (60 kW) idi. Çalışma maddesi olarak hidrojen kullanılmıştır. Çalışma basıncı  $20 \text{ MN/m}^2$ , ısıtıcı sıcaklığı  $750^\circ\text{C}$ , soğutucu sıcaklığı  $80^\circ\text{C}$  idi ve dakikada 5400 devir yapabiliyordu.

### 2.5.2. Tarımsal alanda

Stirling motorları dıştan yanmalı ısı motorları oldukları için yakıt türüne bağımlı olmamaları bu motorları cazip kılan önemli faktörlerden birisidir. Güneş enerjisi herhangi bir maliyet gerektirmediği için uygulamada en çok üzerinde durulan enerji kaynağıdır. Ancak; depolama problemleri, birim alana düşen günlük ortalama enerji miktarının farklılık arz etmesi gibi problemleri mevcuttur. İlk güneş enerjisi ile



alışan sıcak hava motorunu 1872 yılında John Ericsson yapmıştır. Bu motorlarda valf kullanılmıştı. Piston-Yerdeğiştirme piston' lu olan ve Stirling motoru olarak adlandırılan motorlarda ise güneş enerjisi ilk olarak 1880 yılında kullanılmıştır. Parabolik bir ayna ile güneş ışınları silindir ısıtıcı kafasına odaklanmakta ve ısıtma için gerekli olan enerji sağlanmakta idi (Finkelstein, 1959). şekil 2.20' de Ericsson' un güneş enerjili motoru görülmektedir. Dakikada yaklaşık 400 devir yapmakta olan bu motor, elektrik motorlarının icadına kadar su pompalarını çalıştırmak için uzun yıllar kullanılmıştır.



şekil 2.20. Güneş Enerjili İlk Ericsson Motoru (Mair,1987)

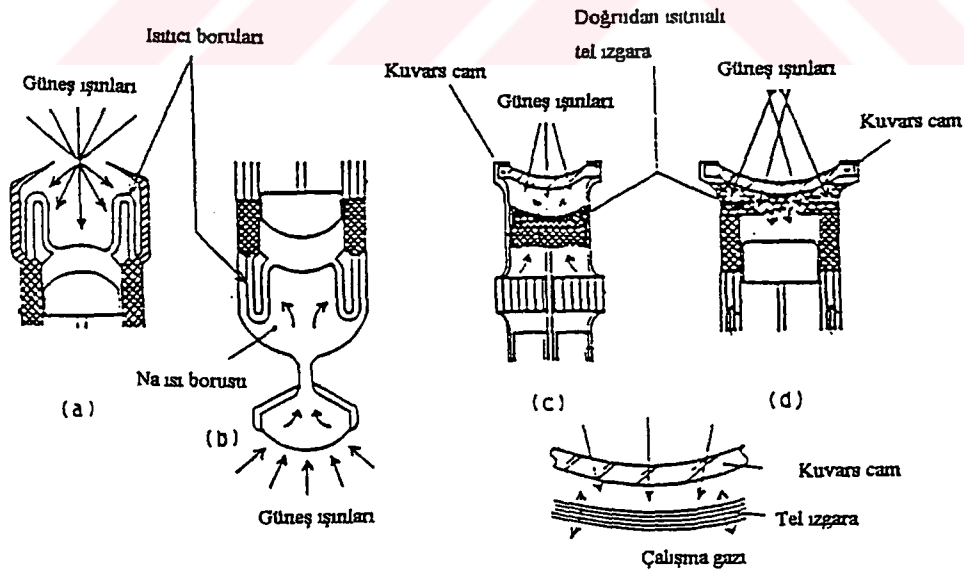
Güneş enerjili motorlarda güneş ışınları parabolik ayna ile veya enerjiyi kuvars bir pencereye odaklamak suretiyle çalışma maddesi üzerine doğrudan ısı oluşturmaktadır.

TNT grubunun araştırma, geliştirme laboratuvarlarında değişik tip Stirling motorları denenmiştir. Bu çalışmanın temel özellikleri;

- 1- Çok basit ve ucuz olarak, parabolik ayna sistemi geliştirilmiştir.
- 2- Küçük ölü hacme sahip, ısıya karşı duyarlı cam silindir kafesli, oldukça kullanışlı, bir gaz ısıtıcının testi yapılmıştır.

Daha sonra, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi kullanarak, yapılan bu modeller üzerinde değişik testler yapılmış ve uygulanabilirlik açısından bir çok olumlu gelişmeler sağlanmıştır.

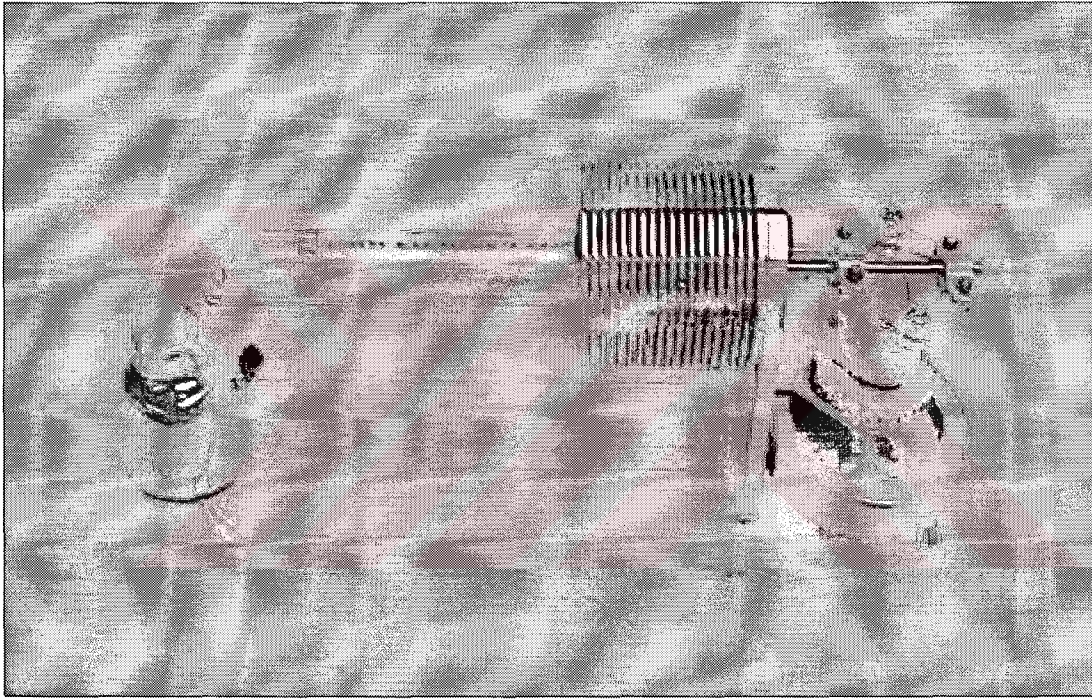
İmal edilen güneş enerjili stirling motorlarının hepsi metalik ısıtıcı tüp veya metalik silindir kafasına sahiptir ve çalışma gazı, yoğunlaştırılmış güneş ışığı tarafından ısıtılmaktadır. Sodyum ısı borularının kullanılmasıyla ısıtıcı tüp duvarlarına doğru ısı transferi yapılmaktadır. Şekil 2.21 (a) ve (b)' de bu durum görülmektedir (Isshiki, Shishido, Watanabe, 1991).



Şekil 2.21. Sodyumlu Isı Borusu (Isshiki, 1991)



TNT-1 güneş enerjili motorda ise silindir kafası ısıya dayanıklı cam olup, içeriye giren güneş enerjisi, piston veya silindir cidarı üzerine yerleştirilmiş gözenekli malzeme üzerine transfer edilir ve çalışma maddesi ısıtılır, Şekil 2.21. ( c ),(d). Günümüzde kullanılan en iyi ısıtıcı kafa malzemesi quartz camdır. Bu cam 1300 °C 'ye kadar yeterli dayanıklılığa sahiptir. 1100 °C' ye kadar şeklini ve şeffaflığını korur, Şekil 2.22.

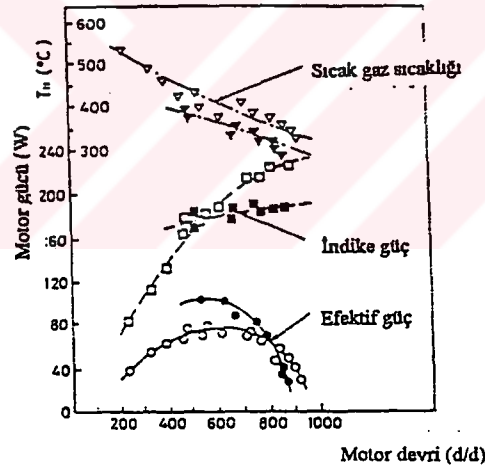


Şekil 2.22. Kuvars Camlı Isıtıcı Kafası (Rhombic, 1998)

TNT-1 modelinde silindir kafasının üzeri iç bükey quartz camdan yapılmıştır. Yer değiştirme pistonu içerisine regeneratör görevi gören ve çok tabakalı gözenekli tel yerleştirilmiştir. Regeneratörün alt tarafına bakırdan yapılmış kanatlı (bayonet) tip soğutucu bulunmaktadır. Güç pistonu ise soğutucunun alt tarafında yer almaktadır. Pistonların faz farkı 90 °C olup, krank mekanizmasında yağlanabilir tip bilyalı yatak kullanılmıştır. Basınç dengelemesi küçük bir kanal tarafından sağlanır aynı zamanda mekanizmanın soğutulmasını sağlar. Bu motordaki en önemli gelişme yer değiştirme

pistonu üzerinde bulunan regeneratörün, silindir cidarına yerleştirilmesidir. Bu sayede soğutucunun soğutma verimliliği artırılmıştır.

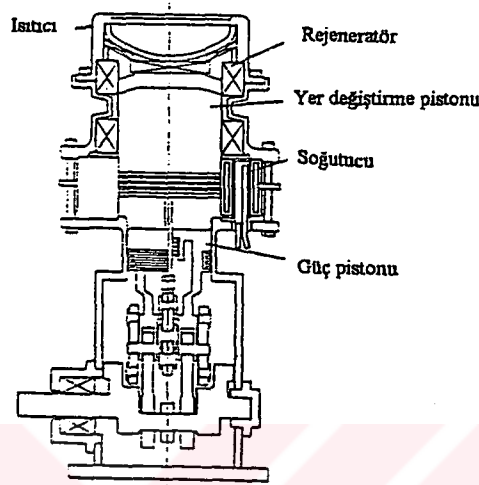
TNT-1 motorunun yer değiştirme pistonu ve silindir kafası yeniden düzenlenerek TNT-2 modeli olarak anıldı. Yapılan bu yeni tasarımda TNT-2 motoru, TNT-1 motorundan daha iyi çalışır. Bu motorda da pimli ısıtıcı ve quartz cam kullanılmıştır. Ancak uzun geçiş kanallarının bulunması TNT-2 motorundan beklenen gücün alınmasını engellemiştir. Test standında motora 1,4 kW gücünde sabit sıcaklık sağlayan bir elektrikli ısıtıcı kullanıldı. Bu enerji güneşten sağlanması gerekenin  $\frac{1}{4}$ 'ü idi. Motora düşük enerji girdisi sağlandığında düşük hız ve 100 W civarında çıkış gücü vermiştir (Şekil 2,23).



Şekil 2.23. TNT-2 Motorunun Maksimum Gaz Sıcaklıkları ve Güç Çıkışı (İsshiki, 1991)

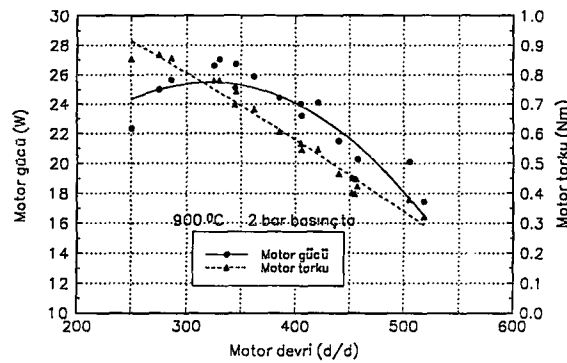
TNT-1 ve TNT-2' nin olumsuz yönlerinin giderilmesi için TNT-3 modeli dizayn edilmiştir. Şekil 2.24' de gösterilen motorda, ölü hacmi azaltmak için regeneratör ve soğutucu silindirin dış çevresine yerleştirilmiştir. Sabit ısıtıcı mesh silindirin üst boşluğuna yerleştirilerek karbon sekmanla desteklendi. Güneş enerjili stirling motorunun 1 kW güç vereceği tahmin edilmiştir. Diğer taraftan, bazı çelik silindir

kafaları üzerine yerleştirilen ve kapağın içerisine kadar uzanan çok sayıda pimler kullanılarak, hem güneş enerjisi ile hem de dıştan ısıtma ( yakıcı) sistemleri ile testler yapılmıştır.



Şekil 2.24. TNT-3 Motoru (Isshiki, 1991)

Şekil 2.25' te ise Fakültemizde güneş enerjisi kapsamında yapılan motorun 900°C de ve 2 bar şarj basıncında motor devrine göre tork ve güç değişimi görölmektedir. Motor 330 1/min'de 27 W maksimum güç üretmektedir.

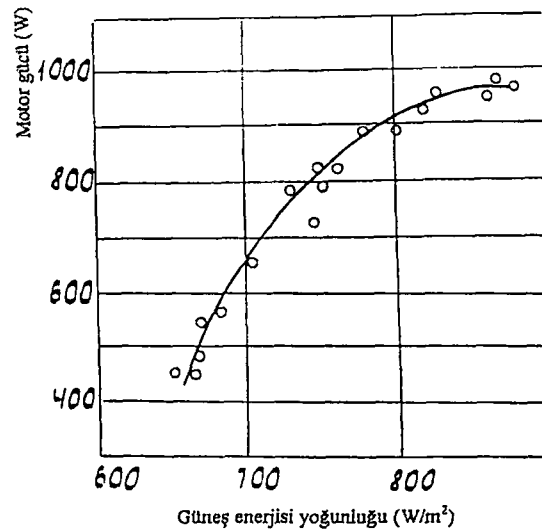


Şekil 2.25. TEF 07/95-3 Proje Motorunun Motor Devrine Göre Tork ve Güç Değişimi (Koca, 1997)

### 2.5.3. Elektrik Üretiminde

Georgia Teknoloji Enstitüsündeki güneş deneyleri merkezinde, altı katlı bir binanın üzerine yerleştirilen, 4 silindirik bir stirling motoru, her biri 1 m çapında olan 550 adet güneşi izleyen hareketli aynanın yansıttığı güneş ışınları ile ısıtılmaktadır. Sistem tarafından üretilen 18.8 kW elektrik enerjisi, birçok ev aletlerinin çalıştığı tipik bir evin ihtiyacını karşılayabilecek düzeydedir (Goswami, 1998).

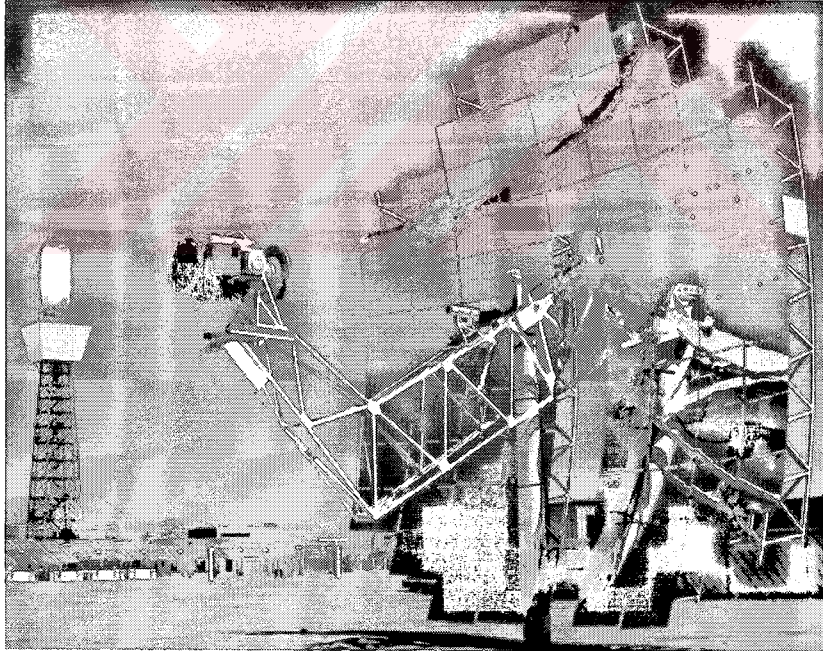
Güneş enerjisi ile çalışan, Trukhov ve Tursunbaev' in yapmış olduğu ve çalışma maddesi olarak Helyum kullanılan motorun çalışma basıncı 20 bar, kurs hacmi 230 cm<sup>3</sup> tür. Yansıtıcıların her biri 500x500 mm ölçülerindeki aynalardan oluşmuştur. Aynanın odak yarıçapı 3.2 m' dir. Bu sistemde ısı akışını düzenli hale getirmek için ısı tüplü sistem tavsiye edilmektedir. Enerjinin % 99' unu absorblayan odak düzlemi, maksimum enerji yoğunluğunun minimum enerji yoğunluğuna oranının 6' dan küçük olamayacağı belirtilmektedir. Test boyunca dizayn edilen motorun gücü 0.5 kW' ı aşmıştır. Güneş radyasyonu yoğunluğuna bağlı olarak çıkış gücü değişimi Şekil 2.26' da görülmektedir.



Şekil 2.26. Çıkış Gücünün Güneş Radyasyon Yoğunluğuna Bağlı Değişimi (Trukkov, 1993)



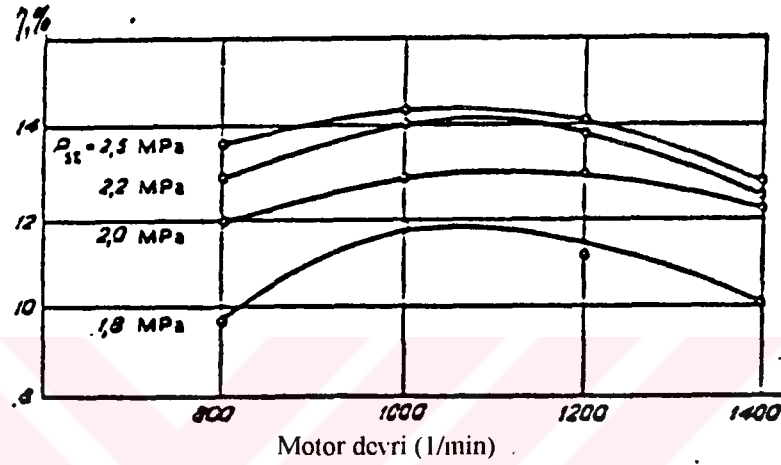
McDonnell-Douglas şirketi tarafından, 1982 yılında, ticari amaçlı 25 kW' lık parabolik aynalı bir stirling motorunun konstrüksiyonu ve çalışması yapıldı. Bu çalışma oldukça basit yapısı dolayısıyla düşük maliyetli idi (Gupta, 1987). Bu sistemde, güneş ışınları bir parabolik ayna tarafından stirling motorunun ısıtıcı kafasına yansıtılmakta ve içerideki çalışma maddesinin ısıtılması sağlanmakta idi. Cummins Power Generation (CPG) ve bir grup şirket bu sistemi gelecekte daha çok ticari amaca hizmet edebilmesi için geliştirme çalışmaları içerisine girdiler ve 7-25 kW arasında değişen kapasitelerde planlama yaptılar. Ancak son zamanlarda bu planlamalar askıya alındı (Mancini, 1994). Bu alandaki yeni uygulama ise, geniş membranlı ayna sistemi ile odaklama yapan, ısı tüplü ısıtıcılı, serbest pistonlu stirling motorları ve bir lineer alternatörden oluşan sistemdir (Goswami, 1998) . Böyle bir sistem Şekil 2.27.' de görülmektedir.



Şekil 2.27. Parabolik Geniş Membranlı Yansıtıcılar Kullanılan Serbest Pistonlu Stirling Motoru (Goswami, 1998)

1987 yılında, AS Özbek SSR' nin fizikoteknik enstitüsünde güneş enerjisi ile çalışan 0.5 W' lık V tipi, iki silindirli, tek etkili, 150 cm<sup>3</sup>' lük çalışma hacminde bir stirling

motoru geliştirilmiştir. Bu motorun sıcak ve soğuk silindirleri bir regeneratör vasıtasıyla birbirlerine bağlanmıştır. Motor karterine kinematik olarak çalışan bir elektrik jeneratörü yerleştirilmiştir. Şekil 2.28.' de bu motorun, motor devrine ve ortalama çalışma basıncına bağlı motor verimi eğrileri görülmektedir.



Şekil 2.28. AS Özbek SSR Motorunun Ortalama Çalışma Basıncına Göre Motor Verimi (Trukhow, 1993)

Güneş enerjili motorların diğer bir uygulama alanı da, uzay roketleri ve uydu enerji sistemleridir. General Motor, Allison Division, özellikle uzay uygulamaları için Rhombic sürücü mekanizmalı güneş enerjili bir elektrik motoru geliştirmiştir.

Otomatik meteoroloji istasyonları, çok çeşitli haberleşme araçları ve uzun süre müdahale edilemeyen benzer uygulamalar için çalışma kapasitesine sahip küçük güçlü jeneratörler için bir çok uygulama imkanı mevcuttur. Stirling motoru bu amaç için son derece uygun görülmektedir. Bir çok değişik ısı kaynağı ile çalışabilir, verim oranı yüksek ve oldukça güvenilir bir motordur.

#### 2.5.4. Deniz taşıtlarında

Stirling motoru, yeterli soğutma sistemine sahip olduğu için, özellikle de denizcilik uygulamaları için son derece elverişlidir. Aynı zamanda bir deniz motorunun spesifik

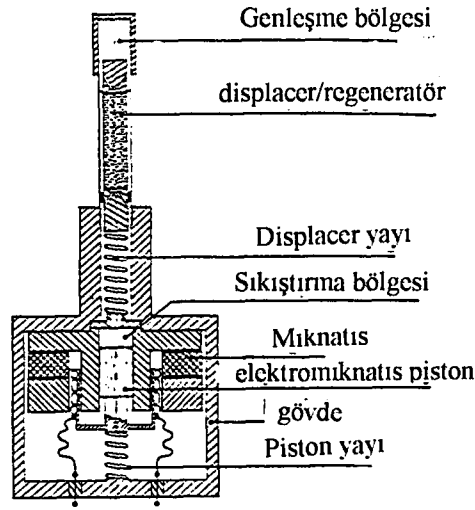


çıktısı çok önemli bir faktör olmayıp, basit tasarımlara imkan tanımaktadır. Deniz motorlarında nispeten düşük devirler gerekli olması sebebiyle, çalışma maddesi olarak havanın kullanılması uygundur.

Nükleer olmayan denizaltılar için güç istasyonları, potansiyel olarak oldukça etkileyici uygulamalar olarak kendini göstermektedir. Stirling motorlarının sessizliği ve yapısı itibarıyla dizel motorlarına göre bir üstünlük sağlamaktadır. Su altında çalışmak için termal depolama sistemli bir stirling motoru, aynı kütleye sahip kurşun-asit bataryalı bir elektrik sisteminin sağladığı enerjinin sekiz kat fazlasını sağlamaktadır. Aynı zamanda, stirling motoru kullanılan yüksek sıcaklık nükleer sistemler, konvansiyonel buharlı sistemlerden daha etkili ve daha yüksek verimlidir. General Motor, su altı uygulamaları için termal enerji depolu stirling motorları üzerinde önemli çalışmalar yapmıştır. Malmö' deki United Stirling (İsveç), yakıt olarak hidrojen peroksit' in kullanıldığı su altı güç sistemlerini geliştirmektedir.

#### 2.5.5. Soğutucularda

Stirling motoru, sıvı hava üretmek suretiyle kriyojenik ısıda büyük bir boşluğu doldurmaktadır. Minyatür kriyojenik soğutuculara olan ihtiyaç sürekli olarak artmaktadır. İnfrared teknikleri, süper geçirgen malzemeler, mikro dalga ışınlar gibi çok düşük sıcaklık ortamlarında üzerinde çalışılabilen durumlar için kullanılmaktadır. Atmosfere yakın yüksek sıcaklık dizinlerinde, stirling çevrim soğutucusuna pek rastlanmamakla beraber, basit üniteli kompakt bir stirling çevrim soğutucusu uygulanabilmektedir (Urieli, Rallis, 1975). Şekil 2.29' da küçük bir stirling soğutucusunun şematik resmi görülmektedir. Elektromanyetik sürücülü, çift yaylı soğutucuda, çalışma maddesi olarak helyum kullanılmıştır. Genleşme aralığında, yaklaşık olarak 80 K (-193 °C) de küçük bir soğutma aralığı 1 W civarında soğutma yüküne sahiptir. Kriyojenik soğutucular düşük sıcaklıklarda ve yüksek soğutma yüklerinde başarılı bir şekilde uygulanabilir. Diğer yandan laboratuvar çalışmalarında, 80 ile 160 K arasında değişen ve 1 ile 2 kW civarında soğutma yüküne sahip stirling soğutucular imal edildi (Other power device).



Şekil 2.29. Küçük Bir Stirling Soğutucu

## 2.6. Stirling Motorlarının Avantaj ve Dezavantajları

### 2.6.1. Avantajları

Kapalı çevrim makinaları olan stirling motorları daha önce icat edilmelerine rağmen, 19. yüzyılda içten yanmalı motorların ortaya çıkması ve hızla gelişmesi yüzünden bu motorlarla rekabet edemez duruma gelmiştir. Ancak; petrol krizinin baş göstermesi ve yakıt türüne karşı daha az bağımlılığına ek olarak içten yanmalı motorlara kıyasla onları cazip kılacak birçok avantajları olması, bu motorları tekrar gündeme getirmiştir. Stirling motorlarının avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- 1- Sistemde valf kullanılmadığı, gürültülü giriş ve eksoz sistemler olmadığı için sessizdirler. İçten yanmalı motorlarda görülen patlamaların ortaya çıkardığı gürültü mevcut değildir (Sustainable Engine System Ltd.1993). ABD ordusu tarafından 3 kW' lık GM tek silindirli stirling motoru ve eş değer bir içten yanmalı motor üzerinde yapılan ses yoğunluk ölçüm araştırmaları, tüm çalışma koşulları altında stirling motorunun diğerinden 21 dB daha sessiz olduğunu göstermiştir. Philips stirling motoru kullanılan bir otobüste, mevcut diğer otobüslerden 10-15 dB daha düşük ses seviyesi tespit edilmiştir (Urieli, Rallis, 1975).

- 2- Bazı mekanik konfigürasyonları yüksek bir dinamik dengeye sahiptir. Özellikle Rhombic sürücü mekanizmalı motorlar, tamamen dengeli olabilir.
- 3- Diğer ısı motorlarına oranla en yüksek termik verime sahiptirler. Regeneratörlü stirling motoru aynı sıcaklık sınırları içerisinde Carnot çevriminin ısı verimine eşdeğer bir verime sahiptir. İleriki aşamalarda termik verimlerinin % 50' ye ulaşacağı tahmin edilmektedir ( Walker, 1980).
- 4- Yakıt türüne bağımlılığı yoktur. Değişik yakıtlar veya ısı kaynakları ile çalışabilir. Güneş enerjisi, çevreci ve maliyeti düşük olduğu için, depolama problemleri halledildiğinde, stirling motorları için en cazip enerji kaynağıdır. Örneğin, Lityum ve magnezyum florür karışımı termal depo kullanıldığında, 746 °C ergime noktasında, depolama kapasitesi kilowatt-saat olarak aynı kütle ve hacimdeki kurşun-asit bataryalara oranla 30 kat artmaktadır.
- 5- Yardımcı sistemler diğer motorlara oranla daha az olduğu için bakım masrafları düşüktür.
- 6- İlk harekete geçirilmeleri kolaydır (Çetinkaya, 1999).
- 7- Güvenilirlik derecesi yüksektir. Yüksek iç basınç altında kapalı çevrimde çalıştığından, çalışma maddesi genellikle atmosferden, tozdan ve diğer kirleticilerden yalıtılmıştır. Çalışma sırasında yağ yorulması yoktur, yağlama yağı tüketimi azdır ve yağ değişimleri sık değildir (Urieli, Rallis, 1975).

### 2.6.2. Dezavantajları

Stirling motorlarının avantajlarının yanı sıra, içten yanmalı motorlara kıyasla rekabetçi bir ortam kazanabilmesi için gelişmesini gölgeleyen önemli problemlerin çözülmesi gerekmektedir. Bu problemler şöyle özetlenebilir:

- 1- Tüm devrelerin büyük termik ataletlerine bağlı olarak, hızlanma ivmeleri düşüktür.
- 2- Birçok kısımların tasarımları daha karmaşıktır (krank mekanizması, ısı eşanjörü, otomatik governor v.b.) (Çetinkaya, 1999). Bu sebeple maliyetleri yüksektir.

Mevcut birçok basit versiyonu olmasına rağmen, geleneksel içten yanmalı motorların etkinlik ve spesifik çıktılarına sahip değildir (Urieli, Rallis, 1975).

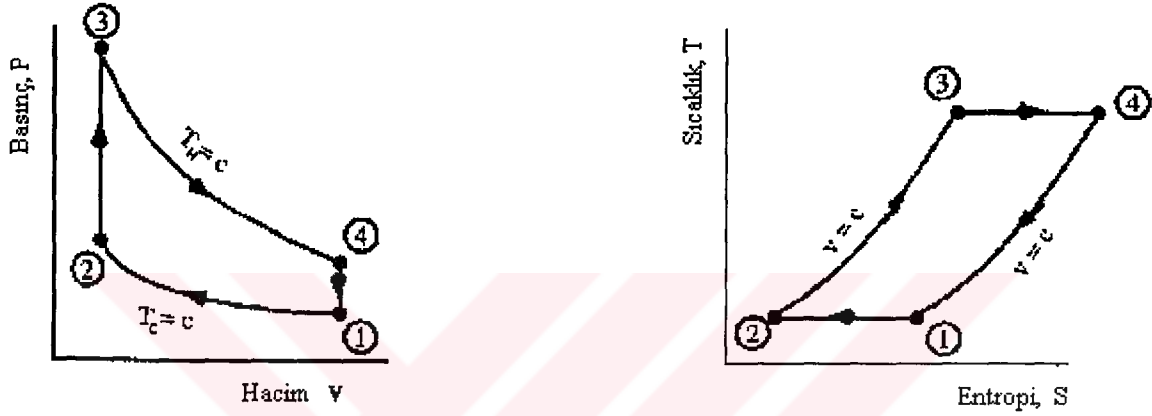
- 3- Ölü hacimle minimum düzeyde tutulması gerekmektedir, bu ise büyük regeneratörlerin kullanımını engellemekte ve yüksek ısı akışı gerektirmektedir. Dolayısıyla yüksek güç çıkışı sağlamak için, oldukça yüksek çalışma maddesi basıncı gereklidir ( $> 20$  MPa).
- 4- İçten yanmalı motorlara kıyasla birim ağırlık başına düşen güç miktarı azdır.
- 5- Çalışma ve krank boşlukları arasında güvenli yalıtım güçlüğü bulunmaktadır (Çetinkaya,1999).

Stirling motorlarında meydana gelen problemleri giderme çalışmalarında başarıya ulaşıldığı zaman içten yanmalı motorlarla rekabet edebilecek duruma gelebilecektir. Temiz enerji kaynağı olan güneş enerjisini depolayabilme durumu söz konusu olduğunda stirling motoru her alanda kullanıma hazır hale gelebilecektir.

### 3. TERMODİNAMİK ANALİZ

#### 3.1. Stirling Çevrimi

Robert Stirling (1816) tarafından tasarlanan, dışarıdan ısı vermeli stirling motorunun teorik çevrimine ait P-V ve T-S diyagramları Şekil 3.1’ de görülmektedir.



Şekil 3.1. Stirling çevriminin P-V ve T-S diyagramları

Çevrim iki izoterm (sabit sıcaklık) ve iki izohordan (sabit hacim) oluşmaktadır. Kapalı bir silindir içerisinde bulunan çalışma maddesine ısı, özel bir ısı eşanjörü-ısıtıcı- tarafından verilir. Isının dışarıya atılması ise, diğer bir ısı eşanjöründen-soğutucudan- olmaktadır. Motor için gerekli olan ısı, silindir dışındaki özel bir yanma odasından sağlanmakta ve burada kesintisiz bir yanma sürdürülmektedir.

Stirling çevriminde, önce  $P_3$  basıncında ve  $T_H$  sıcak kaynak sıcaklığındaki çalışma maddesine 3-4 izotermi boyunca ısı verilerek,  $P_4$  basıncına kadar genişlemesi sağlanır. Daha sonra 4-1 izohoru boyunca sistemden ısı alındığından, çalışma maddesinin basıncı  $P_1$ 'e, sıcaklığı da  $T_C$ ' ye kadar azalır. Bu işlemin ardından; sistemden ısı çekimi sürdürülerek, çalışma maddesinin 1-2 izotermi boyunca  $P_2$  basıncına kadar sıkıştırılması sağlanmaktadır. Son olarak ta 2-3 izohoru boyunca sisteme ısı verilerek, çalışma maddesinin  $T_H$  sıcak kaynak sıcaklığına yükselmesi sağlanır.

Sisteme sabit hacimde (izohorik) verilen ısı;

$$q_{2-3} = C_v (T_H - T_C) \quad (3.1)$$

Sabit sıcaklıkta (izotermik) olarak verilen ısı da;

$$q_{3-4} = R T_H \ln \frac{p_3}{p_4} \quad (3.2)$$

dür. 2-3 ve 4-1 izohorlarından;

$$\frac{T_H}{T_C} = \frac{p_3}{p_2} = \frac{p_4}{p_1} \quad (3.3)$$

ve buradan da;

$$\frac{p_3}{p_4} = \frac{p_2}{p_1} \quad (3.4)$$

yazılabilir. Böylece;

$$q_{3-4} = R T_H \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (3.5)$$

olur.

Sisteme verilen toplam ısı,

$$q_s = q_{2-3} + q_{3-4} \quad (3.6)$$

olduğundan;

$$q_s = C_v(T_H - T_C) + RT_H \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (3.7)$$

olur.

Sistemden izohorik olarak atılan ısı;

$$-q_{4-1} = C_v(T_H - T_C) \quad (3.8)$$

İzotermik olarak atılan ısı da;

$$-q_{1-2} = R T_C \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (3.9)$$

olduğundan, sistemden atılan toplam ısı;

$$q_R = q_{4-1} + q_{1-2} \quad (3.10)$$

ve buradan da;

$$-q_R = C_v(T_H - T_C) + R T_C \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (3.11)$$

olur.

İşe çevrilen net ısı;

$$q_{\text{net}} = C_v(T_H - T_C) + RT_H \ln \frac{p_2}{p_1} - C_v(T_H - T_C) - RT_C \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (3.12)$$

$$= RT_H \ln \frac{p_2}{p_1} - RT_C \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (3.13)$$



veya;

$$q_{\text{net}} = (T_H - T_C)R \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (3.14)$$

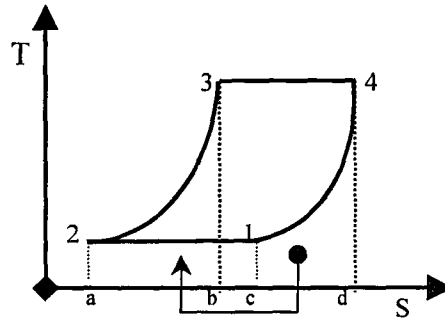
olmaktadır. Bu durumda, regeneratörsüz Stirling çevriminin termik verimi;

$$\eta_t = \frac{q_{\text{net}}}{q_s} = \frac{(T_H - T_C)R \ln \frac{p_2}{p_1}}{C_v(T_H - T_C) + RT_H \ln \frac{p_2}{p_1}} \quad (3.15)$$

olacaktır (Çetinkaya, 1999).

### 3.2. Regeneratörlü Stirling Çevrimi

Basit Stirling çevrimine bir rejeneratör (ısı eşanjörü) eklenmesi durumunda; rejeneratör 4-1 izohoru boyunca dışarıya atılan ısının tamamını depo ederek, 2-3 izohoru boyunca aynen sisteme iade eder. Bu işlem; teorik olarak, sonsuz sayıda ve belirli alanlı veya belirli sayıda ve sonsuz alanlı ısı eşanjörü kullanılarak gerçekleştirir. Şekil 3.2. 'de rejeneratörlü Stirling çevriminin T-S diyagramı görülmektedir.



Şekil 3.2. Rejeneratörlü Stirling çevriminin T-S diyagramı

Şekilden de anlaşılacağı gibi, a-2-3-b alanı, c-1-4-d alanına ve bunların karşılığı olan ısılar da birbirine eşit olacaktır. Bu durumda, sisteme ısı verme işlemi sadece 3-4 izotermi, sistemden de ısı alma işlemi sadece 1-2 izotermi boyunca olmaktadır.

Sisteme verilen ısı;

$$q_s = RT_H \ln \frac{p_3}{p_4} = RT_H \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (3.16)$$

ve sistemden atılan ısı miktarı ise;

$$-q_R = RT_C \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (3.17)$$

olacağından, işe dönüştürülen net ısı,

$$q_{net} = RT_H \ln \frac{p_2}{p_1} - RT_C \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (3.18)$$

$$= (T_H - T_C) R \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (3.19)$$

olur. Böylece, rejeneratörlü stirling çevriminin termik verimi;

$$\eta_t = \frac{q_{net}}{q_s} = \frac{(T_H - T_C) R \ln \frac{p_2}{p_1}}{RT_H \ln \frac{p_2}{p_1}} \quad (3.20)$$

$$= \frac{T_H - T_C}{T_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (3.21)$$

olur.

Bu sonuç, regeneratörlü Stirling çevriminin termik veriminin, Carnot çevriminin termik verimine eşit, yani ısı makinesinden elde edilebilecek maksimum verime eşit olduğunu göstermektedir. Regeneratörün etkinliği, belli devirlerde çok önemlidir. Bu, regeneratörde depolanan enerji miktarının ( $q_R$ ), çevrim başına sisteme verilen enerjiye ( $q_s$ ) oranı hesaplanarak gösterilebilir. Böylece sabit hacim süreci için;

$$q_R = m \cdot c_v \cdot (T_H - T_C) \quad (3.22)$$

yazılabilir. Bu formülde;

$m$ : Yer değiştiren çalışma maddesinin kütlesi,

$c$ : Sabit hacimdeki özgül ısınma ısısı,

$T_H$ : Sıcak kaynak sıcaklığını,

$T_C$ : Soğuk kaynak sıcaklığını, gösterir.

İzotermal genleşme sürecinde sisteme verilen ısı;

$$q_s = mRT_H \ln \left( \frac{V_1}{V_2} \right) \text{ dir.} \quad (3.23)$$

Bu formülde;

$R$ : İdeal gaz sabitesini,

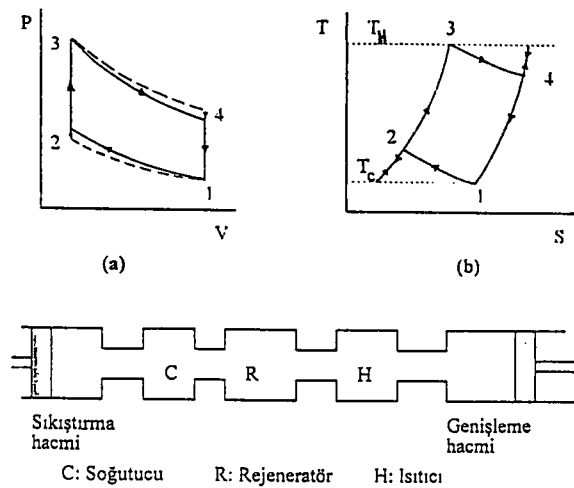
$V_1$ : Maksimum hacmi,

$V_2$ : Minimum hacmi, gösterir.

Çalışma maddesi hava olan ve  $T_H=1000$  K,  $T_C=350$  K,  $V_1/V_2=2$ ' lik hacim oranında bir çevrim örnek alınacak olunursa, sisteme verilen ısıнын, regeneratörde depolanan ısıya oranı;

$$\frac{q_s}{q_R} = \frac{(T_h - T_c) \left[ \frac{c_v}{R} \right]}{T_h \ln \left[ \frac{V_1}{V_2} \right]} = 2,3 \text{ olmaktadır.} \quad (3.24)$$

Buradan anlaşılacağı üzere, regeneratör verimliliğindeki % 1' lik kayıp, yapılan iş aynı kalmak kaydıyla, sisteme sürülen ısıda % 2,3 'lük artış gerektirir. Bu örnekte sıkıştırma oranı ( $\epsilon$ ), 2:1 seçilmiştir. İdeal Stirling çevriminin basit bir analizi, hem termal verimliliğin, hem de özgül iş çıkışının sıkıştırma oranıyla paralel olarak arttığından, gerçekçi düşünüldüğünde bu oran düşüktür. Ancak; Şekil 3.3. (a) ve (b) görüldüğü gibi, Pseudo Stirling çevriminde termik verim 2:1 hacimsel oranda en yüksek değere ulaşmış, buna karşılık özgül işin belirtilen hacimsel oranın altında kalmıştır. İdeal sabit hacim süreçlerinin sınırlı hızlarda çalışan herhangi bir mekanizma tarafından gerçekleştirilmesinin mümkün olmadığına işaret etmektedir (Urieli and Rallis, 1975).



Şekil 3.3. Pseudo-Stirling Çevrimi

Stirling motorlarında kullanılan regeneratörler gözenekli malzemeden yapılırlar. Regeneratör malzemesi olarak elekli tel en fazla kullanılan malzeme türüdür. Regeneratör, çalışma maddesi sıcak bölgeden soğuk bölgeye hareket ederken soğutucuda soğutma suyuna transfer edilecek ısıyı depo eder ve soğuk bölgeden sıcak bölgeye geçiş sırasında ise çalışma maddesinin ısıtılmasını sağlar. Regeneratör bu özelliği ile hem soğutucu ölü hacminin azalmasını sağlar, hem de soğutma suyuna atılacak ısıyı depolayıp sisteme kazandırdığı için ısı tasarrufu sağlar ve sistemin verimini yükseltir (Yücesu, 1996).

### 3.3. Carnot Çevrimi

Sadi Carnot' un tasarladığı bu çevrimde, minimum ve maksimum iki çalışma sıcaklığı  $T_H$  ve  $T_C$  arasında mümkün olan maksimum iş elde edilir. Şekil 3.4' de ağırlıksız bir piston silindir içerisinde sürtünmesiz hareket etmektedir.  $Q_1$  ısı enerjisinin, silindirdeki ideal akışkana  $T_H$  sıcaklığında sabit olarak (izotermal) transfer edildiği kabul edilirse, pistonun a noktasından b noktasına hareketi ile akışkan genleştirilir. B noktasından sonra piston c noktasına adyabatik genleşme ile hareket eder. Bu işlemi c noktasından sonra d noktasına kadar  $Q_2$  ısını  $T_C$  sıcaklığında sabit olarak dışarı atılması takip eder. Son olarak d noktasından a noktasına yine adyabatik sıkıştırma ile çevrim tamamlanır (Borat, 1994).

Bu çevrimin net işi;

$$W_{\text{net}} = Q_1 - Q_2 \quad (3.25)$$

Çevrim verimi ise;

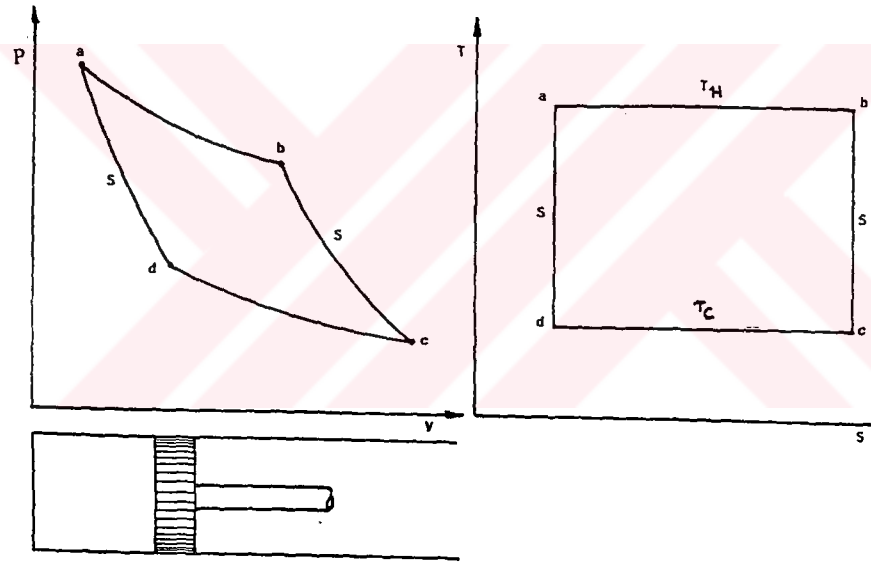
$$\eta_c = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad (3.26)$$

çevrim verimi, minimum ve maksimum sıcaklıklar cinsinden ifade edilecek olunursa;

$$\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (3.27)$$

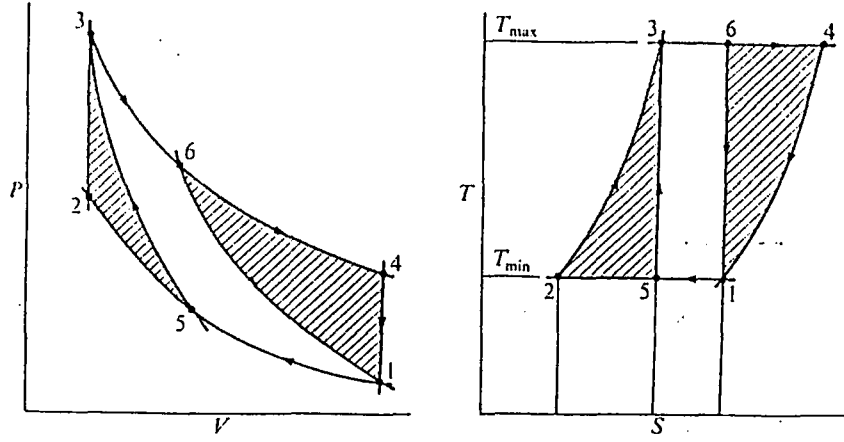
yazılabilir.

3.21 no' lu eşitlikte de görüldüğü gibi regeneratörlü Stirling çevriminin termik verimi Carnot çevrimine eşittir.



Şekil 3.4. Carnot çevrimi

Şekil 3.5' de Carnot ve Stirling çevrimlerinin P-V ve T-S diyagramları üst üste çakıştırıldığında P-V diyagramındaki Stirling çevriminin iş hacminin daha büyük olduğu görülür. Şekil 3.5' deki P-V ve T-S diyagramlarındaki 5-3-2 ve 6-1-4 taralı alanları Carnot çevrimindeki adyabatik süreçlerin yerini alan Stirling çevrimindeki sabit hacim süreçleri tarafından yapılan ilave iş alanıdır. Bu durum içeri sürülen ve sistemden atılan ısı miktarını, faydalı işi aynı oranda artırır. İçeri sürülen ısıнын fazlası işe dönüştürülür. Her iki çevrimde işe dönüşen ısı oranı aynı olmaktadır.



Şekil 3.5. Carnot ve Stirling Çevrimlerinin P-V ve T-S Diyagramları (Walker, 1980).

### 3.4. Stirling Motorunun Çalışma Prensibi

Pratik dıştan yanmalı stirling motorunun çalışma prensibi Şekil 3.6' da görülmektedir. Silindir içerisinde iki piston mevcuttur. Bunlardan birisi güç pistonu (silindir cidarı ile arasındaki boşluk sızdırmaz şekildedir), diğeri ise yer değiştirme pistonudur (silindir cidarı ile aralarında boşluk sızdırır şekildedir). Yer değiştirme pistonunun üst kısmında kalan bölge sıcak (ısıtıcı) genleşme boşluğunu, güç pistonunun ile yer değiştirme pistonu arasında kalan bölge ise soğuk bölge (soğutucu), sıkıştırma boşluğunu oluşturur. Bu iki bölge regeneratör vasıtasıyla birbirine bağlanmıştır. Şekil 3.6' daki durumlar aşağıda özetlenmiştir.

I. durum: Güç pistonu AÖN tarafında, yer değiştirme pistonu ise ÜÖN tarafındadır. Bütün çalışma gazı sıkıştırma odasında ve minimum sıcaklıktadır. Hacim ise maksimum sıkıştırma hacmidir. Bu esnada çalışma gazının basıncı ve sıcaklığı minimum değerdedir.

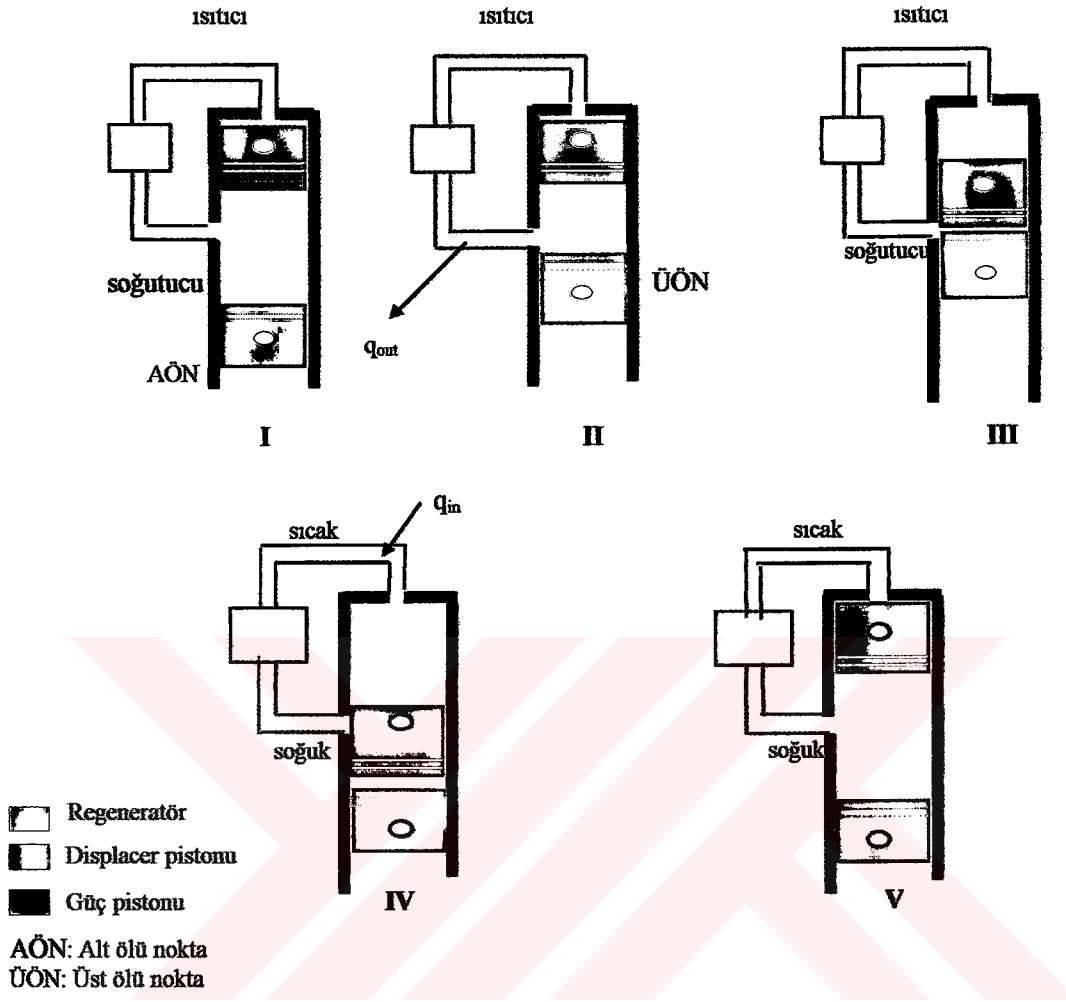
II. durum: Güç pistonu ÜÖN' ya doğru hareket eder ve çalışma gazını sıkıştırır. Bu işlem boyunca, çalışma gazı silindir içerisinde sabit sıcaklıktadır (izotermal). Bu durum P-V diyagramında 1-2 işlemidir (Şekil 3.1.). Sabit sıcaklık işleminin gerçekleşmesi için sistemden ısı alınması gerekir.

III. durum: Yer değiştirme pistonu aşağı doğru hareket ederek, çalışma gazını sıcak bölgeden, soğuk bölgeye doğru iter. Bu durum, P-V diyagramında 2-3 durumudur. Bu durumda hacim sabit kalır ve her iki piston eş zamanlı hareket eder.

IV. durumda: Çalışma gazı soğutucudan geçerek regeneratöre ulaşır ve bir önceki çevrimde depolanan ısıyı alır ( $q_{in}$ ) ve çalışma gazı yeterli basınç ve sıcaklığa erişir. Isınan çalışma gazı genişleyerek yer değiştirme pistonu ve güç pistonu ile beraber aşağıya doğru hareket eder. Bu durum P-V diyagramında 3-4 durumudur. Genişleme işlemi devam ederken hacim arttığı için çalışma gazının basıncı düşer ve bu durumda sıcaklık sabit kalır. Burada ısı sisteme harici kaynaktan aktarılır.

V. durum: Tekrar çevrim başlangıcı için iş ve yer değiştirme pistonları eş zamanlı hareket ederek çalışma gazı sabit hacimde yerlerini alır. Bu durum P-V diyagramında 4-1 durumudur. Çalışma maddesi regeneratörden geçerken ısı regeneratöre aktarılır. Çalışma gazının bu durumda sıcaklığı azalır. Regeneratöre verilen ısı bir sonraki çevrimde kullanılır (Engineering, 1989).

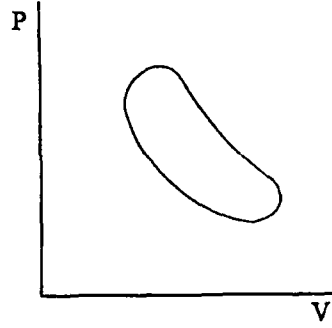




Şekil 3.6. Stirling Motoru (Engineering, 1989)

### 3.5. Stirling Motorlarının Pratik (gerçek) Çevrimi

Teorik Stirling çevrimlerinde iki sabit sıcaklık (izoterm) ve iki sabit hacim (izohor) süreçleri bulunmaktadır. Teoride elde edilen sonuçları pratikte gerçekleştirmek mümkün değildir. Gerçek Stirling çevriminin P-V diyagramı Şekil 3.7.' de görüldüğü gibi elips şeklinde olmaktadır.



Şekil 3.7. Pratik Stirling çevrimi (Urieli and Rallis, 1975).

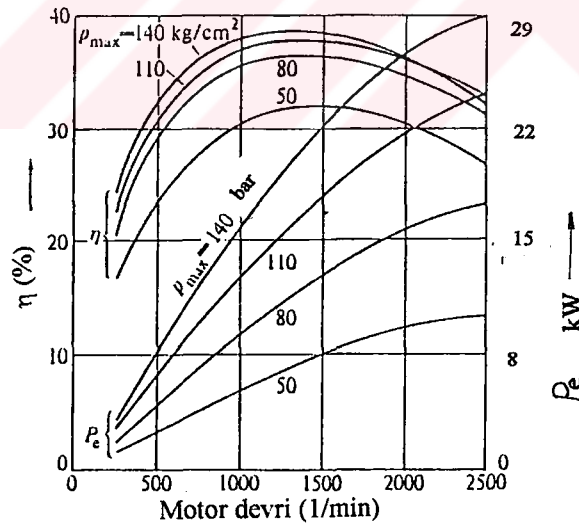
Teorikte sabit sıcaklıkta gerçekleşen sıkıştırma ve genişleme süreçleri ile sabit hacim süreçleri pratikte gerçekleşmez. Motor devri arttıkça sıkıştırma ve genişleme süreçleri adyabatik sürece daha uygun hale gelmektedir. Motor devri ve ısı transfer yüzey alanının büyüklüğü bu durumu etkiler. Isı transfer işlemlerinin sürekliliği ve değişen piston hızı, ısıнын sabit hacim süreçlerinde sisteme sürülmesini engeller. Motordaki ölü hacim ve sürtünme kayıpları da teorik süreçlere ulaşılmasında engel teşkil eden diğer faktörlerdir. Motor imalatında  $90^\circ$  faz açısı bulunan V motor yapılmasındaki amaç, sıkıştırma ve genişleme işlemlerinin kısmen teorik süreçlere yaklaştırılmasıdır. Böylece çevrim başına elde edilecek işin artması sağlanacaktır.

Gerçekte teorik süreçlere ulaşamamasının sebepleri; ölü hacim, sabit sıcaklıkta gerçekleşmeyen sıkıştırma ve genişleme işlemleri, sürtünme kayıpları, değişen piston hızı, ısı transfer yüzey alanının ısıtıcıda ve soğutucuda sınırlandırılması, sızdırmazlık problemleri, ısı v.b.kayıplardır (Martini, 1978).

### 3.6. Stirling Motorlarının Performansı

#### 3.6.1. Güç ve verim

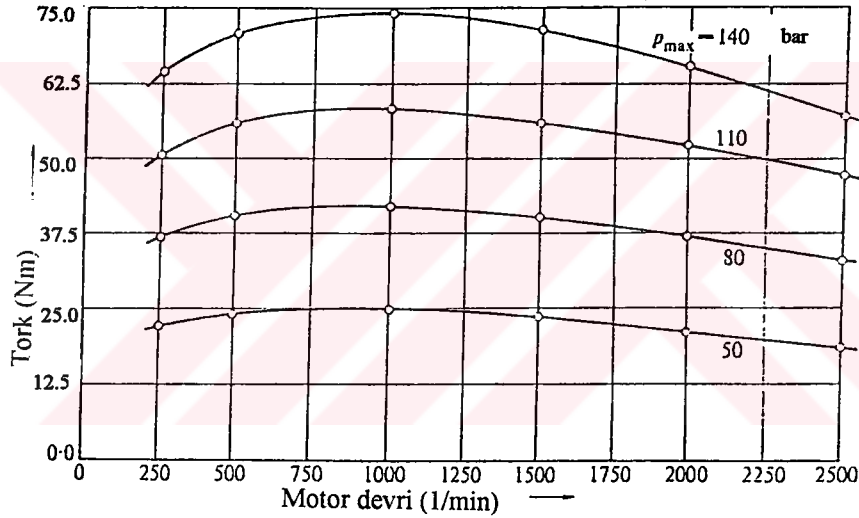
Tek silindirli bir Philips motorunun güç ve veriminin değişik maksimum basınçlarda motor hızına bağımlı değişimi Şekil 3.8.' de görülmektedir. Ölçümlerde kullanılan bu motor, 30 kW(40 hp) gücünde, yer değiştirme piston' lu, Rhombic sürücü mekanizmasına sahip ve çalışma gazı olarak da hidrojen kullanılan bir motordur. Motorun silindir çapı 88 mm, kursu 60 mm' dir. Sıkıştırma oranı  $P_{max}/P_{min}$  2.0, maksimum çalışma basıncı  $13.7 \text{ MN/m}^2$  ve ısıtıcı sıcaklığı  $700^\circ\text{C}$ , soğutucu sıcaklığı ise  $15^\circ\text{C}$ ' dir. Şekilde görüldüğü gibi, değişik çalışma basınçlarında efektif güç ( $P_e$ ) ve motor verimi motor hızı ile değişim göstermektedir. 1250 d/d civarında motor verimi maksimum olmuş ve ilerleyen hızlarda düşme göstermiştir (Walker, 1980; Meijer, 1959).



Şekil 3.8. Tek Silindirli Bir Philips Stirling Motorunun Motor Gücü ve Termal Verimin Motor Devrine Bağlı Değişimi ( Meijer, 1959 ; Walker, 1980)

### 3.6.2. Tork-Hız

Şekil 3.9' da 30 kW' lık gücünde, tek silindirli bir Philips motorunun, motor devrine bağlı tork değişimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, motor torku hıza bağlı olarak çok az değişim göstermektedir. Bu durum stirling motorlarının önemli bir avantajıdır ve otomotiv uygulamaları için çok elverişli olduğunu göstermektedir. Düşük hızlarda yüksek tork, ivmelenme için arzu edilen bir durumdur. Bu durum stirling motorlarında çok basit transmisyon kullanımını uygun kılar (Walker, 1980; Meijer, 1959).

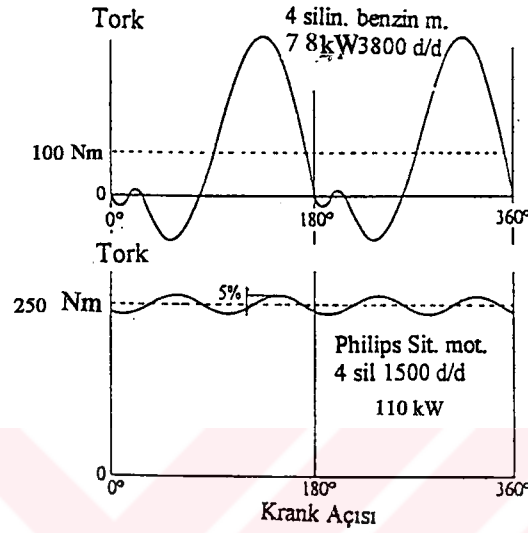


Şekil 3.9. Motor Torkunun Motor Devrine Bağlı Değişimi (Meijer, 1959)

### 3.6.3. Periyodik tork değişimi

1970 yılında Meijer, 4 silindirli bir stirling motoru ile aynı güçteki (73 kW) buji ile ateşlemeli bir motorun krank açısına bağlı motor torkunun değişimlerinin karşılaştırmasını yaptı. Şekil 3.10.' da görüldüğü gibi, stirling motorunun periyodik tork değişimi % 5 gibi her silindirde çok küçük bir aralıktadır ve motorun her devrinde çevrim tamamlanmaktadır. Yaklaşık olarak  $P_{max}/P_{min} = 2.0$  olmaktadır. İçten yanmalı motorda çevrim basıncı ise  $0.08-5 \text{ MN/m}^2$  aralığında değişir ve basınç değişimi büyük aralıklarla olmaktadır. 4 zamanlı motorda her silindir iki devirde çevrimi

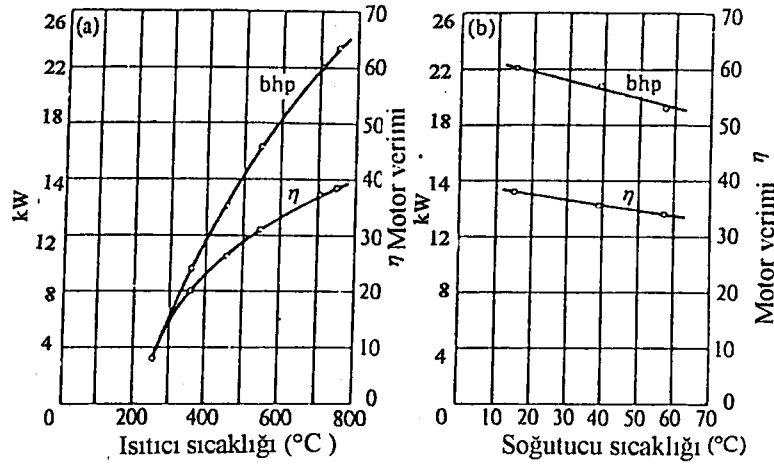
tamamlamaktadır. Tork değişiminin küçük olması motor için gerekli volanın küçülmesini sağlar (Walker, 1980; Meijer, 1970).



Şekil 3.10. Dört Silindirli Bir Stirling ve Benzin Motorunun Periyodik Tork Değişimi (Walker, 1980)

#### 3.6.4. Isıtıcı ve soğutucu sıcaklıkları

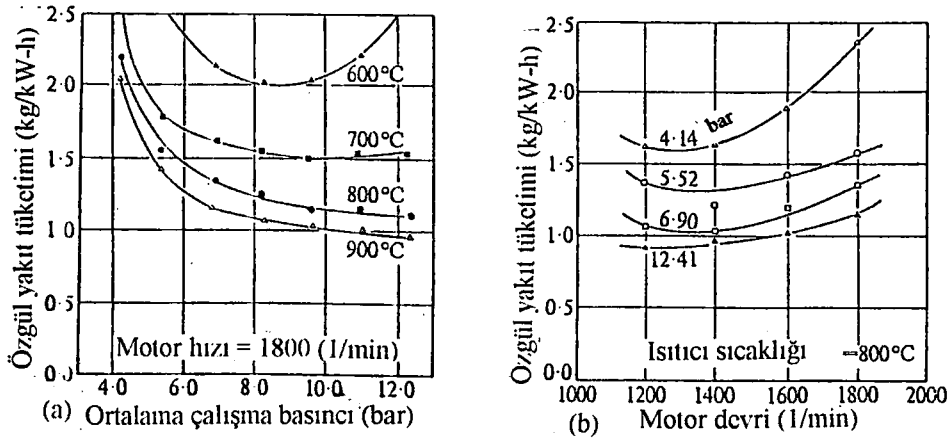
Şekil 3.11 (a) ve (b)' de tek silindirli rhombic sürücü mekanizmalı Philips motorunun ısıtıcı ve soğutucu sıcaklıklarının motor gücü ve termal verime etkisi görülmektedir. Motor gücü ve termal verim, ısıtıcı ve soğutucu sıcaklıklarının bir fonksiyonudur. Motor gücü ve termal verim, ısıtıcı sıcaklığı arttıkça yükselme, soğutma suyu giriş sıcaklığının artması ile azalma göstermektedir (Walker, 1980; Meijer, 1959).



Şekil 3.11. Motor Gücü ve Termal Verimin Isıtıcı ve Soğutucu Sıcaklıklarına Bağlı Değişimi (Walker, 1980)

### 3.6.5. Özgül yakıt tüketimi

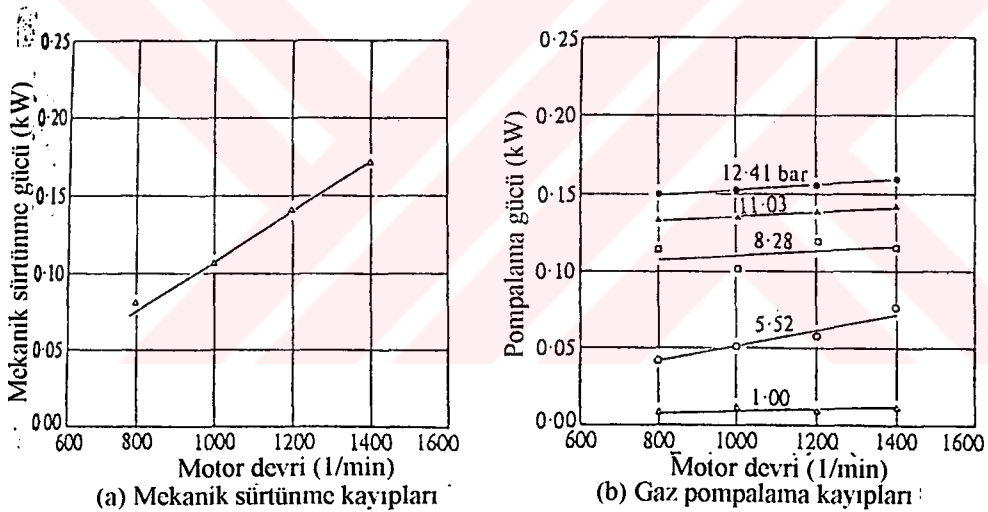
Şekil 3.12 (a)' da, 1800 d/d' da ortalama çalışma basıncına göre değişik ısıtıcı sıcaklıklarındaki özgül yakıt tüketimi, (b)' de ise motor devrine bağlı 800 °C ısıtıcı sıcaklığında ve değişik çalışma basınçlarındaki özgül yakıt tüketimi eğrileri görülmektedir. Her iki şekilde de görüldüğü gibi özgül yakıt tüketimi, sabit ısıtıcı sıcaklıklarında veya sabit motor hızlarında, ortalama çalışma basıncının bir fonksiyonudur.



Şekil 3.12. Özgül Yakıt Tüketiminin Ortalama Çalışma Basıncına ve Motor Devrine Bağlı Değişimi (Walker, 1980)

### 3.6.6. Sürtünme ve pompalama kayıpları

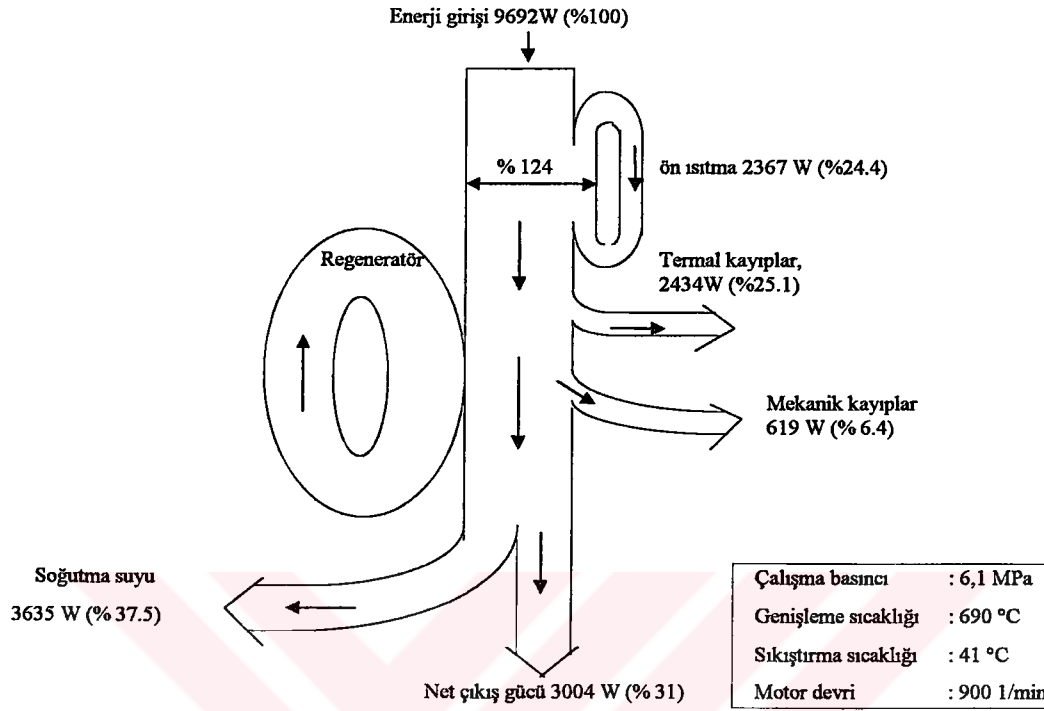
Şekil 3.13 (a)' da, tek silindirli piston-yer değiştirme piston' lu, silindir çapı 0.056 m olan küçük güçlü (<1 kW) bir Philips motorunun, motor devrine bağlı mekanik sürtünme kaybı, (b)' de ise motor devrine bağlı pompalama kaybı görülmektedir. Şekil (a)' da görüldüğü gibi motor devri arttıkça mekanik sürtünme kayıpları lineer olarak artmaktadır. (b)' de ise pompalama kayıpları motor devrinin ve çalışma basıncının bir fonksiyonudur. Çalışma basıncı ve motor devri arttıkça pompalama kayıpları da artmaktadır.



Şekil 3.13. Motor Devrine Bağlı Sürtünme ve Pompalama Kayıpları (Walker, 1980)

### 3.6.7. Enerji dengesi

Şekil 3.14' de 3 kW' lık bir stirling motorunun Sankey diyagramı olarak adlandırılan enerji akış diyagramı verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, bu motorda 9692 W' lık ısı girişi % 100 kabul edilirse; ön ısıtıcının yaptığı ısı telafisi % 24,4 (2367 W) tır. Isı girişinin % 25.1' i iki yolla dağılmaktadır. Biri konveksiyon ve radyasyon yoluyla, diğeri ise eksoz gazı vasıtasıyla atmosfere atılmasıdır.



Şekil 3.14. 3 kW' lık Bir Stirling Motorunun Enerji Akış (Sankey) Diyagramı (Komakine, 1985)

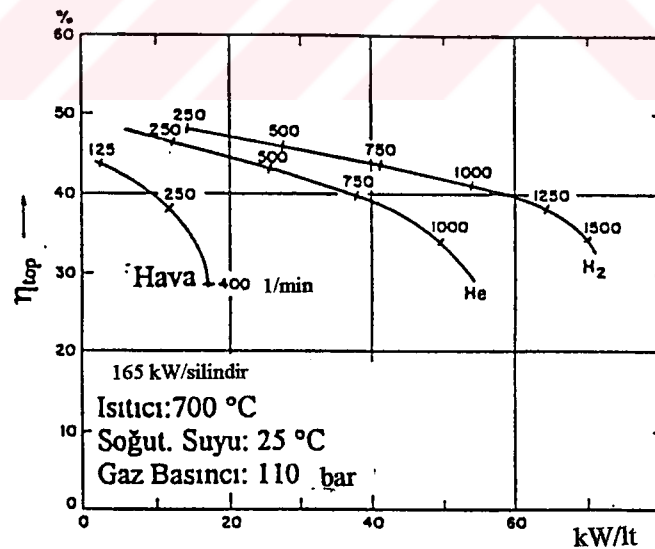
Isının % 37.5' i soğutma suyuna geçmektedir. Net çıkış gücü ise % 31 (3004 W) tır. Meydana gelen ısı ve mekanik kayıpları sırasıyla 3623 ve 619 W olmuştur. Sistemde, % 74.9 yanma verimi, % 82.9 mekanik verim, %31 net termal verim ölçülmüştür. Malzeme ve izolasyon tekniklerindeki gelişmelerin bu kayıpları azaltması beklenmektedir (Komakine, 1985).

### 3.7. Farklı Çalışma Maddelerinin Motor Performansına Etkisi

Stirling motorları değişik çalışma maddeleri ile çalışabilme özelliğine sahiptir. Sistemde herhangi bir kaçak olmadığı takdirde, içerideki basınçlı çalışma maddesini uzun süre muhafaza edebilirler. Optimum şarj basıncını koruyabilmek ve sistemdeki kaçakları telafi edebilmek için küçük bir pompa ile sisteme çalışma basıncı takviyesi yapan motorlar da mevcuttur. Çalışma maddelerinin ısı iletim katsayıları farklı olduğu için, sistemdeki ısı transferini ve akış kayıplarını etkilemektedir.



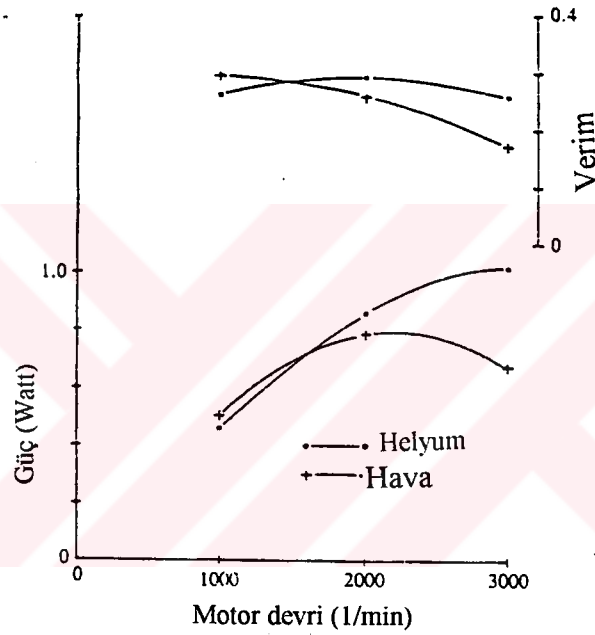
Çalışma maddesinin özelliği iki sebepten dolayı önem taşımaktadır. Bunlardan birincisi ısı transferi, ikincisi de sürtünmeden dolayı meydana gelen kayıplardır. Soğutucu, ısıtıcı ve regeneratördeki ısı transferi söz konusu olduğunda ısı kapasitesi ve ısı iletimi önem arz etmektedir. Akıştaki sürtünme kaybı, çalışma maddesinin yoğunluğu ile de alakalıdır. Bu kayıp;  $\rho V^2/2$  ile ifade edilir. Burada  $\rho$  çalışma maddesinin yoğunluğu,  $V$  ise hızıdır. Philips 1-98 test motorunun araştırma sonuçları, çalışma maddesi olarak hidrojen kullanılmasının, helyum ve havaya nazaran daha az sürtünmeye sebebiyet verdiğini göstermiştir. Dolayısıyla, çalışma maddesi olarak hidrojen kullanıldığında daha fazla güç çıktısı alınmaktadır. Şekil 3.14' de, silindir başına 165 kW' lık (225 hp/cyl) güç veren Philips motorunda değişik çalışma maddeleri kullanıldığında elde edilen özgül güce bağımlı toplam verim eğrileri görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, motorda hava kullanıldığında, motor devri 400 d/d' ya ulaştığında özgül güç maksimum değerine ulaşmakta, ısı verim  $\sim 28\%$  e düşmektedir. Hidrojen kullanıldığı takdirde ise, motor devri 1500 d/d' ya ulaştığında özgül gücün 70 hp/lt' ye ulaştığı görülür (Michels, 1976).



Şekil 3.15. Farklı Çalışma Maddelerinin Motor Verimine ve Özgül Güce Etkisi (Walker, 1980).

Hava, yoğunluğu helyum ve hidrojene göre daha fazla olduğu için sızıntı problemleri açısından ele alındığında, daha az sızıntı meydana getireceği için tercih sebebidir. Ayrıca helyum veya hidrojen kullanıldığında regeneratör tasarımlarının maliyeti iki

katına çıkmaktadır. Sunpower ve Ross A.'nin motor tasarımları, hava şarjlı bir motorun düşük ortalama basınçlarda iyi termodinamik optimizasyonlarla başarılı sonuçlar verdiğini göstermiştir. Şekil 3.16' da, helyum ve hava kullanılan bir motorun, motor devrine göre güç ve verim ilişkisi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, helyum ve hava arasında meydana gelen güç ve verim değişimi düşük devirlerde çok azdır. 3000 1/min devirde ise güçte % 35, verimde ~ % 9 artışla daha önemli hale gelmektedir (Rix, 1996).



Şekil 3.16. Helyum ve Hava Kullanılan Stirling Motorunda Güç ve Verim İlişkisi

Düşük çalışma basınçlı motorlarda yüksek ısı transfer kayıpları meydana gelmektedir. Söz konusu kayıp, monatomik gaz olan helyumda, diatomik gaz olan havaya göre iki kat daha fazla olmaktadır (West, 1986).

### 3.8. Stirling Motorlarında Termodinamik Analiz Yöntemleri

Pratik Stirling çevrimi iki eşsıcaklık ve iki eşhacim işleminden oluşan ideal Stirling çevriminden büyük farklılıklar arz etmektedir. Bu sebeple tasarım aşamasında termodinamik hesaplar yapılırken daha gerçekçi yaklaşımlar kullanılmaktadır. Aşağıda stirling motorlarında kullanılan termodinamik analiz yöntemleri kısaca açıklanmıştır.

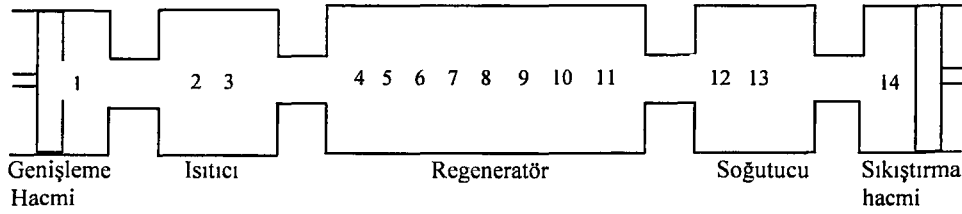
### 3.8.1. Nodal analiz

Stirling motorlarında nodal analizlerinin öncüsü Thedor Finkelstein' dir. Ancak, daha sonra bu programdan bağımsız bir çok nodal analiz programı geliştirilmiştir. Finkelstein' in hazırladığı bu bütün sistem kendi içinde alt bölümlere ayrılmış, burada genişleme hacmi bir, ısıtıcı üç, regeneratör beş, soğutucu üç ve genişleme hacminin bir bölümden oluştuğu kabul edilmiştir. Bu analiz yönteminde temel olarak izotermal işlemler kabul edilmiş ve rejenerasyon, pompalama kayıpları, kararsız hız ve sıcaklık şartları ve sistem kaçakları elimine edilmiştir. Analiz yönteminde sadece önceki özelliklere yer verilmemiş aynı zamanda sistem duvarlarının değişik kısımlarında sıcaklık dalgalanmalarına, pistondan sızan çalışma maddesi kayıplarına, hız ve yük değişimlerine ve ilk hareketlenmeye de yer verilmiştir (Finkelstein, 1967).

Diğer bir nodal analiz programı Shock tarafından hazırlanmış, örnek model serbest pistonlu bir stirling motorunda uygulanmıştır. Bu modelde motor yirmiyedi kısma ayrılmıştır. Genişleme hacmi bir, ısıtıcı altı, regeneratör onbir, soğutucu altı bölüme ayrılmıştır. Yirmibeşinci bölüm çalışma boşluğunu, yirmialtı ve yirmiyedinci bölüm motorda piston ve yer değiştirme pistonunun hareketini sağlayan gaz yaylanmalarını oluşturan boşluklardır (Shock, 1978). Nodal analiz programlarında Termodinamiğin Birinci Yasası, kütlenin korunumu prensibi ve ideal gaz denklemi kullanılarak eşitlikler diferansiyel denklem formunda yazılmış, ısı transferi ve aerodinamik sürtünmeler için amprik formüller verilmiştir. Bu eşitlikler bir boyutlu hale dönüştürülerek basitleştirilmiştir. Motorda basınç, sıcaklık ve akışkan kütlesinin dağılımı için belirli zaman aralığında verilen şartlarda eş zamanlı olarak çok küçük bir zaman aralığında nümerik çözümle sonuçlandırılmıştır. Genelde bütün nodal analiz programları birbirine benzemektedir.

Bu tezde imal edilen motorun tasarım detayları Karabulut tarafından geliştirilen bir termodinamik simülasyon programı kullanılarak çıkartılmıştır. Termodinamik simülasyon programı EK-2' de verilmiştir. Tasarlanan motor beş hacimde ele alınmış

ve termodinamik inceleme yapılan bölgeler şekil 3.17' de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Termodinamik İncelemesi Yapılan Stirling Motoru

Bu analiz metodunda aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- 1 Termodinamik açıdan her hücre bir açık sistem olup periyodik şartlarda madde giriş ve çıkışına sahiptir.
- 2 Çalışma maddesinin yer değiştirmesi esnasında hidrodinamik sürtünmelerden doğan basınç farklılıkları termodinamik basınca kıyasla ihmal edilebilir.
- 3 Regeneratörün katı kısmında sürekli lineer ve değişmeyen bir sıcaklık dağılımı var olup analiz regeneratörün katı kısmının ısı balansını ihtiva etmektedir.
- 4 Çalışma maddesi hava olup ideal gaz kabul edilmiştir.
- 5 Sistem içerisindeki toplam kütle zamanla değişmemektedir.
- 6 Isıtıcı ve sıcak silindirin cidarları sıcak kaynak sıcaklığında, soğutucu ve soğuk silindirin cidarları soğuk kaynak sıcaklığındadır.
- 7 Isıtıcı, soğutucu ve regeneratördeki hacimler sabit, sıcak ve soğuk silindirlerdeki hacimler krank açısı ile değişmekte olup yaklaşık olarak,

$$V_C = V_D + \frac{1}{2} V_S [1 + \cos(\theta - \phi)] \quad (3.28)$$

$$V_H = V_D + \frac{1}{2} V_S [1 + \cos(\theta)] \quad (3.29)$$

bağıntıları ile hesaplanabilir. Basınç ,sıcaklık ve yoğunluk olmak üzere üç tane bilinmeyen mevcut olup bunların belirlenmesinde kullanılacak olan bağıntılar, ideal

gazların hal denklemi, kütlenin korunumu ve enerjinin korunumu prensipleri olup sırası ile;

$$p = \rho RT \quad (3.30)$$

$$m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n = m_t \quad (3.31)$$

$$dQ - dW + dH_{giriş} - dH_{çıkış} = dU \quad (3.32)$$

şeklinde verilir. Basıncın her yerde aynı olduğu dikkate alınarak denklem (3.30) ve (3.31)' in birlikte değerlendirilmesi ile

$$p = \frac{m_t R}{\frac{V_1}{T_1} + \frac{V_2}{T_2} + \frac{V_3}{T_3} + \dots + \frac{V_n}{T_n}} \quad (3.33)$$

eşitliği elde edilir. Denklem (3.32) ile verilen enerjinin korunumu prensibi

$$h_i A_i (T_{wi} - T_i) dt - p dV_i + (dH_{giriş} - dH_{çıkış}) = m_i C_v dT_i + C_v T_i dm_i \quad (3.34)$$

şeklinde düzenlenebilir. Son eşitlikteki  $(dH_{giriş} - dH_{çıkış})$  terimi elemanın sınırlarından giren ve çıkan enerjiyi temsil etmekte olup aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$(dH_{giriş} - dH_{çıkış})_i = C_p [(m_1^t + m_2^t + \dots + m_{i-1}^t) -$$

$$(m_1^{t+\Delta t} + m_2^{t+\Delta t} + \dots + m_{i-1}^{t+\Delta t})] \left[ \frac{T_{i-1}}{T_i} \right] +$$

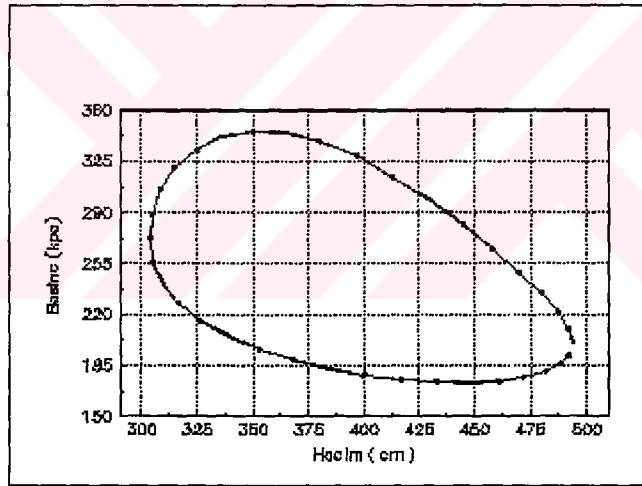
$$C_p [(m_{i+1}^t + m_{i+2}^t + \dots + m_n^t) -$$

$$(m_{i+1}^{t+\Delta t} + m_{i+2}^{t+\Delta t} + \dots + m_n^{t+\Delta t})] \left[ \frac{T_i}{T_{i+1}} \right]$$

son eşitlikte bulunan birinci terim eleman sol taraftan giren veya çıkan enerjiyi ikinci terim sağ taraftan giren veya çıkan enerjiyi göstermektedir. Sütun matriks içerisinde yazılan sıcaklıklardan üstte bulunanlar soldan sağa akışta, altta bulunanlar sağdan sola akışta kullanılacaktır. Denklem (3.34) 'ün nümerik işlemlerde kullanılan şekli aşağıdaki gibidir (Karabulut, 1997);

$$\Delta T_i = [h_i A_i (T_{wi} - T_i) \Delta t - (m_i^{t+\Delta t} - m_i^t) C_v m_i^t] C_v T_i + (dH_{giriş} - dH_{çıkış})_i - P \Delta V_i / C_v m_i \quad (3.35)$$

Bu analiz metodu kullanılarak tasarlanan ve programla elde edilen P-V diyagramı şekil 3.18' de görülmektedir.



Şekil 3.18. Bilgisayar programı ile elde edilen PV diyagramı

Bu program ile elde edilen stirling motoruna ait değer tabloları Tablo 3.1' de verilmiştir.

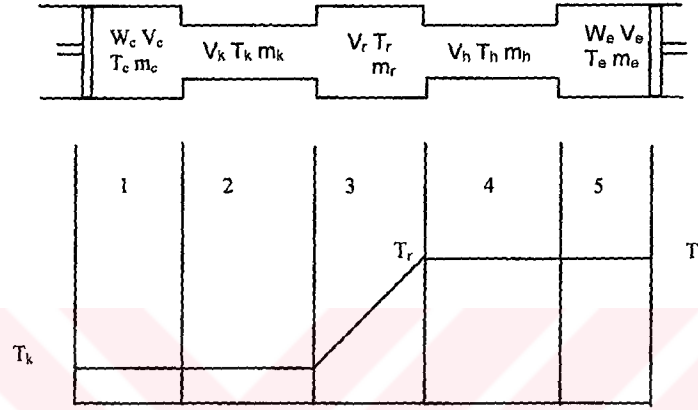
Tablo 3.1. Hesaplanan ve Ölçülen Motor Değerleri

| ÖZELLİKLER                                | PROGRAM İLE ELDE EDİLEN | ÖLÇÜLEN   |
|-------------------------------------------|-------------------------|-----------|
| Motor tipi                                | V ( $\alpha$ )          |           |
| Sıcak silindir hacmi ( $V_E$ )            | 311 cm <sup>3</sup>     |           |
| Soğuk silindir hacmi ( $V_H$ )            | 311 cm <sup>3</sup>     |           |
| Toplam ölü hacim ( $V_D$ )                | 290,57 cm <sup>3</sup>  |           |
| Silindir çapı (D)                         | 61 mm                   |           |
| Piston kursu (L)                          | 65 mm                   |           |
| Faz açısı ( $\phi$ )                      | 90°                     |           |
| Soğuk kaynak sıcaklığı ( $T_C$ )          | 350 °K                  | 318 K     |
| Sıcak kaynak sıcaklığı ( $T_H$ )          | 1273 °K                 | 953 K     |
| Maksimum motor devri ( $n_{max}$ )        | 1200 1/min              | 784 1/min |
| Carnot çevrimi ( $\eta_C$ )               | * % 72                  | % 0.66    |
| Net İş ( $W_{net}$ )                      | 245 J                   |           |
| Motor verimi ( $\eta$ )                   | % 11                    |           |
| Şarj basıncı ( $P_{şarj}$ ), (manometrik) | 2 bar                   | 2 bar     |
| Maksimum çevrim basıncı ( $P_{max}$ )     | *3,048 bar              |           |
| Ortalama çevrim basıncı ( $P_{ort}$ )     | *2.810 bar              |           |
| Çalışma maddesi                           | Hava                    |           |
| Motor gücü (N)                            | 500 watt                | 64,9 watt |
| Sıkıştırma oranı ( $\epsilon$ )           | *1,65                   |           |
| Minimum hacim ( $V_{min}$ )               | 290,57 cm <sup>3</sup>  |           |
| Maksimum hacim ( $V_{max}$ )              | 480,53 cm <sup>3</sup>  |           |

\*Teorik hesaplama sonucu elde edilen değer

### 3.8.2 İzotermal analiz

Stirling motorlarının icadından 50 yıl sonra Gustav Schmidt tarafından geliştirilmiştir (Schmidt, 1879). Bu analiz Martini tarafından daha kapsamlı ele alınarak bilgisayar simülasyonu yardımı ile beş hacimli model geliştirilmiştir. Beş hacimli şematik model Şekil 3.19' da görülmektedir.



Şekil 3.19. Beş Hacimli Model Üzerinde Stirling Motorunun Termal Analizi

İzotermal analizde aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- 1) Hacim değişimleri sıkıştırma ve genişleme bölgesinde üniormdur.
- 2) Çalışma maddesi regeneratöre giriş ve çıkış sıcaklıkları üniormdur ve zamanla değişmez.
- 3) Akış tamamen sürtünmesizdir.
- 4) Çevrim esnasında çalışma maddesi kütlesi sabittir ve sistemde kaçaklar mevcut değildir.
- 5) Sıkıştırma ve genişleme hacimleri bağımsız değişken ( $\phi$ )' nin her döneminde ayrı ayrı tarif edilmiştir.
- 6) Çalışma maddesinin özgül hacmi  $v_s$ ' de sıcaklık ve anlık basınçlar özgül olarak tarif edilmiştir. Motor devri sabit, ideal gazların hal denklemlerinin kullanıldığı, kinetik ve potansiyel enerjilerinin ihmal edildiği kabul edilmiştir (Urieli and Berchowitz).



İzotermal hesaplamalarda motor analizleri için aşağıdaki denklemlerden faydalanılır:

Basınç,

$$P = MR \left[ \frac{V_c}{T_k} + \frac{V_k}{T} + \frac{V_r \ln(T_h / T_k)}{T_h / T_k} + \frac{V_h}{T_h} + \frac{V_e}{T_e} \right]^{-1} \quad (3.36)$$

Sistemden atılan ısı,

$$Q_c = W_c = \oint p \frac{dV_c}{d\theta} d\theta \quad (3.37)$$

Sisteme sürülen ısı,

$$Q_e = W_e = \oint p \frac{dV_e}{d\theta} d\theta \quad (3.38)$$

Yapılan net iş,

$$W = W_c + W_e \quad (3.39)$$

Termik verim,

$$\eta = \frac{W}{Q_c} \quad (3.40)$$

denklemleri verilmiştir.

Motorda kullanılan döndürme mekanizması tipine bağlı olarak değişen  $\frac{dV_c}{d\theta}$ ,  $\frac{dV_e}{d\theta}$  hacim türevlerinin bilinmesi gerekir (Yücesu, H,S).

### 3.8.3. Schmidt analizi

Stirling motorlarının klasik analizi 1871 yılında Schmidt tarafından yapılmıştır. Bu analiz yönteminde aşağıdaki kabuller yapılmıştır (Walker, 1980).

1. Regeneratif işlem idealdir,
2. Anlık basınçlar sistemde çevrim boyunca sabittir,
3. Çalışma maddesi  $Pv=RT$  ideal gazların hal denklemine uyar,
4. Sistemde gaz kaçaqları yoktur ve çalışma maddesi kütlesi sabittir,
5. İş hacminde hacim değişimi sünicoidal olmaktadır,
6. Isıtıcıda çevrim boyunca sıcaklık değişimi yoktur,
7. Silindir cidar ve piston sıcaklıkları çevrim boyunca sabittir,
8. Silindir içerisindeki karışım ideal gazdır,
9. Ölü hacimdeki çalışma maddesinin sıcaklığı çevrim boyunca sabittir,
10. Motor hızı sabittir,
11. Kararlı durum şartları oluşturulmuştur,

Her ne kadar Schmidt analizinde sıkıştırma ve genişleme işlemlerinin sabit sıcaklıkta olduğu kabul edilmişse de gerçekte bu işlemler adyabatiğe yakın politropik işlemlerdir. Bu analiz çok kullanışlı olmasına rağmen aşırı idealleştirilmiştir (Koca, 1997). Schmidt eşitlikleri analitik yöntemle çözülmüştür. Uygun bir yorumlama yapılarak Schmidt teorisi yaklaşımları motor dizaynları için faydalı bir yöntem olabilir (Yücesu, 1996). Schmidt analizi Martini tarafından geliştirilerek beş hacimli bilgisayar simülasyonu oluşturulmuştur. Aşağıda Schmidt analizinde kullanılan temel eşitlikler verilmiştir.

Ölü hacim oranı

$$X = \frac{V_D}{V_E} \quad (3.41)$$

Sıcaklık oranı

$$\tau = T_C/T_H \quad (3.42)$$

Süpürme hacmi oranı

$$K = \frac{V_C}{V_H} \quad (3.43)$$

Düzeltilmiş ölü hacim,

$$S = 2X\tau / \tau + 1 \quad (3.44)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{(\tau^2 + K^2 + 2\tau K \cos \alpha)}{(\tau + K + 2S)}} \quad (3.45)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{(K \sin \alpha)}{(\tau + K \cos \alpha)} \quad (3.46)$$

$$\frac{p_{\max}}{p_{\min}} = \frac{(1 + \delta)}{(1 - \delta)} \quad (3.47)$$

$$P_{\text{ort}} = P_{\max}((1 - \delta)/(1 + \delta))^{1/2} \quad (3.48)$$

Bir çevrimde içeri sürülen ısı miktarı ( $Q_e$ );

$$Q_e = \delta \frac{\pi P_{\text{ort}} V_E \sin \theta}{1 + \sqrt{1 - \delta^2}} \quad (3.49)$$

Bir çevrimde sistemden atılan ısı miktarı ( $Q_c$ ) ise;

$$Q_c = \delta \frac{\pi P_{ori} V_C \sin(\theta - \alpha)}{1 + \sqrt{1 - \delta^2}} \quad (3.50)$$

Buradan net iş ( $W_{net}$ );

$$W_{net} = Q_{net} = Q_e - Q_c \quad (3.51)$$

Sistem verimi ( $\eta$ );

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_e} \quad (3.52)$$

Motor gücü ( $P_e$ )

$$P_e = W_{net} \cdot f \quad (3.53)$$

formülleri ile hesaplanabilir (Walker, 1980)

### 3.9. Motorun Boyutlandırılması

Stirling motorlarının tasarımında, motorun kullanım amacının, bu amacı gerçekleştirecek motor gücünün, motoru hareket ettirmek için hangi enerji türünün kullanılacağını, motor tipinin ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ), alt ve üst çalışma sıcaklıklarının ve motorda kullanılacak çalışma maddesinin türünün önceden bilinmesi gerekmektedir (Yücesu, 1997).

### 3.9.1. Piston çapı ve kurs boyunun belirlenmesi

Kullanım ihtiyacına göre belirlenen motor gücü ve motor devrine bağlı olarak piston çapı belirlenir. Aşağıda tasarlanan motorun özellikleri ve elde edilen sonuçlar hesaplamalar ile gösterilmiştir:

$$\begin{aligned} P & : 500 \text{ W} \\ N & : 1200 \text{ 1/min (20 1/s)} \\ W_{\text{net}} & : 19.8245 \text{ J} \end{aligned}$$

Burada;

$$\begin{aligned} P & : \text{Motor gücü (W)} \\ N & : \text{Motor devri (1/min)} \\ W_{\text{net}} & : \text{Bilgisayar programı ile elde edilen net iş ( J ) dir.} \end{aligned}$$

Piston çapını belirlemek için süpürme hacmini ( $V_s$ ) 1 lt, ortalama çalışma basıncını ( $P_{\text{ort}}$ ) ise 1 bar kabul edelim.

1 litrelik hacimde bir çevrimde meydana gelen net iş:

$$W_{\text{net}} = P_{\text{ort}} \cdot V_s \quad (3.54)$$

olduğundan,

$$W_{\text{net}} = 1^{05} \cdot 1 \cdot 0,001$$

$$W_{\text{net}} = 100 \text{ j/çevrim bulunur.}$$

100 J' luk iş, 0.001 m<sup>3</sup> süpürme hacminde elde ediliyorsa, 19.8245 J' luk iş ne kadarlık süpürme hacminde elde edilebilir? orantısı kurulur.

Buna göre;

$$V_s = 1.9824 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ bulunur.}$$

Süpürme hacminin piston çapı ile ilişkisi;

$$V_s = \frac{\pi D^2}{4} \cdot L_p \quad (3.55)$$

yazılabilir,

$D_p = L_p$  olarak kabul edildiğinde formülü yeniden düzenlersek;

$$V_s = \frac{\pi D_p^2}{4} \cdot D_p = \frac{\pi D_p^3}{4}, \quad (3.56)$$

Buradan  $D_p$ ' yi çekersek;

$$D_p = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_s}{\pi}} \quad (3.57)$$

olur.

Değerleri yerine yazdığımızda  $D_p = 63 \text{ mm}$  bulunur.

İmalat için piston çapı 61 mm, kurs boyu 65 mm olarak seçilmiştir.

Krank mili yarıçapı ise;

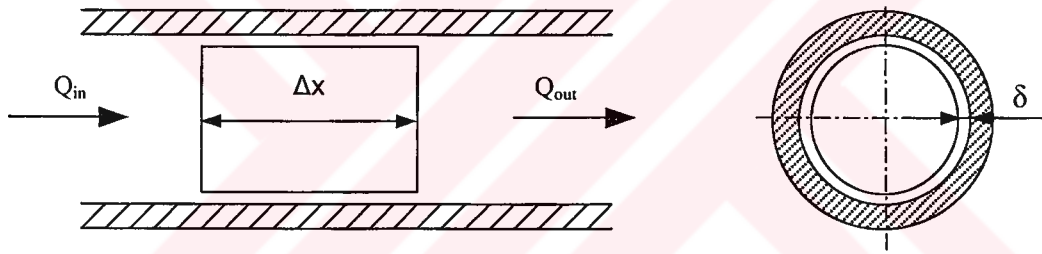
$$L_p = 2 \cdot R_{krank} \quad (3.58)$$

$$R_{krank} = \frac{L_p}{2} = \frac{65}{2} = 32.5 \text{ mm olarak bulunur.}$$

İmalat için krank mili yarıçapı 34 mm olarak seçilmiştir.

### 3.9.2. Isıtıcı ve Soğutucunun Isı Transferi Analiz Hesapları

Şekil 3.20' de incelenen yer değiştirme silindiri görülmektedir.



Şekil 3.20. İncelenen Yer Değiştirme Silindiri

Sabit hacim olayında giren kütle ile çıkan kütle birbirine eşittir. I. Kanundan;

$$Q_{in} = Q_w + Q_{out} \quad (3.59)$$

$$Q_w = h \cdot A \cdot (T - T_w) \quad (3.60)$$

Burada;  $h$  = Isı taşınım katsayısı ( $W/m^2 \cdot ^\circ K$ )

$A$  = Gazın geçiş yüzey alanı ( $m^2$ )

$T_w$  = Duvar sıcaklığı ( $^\circ K$ )

dır. Denklem yeniden düzenlenirse;

$$Q_w = 2h2\pi r \Delta x (T - T_w) \quad (3.61)$$

olur.

Gazın incelenen mecradan birim zamandaki geçiş hızı

$$\bar{u} = m/\rho A \quad (3.62)$$

ile ifade edilir. (3.58) denklemi (3.55)' de yerine yazılırsa;

$$T c_v \bar{u} \rho 2\pi \delta = 4h\pi r \Delta x (T - T_w) + \left(T + \frac{\partial T}{\partial x} \Delta x\right) \bar{u} \rho 2\pi r \delta c_v \quad (3.63)$$

olur.

(3.59) denklemi düzenlendiğinde;

$$\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{2h}{\bar{u} \rho \delta c_v} T = \frac{2h}{\bar{u} \rho \delta c_v} T_w \quad (3.64)$$

denklemi elde edilir.

Duvar sıcaklığının ( $T_w$ ) lineer olarak değiştiği kabul edilirse;

$$T_w = T_H - \frac{T_H - T_C}{L} x \quad (3.65)$$

şeklinde ifade edilir. (3.61) denklemi (3.60) denkleminde yerine yazıldığında;

$$\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{2h}{\bar{u} \rho \delta c_v} (T - T_H) = -\frac{2h}{\bar{u} \rho \delta c_v} * \frac{T_H - T_C}{L} x \quad (3.66)$$



olur.

Sınır şartı  $x=0$ ,  $T=T_H$  olduğundan;

$$T=T_H + \frac{R_2}{R_1^2} e^{-R_1 x} + \frac{R_2}{R_1} x - \frac{R_2}{R_1^2} \quad (3.67)$$

elde edilir. Burada;

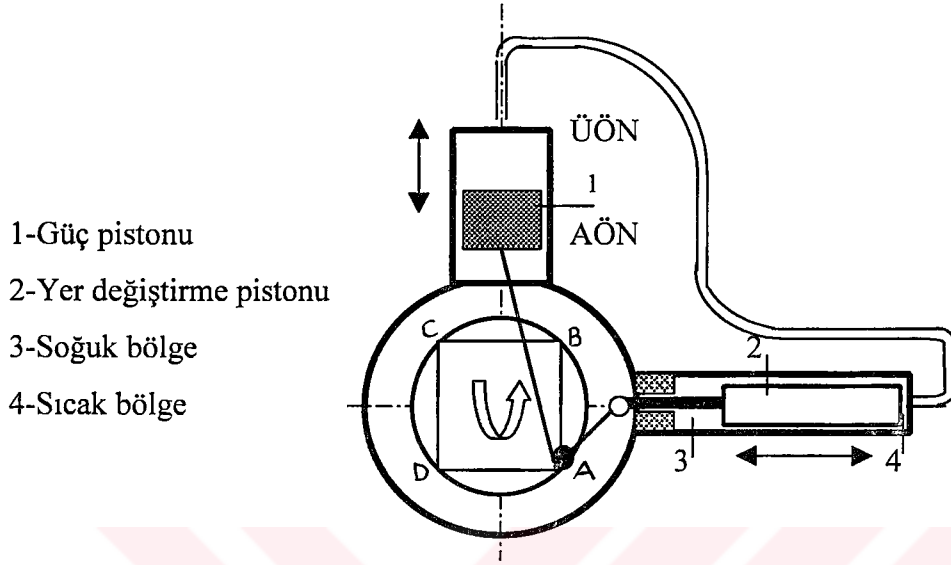
$$R_1 = \frac{\Delta t 2 \pi r 2 h}{m c_v} \quad (3.68)$$

$$R_2 = \frac{T_C - T_H}{L} R_1 = \frac{T_C - T_H}{L} \frac{\pi r h}{n m c_v} \quad (3.69)$$

şeklinde ifade edilir.

Yer değiştirme pistonu çalışma maddesini soğuk bölgeden sıcak bölgeye doğru yer değiştirme işlemini  $\Delta t$  zamanında yapar. Bu zamana körükleme zamanı denir. Körükleme zamanı Şekil 3.21 üzerinde kısaca açıklanmıştır.

Krank milinin A noktasından, B noktasına doğru hareket ettiğini düşünelim. Bu durumda yer değiştirme pistonu hareketsizdir. Güç pistonu ise AÖN' dan ÜÖN' ya doğru hareket ederek önünde bulunan çalışma maddesini sıkıştırır. Bu durum PV diyagramında 1-2 arasındır. Krank mili B noktasından C noktasına doğru hareket ettiğinde ise yer değiştirme pistonu bulunduğu üst noktadan alt noktaya doğru hareket eder. BC arasını  $\Delta t$  zamanında alır. Bu zamana körükleme (deplasman) zamanı denir. Bu durumda soğuk bölgedeki çalışma maddesini sıcak bölgeye aktarır. Güç pistonu bu durumda hareketsiz durumda yön değiştirme için beklemektedir. PV diyagramında 2-3 noktaları arası bu durumu ifade eder.



Şekil 3.21. Körükleme (deplasma) zamanı

Basıncı ve sıcaklığı artan çalışma maddesi güç pistonu üzerine etkiyerek krank milinin C noktasından D noktasına doğru hareket etmesini sağlar. Bu durumda motordan iş elde edilir. Yer değiştirme pistonu bu durumda hareketsizdir ve PV diyagramında 3-4 noktaları ile ifade edilir. Krank mili D noktasından A noktasına hareket ettiğinde ise; Yer değiştirme pistonu hareket ederek çalışma maddesini sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğru akışını sağlar. Bu durumda güç pistonu hareketsizdir. PV diyagramında bu durum 4-1 noktaları arasındır.

Körükleme zamanı  $\Delta t'$  yi şu şekilde yazabiliriz:

$$\Delta t = \text{Çevrim süresi} \cdot 1/4 \quad (3.70)$$

Tasarlanan motorun birim zamandaki devri  $n=20$  1/s olduğuna göre;

$$\Delta t = \frac{1}{4n} \quad (3.71)$$

$$\Delta t = \frac{1}{4n} \quad (3.71)$$

yazılır. Değerler yerine yazıldığında  $\Delta t = 0.0125$  s bulunur.

Denklem 3.64' te körükleme süresi yerine yazılırsa;

$$R_1 = \frac{\pi D h}{2 n m c_c} \quad (3.72)$$

elde edilir.

Yer değiştirme pistonunun birim zamanda süpürdüğü hacim;

$$V_Y = \frac{\pi D_y^2}{4} \cdot R_{krunk} \quad (3.73)$$

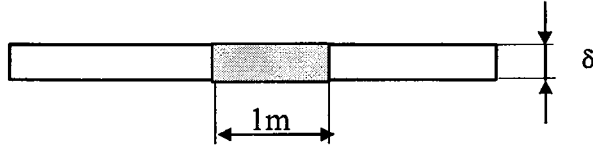
$V_Y = 45,02 \text{ cm}^3$  bulunur. Buradan;

$$\bar{u} = \frac{V_y}{A_y} \quad (3.74)$$

$A_y = \pi D_y \delta = 0,659 \text{ cm}^2$  olduğundan;

$u = 54,65 \text{ m/s}$  bulunur.

Şekil 3.20' deki yer değiştirme pistonu ile silindiri arasından çalışma maddesi geçerken meydana gelen basınç düşmesi hesaplanarak, akışın gerçekleştiği mecradaki akış kesiti Şekil 3.22' den incelenecek olunursa;



Şekil 3.22. Akış Kesiti

Akış kesitinin  $(\delta \cdot 1) \text{ m}^2$  lik bir parçasından geçen debi;

$$Q = \frac{1}{12\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} - \rho g \cos \beta \right) \delta^3 \quad (3.75)$$

Yatay plaka olarak ele alındığında  $\cos \beta = 1$  olur. Bu durumda;

$$\Delta P = \frac{-12\mu L Q}{\delta^3} \quad (3.76)$$

Burada;  $\mu$ : Dinamik viskozite ( $\text{N.s/m}^2$ )

L: Mecra uzunluğu (m),

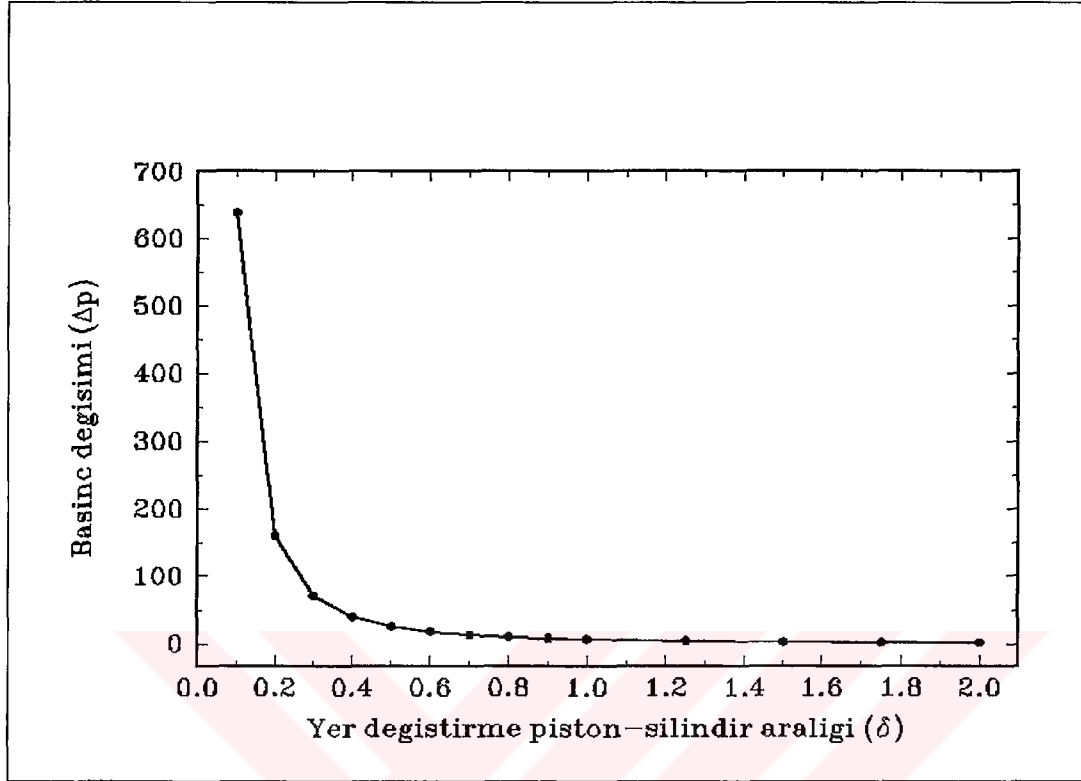
$\delta$  : Yer değiştirme pistonu ile silindiri arasındaki boşluk (m),

Q: Hacimsel debi ( $\text{m}^3/\text{kg}$ ),

$Q = \bar{u} \cdot A$  olduğundan:

$$\Delta P = \frac{-12\mu L \bar{u} \delta}{\delta^3} \quad (3.77)$$

olarak belirlenir. EK-3' de verilen bilgisayar programı yardımıyla  $\Delta P$  hesaplanarak Şekil 3.23' de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 3.23 Yer Değiştirme Pistonu İle Silindiri Arasındaki Mesafe Değişimine Bağlı Basınç Değişimi

Basınç kaybını azaltmak için yer değiştirme pistonu ile silindiri arasındaki boşluk  $\delta$  artırılabilir. Ancak, sistemdeki ölü hacim artması, ısı transferinin kötüleşmesi ve çalışma maddesinin sıcak kaynak ve soğuk kaynak arasındaki sıcaklık farkının  $\delta$  ile ters orantılı olması sebebiyle belirli bir noktada tutulmasını gerektirmektedir. İmalat esnasında  $\delta=1$  mm olarak verilmiştir. Bu aralıkta basınç kaybı  $\Delta P= -6390$  Pa olmaktadır.

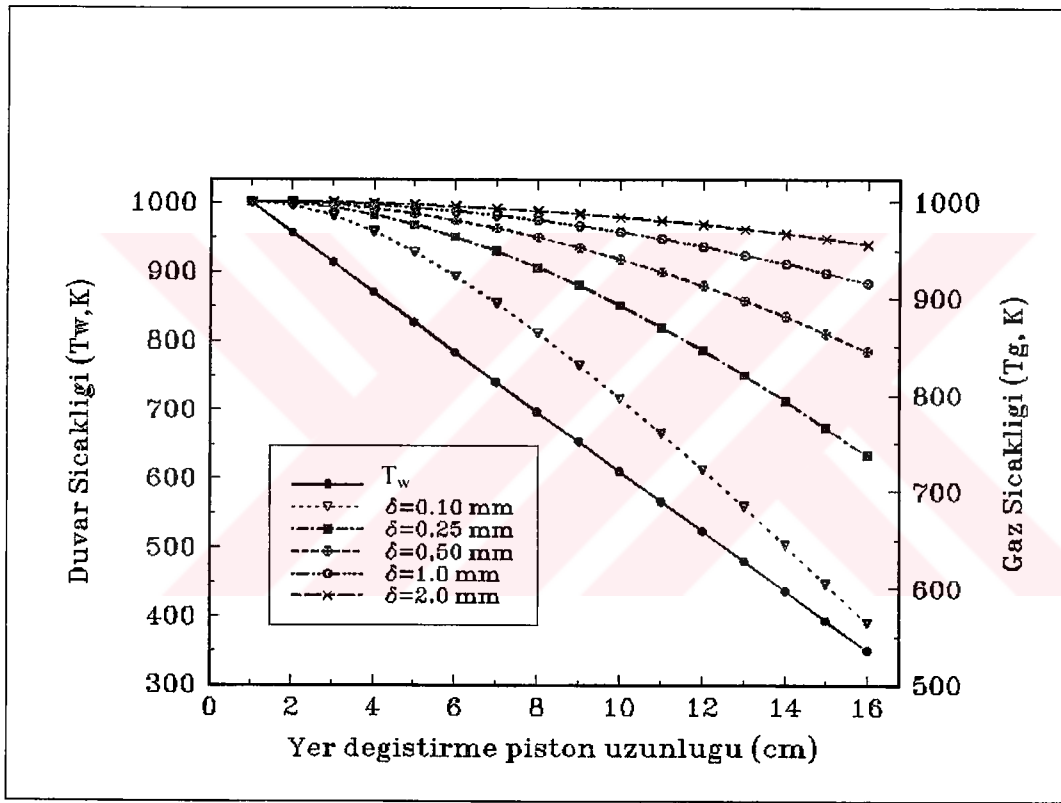
Basınç kaybının meydana getirdiği negatif iş hesaplanacak olursa;

$$W_{\text{neg}} = - \Delta P \cdot V_y \quad (3.78)$$

olarak yazılabilir. Elde edilen değerler yazılacak olursa;

$W_{neg} = -0,287 \text{ J}$  olarak bulunur.

EK-2' de verilen bilgisayar programı ile elde edilen iş  $W = 21.95697 \text{ J}$  olarak bulunmuştur. Meydana gelen kayıp iş bu değerle kıyaslandığında ihmal edilebilecek şekildedir. Şekil 3.24' de ise yer değiştirme pistonu uzunluğuna bağlı olarak geçiş kesitine göre gaz sıcaklığı ile duvar sıcaklığı değişimi görülmektedir.



Şekil 3.24 Yer Değiştirme Pistonu Uzunluğuna Bağlı Olarak Değişik Geçiş Kesitlerindeki Gaz Sıcaklığı İle Duvar Sıcaklığı Değişimi

Şekilde görüldüğü gibi duvar sıcaklığı ve gaz sıcaklığı yer değiştirme pistonu uzunluğuna bağlı olarak lineer olarak değişmektedir. Ancak; yer değiştirme pistonu ile silindiri arasındaki mesafe (geçiş kesiti,  $\delta$ ), azaldıkça geçiş kesitinde ısı iletimi iyileştiğinden gaz sıcaklığı duvar sıcaklığına yaklaşmaktadır. Bununla birlikte geçiş kesitinin çok fazla azalması her ne kadar ısı iletimini iyileştirecekse de çalışma maddesinin geçişini zorlaştıracığından kayıp iş (pompalama işi) artacaktır Şekil 3.23.

İmalat durumu ele alındığında geçiş kesitini çok küçültmek yer değiştirme pistonunun merkezlemesini zorlaştırmakta ve sürtünme işi artmaktadır. Geçiş kesitindeki mesafe arttıkça ısı iletimi kötüleştiğinden gaz sıcaklığı, duvar sıcaklığından uzaklaşmaktadır. İmalatta geçiş kesiti 1 mm olarak verilmiştir.

İmal edilen motor 500 W olarak tasarlanmıştır. Ancak denemelerde 69.4 W' lık bir güç elde edilmiştir. Gücün düşük çıkmasının en büyük sebeplerinden bir tanesi geçiş kesiti mesafesidir (δ). Çünkü geçiş kesiti daraldıkça gaz sıcaklığı duvar sıcaklığına yaklaştığından Carnot çevrimine göre sıcak ve soğuk kaynaklar arasındaki mesafe ne kadar fazla olursa çevrim verimi yüksek olacağından motor verimi yüksek çıkar. Bunun yanında geçiş kesiti mesafesi arttıkça sıcak ve soğuk kaynaklar arasındaki fark azalacağından verim düşük çıkmaktadır. İmal edilen motorda % 11 verim elde edilmiştir.

Yer değiştirme pistonunun boyutları, Ek-3' de verilen bilgisayar programı yardımıyla ihtiyaca göre önceden belirlenen motor gücüne göre optimize edilerek belirlenmiştir. Buna göre;

|                                             |           |
|---------------------------------------------|-----------|
| Yer değiştirme pistonu çapı                 | : 4,2 cm  |
| Yer değiştirme pistonu boyu                 | : 14,5 cm |
| Yer değiştirme pistonu silindiri çapı       | : 4,6 cm  |
| Yer değiştirme piston-silindir arası boşluk | : 1 mm    |

olarak imal edilmiştir. Tasarlanan motor gücüne ulaşmak için iki adet yer değiştirme pistonu kullanılmıştır.

### 3.9.3. Motor verimi

Kapalı sistemlerde Termodinamiğin I. Kanunu;

$$dQ = dU + dW$$

(3.79)

ile ifade edilir. Burada Şekil 3.18' de imal edilen motorun net iş alanı (dW) EK-2' de verilen bilgisayar programı yardımıyla hesaplanmıştır.

Sistemin iç enerji değişimi;

$$dU = C_v \cdot dT \quad (3.80)$$

ile hesaplanmaktadır.

Buradan ;

$$U = C_v \cdot (P_1 \cdot V_1 + P_2 \cdot V_2 + P_3 \cdot V_3 + P_B \cdot V_B + P_{R1} \cdot V_{R1}) / R \quad (3.81)$$

eşitliği ile hesaplanabilir.

- Eşitlikte;
- $V_1$  = Sıcak bölge hacmi ( $m^3$ )
  - $V_2$  = Soğuk bölge hacmi ( $m^3$ )
  - $V_3$  = Süpürme hacmi ( $m^3$ )
  - $V_{R1}$  = Regeneratör hacmi ( $m^3$ )
  - $R$  = İdeal gaz sabiti (J/kgK)
  - $C_v$  = Sabit hacimde özgül ısı (J/kgK)

dir.

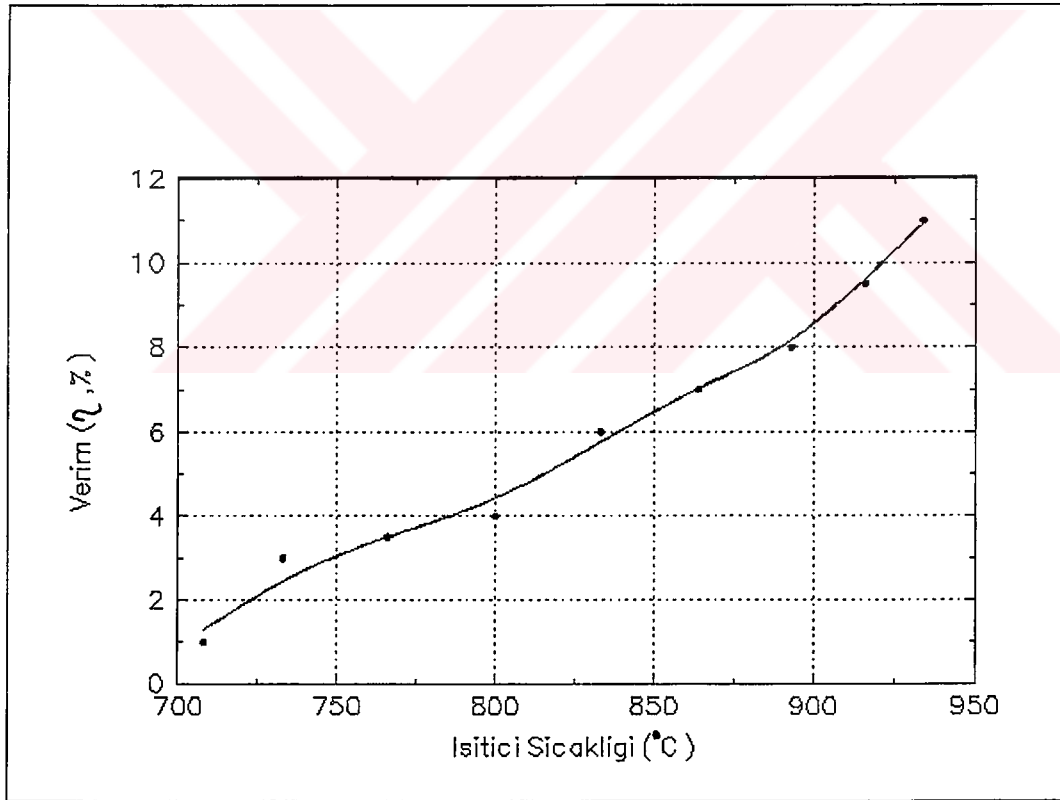
Termodinamiğin İkinci Kanunu' na göre bir termik makinanın verimi;

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_e} \quad (3.82)$$

olarak ifade edilir.



Sistemin iç enerji değişimiyle içeri sürülen ısı EK-3' de verilen bilgisayar programı ile hesaplanmış ve birinci kanundan içeri sürülen ısı bulunmuştur. Buradan motor verimi hesaplanmıştır. Yapılan hesaplama sonucu motor verimi % 11 olarak bulunmuştur. Şekil 3.25' de gaz sıcaklığına göre motor veriminin değişimi görülmektedir. Motor verimi gerçekte düşük olarak çıkmıştır. Stirling motorlarında özellikle helyum ve hidrojen gibi çalışma maddeleri kullanıldığında motor verimi % 40' a kadar çıkabilmektedir. İmal edilen bu motorda motor veriminin düşük çıkmasının nedeni çalışma maddesine yeterince ısı transferinin sağlanamaması, ölü hacimler ve sızdırmazlık problemi olarak gösterilebilir.



Şekil 3.25. Motor Veriminin Isıtıcı Sıcaklığına Bağlı Değişimi

## **4. MATERYAL VE METOD**

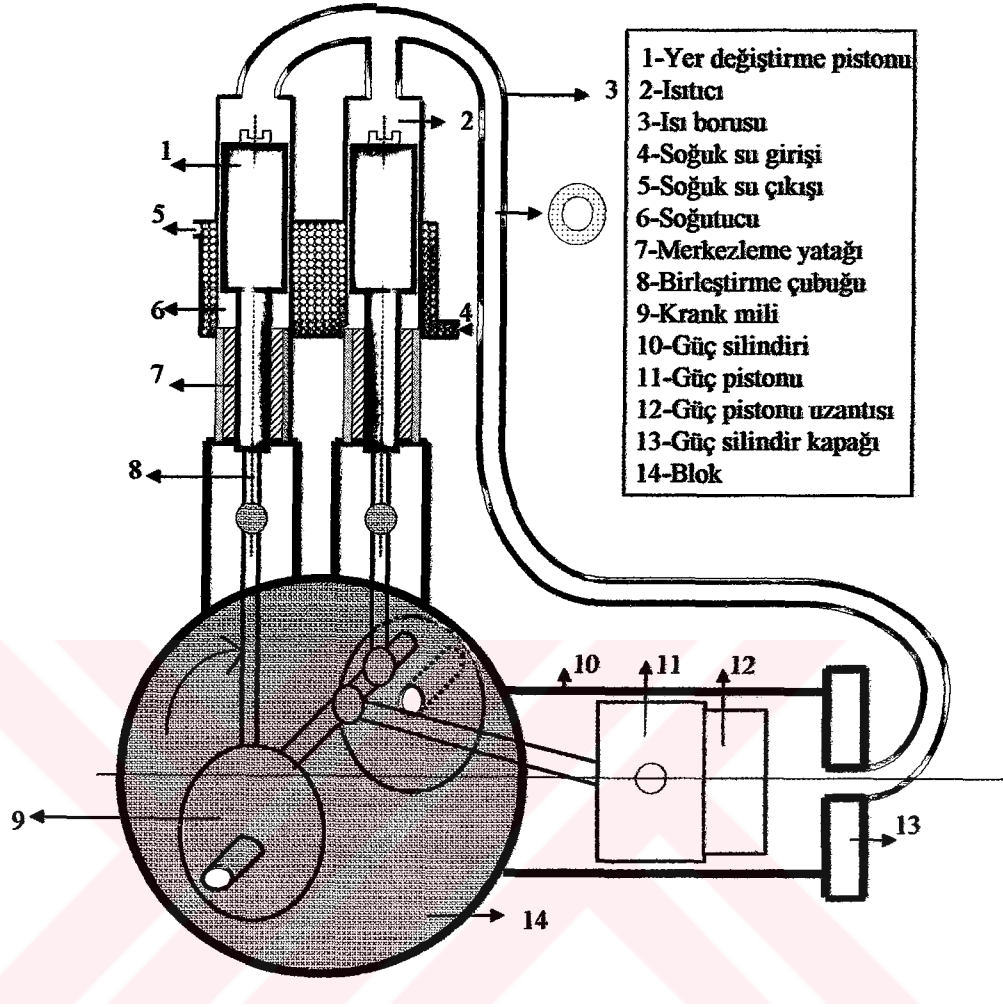
Motorun imalatı G.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi Otomotiv Anabilim dalı atelye ve laboratuvarlarında ve yerli malzemeler kullanılarak yapılmıştır. İmal edilen çift yer değiştirme pistonlu V tipi Stirling motorunun şematik resmi Şekil 4.1' de görülmektedir.

### **4.1. İmal Edilen Motor Parçaları**

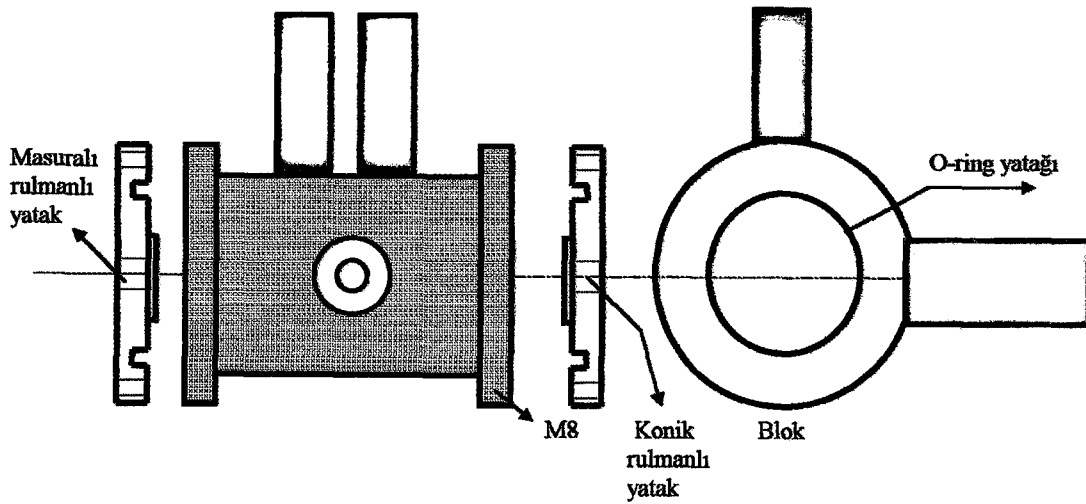
#### **4.1.1. Motor bloğu ve yan sızdırmazlık kapakları**

Motor bloğu çekme dikişsiz borudan imal edilmiştir. Yer değiştirme silindirleri ile güç silindirlerinin ayrı ayrı imalatları yapıldığından blokla birleştirilmeleri ark kaynağı ile yapılmıştır. Silindir eksenleri profilden birbirlerine dik olup, dönme ekseninde aralarında 17 mm kaçıklık mevcuttur. Bloкта krank milini merkezleyen iki adet yan kapak mevcuttur. Blok ve yan kapakları Şekil 4.2' de görülmektedir.

Yan kapaklar işleme kolaylığı ve dayanımı artırmak için alaşımsız makine yapı çeliğinden (Ç 1040) imal edilmiştir. Ön kapakta masuralı rulman yatağı, arka kapak ise konik rulman yatağı mevcuttur. Ön kapak üzerine şarj esnasında masuralı rulman etrafından kaçakları önlemek için bir yağ keçesi bağlanmıştır. Keçe kısmen sürtünmeye sebebiyet vermektedir.



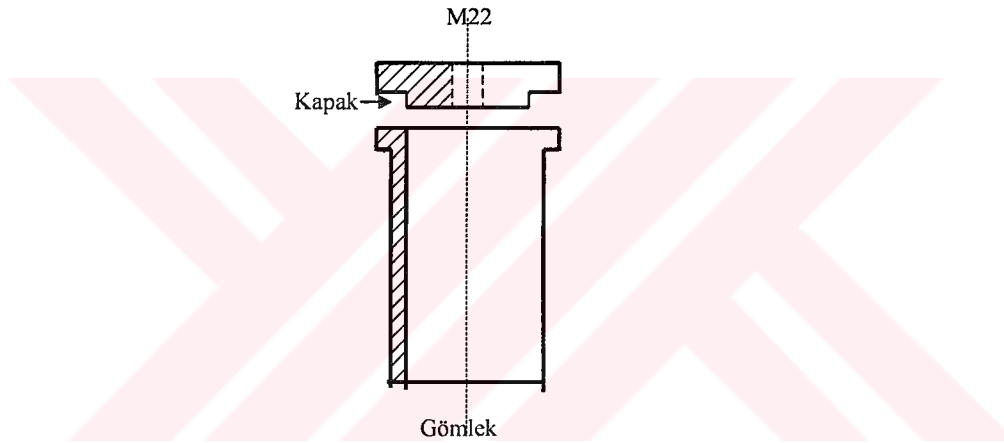
şekil 4.1. İmal Edilen Çift Yer Değiştirme Pistonlu (çift displacer'lı)  
V tipi Stirling Motorun şematik Resmi



şekil 4.2. Motor Bloğu ve Yan Sızdırmazlık Kapakları

#### 4.1.2. Silindir gömleği

Yüksek - grafitli dökme demirden imal edilen silindir gömleği kuru gömlek türündendir. Şekil 4.3' te görüldüğü gibi gömlekte sızdırmazlık sağlamak için faturalı olarak imal edilmiştir. Silindir gömleği, çelik motor bloğunda bulunan yuvasına uygun sıkılıkta pres altında çakılmıştır. Piston ile silindir arasında önce 0,02 boşluk verilmiş ancak denemelerde motor devri 190 d/dk' nın üzerine çıkamamıştır. Daha sonra boşluk 0,03' e artırılmış, bu durumda motor devrinin arttığı gözlenmiştir. Silindir gömleğinin imalat resmi EK-5' de verilmiştir.

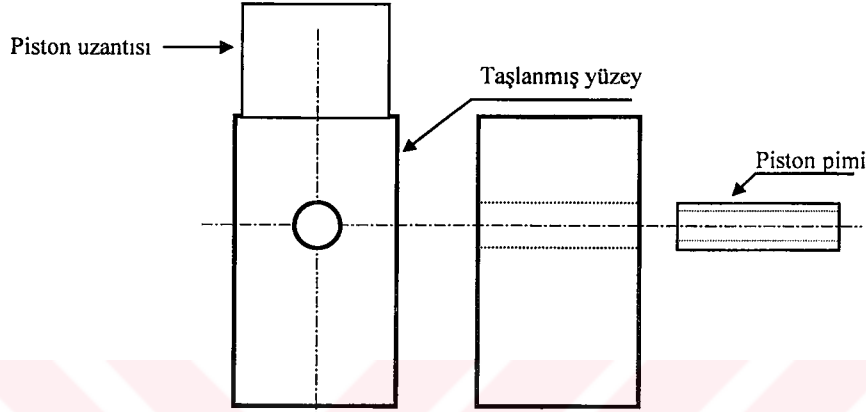


Şekil 4.3. Silindir Gömleği ve Kapağı

#### 4.1.3. Güç pistonu ve uzantısı

Çalışma maddesi depolamış olduğu enerji yükünü güç silindirinde harcayarak iş meydana getirmektedir. Bu esnada güç pistonu doğrusal olarak hareket eder. Bu hareket, biyel vasıtası ile krank miline iletilir. Şekil 4.4' de güç pistonu ve uzantısı görülmektedir. Güç pistonu sürtünmeleri azaltmak amacıyla, yüksek grafitli dökme demirden sekmansız olarak imal edilmiştir. Bu haliyle piston 525 gram gelmekteydi. Ancak motor denemesi sonucunda motor devri 350 d/dk ' dan fazla devir yapamamıştır. Pistonun ağırlığından dolayı atalet kuvvetleri fazla gelmiştir. Piston ağırlığı daha sonra 300 grama düşürülerek motorda devir artışı sağlanmıştır. Piston

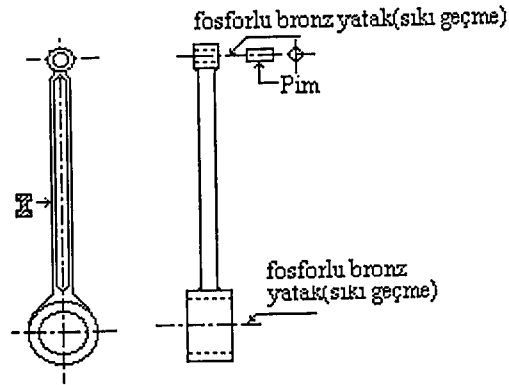
pimi yağ çeliğinden yapılarak 900 °C’ de yağda sertleştirilmiştir. Pim pistonda sabit, biyel kolunda serbest pozisyonundadır. Piston uzantısı motordaki ölü hacimleri minimuma indirmek için pistona eklenen kısımdır. Güç pistonu imalat resmi EK-5’ de verilmiştir.



Şekil 4.4. Güç Pistonu ve Uzantısı

#### 4.1.4. Biyel

Biyeller dayanımı artırmak için Ç1040 malzemeden yapılmıştır. İmalat kolaylığı açısından yer değiştirme pistonu biyelleri ile güç silindirin biyeli aynı ölçülerde yapılmıştır. Çalışma esnasında aşını ve gürültüyü minimum seviyeye indirmek için biyel ayağı ve biyel başına fosforlu bronz burç çakılmış ve burçlar raybalanarak krank muylusuna alıştırılmıştır. Atalet kuvvetlerini azaltmak amacıyla biyel ayakları ve biyel başları ile biyel kollarının yan tarafları freze ile boşaltılarak ağırlıkları azaltılmıştır. Biyel kolunun dayanımını artırmak için biyel kesiti H şeklinde imal edilmiştir. Bir biyel kolunun ağırlığı 125 gramdır. Üç biyelin biyel ayakları krank mili muylusuna bağlanmıştır. Güç silindirin biyel ayağı güç pistonuna, diğer iki biyel kolunun ayakları yer değiştirme pistonu çubuğuna bağlanmıştır.

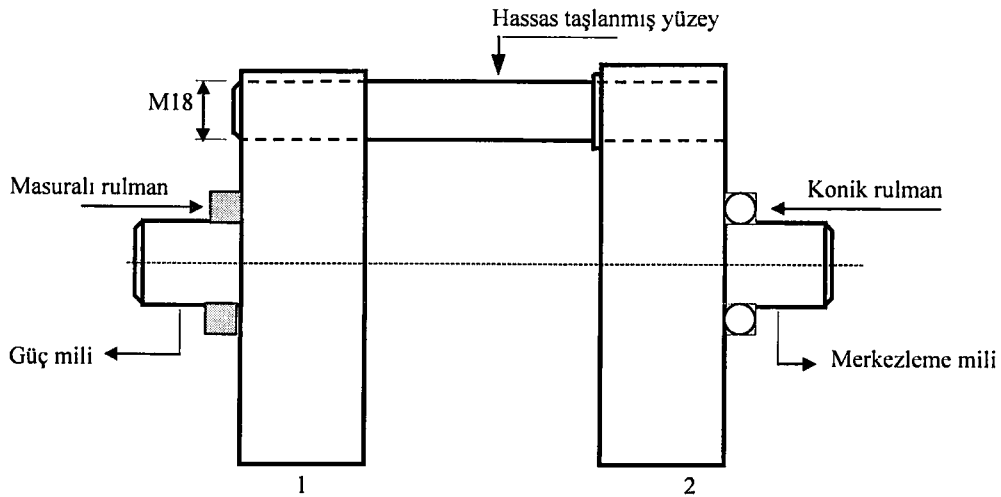


Şekil 4.5. Biyel Şematik Resmi

#### 4.1.5. Krank mili

Krank mili, imalat ve montaj kolaylığı nedeniyle iki parçalı olarak imal edilmiştir. Şekil 4.6' da krank milinin şematik resmi ve EK-5' de ise imalat resmi görülmektedir.

Bağlama esnasında eksen kaçıklığını önlemek için dış yüzeyi merkezleme ve güç millerinin göbeklerine göre hassas olarak taşlanmış merkezleme malafası kullanılmıştır.



Şekil 4.6. İki Parçalı Krank Mili

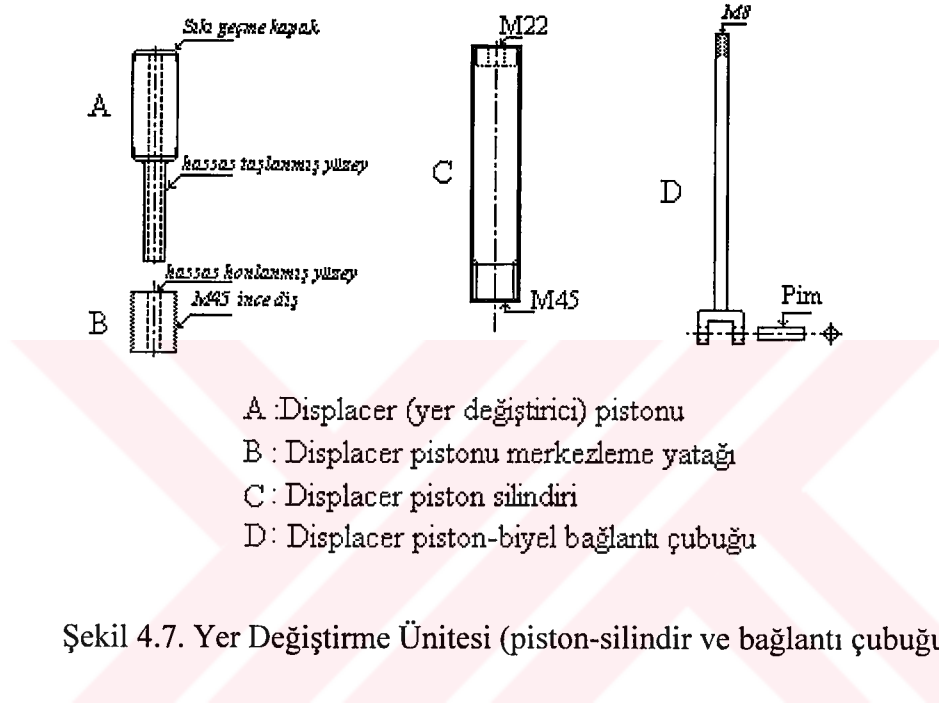
Merkezleme mili tarafında ise tork ölçümü esnasındaki sürtünme kaybını azaltmak için konik rulman kullanılmıştır. Biyel muylusu DIN x 210 Cr12, SAE 2080 yağ çeliğinden imal edilmiş, 900 °C de yağda sertleştirilmiş ve hassas olarak taşlanmıştır. Krank mili torna edilerek salgıları giderilmiştir.

#### 4.1.6. Yer değiştirme ünitesi

Yer değiştirme ünitesi, Şekil 4.7' de görüldüğü gibi, A-yer değiştirme pistonu (displacer), B-yer değiştirme pistonu merkezleme yatağı, C- yer değiştirme pistonu silindiri, D-Yer değiştirme pistonu bağlantı çubuğu olmak üzere dört parçadan oluşmaktadır. Yer değiştirme pistonu, çalışma maddesine (hava) hareket vererek sıcak ve soğuk bölgeler arasında yer değiştirmesini ve bu esnada sabit sıcaklıkta çalışma maddesine, motorun çalışması için gerekli olan ısı enerjisinin aktarımını sağlar. Şekil 4.7' de görülen yer değiştirme pistonunun silindirik kısmı Ç 1040 malzemeden içi boş boru şeklinde imal edilmiştir. Mil yüzeyi hassas olarak taşlanmıştır. Taşlanan bu yüzey merkezleme yatağına (B) hassas olarak alıştırılmıştır. Yer değiştirme pistonu merkezleme yatağında yağsız olarak çalışmaktadır. Sürtünmeden kaynaklanan yatak sarmalarını önlemek için merkezleme yatağı yüksek grafitli sert dökme demirden imal edilerek delik yüzeyi yer değiştirme pistonu alt kapak miline göre tolerans sınırları içerisinde hassas olarak honlanmıştır.

Yer değiştirme silindiri, korozyon ve ısıya karşı direncini artırmak için et kalınlığı 3 mm olan kromlu çelikten yapılmıştır. Her iki yer değiştirme pistonu ile silindir yüzeyi arasında 1 mm boşluk bırakılmıştır. Isı radyasyonla silindirden çalışma maddesine geçmektedir. Çalışma maddesi yer değiştirme pistonu ile silindir arasında bulunan boşluktan geçerken ısı alarak basıncı ve sıcaklığı artar ve güç silindirinde iş meydana getirir. Yer değiştirme pistonunun sıcaklığı, silindir yüzey sıcaklığından düşüktür. Silindir yüzey sıcaklığı 800 K iken yer değiştirme pistonu sıcaklığı 700 K kabul edilebilir. İki yüzey arasındaki radyasyonla ısı aktarımı hesaplanırsa yaklaşık 300 W civarında olur. Bu ısının bir kısmı çalışma maddesine verilir, bir kısmı ise çeşitli yollardan kaybolur.

Yer değiştirme pistonunun biyele bağlanması aracılık eden eleman şekil 4.7' de görülen bağlantı çubuğudur. Bağlantı ubuğu biyel ayağına hassas olarak alıştırılmış pim ile bağlanır. Pim bağlantı çubuğunda sabit, biyel ayağında serbesttir. Yer değiştirme nitesi yaklaşık 2 kg dır.



şekil 4.7. Yer Değiştirme nitesi (piston-silindir ve bağlantı ubuğu)

#### 4.1.7. Soğutucu

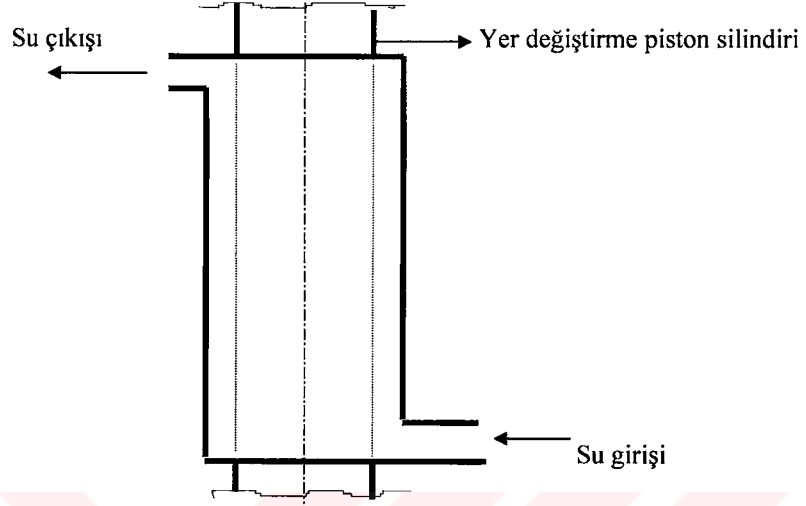
Isının sabit sıcaklıkta sistemden atıldığı yerdir. Çalışma maddesinin soğutulması, yer değiştirme pistonu ile silindiri arasından gazın geçişi esnasında olmaktadır. Verimi artırmak için sıcak ile soğuk kaynak arasındaki sıcaklık farkını artırmak gerekmektedir. Çalışma maddesinin etkin biçimde soğutulabilmesi için soğutucunun dış tarafından su sirkülasyonu sağlanmıştış şekil 4.8.

#### 4.1.8 Su ceketı

Su ceketı şekil 4.8' de görüldüğü gibi yer değiştirme silindirinin soğutulması gereken alt kısmına monte edilmiştir. Isı iletimi hızlı bir şekilde olabilmesi için ısı iletkenlik katsayısı yüksek olan alüminyum malzemeden imal edilmiştir. Silindir etrafından



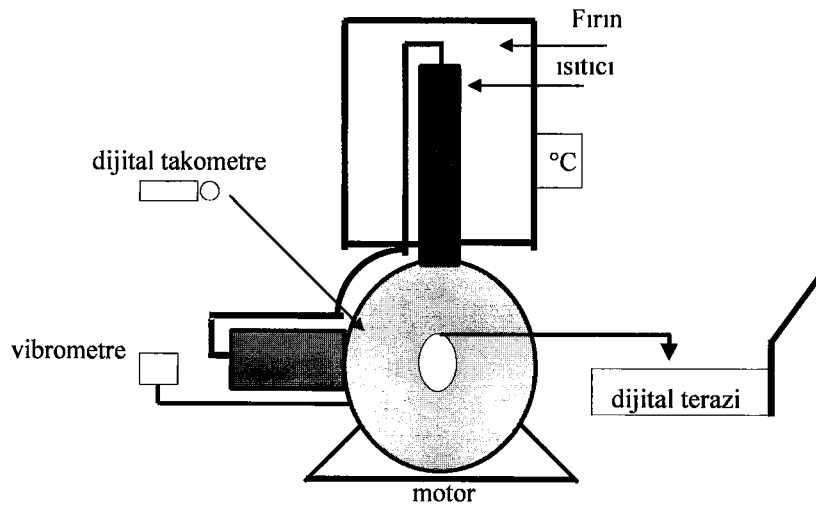
geçen soğutma suyu, konveksiyonla yüzeyi soğutmakta ve çalışma maddesi soğuk silindir yüzeylerine temas ederek soğumaktadır.



Şekil 4.8. Su Ceketi

#### 4.2. Deney Yeri

Deneyler Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Otomotiv Anabilim Dalı laboratuvarlarında yapılmıştır. Deney tesisatının şematik resmi Şekil 4.9.' da görülmektedir.



Şekil 4.9. Deney Tesisatının Şematik Resmi

### **4.3. Deneyde Kullanılan Ölçü Cihazlarının Tanıtımı**

#### **4.3.1. Termometre**

Deney ortamının sıcaklığını ve nemini ölçmek için elden savurmalı, 0,1 °C hassasiyetli kuru ve yaş termometre kullanılmıştır.

#### **4.3.2. Barometre**

Deney ortamının atmosferik basıncını ölçmede, precision marka 710 - 800 mmHg ölçme aralığı olan bir barometre kullanılmıştır.

#### **4.3.3. Vibrometre**

Sinüs marka, 0,05  $\mu\text{m}$  ölçme hassasiyetinde olan bir vibrometre kullanılmıştır. Cihazın titreşim sensör başlığı düşey konumda olacak şekilde motor gövdesine bağlanarak ölçme yapılmıştır.

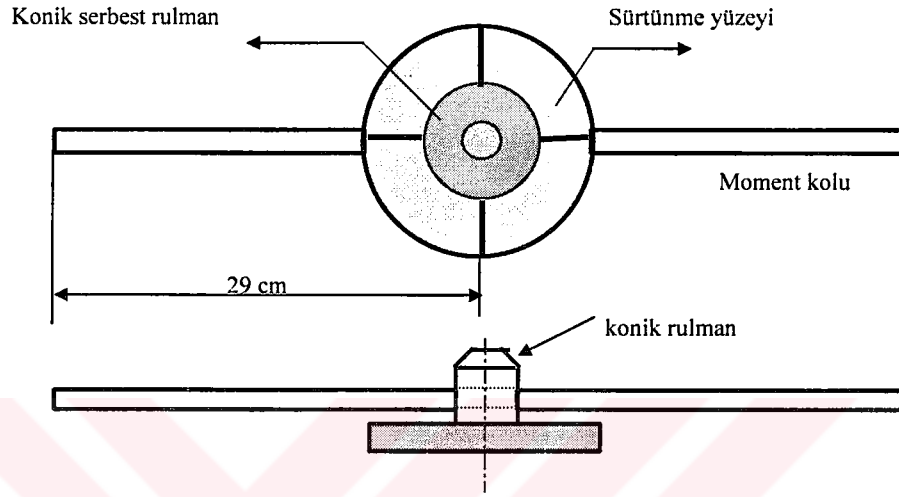
#### **4.3.4. Terazı**

Motorun döndürme kuvvetinin ölçülmesinde Tarsan B-15 marka ve 0,1 g hassasiyetinde ve en fazla 15 kg ölçme yapabilen elektronik bir terazi kullanılmıştır. Motor momentini belirlemek üzere moment aparatının yükleme kolunun meydana getirdiği kuvvet ölçülmüştür.

#### **4.3.5. Motor momenti ölçme aparatı**

Aparat, Temel işlemler atelyesinde imal edilen Şekil 4.10' da görüldüğü gibi volan göbeğine boşluklu merkezlenecek şekilde yataklandırılmıştır. Sürtünme yüzeyinde balata mevcuttur. Elle yükleme yapılan yerde oynak başlı rulman kullanılarak balata yüzeyinin volan yüzeyine tam oturması sağlanmıştır. Moment kolunun uzunluğu 29

cm' dir. Ölçüm sonucunda okunan kuvvet ile kuvvet kolu uzunluğu çarpılarak Nm olarak motor momenti belirlenmiştir.



Şekil 4.10. Motor Momenti Ölçme Aparatı

#### 4.3.6. Isı kaynağı

Laboratuvar denemelerinde ısı kaynağı olarak, 3000 Watt gücünde 1 °C hassasiyetinde, 1200 °C' ye kadar ısıtma yapabilen ve üzerinde sıcaklığı  $\pm 5$  °C' de sınırlayan termik regülatörü bulunan bir fırın kullanılmıştır.

## 5. DENEY SONUÇLARI

Deney sırasında ortam sıcaklığı kuru 18.2 °C, yaş 11 °C ve barometrik basınç 749 mmHg olarak ölçülmüştür. Deneyler sonucunda elde edilen veriler EK-4' de tablo halinde verilmiştir. Bu veriler bilgisayar yardımıyla grafik haline dönüştürülerek açıklamaları yapılmıştır.

### 5.1. Deney Yöntemi

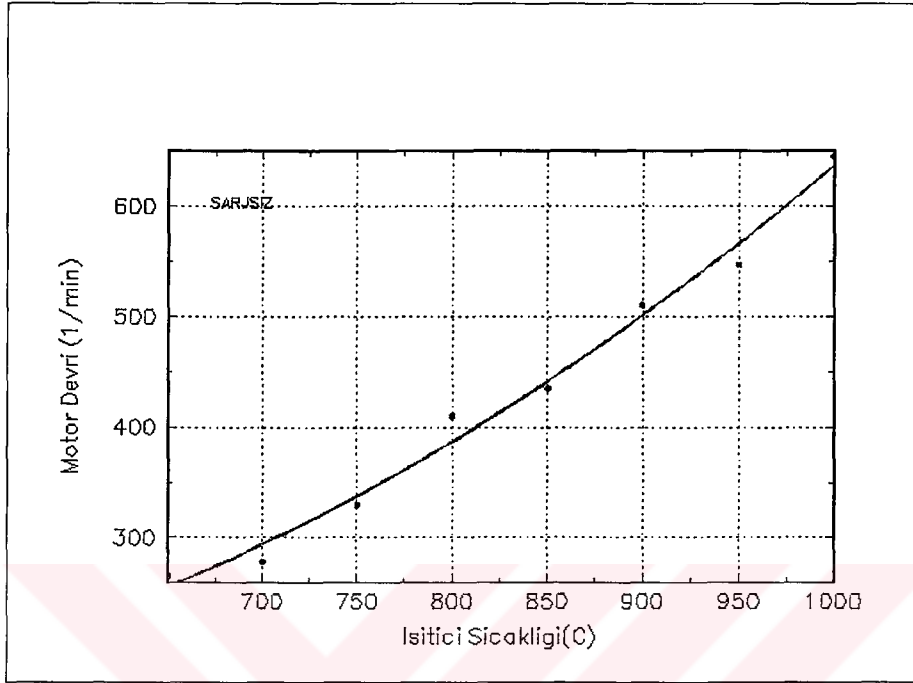
Deney motoru sabit fırın sıcaklıklarında ve şarjsız olarak çalıştırılıp devir, tork, güç ve titreşim değişimleri ölçülmüş, daha sonra yine sabit fırın sıcaklıklarında fakat bu kez değişik şarj basınçlarında (0.5 bar, 1.0 bar, 1.5 bar, 2.0 bar manometrik basınçlarında) devir, tork, güç ve titreşim değişimleri incelenmiştir. Aşağıda grafikler ve değerlendirmeleri sıra halinde verilmiştir.

### 5.2. Sonuçlar ve Tartışma

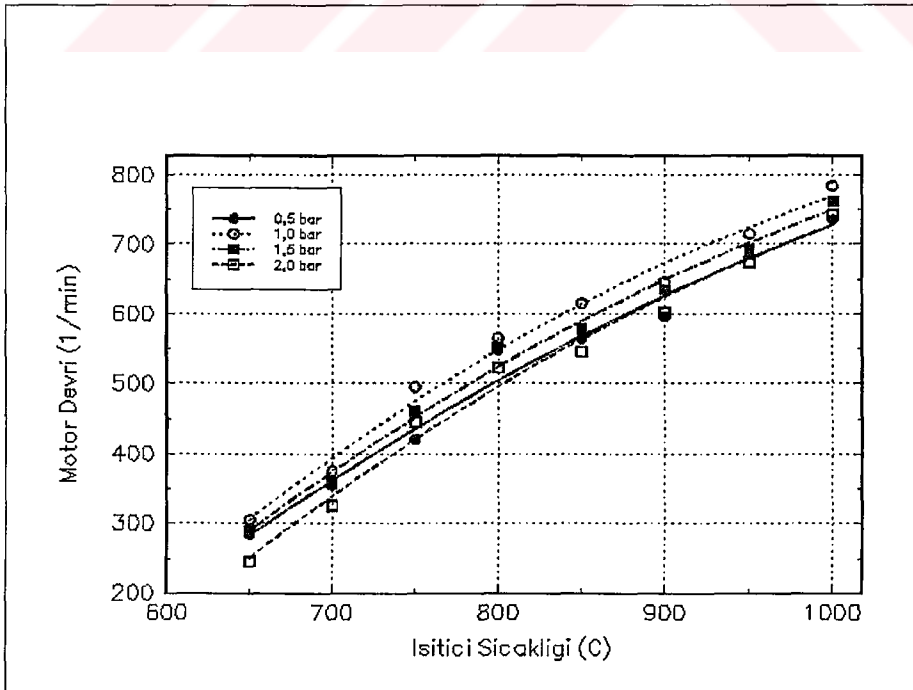
#### 5.2.1 Isıtıcı sıcaklığının motor hızına etkisi

Şekil 5.1' de şarjsız çalışma sırasında motor devrinin ısıtıcı sıcaklığına bağlı olarak değişimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi ısıtıcı sıcaklığı arttıkça motor devri lineer olarak artış göstermektedir. Motor devri, atmosferik basınçta ısıtıcı sıcaklığının bir fonksiyonu olarak değişim göstermektedir.

Şekil 5.2' de ise, değişik şarj basınçlarında motor devrinin ısıtıcı sıcaklığına bağlı değişimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi 1.0 bar basınçta 1000 °C sıcaklıkta motor devri 784 1/min' e çıkmıştır ve devir ısıtıcı sıcaklığına bağlı olarak değişim göstermektedir. Atmosferik basınçta yapılan ölçmelerde Şekil 5.1' de görüldüğü gibi motor devri atmosferik şartlarda 1000 °C sıcaklıkta 645 1/min' e ulaşmıştır. Şarjlı ölçmelerde motor devrinin atmosferik şartlara göre yüksek çıkması, şarj sonucu çalışma maddesinin kütlesinde meydana gelen artıştan kaynaklanmaktadır.



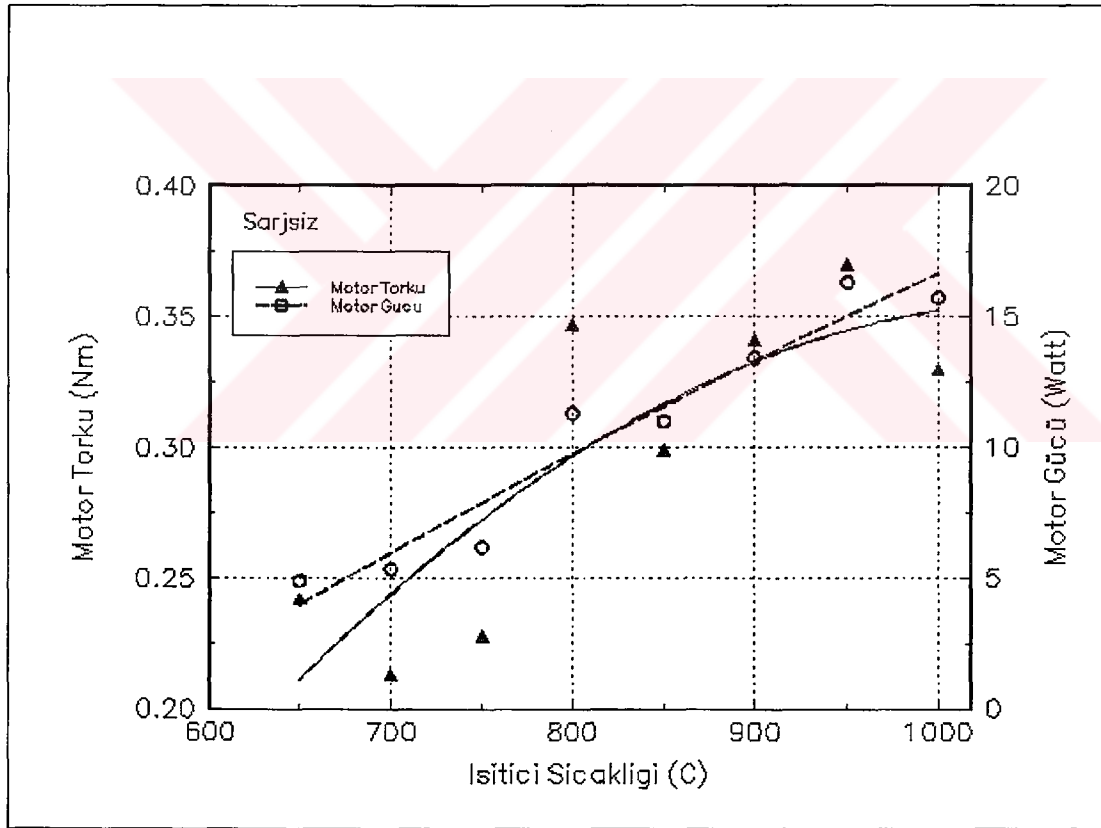
Şekil 5.1. Isıtıcı Sıcaklığına Göre Motor Devri Değişimi (Şarjsız)



Şekil 5.2. Isıtıcı Sıcaklığına Göre Motor Devri Değişimi (Şarjlı)

### 5.2.2 Isıtıcı sıcaklığının tork ve güce etkisi

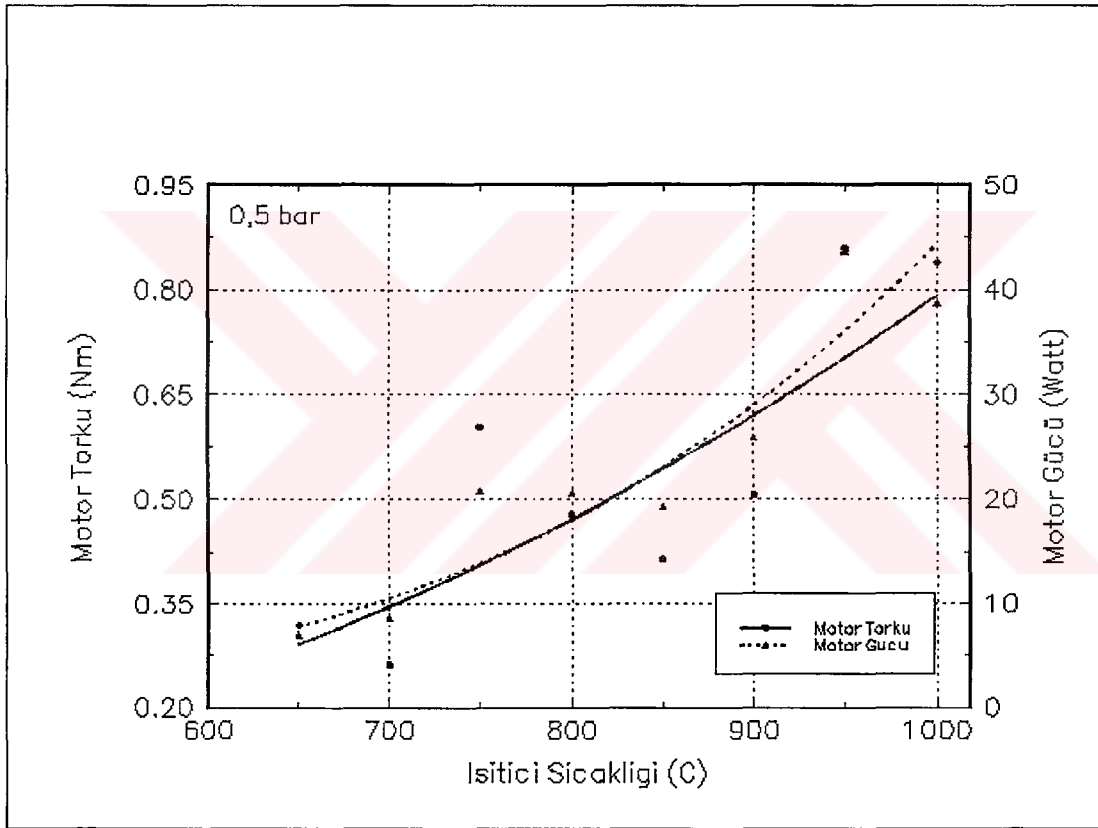
Şekil 5.3' te atmosferik basınçta ısıtıcı sıcaklığına bağlı olarak motor torku ve gücün değişimi görülmektedir. Her ısıtıcı sıcaklığında en yüksek tork ve güç değerleri alınarak grafik oluşturulmuştur. Isıtıcı sıcaklığına bağlı olarak tork ve güçte meydana gelen artış, ısıtıcı ve soğutucu sıcaklıkları arasındaki sıcaklık farkının artmasından kaynaklanmaktadır. Isıtıcı sıcaklığının malzeme dayanım sınırına kadar çıkartılması çevrim işini ve motor verimini artırdığından, buna bağlı olarak tork ve güçte artmaktadır.



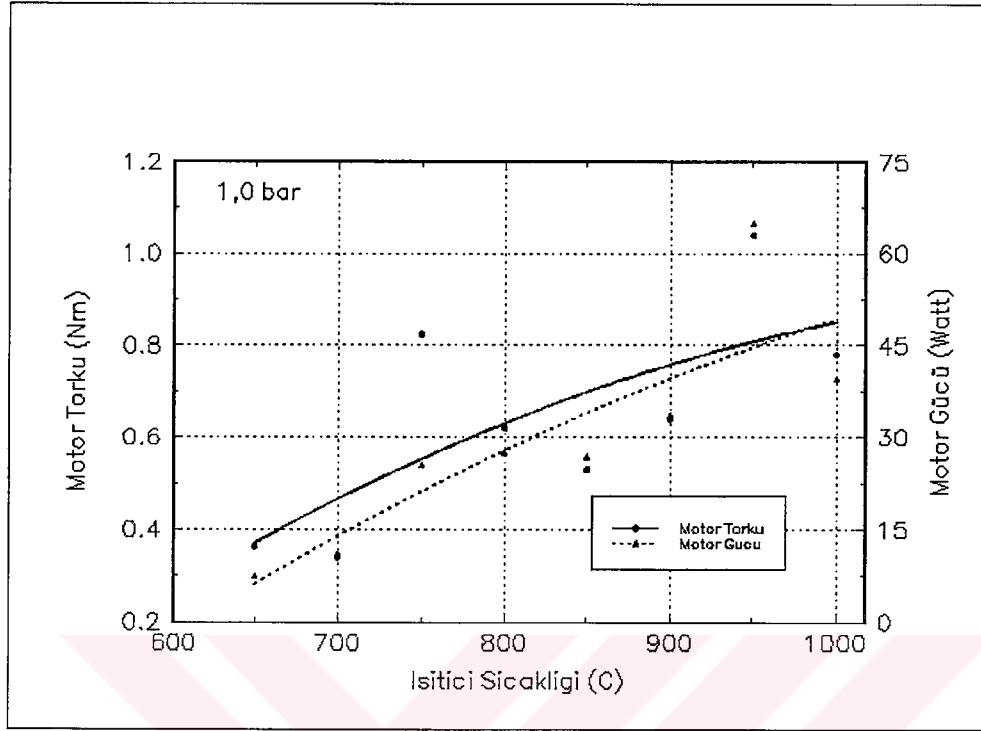
Şekil 5.3. Isıtıcı Sıcaklığına Bağlı Tork ve Güç Değişimi (Şarjsız)

Şekil 5.4, Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7' de değişik şarj basınçlarında ısıtma sıcaklığına bağlı olarak tork ve güçte meydana gelen değişimler görülmektedir. Şekillerde görüldüğü gibi ısıtıcı sıcaklığı ve şarj basıncı arttıkça tork ve güç de optimum noktasına kadar artış göstermektedir. Şarj basıncı 0,5 bar gösterge basıncı

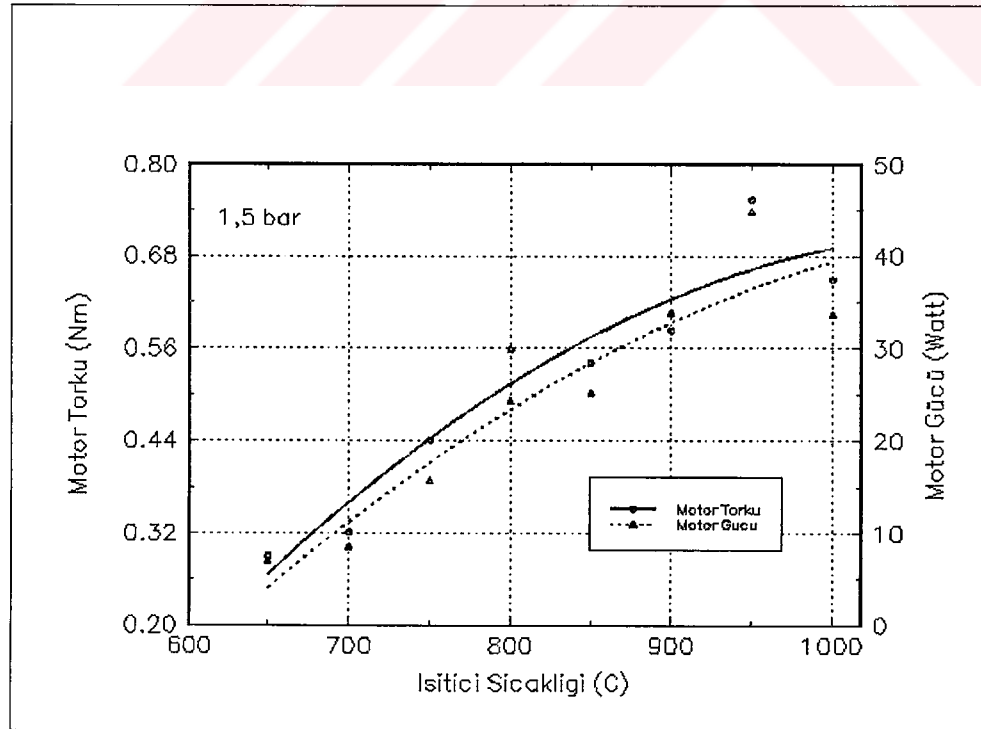
iken, 950 °C ısıtıcı sıcaklığında 43.7 W olan motor gücü, aynı sıcaklıkta 1.0 bar basınçta 64.9 W, 1.5 bar basınçta 44.9 W ve 2.0 bar basınçta 42.2 W olmaktadır. 950 °C, 1.0 bar basınçta maksimum güç elde edilmiştir. Tork eğrisine bakıldığında güç eğrisine benzer bir durum görülmektedir. 1.0 bar' dan sonra güçte ve torkta meydana gelen azalmanın sebebi ısıtıcı içerisindeki kütleyi ısıtmak için ısıtıcı sıcaklığının ve ısıtıcıdaki ısı transfer yüzey alanının yeterli olmayışıdır.



Şekil 5.4. Isıtıcı Sıcaklığına Bağlı Tork-Güç Değişimi (0.5 bar şarj basıncında)

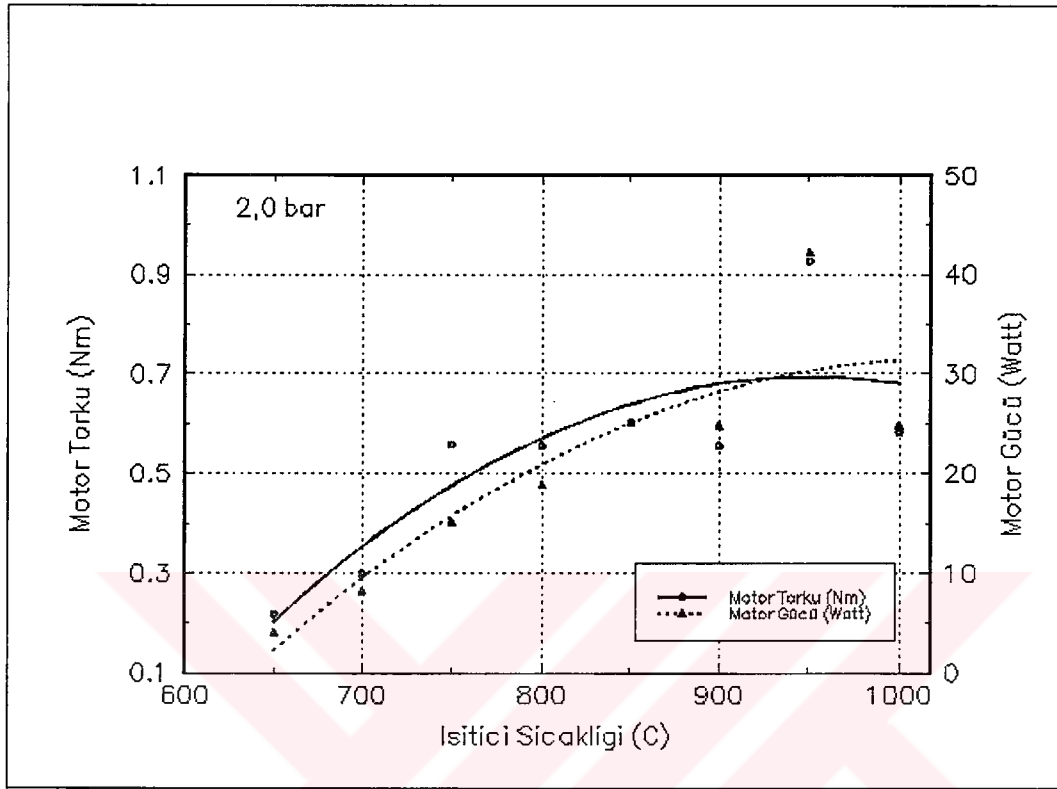


Şekil 5.5. Isıtıcı Sıcaklığına Bağlı Tork – Güç Değişimi (1.0 bar şarj basıncında)



Şekil 5.6. Isıtıcı Sıcaklığına Bağlı Tork-Güç Değişimi (1.5 bar şarj basıncında)

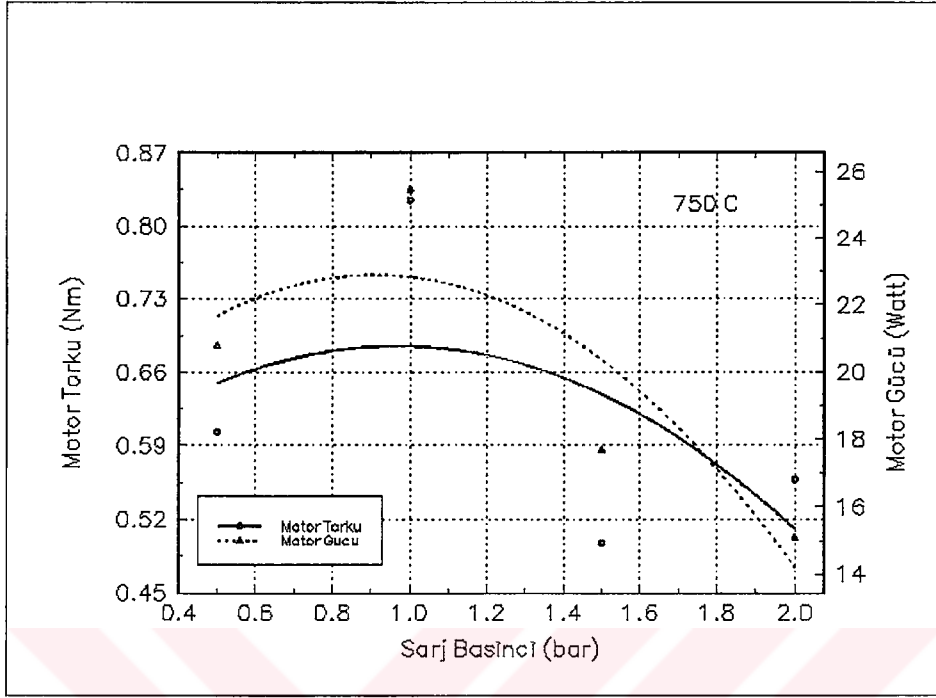




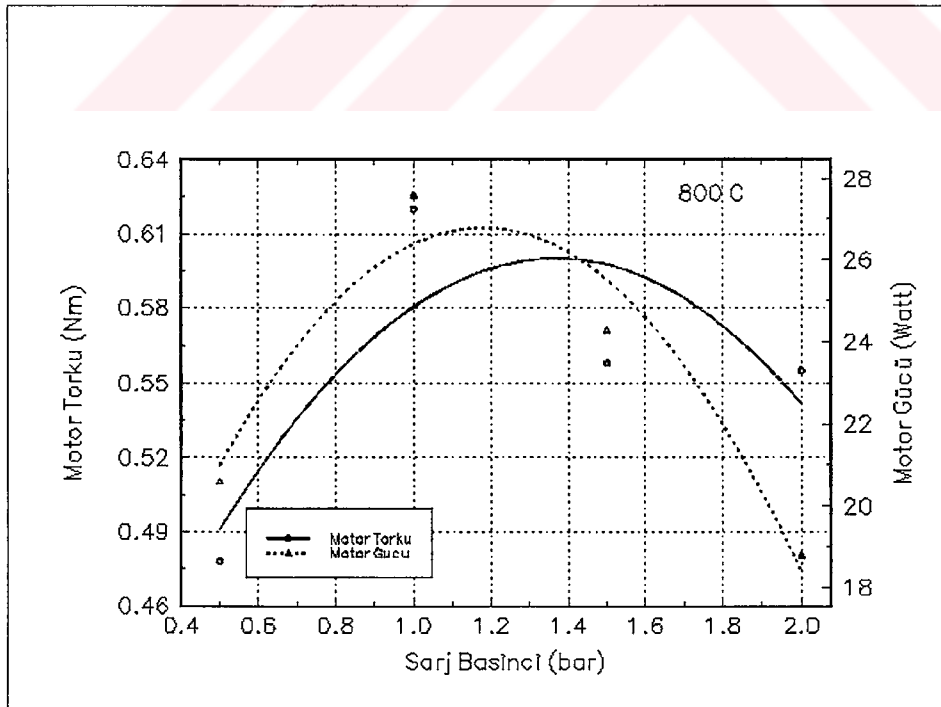
Şekil 5.7. Isıtıcı Sıcaklığına Bağlı Tork-Güç Değişimi (2.0 bar şarj basıncında)

### 5.2.3 Şarj basıncının tork ve güce etkisi

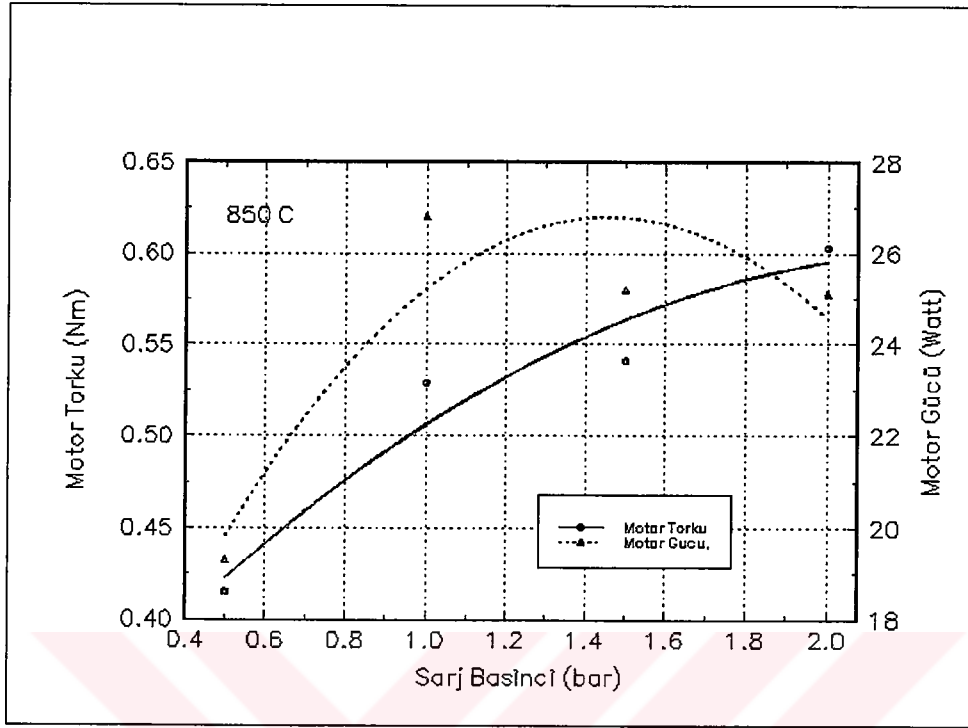
Şekil 5.8' den Şekil 5.13' e kadar, 750 °C ile 1000 °C arasında ve 50 °C aralıklarla sabit tutulan ısıtıcı sıcaklıklarında, şarj basıncına göre tork ve güçteki değişim görülmektedir. Şekillerde görüldüğü gibi 0.9-1.1 bar şarj basıncı arasında motor gücü maksimum olmaktadır. Bunun üzerindeki şarj basınçlarında motor gücü ve torku düşmektedir. Isıtıcı sıcaklığı, malzemede meydana gelen genleşme sebebiyle belli bir sınırın üzerine çıkarılamamaktadır. Yüksek sıcaklıklarda akışkan kütesine ısı aktarımı zorlaşmaktadır. Akışkana ısı transferini artırmak için ısı transferi yüzey alanını artırmak gerekmektedir. Bu durum ise motordaki ölü hacimlerin artmasına ve dolayısıyla sıkıştırma oranının düşmesine sebebiyet vermektedir. Prototip motorun optimum şarj basıncı 0.9-1.1 bar arasında değişmiştir.



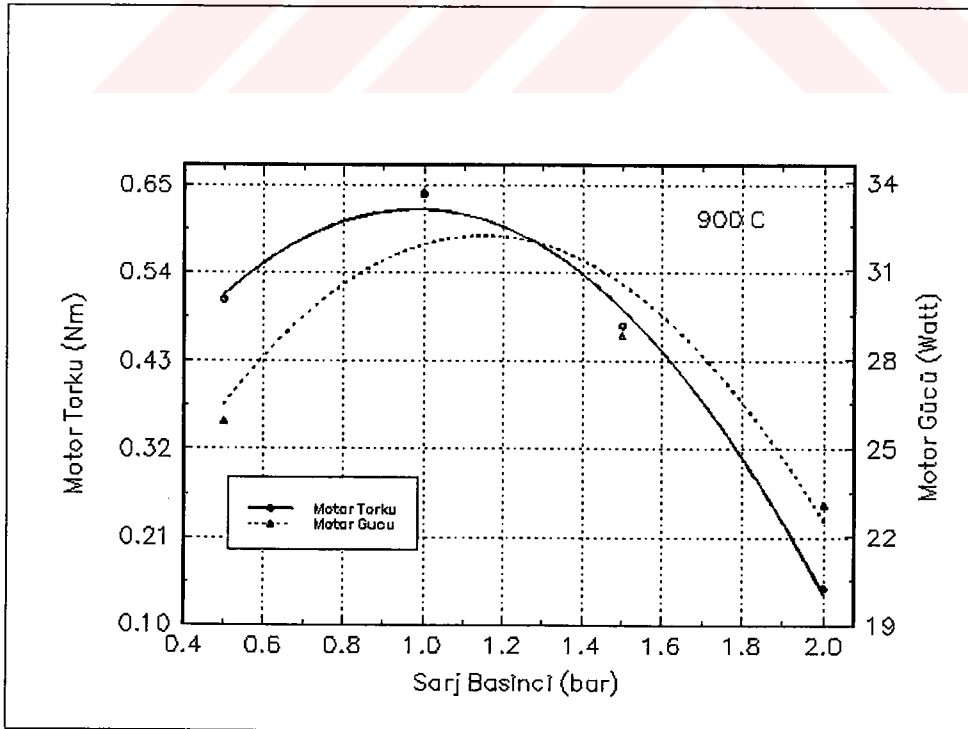
Şekil 5.8. Şarj Basıncına Göre Tork ve Güç Değişimi (750 °C)



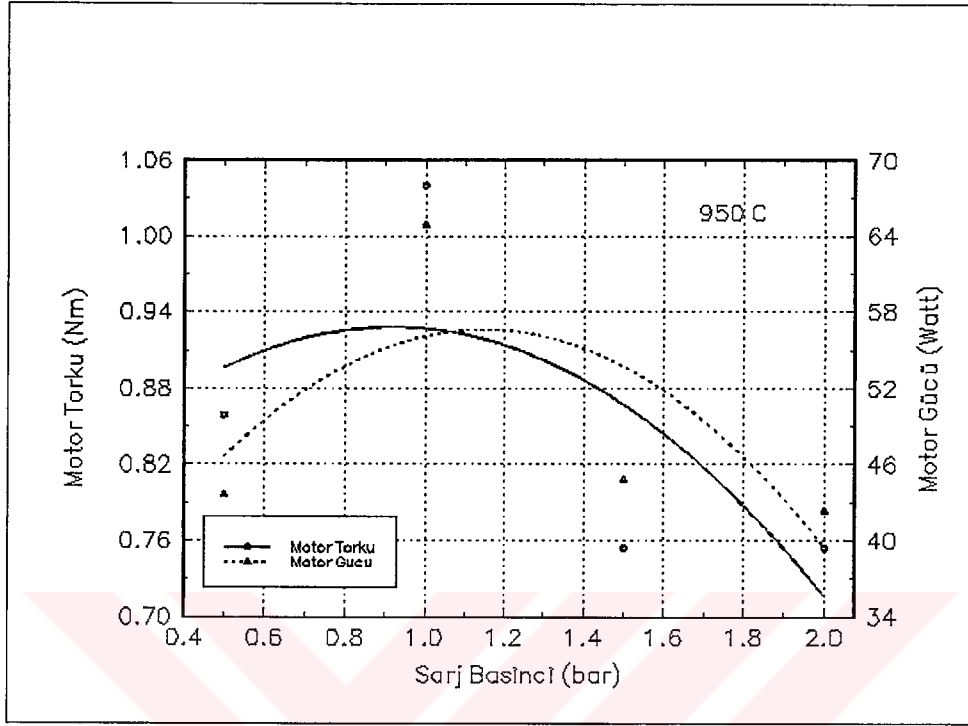
Şekil 5.9. Şarj Basıncına Göre Tork ve Güç Değişimi (800 °C)



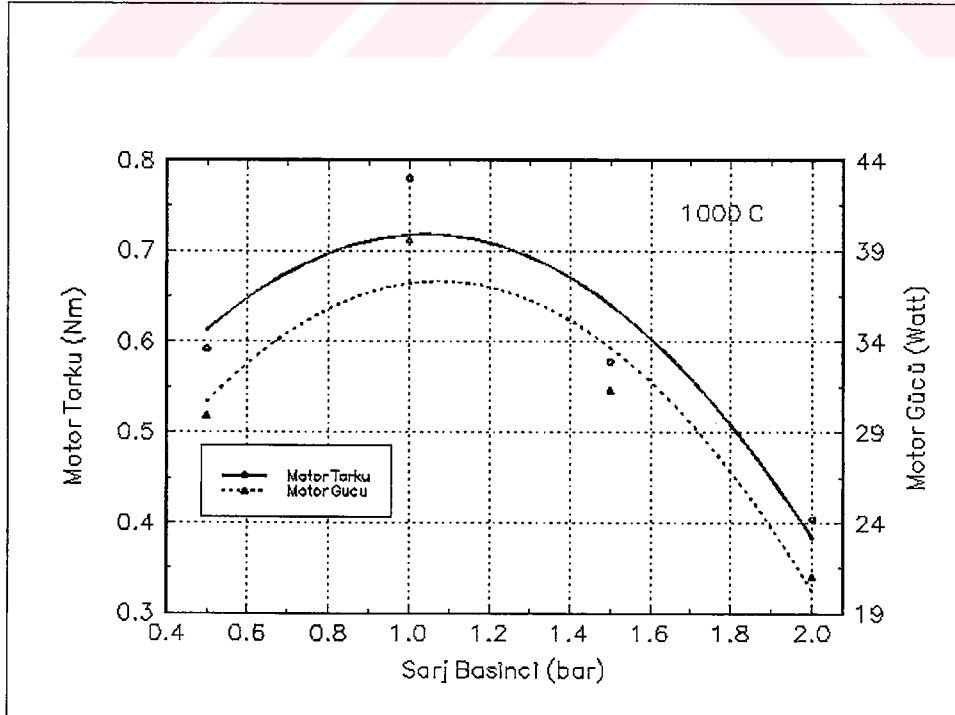
Şekil 5.10. Şarj Basıncına Göre Tork ve Güç Değişimi (850 °C)



Şekil 5.11. Şarj Basıncına Göre Tork ve Güç Değişimi (900 °C)



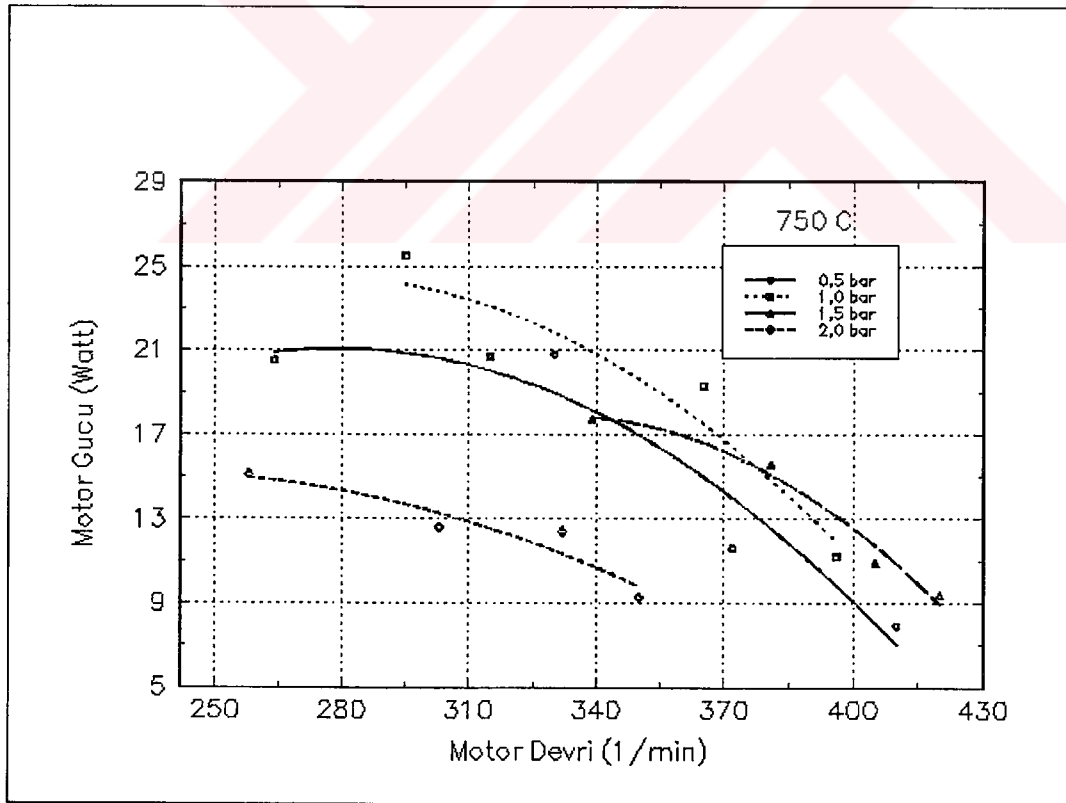
Şekil 5.12. Şarj Basıncına Göre Tork ve Güç Değişimi (950 °C)



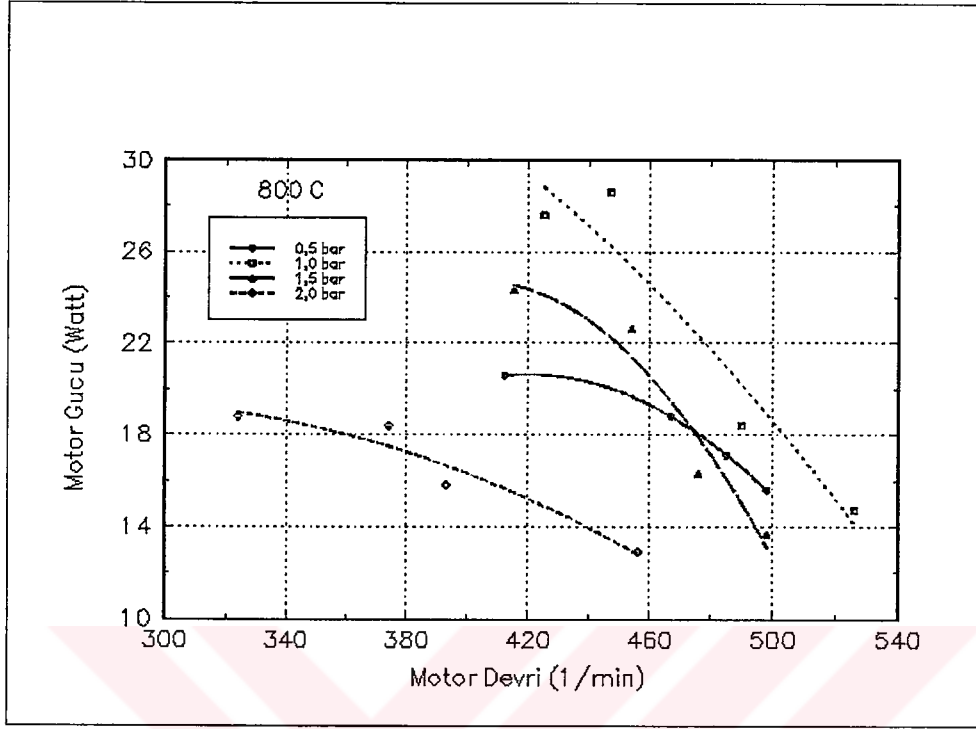
Şekil 5.13. Şarj Basıncına Göre Tork ve Güç Değişimi (1000 °C)

### 5.2.4 Farklı şarj basınç ve sıcaklıklarında motor devrinin motor gücüne etkisi

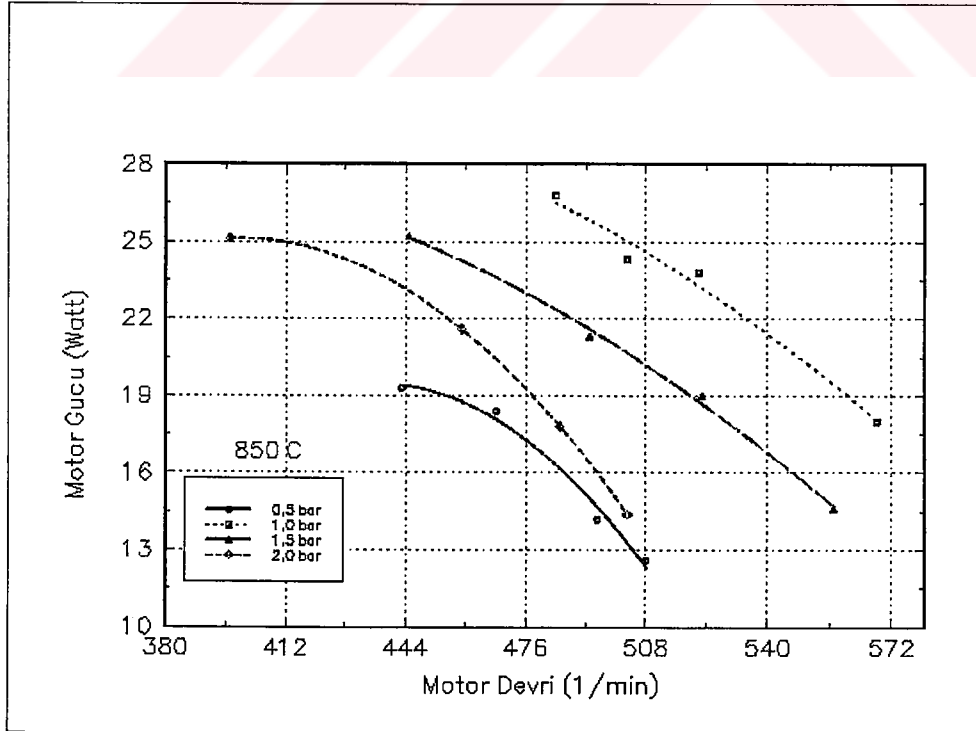
Motor gücünün, sabit ısıtıcı sıcaklıklarında ve değişik şarj basınçlarında (0.5 bar, 1.0 bar, 1.5 bar, 2.0 bar) motor devrine göre değişimi Şekil 5.14, Şekil 5.15, Şekil 5.16, Şekil 5.17 ve Şekil 5.18’ de kıyaslamalı olarak görülmektedir. Şekillerde görüldüğü gibi motor gücü, bütün şarj basınçlarında, motor devri arttıkça azalmaktadır. Optimum şarj basıncını geçtiğinde (1-1,5 bar), sistem içerisindeki çalışma maddesi kütlesini ısıtmak için ısıtıcı gücü yeterli gelmemektedir. Dolayısıyla karter basıncı ters etki yapmakta ve ısıtma bölgesi ile karter bölgesi arasında basınç farkının artması güç eğrisinde azalma meydana getirmektedir. Şekil 5.18’ de 950 °C ısıtıcı sıcaklığında 1.0 bar şarj basıncında, 594 1/min’ de 64.9 W olan motor gücü, aynı sıcaklıkta şarj basıncı 1.5 bar’ a çıkarıldığında 569 1/min’ de 44.9 W, 2.0 bar şarj basıncına çıkarıldığında ise 435 1/min’ de 42.2 W’ a düşmektedir.



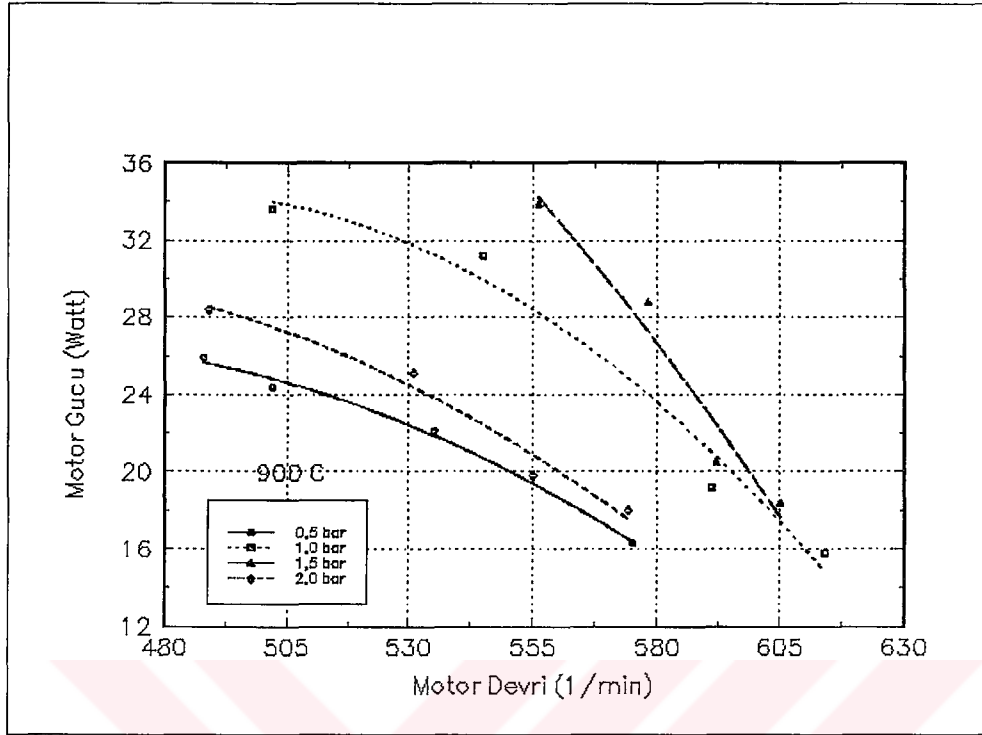
Şekil 5.14. Motor Devrine Bağlı Güç Değişimi (750 °C, Şarjlı)



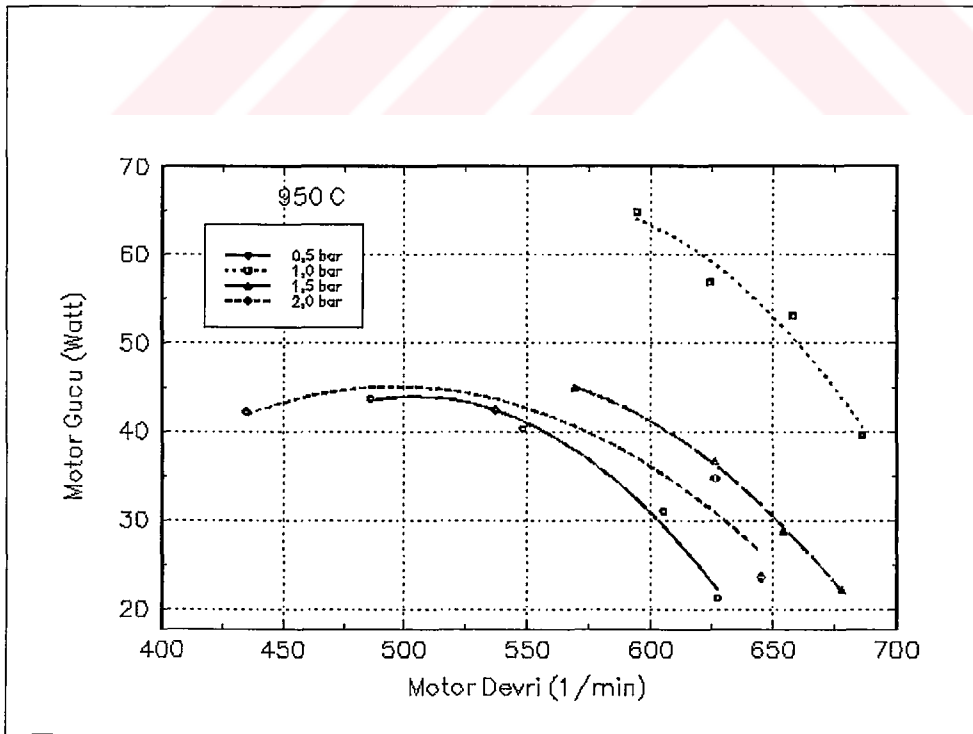
Şekil 5.15. Motor Devrine Bağlı Güç Değişimi (800 °C, Şarjlı)



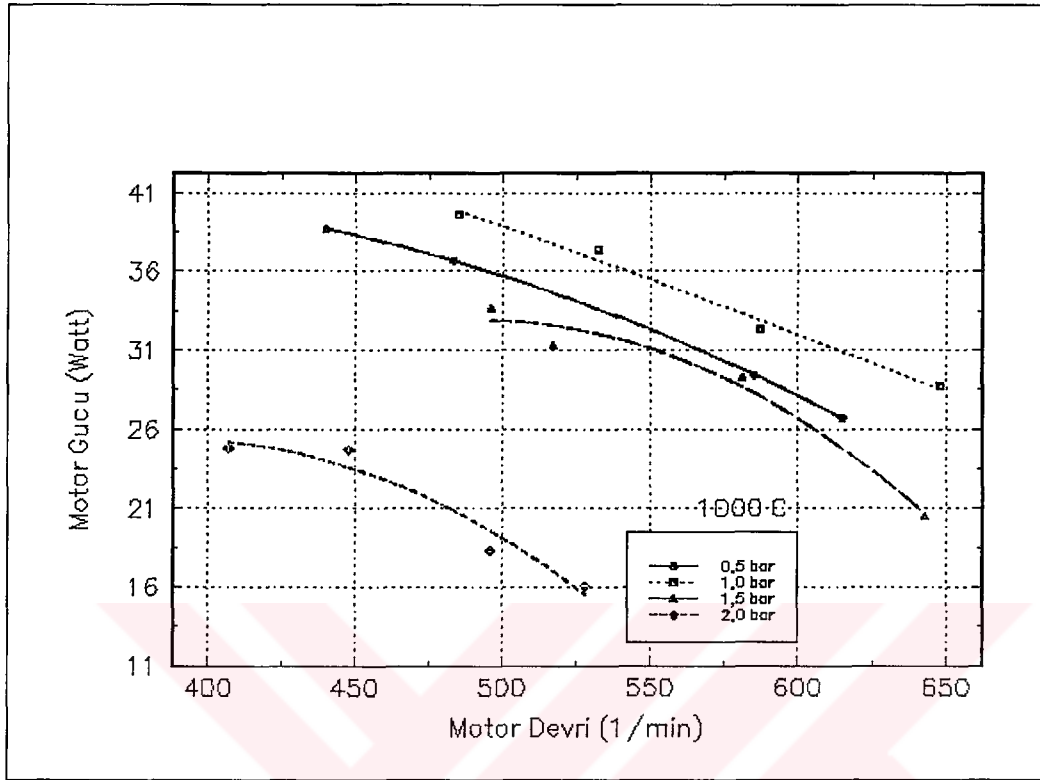
Şekil 5.16. Motor Devrine Bağlı Güç Değişimi (850 °C, Şarjlı)



Şekil 5.17. Motor Devrine Bağlı Güç Değişimi (900 °C, Şarjlı)



Şekil 5.18. Motor Devrine Bağlı Güç Değişimi (950 °C, Şarjlı)

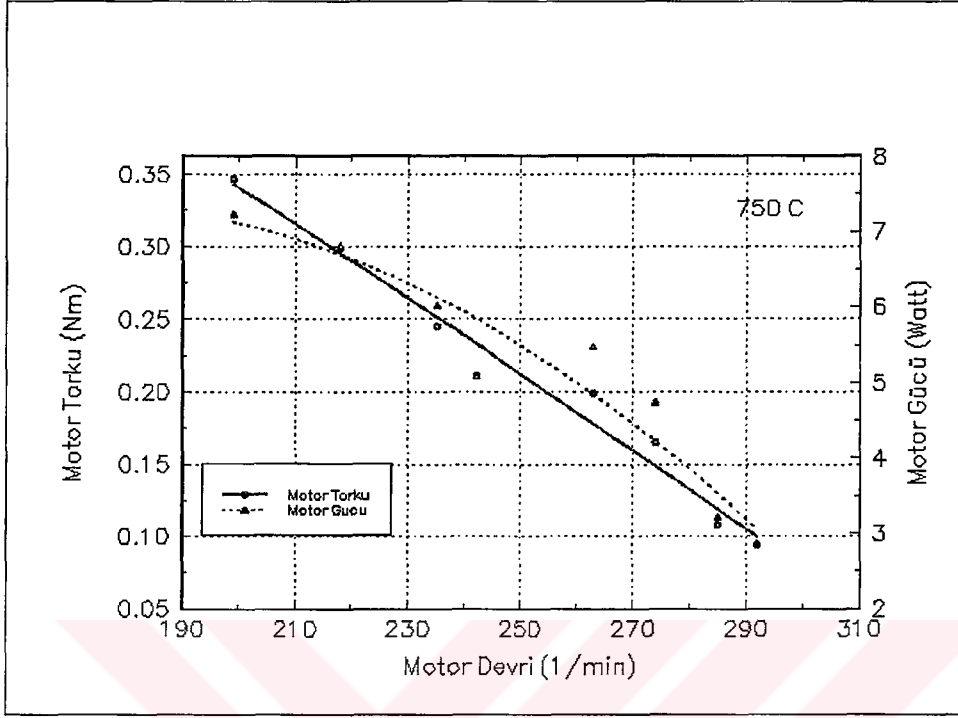


Şekil 5.19. Motor Devrine Bağlı Güç Değişimi ( 1000 °C, Şarjlı)

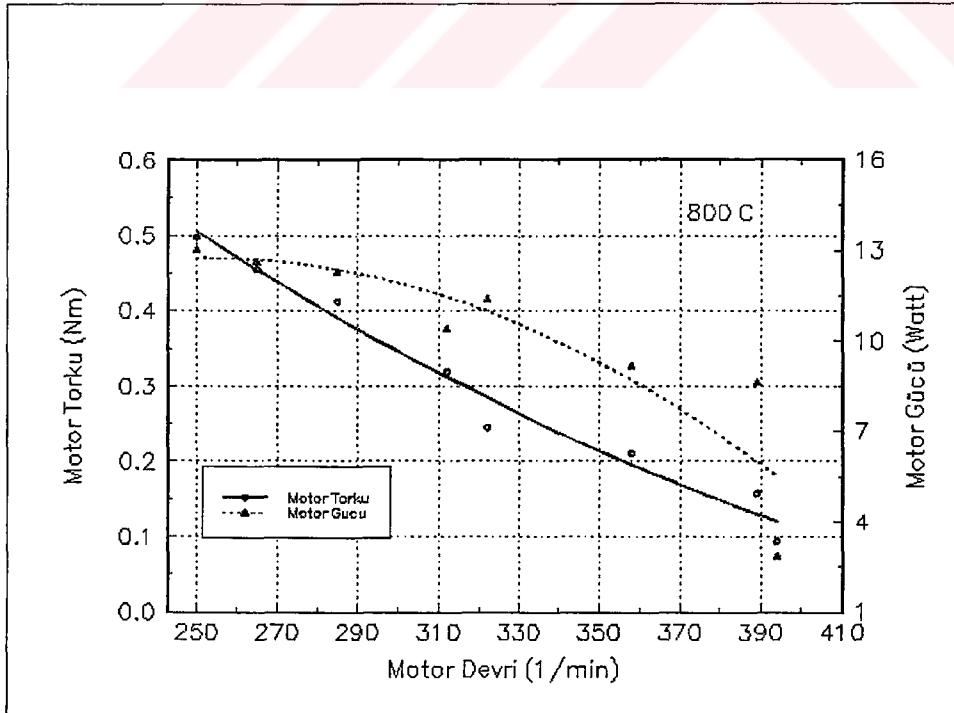
### 5.2.5 Farklı ısıtıcı sıcaklıklarında motor devrinin tork ve güce etkisi (şarjsız)

Atmosferik şartlarda, sabit ısıtıcı sıcaklıklarında, motor devrine göre tork ve güç değişimi Şekil 5.20, Şekil 5.21, Şekil 5.22, Şekil 5.23, Şekil 5.24 ve Şekil 5.25' de görülmektedir. Isıtıcı sıcaklığı arttıkça tork, güç ve motor devrinde artış meydana gelmektedir. Atmosferik şartlarda 750 °C' de 172 1/min olan maksimum güç devri, 950 °C sıcaklıkta 292 1/min' e, 1000 °C sıcaklıkta ise 625 1/min' e çıktığı görülmektedir. Motor gücünün ısıtıcı sıcaklığına bağlı olarak artış göstermesi hem devir artışı, hem de tork artışı ile olmaktadır. Buna bağlı olarak motor devri arttıkça pompalama ve sürtünme kayıplarının artması, ısıtıcıdaki ısı transfer yüzey alanının yetersiz kalması sebepleriyle devir artışına bağlı olarak tork ve güç eğrisi azalma eğilimi göstermektedir.

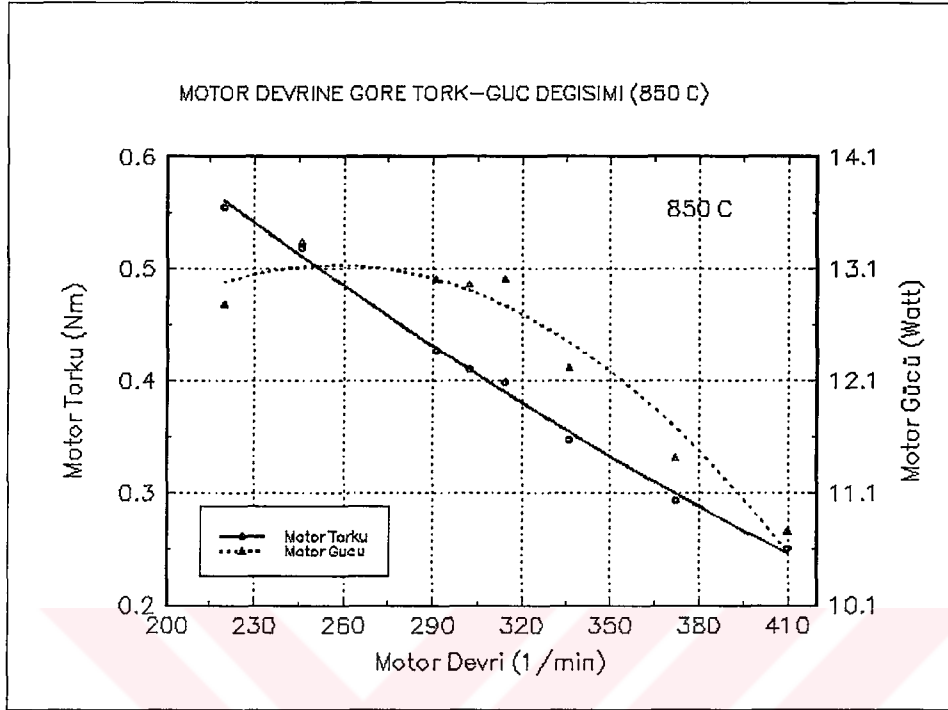




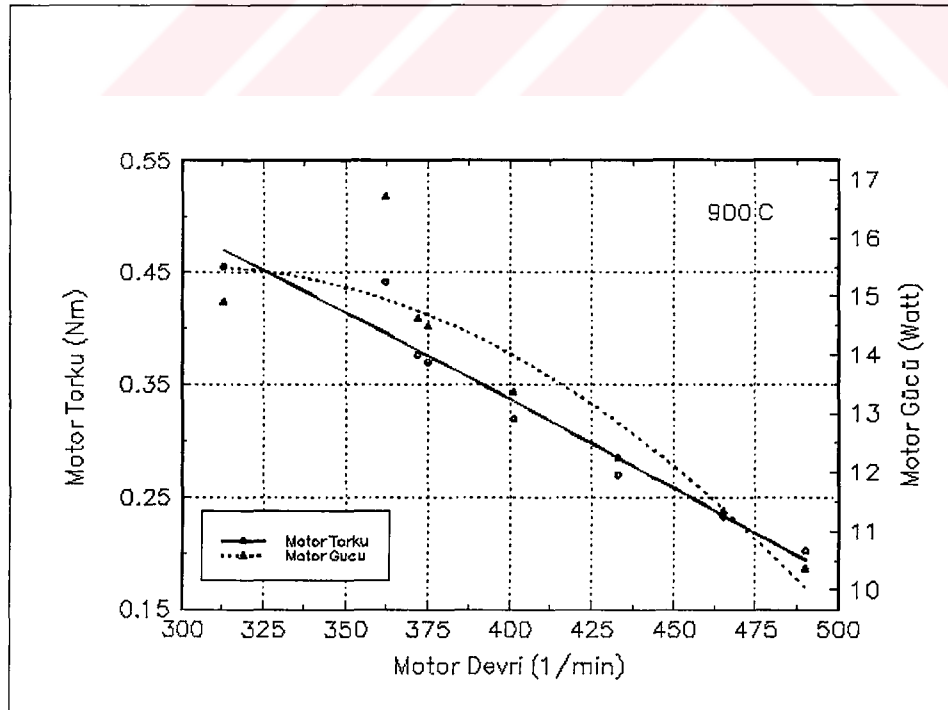
Şekil 5.20. Motor Devrine Göre Tork ve Güç Değişimi (750 °C, Şarjsız)



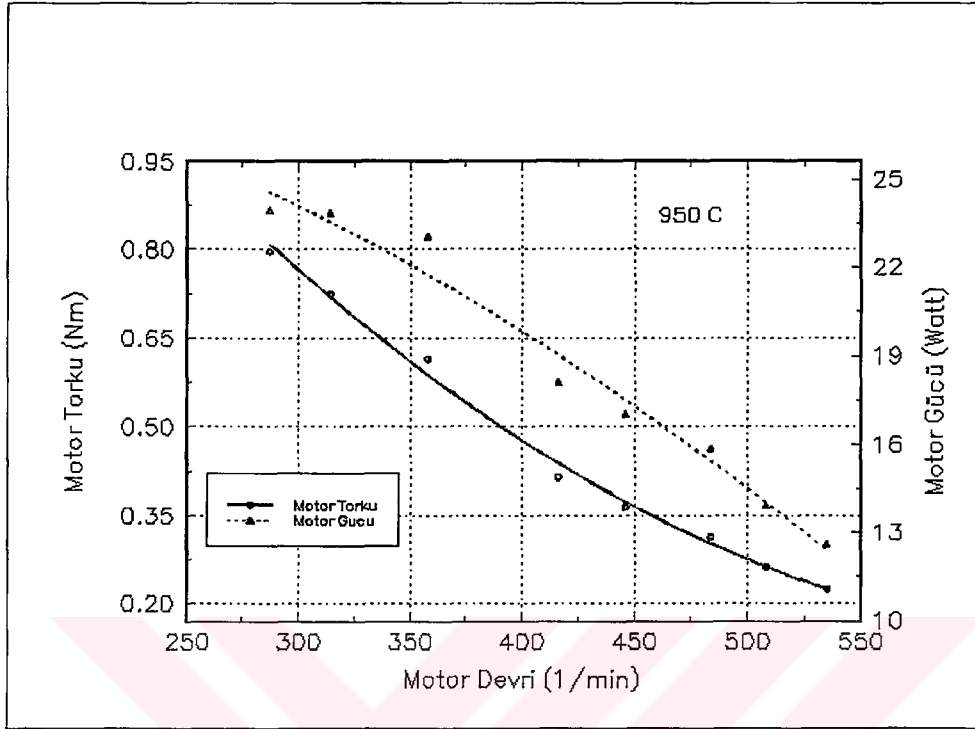
Şekil 5.21. Motor Devrine Göre Tork ve Güç Değişimi (800 °C, Şarjsız)



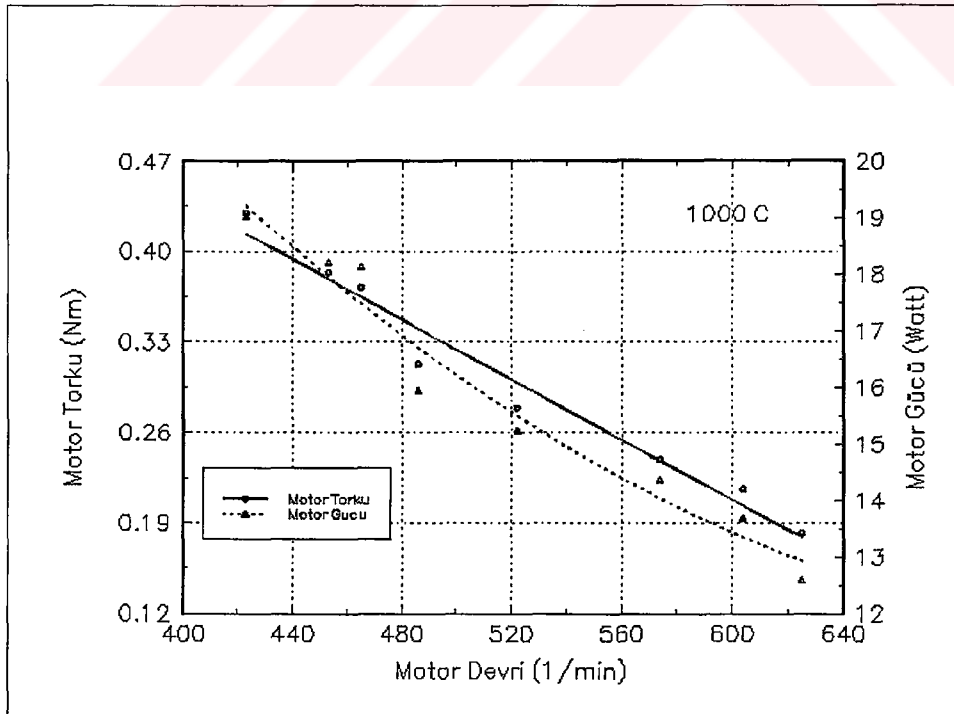
Şekil 5.22. Motor Devrine Göre Tork ve Güç Değişimi (850 °C, Şarjsız )



Şekil 5.23. Motor Devrine Göre Tork ve Güç Değişimi (900 °C, Şarjsız)



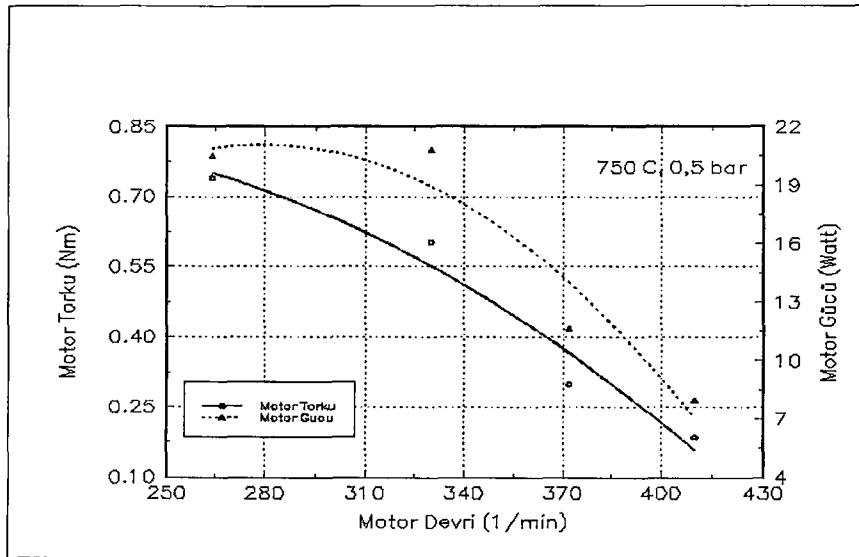
Şekil 5.24. Motor Devrine Göre Tork ve Güç Değişimi (950 °C, Şarjsız)



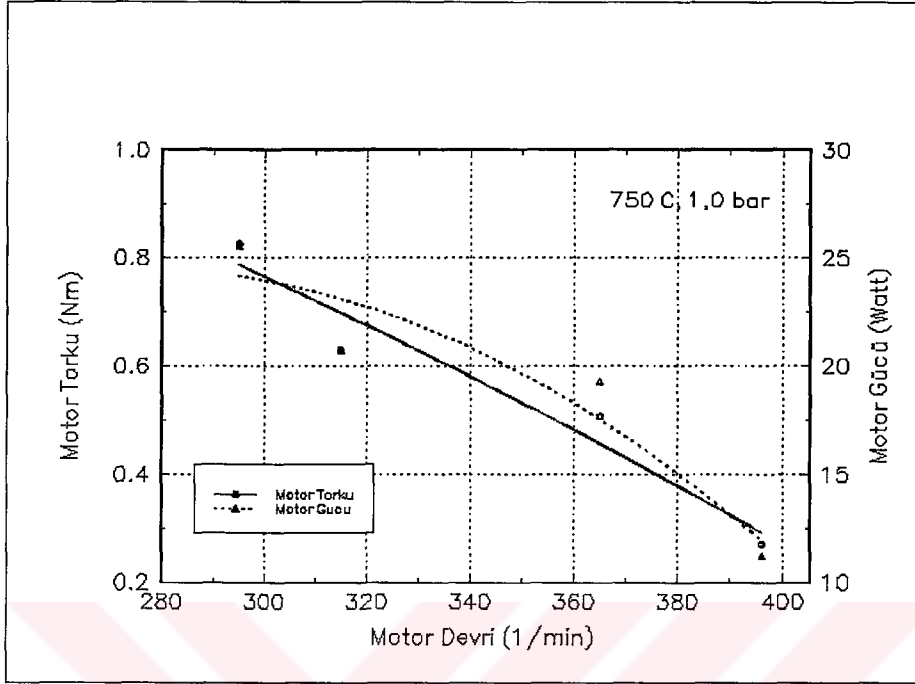
Şekil 5.25. Motor Devrine Göre Tork ve Güç Değişimi ( 1000 °C, Şarjsız)

### 5.2.6 Farklı ısıtıcı sıcaklıklarında motor devrine göre tork ve güç ilişkisi (şarjlı)

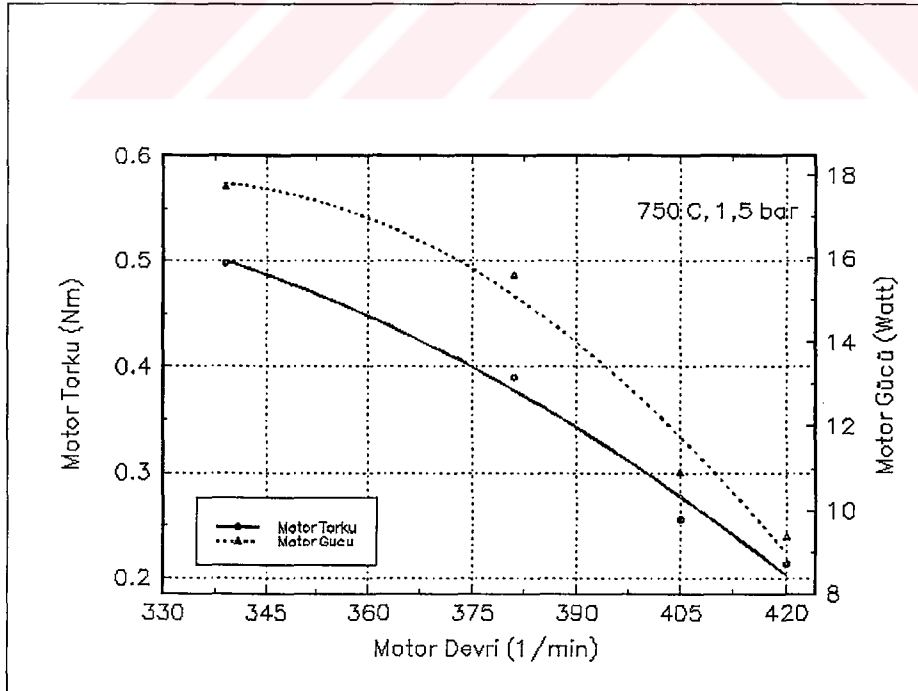
Isıtıcı sıcaklığı 750 °C’ de sabit tutularak, motora 0.5 bar, 1.0 bar, 1.5 bar ve 2.0 bar şarj basıncı uygulayarak elde edilen motor devrine göre tork ve güç değişimi Şekil 5.26, Şekil 5.27, Şekil 5.28 ve Şekil 5.29’ da verilmiştir. Grafiklerde görüldüğü gibi atmosferik şartlarla kıyaslandığında motor torku ve motor gücünde önemli ölçüde fark vardır. Atmosferik şartlarda, 750 °C ısıtıcı sıcaklığında, 0.347 Nm’ de 7.23 W elde edilen motor gücü, aynı sıcaklıkta 0.5 bar şarj basıncında 0.603 Nm motor torkunda, 20.8 W, 1.0 bar basınçta, 0.825 Nm motor torkunda 25.5 W, 1.5 bar basınçta 0.498 Nm motor torkunda 17.7 W ve 2.0 bar basınçta 0.558 Nm motor torkunda 15.1 W güç elde edilmiştir. Görülüyor ki atmosfer üstü şartlarda motor torku ve gücü, atmosferik şartlara göre yaklaşık üç kat fazla çıkmaktadır. 1.0 bar basınçtan sonra tork ve güçte azalma meydana gelmektedir. Bunun nedeni, şarj basıncı ile çalışma hacmindeki gaz basıncı arasındaki basınç farkının artması bu durumu olumsuz etkilemektedir. Bunun yanında şarj basıncı arttığında çalışma hacmindeki gazın kütlesinin artması sonucunda ısıtıcı gaz kütlesini ısıtmak için ısıtıcı gücünün yetersiz kalması ve çevrim üst sıcaklığının düşük kalması olarak gösterilebilir.



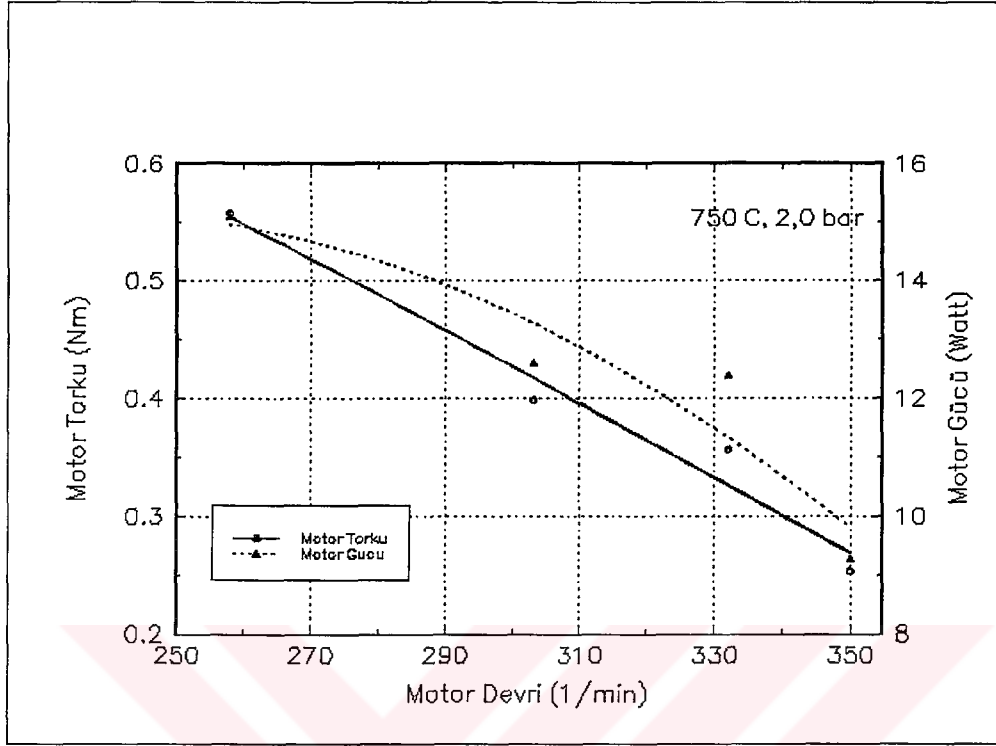
Şekil 5.26. Motor Devrine Göre Tork ve Güç Değişimi  
(750 °C, 0.5 bar şarj basıncında)



Şekil 5.27. Motor Devrine Göre Tork ve Güç Değişimi  
(750 °C, 1.0 bar şarj basıncında)

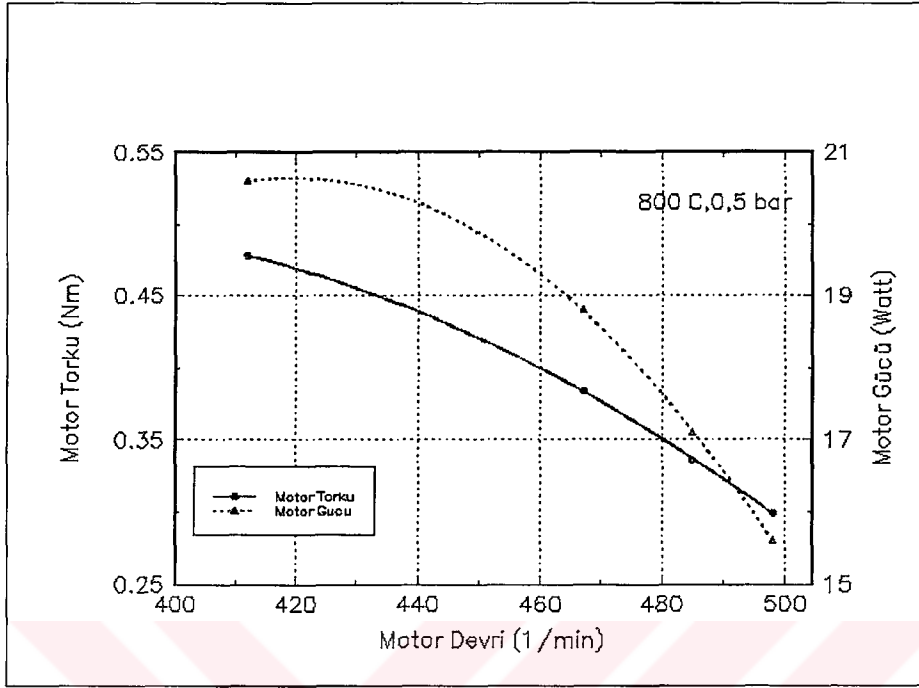


Şekil 5.28. Motor Devrine Göre Tork ve Güç Değişimi  
(750 °C, 1.5 bar şarj basıncında)

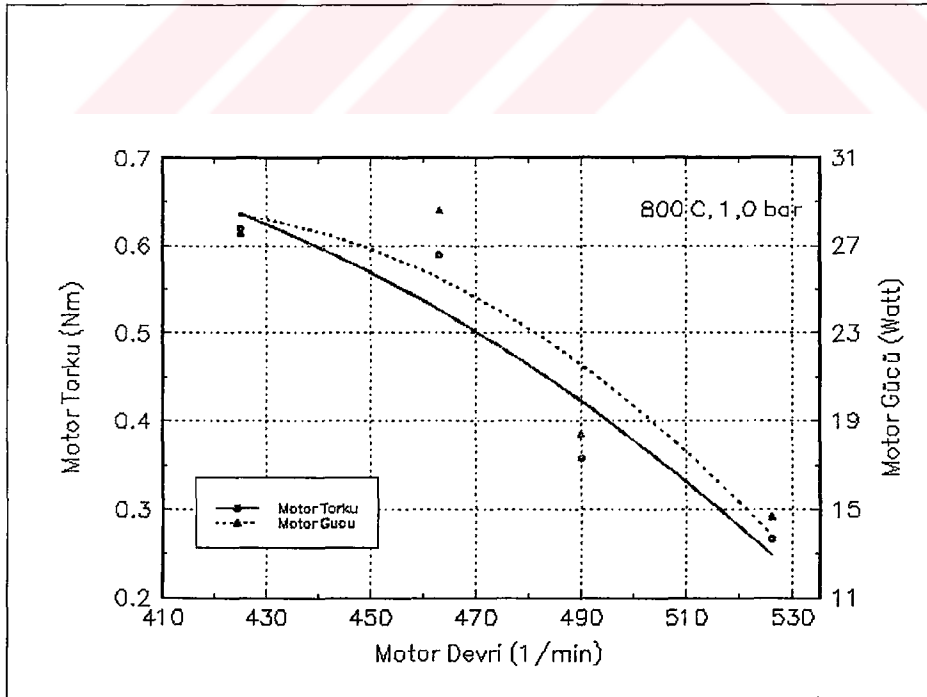


Şekil 5.29. Motor Devrine Göre Tork ve Güç Değişimi  
(750 °C, 2.0 bar şarj basıncında)

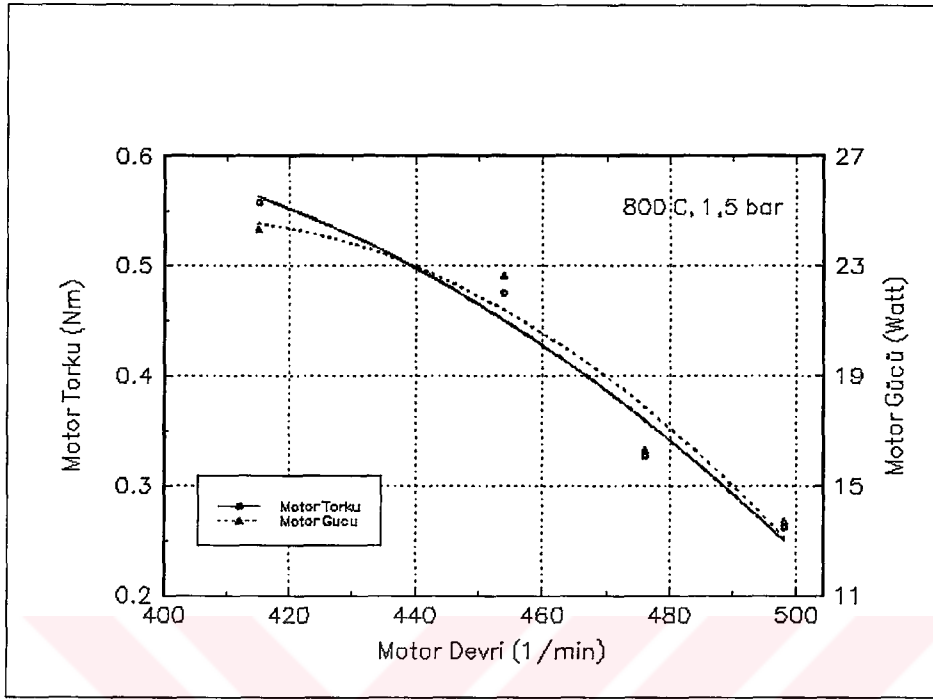
Şekil 5.30, Şekil 5.31, Şekil 5.32 ve Şekil 5.33' te yine 800 °C ısıtıcı sıcaklığında 0.5 bar, 1.0 bar, 1.5 bar ve 2.0 bar şarj basınçlarında motor devrine göre motor torku ve motor gücü değişimleri görülmektedir. Grafikler incelendiğinde 800 °C ısıtıcı sıcaklığında elde edilen motor torku ve güç değerlerinin, 750 °C ısıtıcı sıcaklığında elde edilen değerlere göre yüksek olduğu görülmektedir. 800 °C ısıtıcı sıcaklığında elde edilen grafikler birbiri ile kıyaslandığında şarj basıncı arttıkça motor devrinin azaldığı görülmektedir. 1.0 bar şarj basıncında maksimum güç devri 485 1/min' dir.



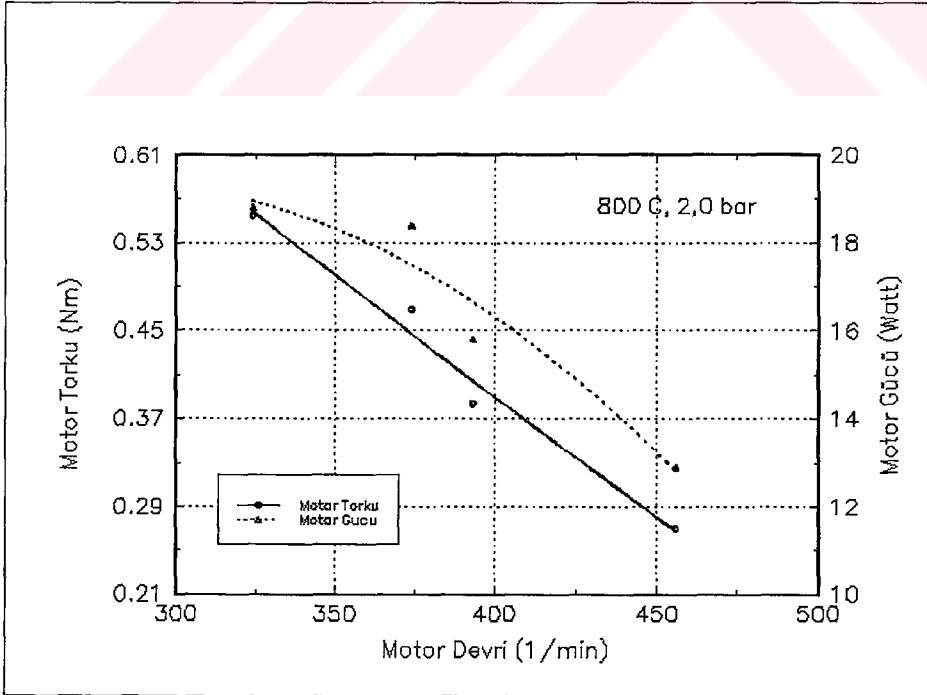
Şekil 5.30. Motor Devrine Göre Tork ve Güç Değişimi  
(800 °C, 0.5 bar şarj basıncında)



Şekil 5.31. Motor Devrine Göre Tork ve Güç Değişimi  
(800 °C, 1.0 bar şarj basıncında)



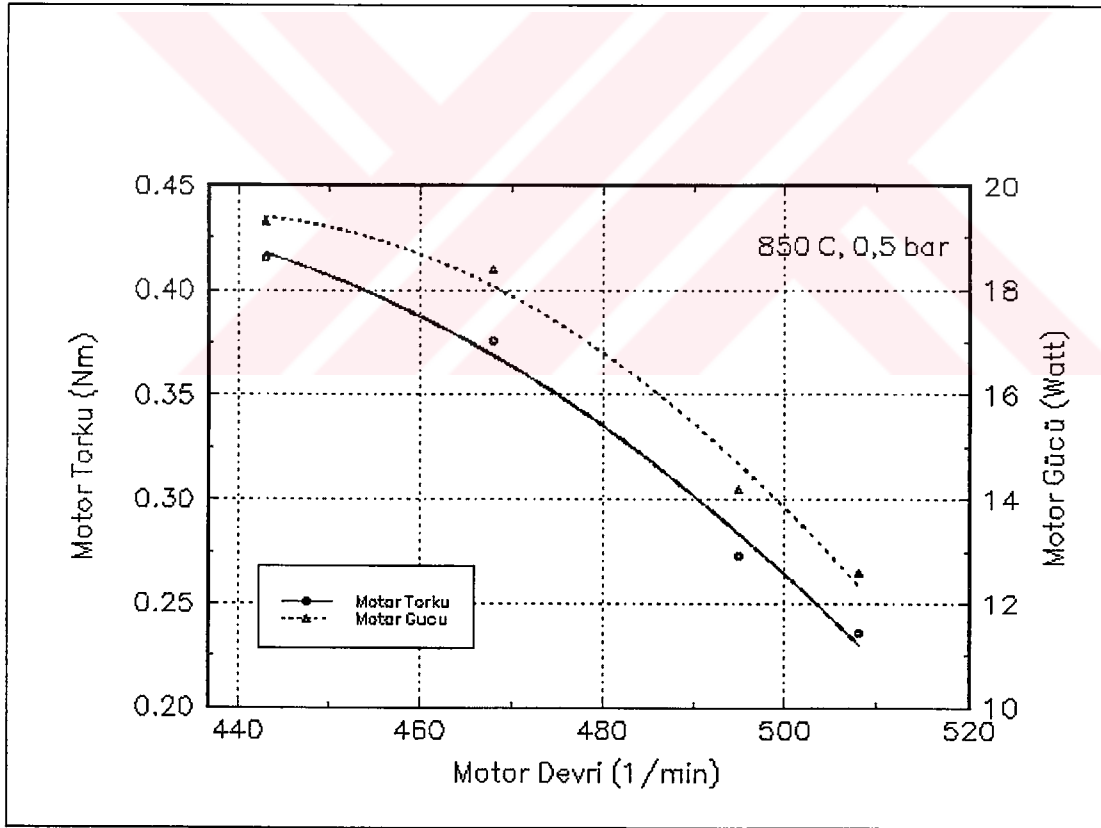
Şekil 5.32. Motor Devrine Göre Tork ve Güç Değişimi  
(800 °C, 1.5 bar şarj basıncında)



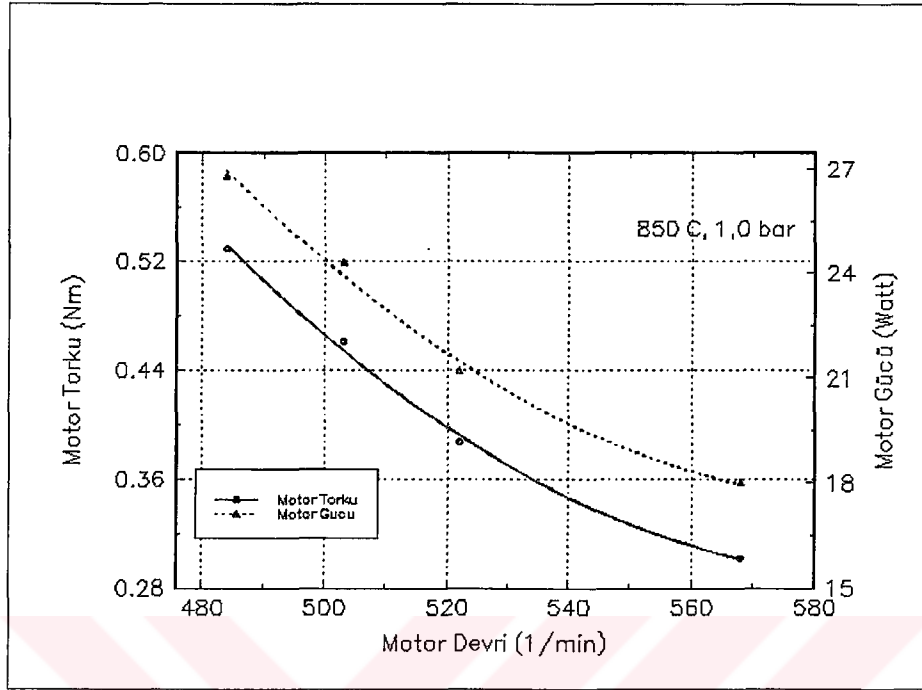
Şekil 5.33. Motor Devrine Göre Tork ve Güç Değişimi  
(800 °C, 2.0 bar şarj basıncında)



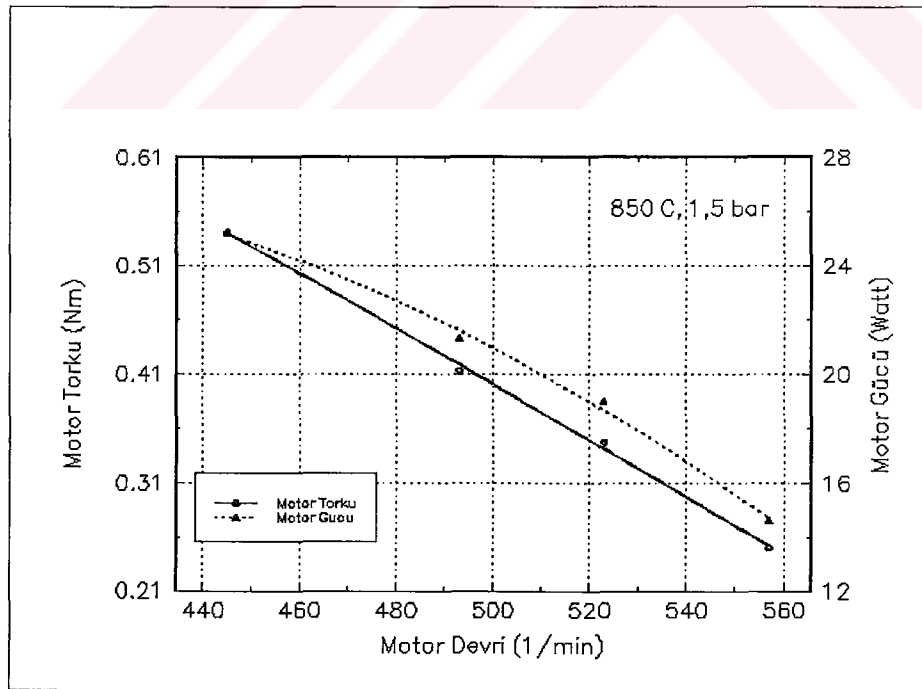
Şekil 5.34, Şekil 5.35, Şekil 5.36 ve Şekil 5.37’ de ise 850 °C ısıtıcı sıcaklığında, 0.5 bar, 1.0 bar, 1.5 bar ve 2.0 bar şarj basınçlarında motor devrine göre tork ve güç değişimi görülmektedir. Grafikler birbiri ile kıyaslandığında önceki grafiklerle benzerlik göstermektedir. 850 °C ısıtıcı sıcaklığında elde edilen tork ve güç değerleri, 750 °C ve 800 °C ısıtıcı sıcaklıklarına göre elde edilen değerlere göre yüksek çıkmıştır. Maksimum güç devri yine 1.0 bar’ da elde edilmiştir. Bu şarj basıncından sonra motor devri düşmektedir. Motor devrinin 1.0 bar’ şarj basıncından sonra düşmesinin sebebi, ısıtıcı ısı transfer yüzey alanının ve ısıtıcı gücünün bu şarj basıncından sonra yetersiz kalmasıdır. Isı transfer yüzey alanını artırmak ve ısıtıcı gücünü yükseltmek gerekmektedir.



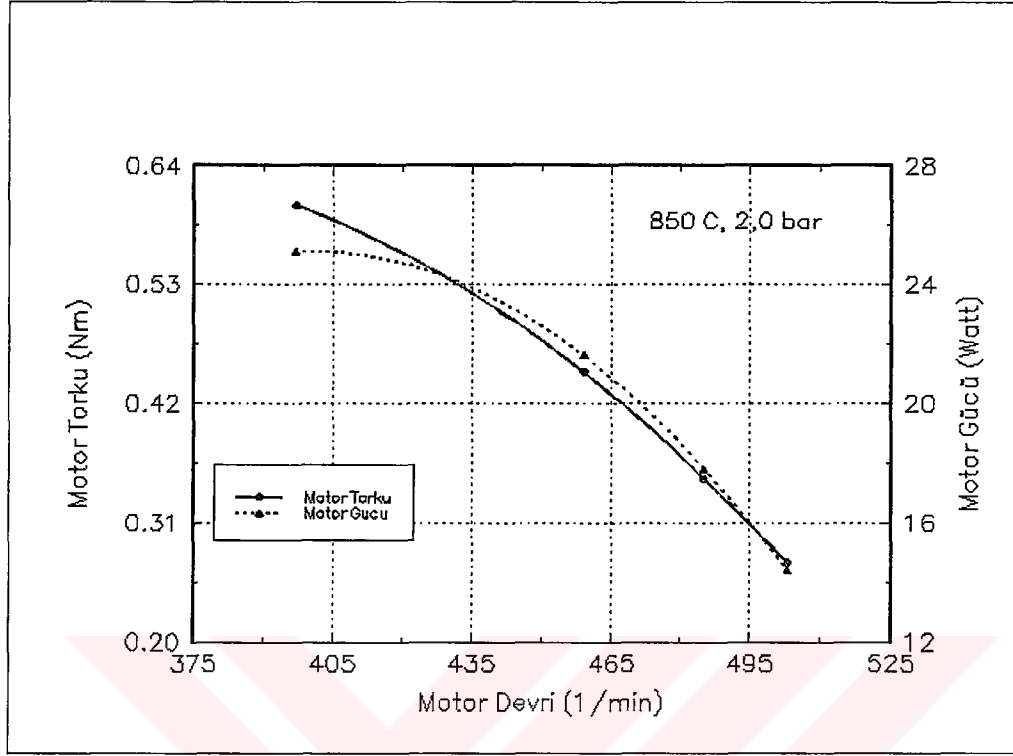
Şekil 5.34. Motor Devrine Göre Tork ve Güç Değişimi  
(850 °C, 0.5 bar şarj basıncında)



Şekil 5.35. Motor Devrine Göre Tork ve Güç Değişimi  
(850 °C, 1.0 bar şarj basıncında)

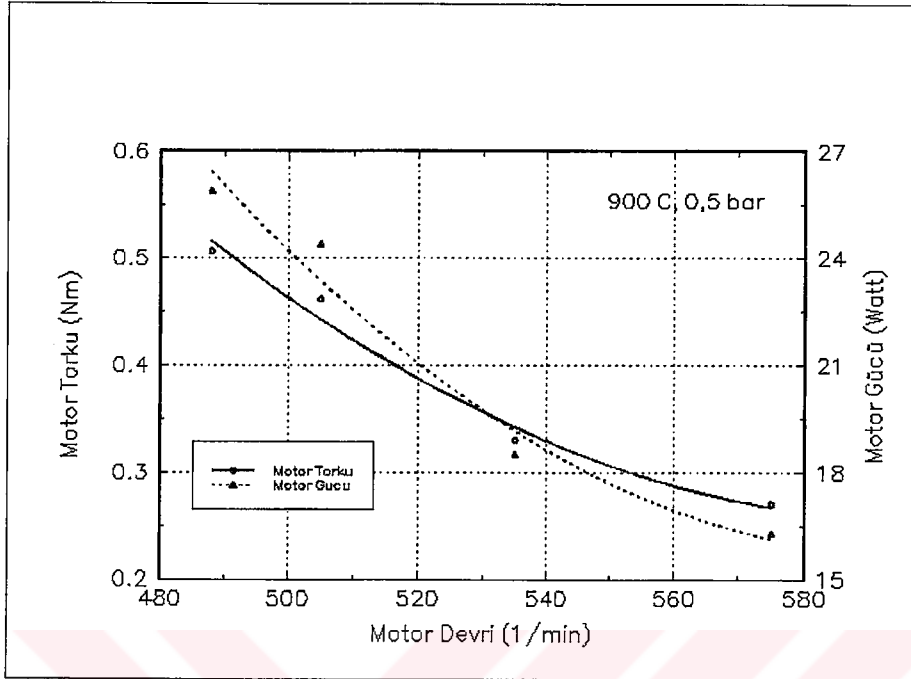


Şekil 5.36. Motor Devrine Göre Tork ve Güç Değişimi  
(850 °C, 1.5 bar şarj basıncında)

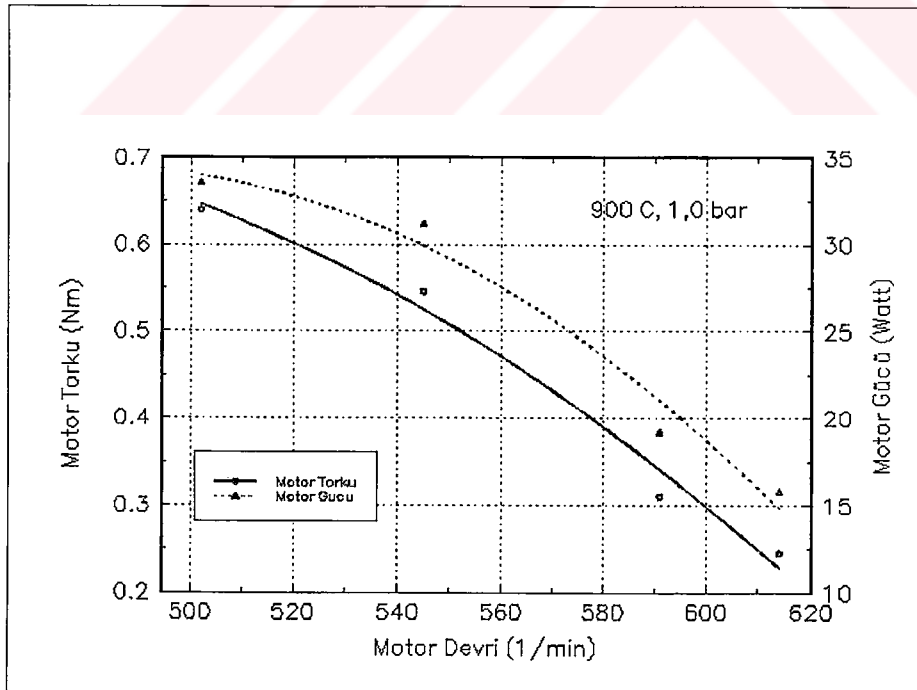


Şekil 5.37. Motor Devrine Göre Tork ve Güç Değişimi  
(850 °C, 2.0 bar şarj basıncında)

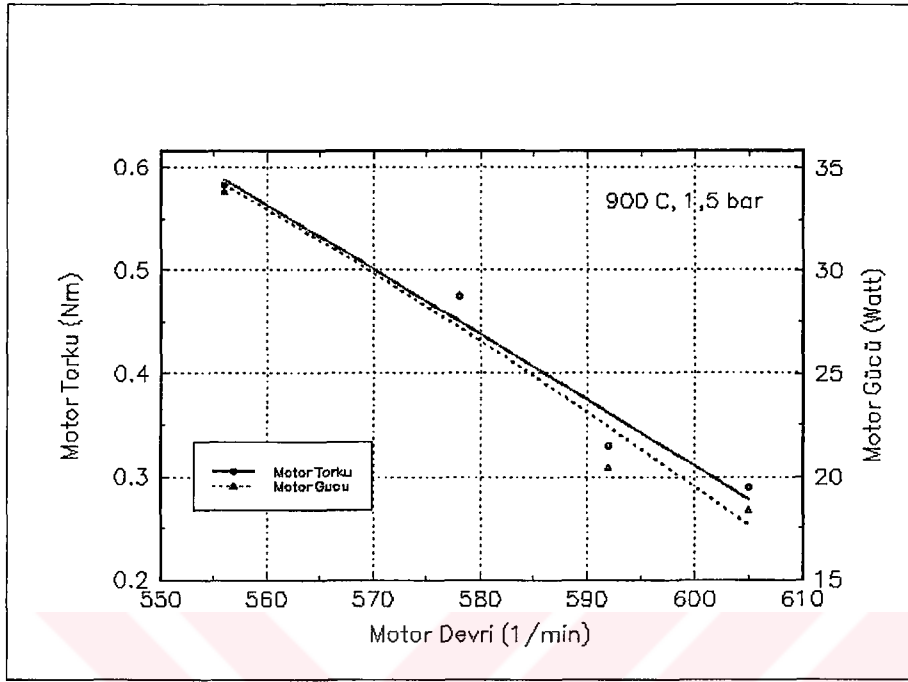
Şekil 5.38, Şekil 5.39, Şekil 5.40 ve Şekil 5.41’ de 900 °C ısıtıcı sıcaklığında, değişik şarj basınçlarında motor devrine göre tork ve güçteki değişim görülmektedir. Maksimum güç devri 1.0 bar basınçta 556 1/min olarak ölçülmüştür. Bu şarj basıncından sonra motor torku ve motor gücü azalmaktadır. Motor gücü önceki ısıtıcı sıcaklıklarına göre kıyaslandığında 33.6 W ile en yüksek değerdedir. Bu da gösteriyor ki şarj basıncı ve ısıtıcı sıcaklığı motor gücü optimum noktaya kadar artma eğilimi göstermektedir.



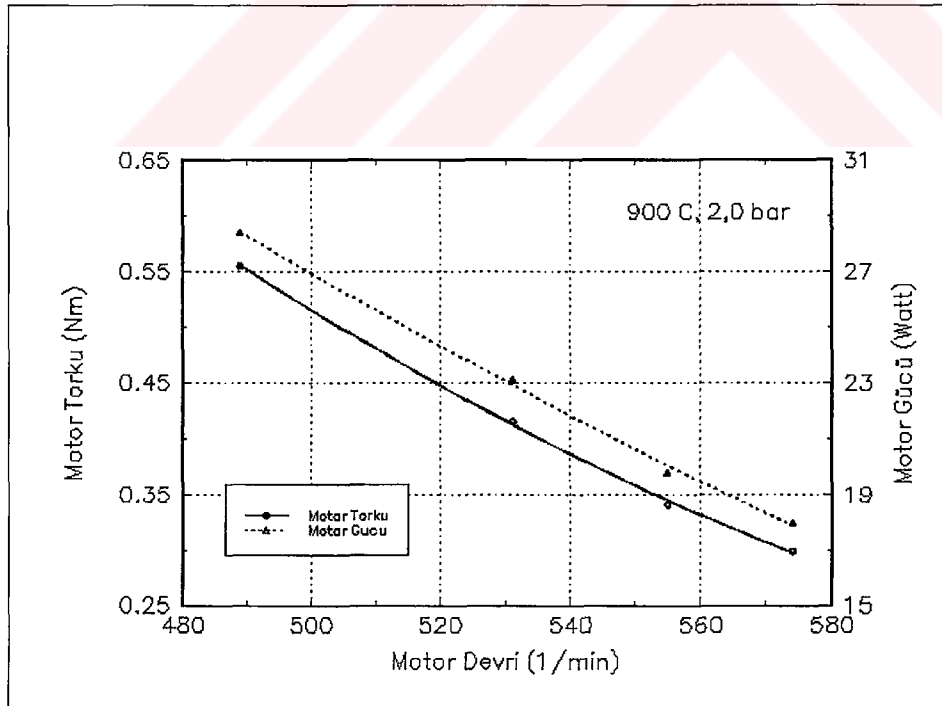
Şekil 5.38. Motor Devrine Bağlı Tork ve Güç Değişimi  
(900 °C, 0.5 bar şarj basıncında)



Şekil 5.39. Motor Devrine Bağlı Tork ve Güç Değişimi  
(900 °C, 1.0 şarj basıncında)

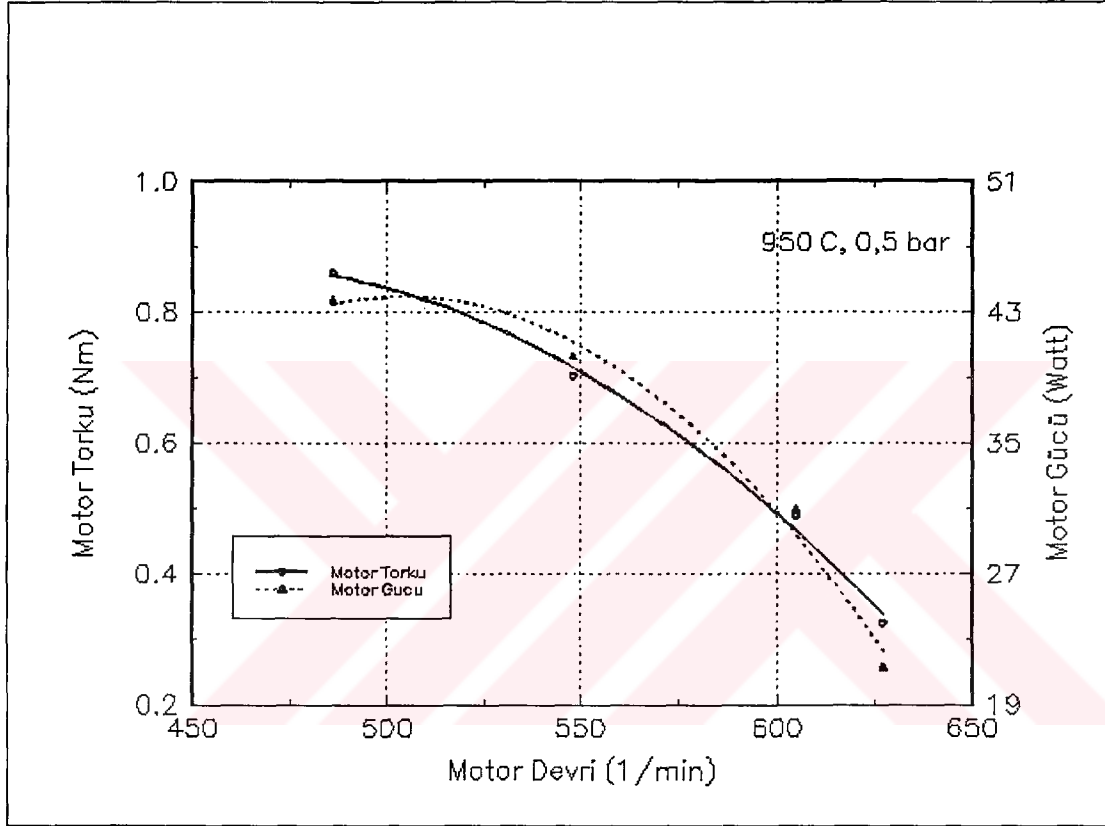


Şekil 5.40. Motor Devrine Bağlı Tork ve Güç Değişimi  
(900 °C, 1.5 bar şarj basıncında)

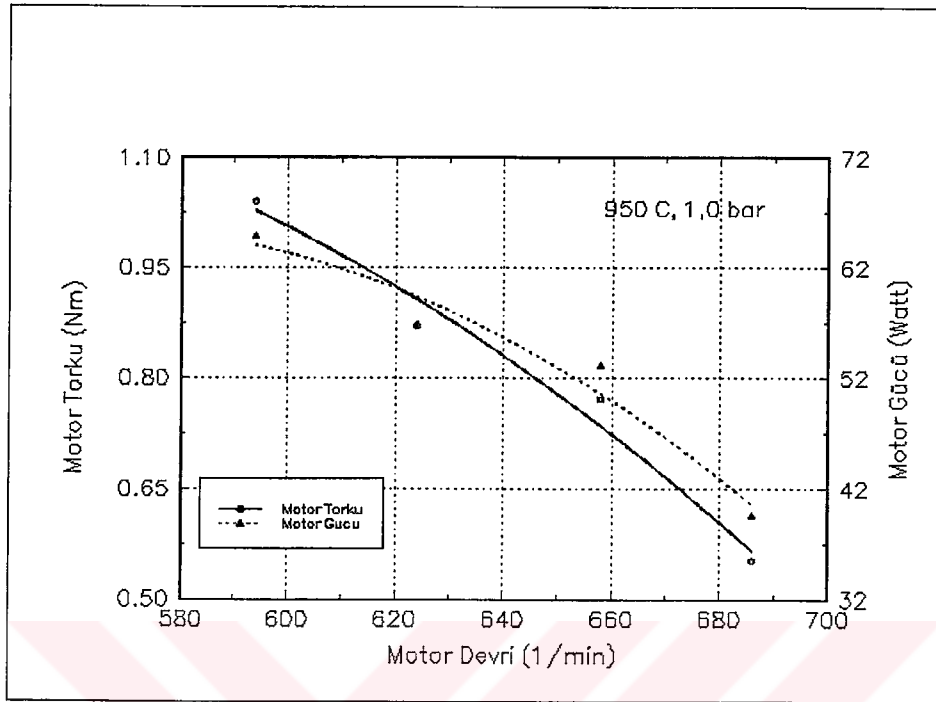


Şekil 5.41. Motor Devrine Göre Tork ve Güç Değişimi  
(900 °C, 2.0 bar şarj basıncında)

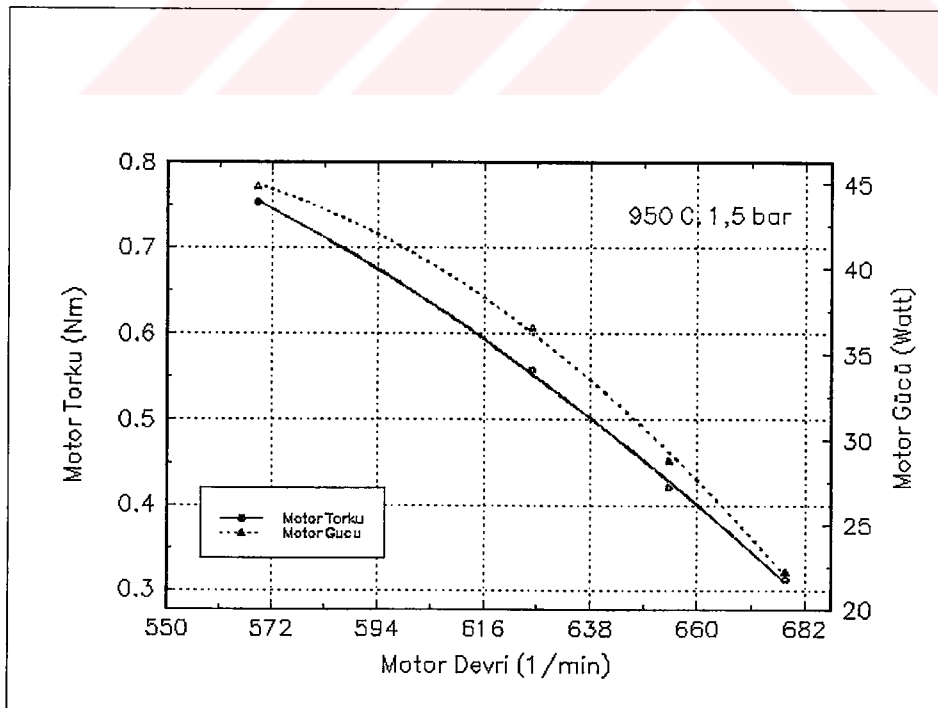
Şekil 5.42, Şekil 5.43, Şekil 5.44 ve Şekil 5.45’ te ise 950 °C ısıtıcı sıcaklığında motor devrine bağlı aynı şarj basınçlarında motor torku ve gücün değişimi görülmektedir. 1.0 bar şarj basıncında maksimum güç 64.9 W, maksimum güç devri ise 594 1/min olarak ölçülmüştür.



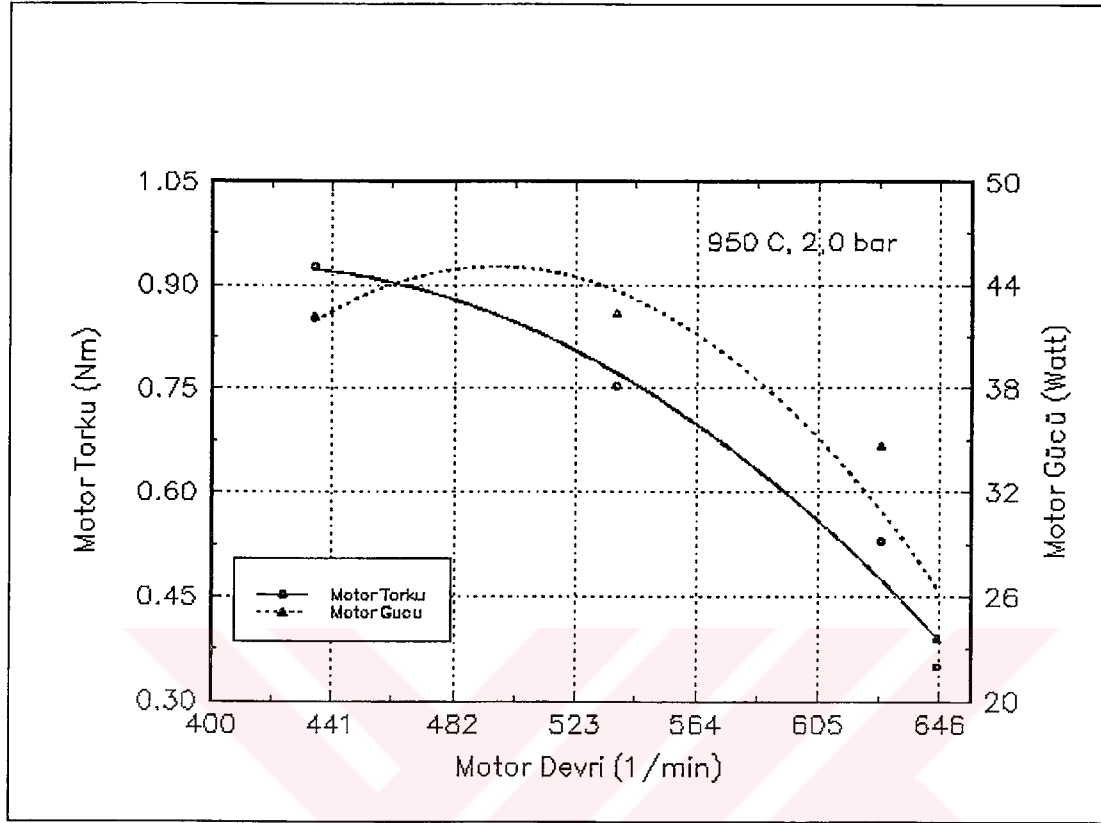
Şekil 5.42. Motor Devrine Göre Tork ve Güç Değişimi  
(950 °C, 0.5 bar şarj basıncında)



Şekil 5.43. Motor Devrine Göre Tork ve Güç Değişimi  
(950 °C, 1.0 bar şarj basıncında)



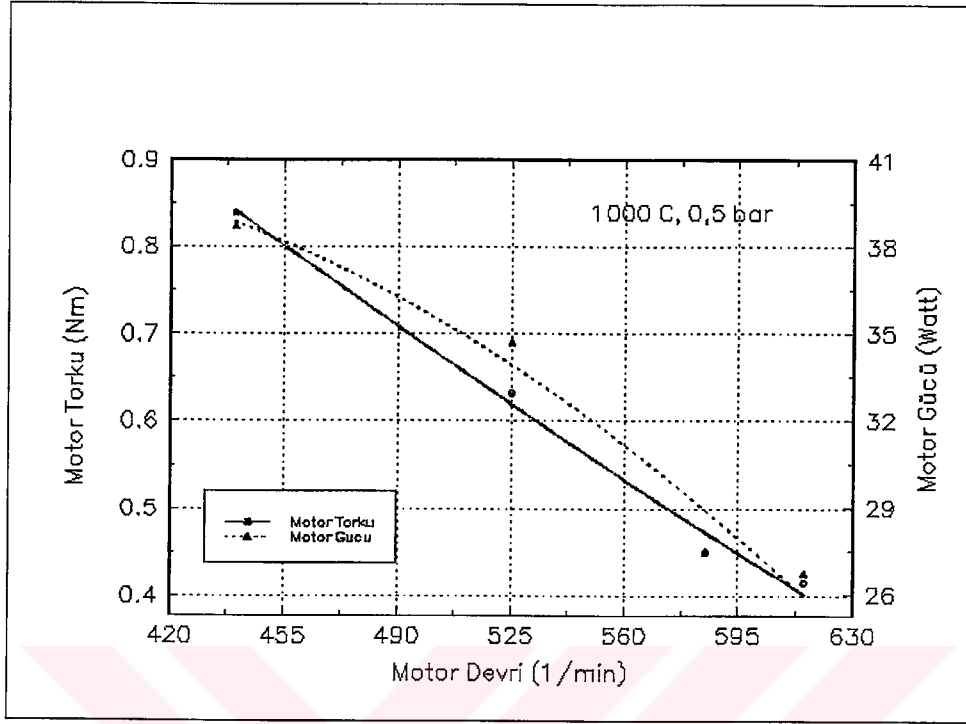
Şekil 5.44. Motor Devrine Göre Tork ve Güç Değişimi  
(950 °C, 1.5 bar şarj basıncında)



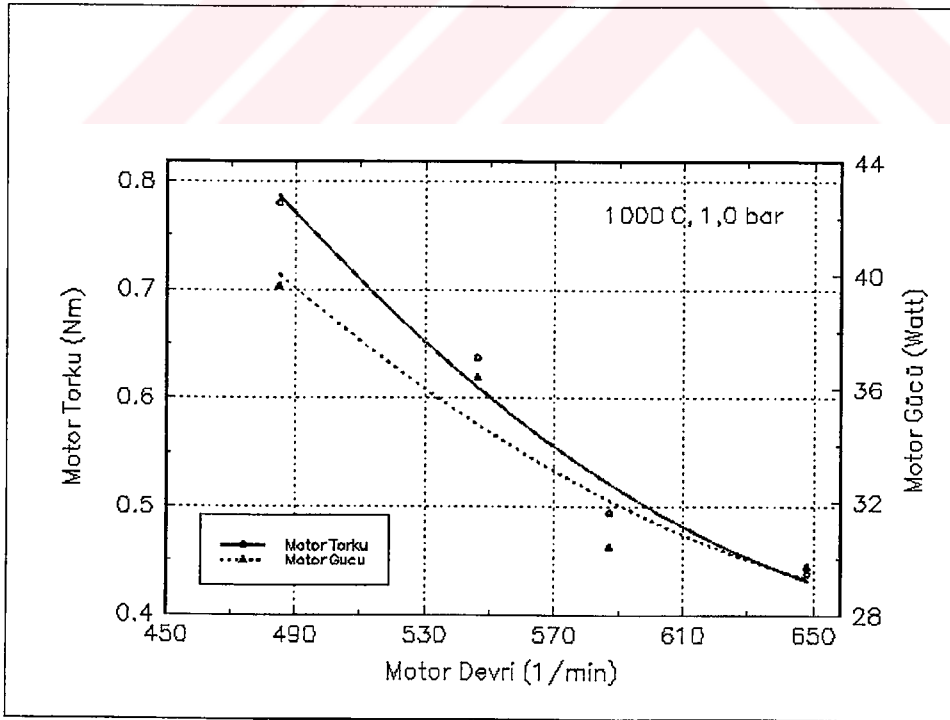
Şekil 5.45. Motor Devrine Göre Tork ve Güç Değişimi  
(950 °C, 2.0 bar şarj basıncında)

1000 °C' de sabit ısıtıcı sıcaklığında, 0.5 bar, 1.0 bar, 1.5 bar ve 2.0 bar şarj basınçlarında motor devrine göre motor torku ve motor gücü değişimi Şekil 5.46, Şekil 5.47, Şekil 5.48 ve Şekil 5.49' da verilmiştir. Önceki ısıtıcı sıcaklıklarında yükselme eğilimi gösteren motor torku ve gücü, 1000 °C sıcaklıkta düşme eğilimi göstermiştir. Bunun sebebi ısıtıcı ısı transfer yüzey alanının yetersiz kalması olabilir.

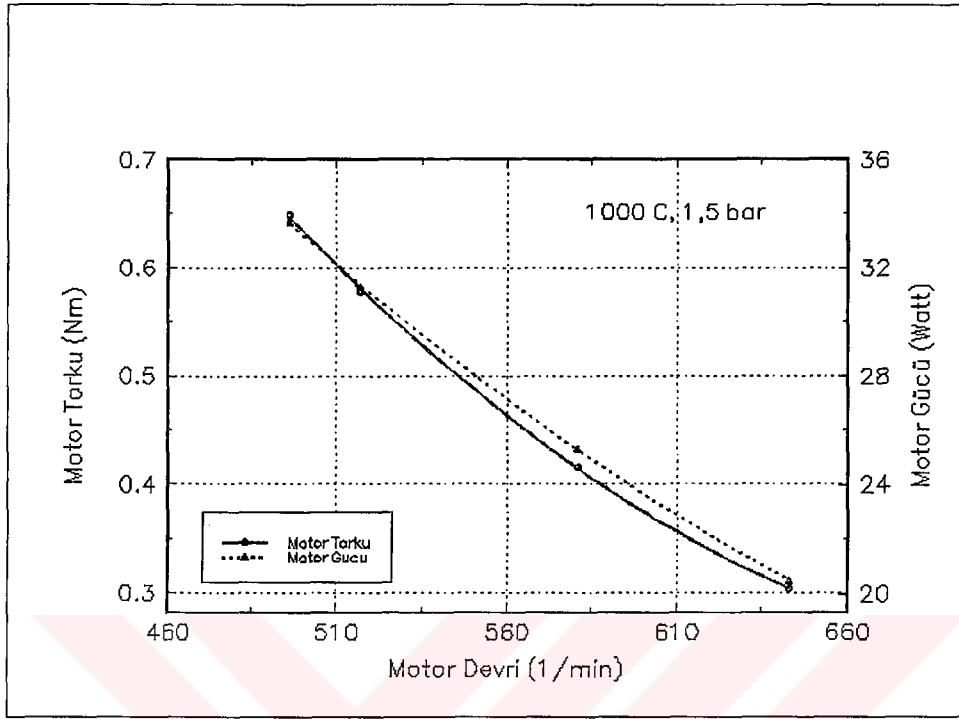




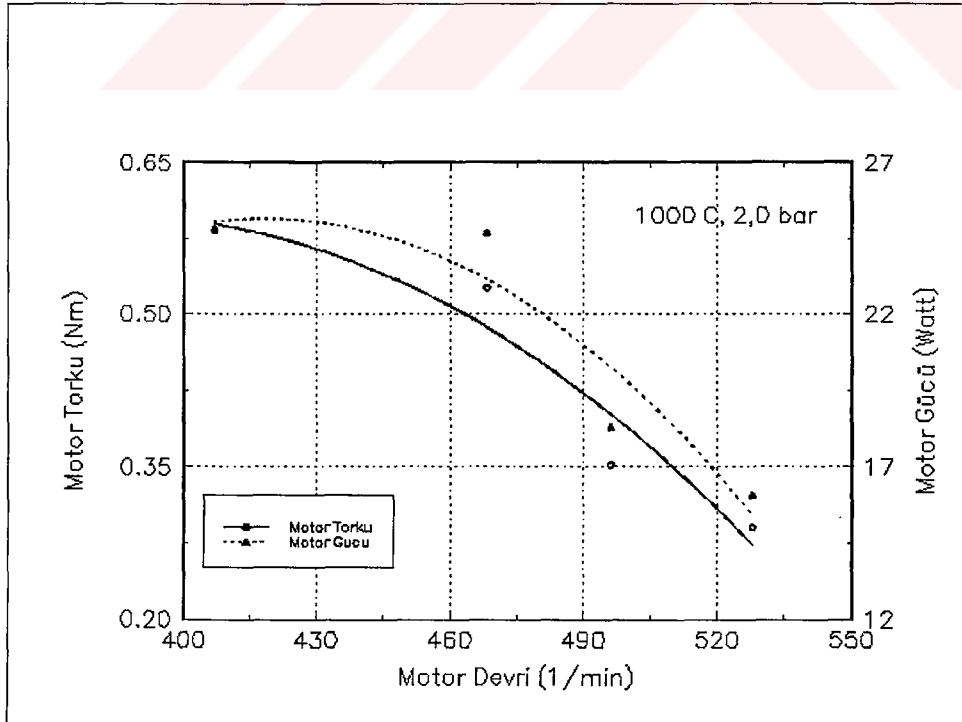
Şekil 5.46. Motor Devrine Göre Tork ve Güç Değişimi  
(1000 °C, 0.5 bar şarj basıncında)



Şekil 5.47. Motor Devrine Göre Tork ve Güç değişimi  
(1000 °C, 1.0 bar şarj basıncında)



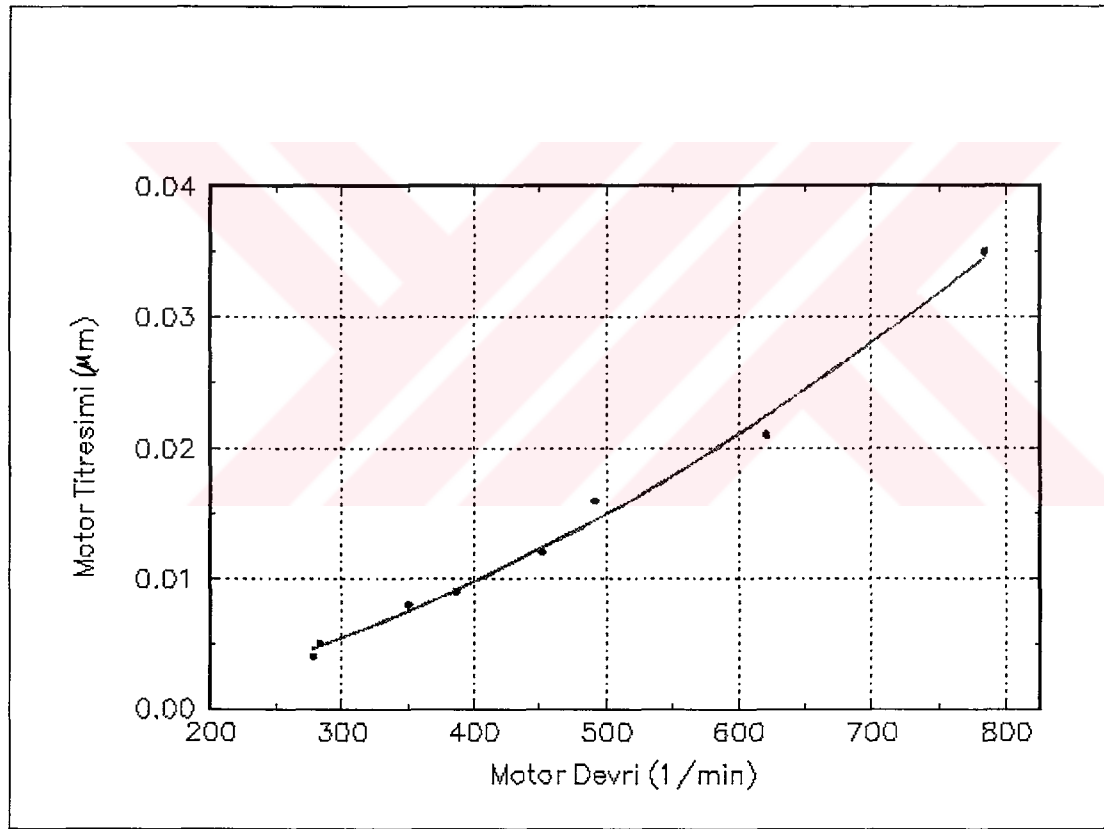
Şekil 5.48. Motor Devrine Göre Tork ve Güç değişimi  
(1000 °C, 1.5 bar şarj basıncında)



Şekil 5.49. Motor Devrine Göre Tork ve Güç Değişimi  
(1000 °C, 2.0 bar şarj basıncında)

### 5.2.7. Motor devrine göre titreşim değişimi

Şekil 5.50' de Motor devrine göre titreşim değişimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi motor 278 1/min' e kadar titreşimsiz olarak çalışmaktadır. Ancak, bu devirden sonra krank mili ekseninde dönme yapan dengelenmemiş kuvvetlerin artması sebebiyle titreşimler giderek artmaktadır. Motor devri ile titreşim doğru orantılı olarak değişmektedir. Krank milinin ve piston-biyel mekanizmasının hassas dengelenmesi halinde titreşim minimum seviyeye indirilebilir.



Şekil 5.50. Motor Devrine Göre Titreşim Değişimi

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

İmal edilen V ( $\alpha$ ) tipi, çift yer değiştirme pistonlu stirling motorunda yapılan denemeler ve elde edilen sonuçlara göre, motorun piyasa şartlarında kullanılabilirliğinin sağlanabilmesi için bazı öneriler getirilmiştir. Yapılan bu çalışmada ;

Motor gücü olarak atmosferik şartlarda 950 °C sıcaklıkta, 287 l/min' de 23,94 W, şarjlı ölçümlerde ise 950 °C sıcaklıkta, 1.0 bar şarj basıncında, 594 l/min' de 64,9 W güce ulaşılmıştır. Motor 1-1,5 bar arası şarj basınçlarında maksimum güce ulaşmakta, bunun alt ve üstündeki şarj basınçlarında çalışma verimi düşmektedir.

Motor verimi % 11 olarak bulunmuştur. Motor verimini yükseltmek için sistemdeki ölü hacimlerin ve kaçakların giderilmesi gerekmektedir.

Motor devri ısıtıcı sıcaklığına bağlı olarak artış göstermektedir.

Isıtıcı sıcaklığını malzeme dayanım sınırına kadar yükseltmek motor torku ve gücünün iyileştirilmesinde çok etkili rol oynamaktadır.

Sisteme şarj basıncı karterden yapılmıştır. Motordaki sızdırmazlık kalitesinin arttırılması sonucunda sadece ısıtıcı-soğutucu bölümünden yapılacak şarj daha etkili olacaktır.

Şarj basıncının arttırılması veya ısıtıcı sıcaklığının yükseltilmesi motor gücünü arttırmakla birlikte, ısıtıcının ısı transfer yüzey alanının da genişletilmesi gerekmektedir.

Isıtma verimini arttırmak üzere, ısıtıcı sayısını arttırmak, birim ağırlığa gelen güç miktarını arttırmaktadır.

Bu çalışmada 500 W'lık bir motor tasarlanmış ancak yapılan ölçümlerde 594 l/min' de 64,9 W güç elde edilmiştir. Daha fazla güç için motordaki ölü hacimlerin en aza indirilmesi, krank-biyel mekanizmasının iyi bir şekilde dengelenmesi, iş hacmine şarj yapabilmek üzere sistemde iyi bir sızdırmazlık sağlanması gerekmektedir.

Stirling motorlarının içten yanmalı motorlarla rekabet edebilmesi için sızdırmazlık ve ölü hacim ve ısı iletiminin iyileştirilmesi problemleri dışında güneş enerjisinin depolama problemlerinin de çözülmesi gerekmektedir. Bunun yanında motorun güneş enerjisi ile kullanımı çevre dostu ve ucuz olduğundan, sulama amaçlı sabit tesis motoru olarak kullanılması halinde motorun güneş enerjisinden en iyi şekilde yararlanabilmesi için güneşi takip eden kollektörler kullanılabilir.

İmal edilen çift yer değiştirmeli pistonlu, V tipi motor Türkiye' de bilinen ilk örnektir. Prototipte dengeleme, sızdırmazlık, ısı iletimi ve ölü hacim problemleri mevcuttur. Bu problemler çözümlendiği takdirde sabit tesis motoru olarak piyasa şartlarında kullanılması mümkündür.

## KAYNAKLAR

- Albert, E, Richey., “Mod II Automotive Stirling Engine Desing Description and performance Projections”, SAE 860059, 1987. Automotive Engineers, Inc.
- Beale, W., Holmes, W., Levis, S., Cheng, E., 1973, “Free - Piston Stirling Engines A Progress Report”, SAE Paper 730647, June.
- Braun, Harry W., Hydrogen Engineering Associates Phoenix, Arizona, Solar Energy Technology, vol 13, 1992.
- Borat, O., Balcı M., Sürmen A., 1994, İçten Yanmalı Motorlar, Cilt 1,
- Claus, R., 1994, Philips technical review, vol. 31., no 5/6.
- Cooke, E, H., Yarborough, MA., F Eng, FInstP, FIEE, Atomic Energy Authority Research Establishment, Harwell, Oxfordshire, IMech E, 1982.
- Çetinkaya, S., 1999 “Gaz Türbinleri ”, pg 34- 46, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.
- D M Clucas, PhD and J, K, Raine., BE, PhD, Ceng, FIMech E, FIPENZ, MSAE-A “A New Wobble Drive With Particular Application in a Stirling Engine” Departmen of Mechanical Engineering, University of Cantebury, Christchurch, New Zealand, June, 1994.
- Devins, D, W., “İts Physical İmpoct on the Environment”, Energy, 1988, Newyork.
- Energy Sources, Journal of Extraction, Conversion, and the Environment., , Volume 20, Number 2, Februaryδ March, 1998.
- Finkelstein, T., 1959, Air Engines I, The Engineer, pg. 492-497, 27 March.
- Finkelstein, T., 1959, Air Engines II, The Engineer, pg.522-527, 3 April.
- Finkelstein, T., 1959, Air Engines III, The Engineer, pg.720-722, 10 April.
- Gang, Chen., 1991, The limit of Stirling engine power, ISEC paper no 91019, Dubrovnik 8-10 May.
- Goswami, Y, D., “Solar Thermal Power Technology Present Status and İdeas for the Future” Energy sources, Volume 20, Number 2, March 1998.
- Güneş Enerjisi ve Çevre (Bildiriler), IV. Türk - Alman Enerji sempozyumu, İzmir, 1992.

Güven Çelik Ltd., 1991

Gupta, B. P., 1987, Status and Progress in Solar Thermal Research and Technology. In Progress in Solar Engineering, ed., D.Y. Goswami., Washington, D.C., Hemisphere.

Isshiki, N., Shishido, K., Watanabe, K., 1991, "Research and Development on Solar Stirling Engine TNT-1,2 and 3" , 5<sup>th</sup> International Stirling Engine Conference (ISEC), 8-9-10 May., Dubrovnik, pg. 279-284.

Karabulut, H., 1997, "Stirling Motorlarının Termodinamik Simülasyonu " Türk Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, Mart 1997, Ankara.

Karabulut, H., "Akışkanlar Mekaniği" ders notları, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Ankara

Koca, A., " V Tipi Bir Stirling Motorunun Tasarım ve İmali " Doktora tezi, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Mayıs 1997.

Komakine, T., at all., 1985, "Performance of A 3 kW Prototype Stirling Engine for A Gas-Fired Residential Heat Pump", SAE/P-85/164/502.50

Mair, L., "Hot Air, Caloric, Stirling and Vacuum Engines", U.K., 1987, <http://www.argonet.co.uk/users/bobsier/sola2.html>

Mancini, T., 1994, The DOE Solar Elektrik Program . In proceedings of the 29<sup>th</sup> Intersociety energy conversion engineering conference, pp. 1790-1795.

Martini, W. R., 1978, Stirling Engine Design Manual, U.S. Department of Energy, DOE/NASA/3152-78/1, NASA CR-135182, April.

Meteoroloji Bülteni, 1984, Türk Tarih Kurumu Matbaası, Ankara.

Michels, A, P, J, 1976, The Philips Stirling Engine: A Study its Efficiency As a Function of Operating Temperatures and Working Fluids, 769258, 11<sup>th</sup> IESECEC Sahara Tahoe Hotel, Stateline, Nevada, september 12-17.

Meijer, R. J., "The Philips hot-gas engine with rhombic drive mechanism " Philips Tech. Reve, 20, pp.245-246 (1959).

Meijer, R. J., The Philips Stirling Thermal Engine, Thesis , Technische Hogescholl Delf, November 1960.

Meijer, R. J., 1970, "Prospects of the Stirling engine for vehicular propulsion ", Berkshire, pg. 99-111.

- Meijer, R. J., Spight, C. L., 1974, The Potential of the Philips Stirling Engine for Pollution Reduction and Energy Conservation, Second Symposium on Low Pollution Power Systems Development, Düsseldorf, Germany, November.
- Pedroso, R. I., 1976, The Stirling Engine - Engineering Considerations in View of Future Needs, pp.769-225, pg.1498-1505, 11<sup>th</sup> IECEC, Sahara Tahoe Hotel, Stateline, Nevada, 12-17 September.
- Phillips, D., "Airsport Corporation Stirling Engine Page" E-mail: darryl @ airsport-corporation, 1994.
- Reader, G. T., 1987, "Stirling Engine Work in The Royal Navy" Society of Automotive Engineers, Royal Naval Engineering College, Plymouth, UK.
- "Rhombic Drive Stirling" <http://www.geocities.com/~rrice2/ttr/ttr.html>, 17 November 1998.
- Rix, D. H., 1996, "Some aspect of the outline desing specification of a 0.5 kW Stirling Engine for domestic scale co - generation" BSc. PhD. CEng. MIMechE. Department of Engineering. University of Cambridge.
- Simetkosky, M., 1985, "MOD- I Automotive Stirling Engine Mechanical Development ", SAE 840462.
- Spight, C. L., Daniels, A., 1974 "The Philips Stirling Engine", A Progress Report, Proc 10<sup>th</sup> IECEC, Newark, N. J., 17-22, August.
- Sustainable Engine Systems Ltd., 1993, 51 Artesian Road, London.
- Trukhov, V. S., Tursunbaev, I. A., 1987, "Stirling Engine for Autonomous Solar Energy Unit of 0.5 kW" , Express-Information, Tashkent.
- The Tenth Annual Report of the Council on Environmental Quality. Washington D.C., U.S. Government Printing Office, 1979, p.66.
- Urieli, I., Rallis, C. J., 1975, "Stirling Cycle Engine Development - A Review", University of Witwatersrand, Department of Mechanical Engineering, Report no:67.
- Urielli, U., Berchowitz, D. M., 1984, Stirling Cycle Machine Analysis, Adam Hilger Ltd., Bristol.
- Uyarel, A. Y., Öz, E. S., 1987, "Güneş Enerjisi ve Uygulamaları", Emel Matbaacılık Sanayii, Ankara.

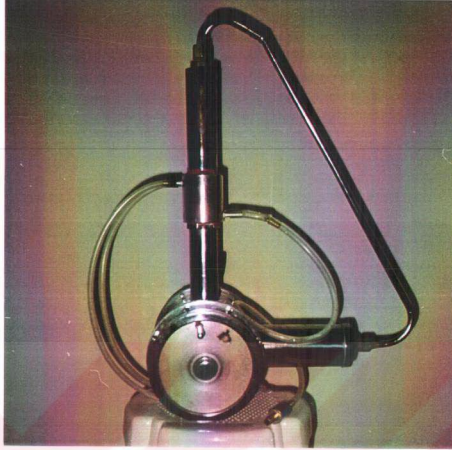


- Walker, G., 1980, "Stirling Engines", Calredon Pres, Oxford.
- Walker, G., 1981, Stirling Engines, Calredon Press, Oxford. Pavletic, R., Prebil, I., Vuksanovic, B., 1991, "Better Cycle Engines", University of Ljubljana., Yugoslavia.
- West, C. D., 1986, Principles and applications of stirling engines, Van Nosrand Reinhold, Newyork.
- White, M. A., Eming, S. G., and Ragle, P., 1987, "Practical Bellows Seals for Stirling Engines", SAE 870104.
- William, L, Haberman and James E.A., 1989, USA., Engineering Thermodynamic With Heat Transfer.
- Yücesu, H., "Küçük Güçlü Güneş Enerjili Bir Stirling Motoru Tasarımı" Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ekim 1996.

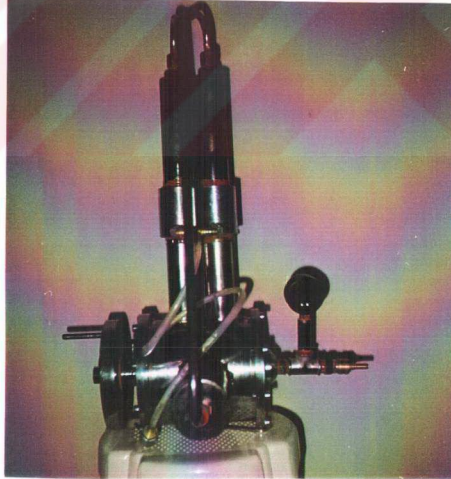




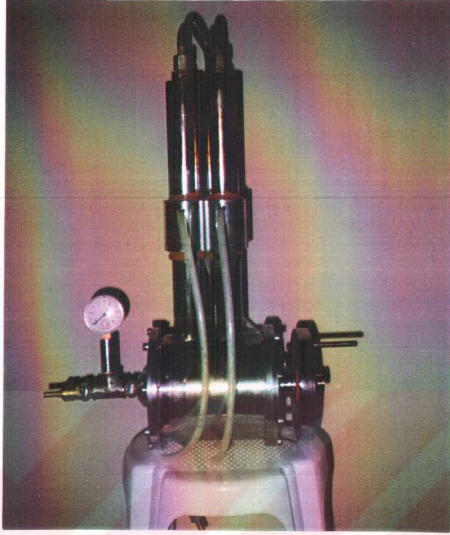
**EKLER**



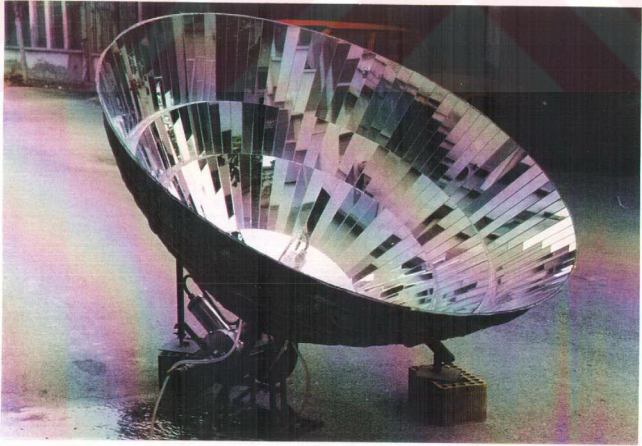
Şekil 4.1. İmal Edilen Çift Isıtıcı V Tipi Stirling Motoru  
(yandan görünüş)



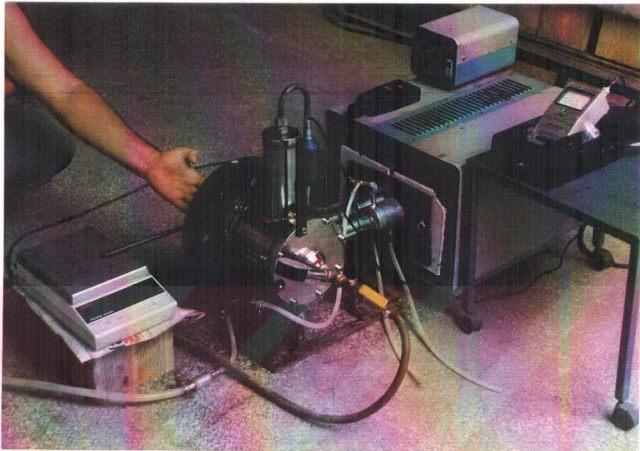
Şekil 4.1.a. İmal Edilen Çift Isıtıcı V Tipi Stirling Motoru  
(önden görünüş)



Şekil 4.1.b. İmal Edilen Çift Isıtıcı V Tipi Stirling Motoru  
(arkadan görünüş)



Şekil 4.1.c. Stirling Motoru ve Güneş Kolektörü



Şekil 4.9. Deney Tesisatı

**EK-2**

```

PROGRAM USTUN
OPEN(UNIT=13,FILE='USTUN.DAT',STATUS='NEW')
W=0.000483
CV=717.0
T2=1000.0
T1=1000.0
T3=350.0
TR1=650.0
N=20
PI=3.14
D=42.0/1000.0
DEL=0.001
TB=1000.0
R=288.0
A=1.57
VH=189.96/1000000.0
VR1=50.0/1000000.0
VB=63.61/1000000.0
DO 1 I=1,361
F=(I-1)*6.283185/360
V2=VH-(VH/2.0-VH*COS(F)/2.0)
V1=VH-(VH/2.0-VH*COS(F+A)/2.0)
V3=VH/2.0-VH*COS(F+A)/2.0
VT=V1+V2+VR1+V3+VB
P=W*R/(V1/T1+V2/T2+VR1/TR1+V3/T3+VB/TB)
U=CV*(P*V1+P*V2+P*V3+P*VB+P*VR1)/R
IF(I.GT.1)WORK=WORK+P*(VT-VTF)
IF(I.GT.1)DU=U-UF
IF(I.GT.1)DW=P*(VT-VTF)
DISI=DU+DW
VTF=VT
WRITE(13,32)P,VT,WORK,DISI,U
WRITE(*,*)WORK,DISI,U
1 CONTINUE
32 FORMAT (F9.1,2X,F8.6,2X,F7.3,2X,F10.6,2X,F10.3,)
STOP
END

```

**EK-3**

```

PROGRAM DISP
OPEN(UNIT=14,FILE='DIS.DAT',STATUS='NEW')
HC=0.00007619
EM=0.000483
EN=20.0
TH=1000.0
TC=350.0
PI=3.1415
DVG=3.55E-05
SNUS=4.0
DX=0.01
TCG=0.05
CV=717.0
EL=0.15
D=42.0/1000.0
DEL=0.0001
H=SNUS*TCG/DEL
R1=PI*D*H/(2.0*EN*EM*CV)
R2=R1*(TC-TH)/EL
A=PI*D*DEL
HIZ=(4.0*HC*EN)/A
WRITE(*,*)HIZ
DO 1 I=1,16
X=(I-1)*DX
T=TH+R2*EXP(-R1*X)/R1**2+R2*X/R1-R2/R1**2
TW=TH-X*(TH-TC)/EL
DELP=(-12.0*DVG*HIZ/DEL**2)*EL
Q=T*CV
WP=DELP*HC
WRITE(*,*)I,T,TW,Q
WRITE(14,32)T,TW,DELP,WP
1 CONTINUE
32 FORMAT(F7.2,2X,F7.2,2X,F9.1,2X,F7.2)
STOP
END□

```

## EK-4

## ÖLÇÜM DEĞERLERİ

## 1- Isıtıcı sıcaklığına bağlı tork-güç değişimi (şarjsız)

| <u>Isıtıcı</u><br><u>sıcaklığı</u><br><u>(°C)</u> | <u>Ağırlık</u><br><u>(gr)</u> | <u>Tork</u><br><u>(Nm)</u> | <u>Güç</u><br><u>(Watt)</u> |
|---------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 650                                               | 85                            | 0.242                      | 4.87                        |
| 700                                               | 75                            | 0.213                      | 5.33                        |
| 750                                               | 80                            | 0.228                      | 6.16                        |
| 800                                               | 122                           | 0.347                      | 11.3                        |
| 850                                               | 105                           | 0.299                      | 11.0                        |
| 900                                               | 120                           | 0.341                      | 13.4                        |
| 950                                               | 130                           | 0.370                      | 16.3                        |
| 1000                                              | 116                           | 0.330                      | 15.7                        |

## 2-Isıtıcı sıcaklığına bağlı olarak Tork-Güç değişimi

0.5 bar

| <u>Fırın Sic.</u><br><u>(°C)</u> | <u>Ağırlık</u><br><u>(gr)</u> | <u>Tork</u><br><u>(Nm)</u> | <u>Güç</u><br><u>(Watt)</u> |
|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 650                              | 112                           | 0.319                      | 7.02                        |
| 700                              | 92                            | 0.262                      | 8.67                        |
| 750                              | 212                           | 0.603                      | 20.8                        |
| 800                              | 168                           | 0.478                      | 20.6                        |
| 850                              | 146                           | 0.415                      | 19.3                        |
| 900                              | 178                           | 0.506                      | 25.9                        |
| 950                              | 302                           | 0.859                      | 43.7                        |
| 1000                             | 295                           | 0.839                      | 38.7                        |

1.0 bar

| <u>Fırın Sic.</u><br><u>(°C)</u> | <u>Ağırlık</u><br><u>(gr)</u> | <u>Tork</u><br><u>(Nm)</u> | <u>Güç</u><br><u>(Watt)</u> |
|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 650                              | 128                           | 0.364                      | 7.44                        |
| 700                              | 120                           | 0.341                      | 11                          |
| 750                              | 290                           | 0.825                      | 25.5                        |
| 800                              | 218                           | 0.620                      | 27.6                        |
| 850                              | 186                           | 0.529                      | 26.8                        |
| 900                              | 225                           | 0.640                      | 33.6                        |
| 950                              | 367                           | 1.04                       | 64.9                        |
| 1000                             | 274                           | 0.780                      | 39.6                        |



**1.5 bar**

| <b>Fırın Sıc.<br/>(°C)</b> | <b>Ağırlık<br/>(gr)</b> | <b>Tork<br/>(Nm)</b> | <b>Güç<br/>(Watt)</b> |
|----------------------------|-------------------------|----------------------|-----------------------|
| 650                        | 102                     | 0.290                | 6.99                  |
| 700                        | 113                     | 0.321                | 8.54                  |
| 750                        | 155                     | 0.441                | 15.7                  |
| 800                        | 196                     | 0.558                | 24.3                  |
| 850                        | 190                     | 0.541                | 25.2                  |
| 900                        | 205                     | 0.583                | 33.9                  |
| 950                        | 265                     | 0.754                | 44.9                  |
| 1000                       | 228                     | 0.649                | 33.7                  |

**2.0 bar**

| <b>Fırın Sıc.<br/>(°C)</b> | <b>Ağırlık<br/>(gr)</b> | <b>Tork<br/>(Nm)</b> | <b>Güç<br/>(Watt)</b> |
|----------------------------|-------------------------|----------------------|-----------------------|
| 650                        | 77                      | 0.219                | 4.13                  |
| 700                        | 105                     | 0.299                | 8.27                  |
| 750                        | 196                     | 0.558                | 15.1                  |
| 800                        | 195                     | 0.555                | 18.8                  |
| 850                        | 212                     | 0.603                | 25.1                  |
| 900                        | 195                     | 0.555                | 28.4                  |
| 950                        | 326                     | 0.927                | 42.2                  |
| 1000                       | 205                     | 0.583                | 24.8                  |

**3- Şarj basıncına göre Tork-Güç değişimi****750 °C**

| <b>Şarj Basıncı<br/>(bar)</b> | <b>Tork<br/>(Nm)</b> | <b>Güç<br/>(Watt)</b> |
|-------------------------------|----------------------|-----------------------|
| 0.5                           | 0.740                | 20.5                  |
| 1.0                           | 0.825                | 25.5                  |
| 1.5                           | 0.441                | 15.7                  |
| 2.0                           | 0.558                | 15.1                  |

**800 °C**

| <b>Şarj Basıncı<br/>(bar)</b> | <b>Tork<br/>(Nm)</b> | <b>Güç<br/>(Watt)</b> |
|-------------------------------|----------------------|-----------------------|
| 0.5                           | 0.478                | 20.6                  |
| 1.0                           | 0.620                | 27.6                  |
| 1.5                           | 0.558                | 24.3                  |
| 2.0                           | 0.555                | 18.8                  |

**850 °C**

| <b>Şarj Basıncı<br/>(bar)</b> | <b>Tork<br/>(Nm)</b> | <b>Güç<br/>(Watt)</b> |
|-------------------------------|----------------------|-----------------------|
| 0.5                           | 0.415                | 19.3                  |
| 1.0                           | 0.529                | 26.8                  |
| 1.5                           | 0.541                | 25.2                  |
| 2.0                           | 0.603                | 25.1                  |

**900 °C**

| <b>Şarj Basıncı<br/>(bar)</b> | <b>Tork<br/>(Nm)</b> | <b>Güç<br/>(Watt)</b> |
|-------------------------------|----------------------|-----------------------|
| 0.5                           | 0.506                | 25.9                  |
| 1.0                           | 0.640                | 33.6                  |
| 1.5                           | 0.475                | 28.8                  |
| 2.0                           | 146                  | 23.1                  |

**950 °C**

| <b>Şarj Basıncı<br/>(bar)</b> | <b>Tork<br/>(Nm)</b> | <b>Güç<br/>(Watt)</b> |
|-------------------------------|----------------------|-----------------------|
| 0.5                           | 0.859                | 43.7                  |
| 1.0                           | 1.04                 | 64.9                  |
| 1.5                           | 0.754                | 44.9                  |
| 2.0                           | 0.927                | 42.2                  |

**1000 °C**

| <b>Şarj Basıncı<br/>(bar)</b> | <b>Tork<br/>(Nm)</b> | <b>Güç<br/>(Watt)</b> |
|-------------------------------|----------------------|-----------------------|
| 0.5                           | 0.839                | 38.7                  |
| 1.0                           | 0.780                | 39.6                  |
| 1.5                           | 0.649                | 33.7                  |
| 2.0                           | 0.583                | 24.8                  |

**4-Motor devri ile güç değişimi****750 °C şarjlı**

| <b>Ölçüm<br/>No</b> | <b>Motor<br/>devri<br/>(1/min)</b> | <b>Güç<br/>(Watt)<br/>0.5 bar</b> | <b>Motor<br/>devri<br/>(1/min)</b> | <b>Güç<br/>(Watt)<br/>1.0 bar</b> | <b>Motor<br/>devri<br/>(1/min)</b> | <b>Güç<br/>(Watt)<br/>1.5 bar</b> | <b>Motor<br/>devri<br/>(1/min)</b> | <b>Güç<br/>(Watt)<br/>2.0 bar</b> |
|---------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 1                   | 264                                | 20.5                              | 295                                | 25.5                              | 339                                | 15.7                              | 258                                | 15.1                              |
| 2                   | 330                                | 20.8                              | 315                                | 20.7                              | 381                                | 11.6                              | 303                                | 12.6                              |
| 3                   | 372                                | 11.6                              | 365                                | 19.3                              | 405                                | 10.9                              | 332                                | 12.4                              |
| 4                   | 410                                | 7.94                              | 396                                | 11.2                              | 420                                | 10.6                              | 350                                | 9.27                              |

**800 °C. şarjlı**

| <b>Ölçüm<br/>No</b> | <b>Motor<br/>devri<br/>(1/min)</b> | <b>Güç<br/>(Watt)<br/>0.5 bar</b> | <b>Motor<br/>devri<br/>(1/min)</b> | <b>Güç<br/>(Watt)<br/>1.0 bar</b> | <b>Motor<br/>devri<br/>(1/min)</b> | <b>Güç<br/>(Watt)<br/>1.5 bar</b> | <b>Motor<br/>devri<br/>(1/min)</b> | <b>Güç<br/>(Watt)<br/>2.0 bar</b> |
|---------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 1                   | 412                                | 20.6                              | 425                                | 27.6                              | 415                                | 24.3                              | 324                                | 18.8                              |
| 2                   | 467                                | 18.8                              | 447                                | 26.1                              | 454                                | 22.6                              | 374                                | 18.4                              |
| 3                   | 485                                | 17.1                              | 490                                | 18.4                              | 476                                | 16.3                              | 393                                | 15.8                              |
| 4                   | 498                                | 15.6                              | 526                                | 14.7                              | 498                                | 13.7                              | 456                                | 12.9                              |

**850 °C, şarjlı**

| <u>Ölçüm No</u> | <u>Motor devri (1/min)</u> | <u>Güç (Watt)</u><br>0.5 bar | <u>Motor devri (1/min)</u> | <u>Güç (Watt)</u><br>1.0 bar | <u>Motor devri (1/min)</u> | <u>Güç (Watt)</u><br>1.5 bar | <u>Motor devri (1/min)</u> | <u>Güç (Watt)</u><br>2.0 bar |
|-----------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 1               | 443                        | 19.3                         | 484                        | 26.8                         | 445                        | 25.2                         | 397                        | 25.1                         |
| 2               | 468                        | 18.4                         | 503                        | 24.3                         | 493                        | 21.3                         | 459                        | 21.6                         |
| 3               | 495                        | 14.2                         | 522                        | 21.2                         | 523                        | 19                           | 485                        | 17.8                         |
| 4               | 508                        | 12.6                         | 568                        | 18                           | 557                        | 14.6                         | 503                        | 14.4                         |

**900 °C, şarjlı**

| <u>Ölçüm No</u> | <u>Motor devri (1/min)</u> | <u>Güç (Watt)</u><br>0.5 bar | <u>Motor devri (1/min)</u> | <u>Güç (Watt)</u><br>1.0 bar | <u>Motor devri (1/min)</u> | <u>Güç (Watt)</u><br>1.5 bar | <u>Motor devri (1/min)</u> | <u>Güç (Watt)</u><br>2.0 bar |
|-----------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 1               | 488                        | 25.9                         | 502                        | 33.6                         | 556                        | 33.9                         | 489                        | 28.4                         |
| 2               | 505                        | 24.4                         | 545                        | 31.2                         | 578                        | 28.8                         | 531                        | 23.1                         |
| 3               | 535                        | 18.5                         | 591                        | 19.2                         | 592                        | 20.5                         | 555                        | 19.8                         |
| 4               | 575                        | 16.3                         | 614                        | 15.8                         | 605                        | 18.4                         | 574                        | 18                           |

**950 °C, şarjlı**

| <u>Ölçüm No</u> | <u>Motor devri (1/min)</u> | <u>Güç (Watt)</u><br>0.5 bar | <u>Motor devri (1/min)</u> | <u>Güç (Watt)</u><br>1.0 bar | <u>Motor devri (1/min)</u> | <u>Güç (Watt)</u><br>1.5 bar | <u>Motor devri (1/min)</u> | <u>Güç (Watt)</u><br>2.0 bar |
|-----------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 1               | 486                        | 43.7                         | 594                        | 64.9                         | 569                        | 44.9                         | 435                        | 42.2                         |
| 2               | 548                        | 40.3                         | 624                        | 56.9                         | 626                        | 36.6                         | 537                        | 42.4                         |
| 3               | 605                        | 31.0                         | 658                        | 53.1                         | 654                        | 28.8                         | 626                        | 34.7                         |
| 4               | 627                        | 21.3                         | 686                        | 39.6                         | 678                        | 22.2                         | 645                        | 23.6                         |

**1000 °C, şarjlı**

| <u>Ölçüm No</u> | <u>Motor devri (1/min)</u> | <u>Güç (Watt)</u><br>0.5 bar | <u>Motor devri (1/min)</u> | <u>Güç (Watt)</u><br>1.0 bar | <u>Motor devri (1/min)</u> | <u>Güç (Watt)</u><br>1.5 bar | <u>Motor devri (1/min)</u> | <u>Güç (Watt)</u><br>2.0 bar |
|-----------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 1               | 440                        | 38.7                         | 485                        | 39.6                         | 496                        | 33.7                         | 407                        | 24.8                         |
| 2               | 483                        | 29.9                         | 532                        | 33.6                         | 517                        | 31.3                         | 448                        | 23.6                         |
| 3               | 585                        | 27.5                         | 587                        | 32.3                         | 581                        | 25.3                         | 496                        | 21                           |
| 4               | 615                        | 26.7                         | 648                        | 29.7                         | 643                        | 20.5                         | 528                        | 16.7                         |

**5- Motor devrine bağlı tork ve güç değişimi (şarjsız)****750 °C, Şarjsız**

| <u>Ölçüm No</u> | <u>Motor devri (1/min)</u> | <u>Ağırlık (gr)</u> | <u>Tork (Nm)</u> | <u>Güç (Watt)</u> |
|-----------------|----------------------------|---------------------|------------------|-------------------|
| 1               | 199                        | 122                 | 0.347            | 7.23              |
| 2               | 218                        | 105                 | 0.299            | 6.81              |
| 3               | 235                        | 86                  | 0.245            | 6.02              |
| 4               | 242                        | 74                  | 0.211            | 5.09              |
| 5               | 263                        | 70                  | 0.199            | 5.48              |
| 6               | 274                        | 58                  | 0.165            | 4.74              |
| 7               | 285                        | 38                  | 0.108            | 3.22              |
| 8               | 292                        | 33                  | 0.094            | 2.87              |
| 9               | 330                        | 0                   | 0                | 0                 |

**800 °C, Şarısız**

| <u>Ölçüm</u><br><u>No</u> | <u>Motor devri</u><br><u>(1/min)</u> | <u>Ağırlık</u><br><u>(gr)</u> | <u>Tork</u><br><u>(Nm)</u> | <u>Güç</u><br><u>(Watt)</u> |
|---------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 1                         | 250                                  | 175                           | 0.498                      | 13.04                       |
| 2                         | 265                                  | 160                           | 0.455                      | 12.63                       |
| 3                         | 285                                  | 145                           | 0.413                      | 12.31                       |
| 4                         | 312                                  | 112                           | 0.319                      | 10.41                       |
| 5                         | 322                                  | 105                           | 0.338                      | 11.4                        |
| 6                         | 358                                  | 86                            | 0.245                      | 9.18                        |
| 7                         | 389                                  | 74                            | 0.211                      | 8.65                        |
| 8                         | 394                                  | 55                            | 0.157                      | 6.5                         |
| 9                         | 410                                  | 0                             | 0                          | 0                           |

**850 °C, Şarısız**

| <u>Ölçüm</u><br><u>No</u> | <u>Motor devri</u><br><u>(1/min)</u> | <u>Ağırlık</u><br><u>(gr)</u> | <u>Tork</u><br><u>(Nm)</u> | <u>Güç</u><br><u>(Watt)</u> |
|---------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 1                         | 220                                  | 195                           | 0.555                      | 12.78                       |
| 2                         | 246                                  | 182                           | 0.518                      | 13.34                       |
| 3                         | 291                                  | 150                           | 0.427                      | 13.00                       |
| 4                         | 302                                  | 144                           | 0.410                      | 12.96                       |
| 5                         | 314                                  | 140                           | 0.398                      | 13.01                       |
| 6                         | 336                                  | 122                           | 0.347                      | 12.21                       |
| 7                         | 372                                  | 103                           | 0.293                      | 11.41                       |
| 8                         | 410                                  | 88                            | 0.250                      | 10.75                       |
| 9                         | 435                                  | 0                             | 0                          | 0                           |

**900 °C, Şarısız**

| <u>Ölçüm</u><br><u>No</u> | <u>Motor devri</u><br><u>(1/min)</u> | <u>Ağırlık</u><br><u>(gr)</u> | <u>Tork</u><br><u>(Nm)</u> | <u>Güç</u><br><u>(Watt)</u> |
|---------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 1                         | 313                                  | 160                           | 0.455                      | 14.92                       |
| 2                         | 362                                  | 155                           | 0.441                      | 16.72                       |
| 3                         | 372                                  | 132                           | 0.376                      | 14.63                       |
| 4                         | 375                                  | 130                           | 0.370                      | 14.5                        |
| 5                         | 401                                  | 112                           | 0.319                      | 13.38                       |
| 6                         | 433                                  | 95                            | 0.270                      | 12.26                       |
| 7                         | 465                                  | 82                            | 0.233                      | 11.36                       |
| 8                         | 490                                  | 71                            | 0.202                      | 10.37                       |
| 9                         | 510                                  | 0                             | 0                          | 0                           |

**950 °C, Şarısız**

| <u>Ölçüm</u><br><u>No</u> | <u>Motor devri</u><br><u>(1/min)</u> | <u>Ağırlık</u><br><u>(gr)</u> | <u>Tork</u><br><u>(Nm)</u> | <u>Güç</u><br><u>(Watt)</u> |
|---------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 1                         | 287                                  | 280                           | 0.797                      | 23.94                       |
| 2                         | 314                                  | 255                           | 0.725                      | 23.85                       |
| 3                         | 358                                  | 216                           | 0.615                      | 23.04                       |
| 4                         | 416                                  | 146                           | 0.415                      | 18.1                        |
| 5                         | 446                                  | 128                           | 0.364                      | 17.01                       |
| 6                         | 484                                  | 110                           | 0.313                      | 15.86                       |
| 7                         | 508                                  | 92                            | 0.262                      | 13.92                       |
| 8                         | 535                                  | 79                            | 0.225                      | 12.59                       |
| 9                         | 547                                  | 0                             | 0                          | 0                           |

**1000 °C, Şarjsız**

| <u>Ölçüm</u><br><u>No</u> | <u>Motor devri</u><br><u>(1/min)</u> | <u>Ağırlık</u><br><u>(gr)</u> | <u>Tork</u><br><u>(Nm)</u> | <u>Güç</u><br><u>(Watt)</u> |
|---------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 1                         | 423                                  | 151                           | 0.430                      | 19.03                       |
| 2                         | 453                                  | 135                           | 0.384                      | 18.22                       |
| 3                         | 465                                  | 128                           | 0.364                      | 17.73                       |
| 4                         | 486                                  | 110                           | 0.313                      | 15.93                       |
| 5                         | 522                                  | 98                            | 0.279                      | 15.24                       |
| 6                         | 574                                  | 84                            | 0.239                      | 14.37                       |
| 7                         | 604                                  | 76                            | 0.216                      | 13.68                       |
| 8                         | 625                                  | 64                            | 0.182                      | 11.92                       |
| 9                         | 645                                  | 0                             | 0                          | 0                           |

**6- Motor devrine göre tork ve güç değişimi (Şarjlı)****650 °C, 0.5 bar şarj basıncında**

| <u>Ölçüm</u><br><u>No</u> | <u>Motor devri</u><br><u>(1/min)</u> | <u>Ağırlık</u><br><u>(gr)</u> | <u>Tork</u><br><u>(Nm)</u> | <u>Güç</u><br><u>(Watt)</u> |
|---------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 1                         | 210                                  | 112                           | 0.319                      | 7.02                        |
| 2                         | 230                                  | 93                            | 0.265                      | 6.38                        |
| 3                         | 250                                  | 65                            | 0.185                      | 4.84                        |
| 4                         | 278                                  | 55                            | 0.157                      | 4.57                        |
| 5                         | 285                                  | 0                             | 0                          | 0                           |

**650 °C, 1.0 bar şarj basıncında**

| <u>Ölçüm</u><br><u>No</u> | <u>Motor devri</u><br><u>(1/min)</u> | <u>Ağırlık</u><br><u>(gr)</u> | <u>Tork</u><br><u>(Nm)</u> | <u>Güç</u><br><u>(Watt)</u> |
|---------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 1                         | 195                                  | 128                           | 0.364                      | 7.44                        |
| 2                         | 210                                  | 104                           | 0.296                      | 6.51                        |
| 3                         | 242                                  | 90                            | 0.256                      | 6.49                        |
| 4                         | 284                                  | 48                            | 0.137                      | 4.07                        |
| 5                         | 305                                  | 0                             | 0                          | 0                           |

**650 °C, 1.5 bar şarj basıncında**

| <u>Ölçüm</u><br><u>No</u> | <u>Motor devri</u><br><u>(1/min)</u> | <u>Ağırlık</u><br><u>(gr)</u> | <u>Tork</u><br><u>(Nm)</u> | <u>Güç</u><br><u>(Watt)</u> |
|---------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 1                         | 230                                  | 102                           | 0.290                      | 6.99                        |
| 2                         | 252                                  | 91                            | 0.259                      | 6.84                        |
| 3                         | 283                                  | 67                            | 0.191                      | 5.66                        |
| 4                         | 302                                  | 46                            | 0.131                      | 4.14                        |
| 5                         | 290                                  | 0                             | 0                          | 0                           |

**650 °C, 2.0 bar şarj basıncında**

| <u>Ölçüm</u><br><u>No</u> | <u>Motor devri</u><br><u>(1/min)</u> | <u>Ağırlık</u><br><u>(gr)</u> | <u>Tork</u><br><u>(Nm)</u> | <u>Güç</u><br><u>(Watt)</u> |
|---------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 1                         | 180                                  | 77                            | 0.219                      | 4.13                        |
| 2                         | 210                                  | 65                            | 0.185                      | 4.07                        |
| 3                         | 238                                  | 53                            | 0.151                      | 3.76                        |
| 4                         | 255                                  | 41                            | 0.117                      | 3.11                        |
| 5                         | 245                                  | 0                             | 0                          | 0                           |

**700 °C, 0.5 bar şarj basıncında**

| <u>Ölçüm</u> | <u>Motor devri</u> | <u>Ağırlık</u> | <u>Tork</u> | <u>Güç</u>    |
|--------------|--------------------|----------------|-------------|---------------|
| <u>No</u>    | <u>(1/min)</u>     | <u>(gr)</u>    | <u>(Nm)</u> | <u>(Watt)</u> |
| 1            | 316                | 92             | 0.262       | 8.67          |
| 2            | 328                | 85             | 0.242       | 8.31          |
| 3            | 347                | 72             | 0.205       | 7.45          |
| 4            | 365                | 54             | 0.154       | 5.89          |
| 5            | 355                | 0              | 0           | 0             |

**700 °C, 1.0 bar şarj basıncında**

| <u>Ölçüm</u> | <u>Motor devri</u> | <u>Ağırlık</u> | <u>Tork</u> | <u>Güç</u>    |
|--------------|--------------------|----------------|-------------|---------------|
| <u>No</u>    | <u>(1/min)</u>     | <u>(gr)</u>    | <u>(Nm)</u> | <u>(Watt)</u> |
| 1            | 308                | 120            | 0.341       | 11            |
| 2            | 322                | 98             | 0.279       | 9.41          |
| 3            | 349                | 82             | 0.233       | 8.52          |
| 4            | 367                | 64             | 0.182       | 6.99          |
| 5            | 375                | 0              | 0           | 0             |

**700 °C, 1.5 bar şarj basıncında**

| <u>Ölçüm</u> | <u>Motor devri</u> | <u>Ağırlık</u> | <u>Tork</u> | <u>Güç</u>    |
|--------------|--------------------|----------------|-------------|---------------|
| <u>No</u>    | <u>(1/min)</u>     | <u>(gr)</u>    | <u>(Nm)</u> | <u>(Watt)</u> |
| 1            | 254                | 113            | 0.321       | 8.54          |
| 2            | 307                | 96             | 0.273       | 8.78          |
| 3            | 325                | 76             | 0.216       | 7.35          |
| 4            | 354                | 63             | 0.179       | 6.64          |
| 5            | 360                | 0              | 0           | 0             |

**700 °C, 2.0 bar şarj basıncında**

| <u>Ölçüm</u> | <u>Motor devri</u> | <u>Ağırlık</u> | <u>Tork</u> | <u>Güç</u>    |
|--------------|--------------------|----------------|-------------|---------------|
| <u>No</u>    | <u>(1/min)</u>     | <u>(gr)</u>    | <u>(Nm)</u> | <u>(Watt)</u> |
| 1            | 264                | 105            | 0.299       | 8.27          |
| 2            | 273                | 94             | 0.267       | 7.63          |
| 3            | 290                | 78             | 0.222       | 6.74          |
| 4            | 304                | 64             | 0.182       | 5.79          |
| 5            | 325                | 0              | 0           | 0             |

**750 °C, 0.5 bar şarj basıncında**

| <u>Ölçüm</u> | <u>Motor devri</u> | <u>Ağırlık</u> | <u>Tork</u> | <u>Güç</u>    |
|--------------|--------------------|----------------|-------------|---------------|
| <u>No</u>    | <u>(1/min)</u>     | <u>(gr)</u>    | <u>(Nm)</u> | <u>(Watt)</u> |
| 1            | 264                | 260            | 0.740       | 20.5          |
| 2            | 330                | 212            | 0.603       | 20.8          |
| 3            | 372                | 105            | 0.299       | 11.6          |
| 4            | 410                | 65             | 0.185       | 7.94          |
| 5            | 420                | 0              | 0           | 0             |

**750 °C, 1.0 bar şarj basıncında**

| <u>Ölçüm</u> | <u>Motor devri</u> | <u>Ağırlık</u> | <u>Tork</u> | <u>Güç</u>    |
|--------------|--------------------|----------------|-------------|---------------|
| <u>No</u>    | <u>(1/min)</u>     | <u>(gr)</u>    | <u>(Nm)</u> | <u>(Watt)</u> |
| 1            | 295                | 290            | 0.825       | 25.5          |
| 2            | 315                | 221            | 0.629       | 20.7          |
| 3            | 365                | 178            | 0.506       | 19.3          |
| 4            | 396                | 95             | 0.270       | 11.2          |
| 5            | 495                | 0              | 0           | 0             |

**750 °C, 1.5 bar şarj basıncında**

| <u>Ölçüm</u> | <u>Motor devri</u> | <u>Ağırlık</u> | <u>Tork</u> | <u>Güç</u>    |
|--------------|--------------------|----------------|-------------|---------------|
| <u>No</u>    | <u>(1/min)</u>     | <u>(gr)</u>    | <u>(Nm)</u> | <u>(Watt)</u> |
| 1            | 339                | 155            | 0.498       | 17.7          |
| 2            | 381                | 102            | 0.390       | 15.6          |
| 3            | 405                | 90             | 0.256       | 10.9          |
| 4            | 420                | 85             | 0.213       | 9.38          |
| 5            | 460                | 0              | 0           | 0             |

**750 °C, 2.0 bar şarj basıncında**

| <u>Ölçüm</u> | <u>Motor devri</u> | <u>Ağırlık</u> | <u>Tork</u> | <u>Güç</u>    |
|--------------|--------------------|----------------|-------------|---------------|
| <u>No</u>    | <u>(1/min)</u>     | <u>(gr)</u>    | <u>(Nm)</u> | <u>(Watt)</u> |
| 1            | 258                | 196            | 0.558       | 15.1          |
| 2            | 303                | 140            | 0.398       | 12.6          |
| 3            | 332                | 125            | 0.356       | 12.4          |
| 4            | 350                | 89             | 0.253       | 9.27          |
| 5            | 445                | 0              | 0           | 0             |

**800 °C, 0.5 bar şarj basıncında**

| <u>Ölçüm</u> | <u>Motor devri</u> | <u>Ağırlık</u> | <u>Tork</u> | <u>Güç</u>    |
|--------------|--------------------|----------------|-------------|---------------|
| <u>No</u>    | <u>(1/min)</u>     | <u>(gr)</u>    | <u>(Nm)</u> | <u>(Watt)</u> |
| 1            | 412                | 168            | 0.478       | 20.6          |
| 2            | 467                | 135            | 0.384       | 18.8          |
| 3            | 485                | 118            | 0.336       | 17.1          |
| 4            | 498                | 105            | 0.299       | 15.6          |
| 5            | 548                | 0              | 0           | 0             |

**800 °C, 1.0 bar şarj basıncında**

| <u>Ölçüm</u> | <u>Motor devri</u> | <u>Ağırlık</u> | <u>Tork</u> | <u>Güç</u>    |
|--------------|--------------------|----------------|-------------|---------------|
| <u>No</u>    | <u>(1/min)</u>     | <u>(gr)</u>    | <u>(Nm)</u> | <u>(Watt)</u> |
| 1            | 425                | 218            | 0.620       | 27.6          |
| 2            | 463                | 196            | 0.589       | 28.6          |
| 3            | 490                | 126            | 0.358       | 18.4          |
| 4            | 526                | 94             | 0.267       | 14.7          |
| 5            |                    |                |             |               |

**800 °C, 1.5 bar şarj basıncında**

| <u>Ölçüm</u> | <u>Motor devri</u> | <u>Ağırlık</u> | <u>Tork</u> | <u>Güç</u>    |
|--------------|--------------------|----------------|-------------|---------------|
| <u>No</u>    | <u>(1/min)</u>     | <u>(gr)</u>    | <u>(Nm)</u> | <u>(Watt)</u> |
| 1            | 415                | 196            | 0.558       | 24.3          |
| 2            | 454                | 167            | 0.475       | 22.6          |
| 3            | 476                | 115            | 0.327       | 16.3          |
| 4            | 498                | 92             | 0.262       | 13.7          |
| 5            | 578                | 0              | 0           | 0             |

**800 °C, 2.0 bar şarj basıncında**

| <u>Ölçüm</u> | <u>Motor devri</u> | <u>Ağırlık</u> | <u>Tork</u> | <u>Güç</u>    |
|--------------|--------------------|----------------|-------------|---------------|
| <u>No</u>    | <u>(1/min)</u>     | <u>(gr)</u>    | <u>(Nm)</u> | <u>(Watt)</u> |
| 1            | 324                | 195            | 0.555       | 18.8          |
| 2            | 374                | 165            | 0.469       | 18.4          |
| 3            | 393                | 135            | 0.384       | 15.8          |
| 4            | 456                | 95             | 0.270       | 12.9          |
| 5            | 522                | 0              | 0           | 0             |

**850 °C, 0.5 bar şarj basıncında**

| <u>Ölçüm</u><br><u>No</u> | <u>Motor devri</u><br><u>(1/min)</u> | <u>Ağırlık</u><br><u>(gr)</u> | <u>Tork</u><br><u>(Nm)</u> | <u>Güç</u><br><u>(Watt)</u> |
|---------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 1                         | 443                                  | 146                           | 0.415                      | 19.3                        |
| 2                         | 468                                  | 132                           | 0.376                      | 18.4                        |
| 3                         | 495                                  | 96                            | 0.273                      | 14.2                        |
| 4                         | 508                                  | 83                            | 0.236                      | 12.6                        |
| 5                         | 564                                  | 0                             | 0                          | 0                           |

**850 °C, 1.0 bar şarj basıncında**

| <u>Ölçüm</u><br><u>No</u> | <u>Motor devri</u><br><u>(1/min)</u> | <u>Ağırlık</u><br><u>(gr)</u> | <u>Tork</u><br><u>(Nm)</u> | <u>Güç</u><br><u>(Watt)</u> |
|---------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 1                         | 484                                  | 186                           | 0.529                      | 26.8                        |
| 2                         | 503                                  | 162                           | 0.461                      | 24.3                        |
| 3                         | 522                                  | 136                           | 0.387                      | 21.2                        |
| 4                         | 568                                  | 106                           | 0.302                      | 18                          |
| 5                         | 615                                  | 0                             | 0                          | 0                           |

**850 °C, 1.5 bar şarj basıncında**

| <u>Ölçüm</u><br><u>No</u> | <u>Motor devri</u><br><u>(1/min)</u> | <u>Ağırlık</u><br><u>(gr)</u> | <u>Tork</u><br><u>(Nm)</u> | <u>Güç</u><br><u>(Watt)</u> |
|---------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 1                         | 445                                  | 190                           | 0.541                      | 25.2                        |
| 2                         | 493                                  | 145                           | 0.413                      | 21.3                        |
| 3                         | 523                                  | 122                           | 0.347                      | 19                          |
| 4                         | 557                                  | 88                            | 0.250                      | 14.6                        |
| 5                         | 578                                  | 0                             | 0                          | 0                           |

**850 °C, 2.0 bar şarj basıncında**

| <u>Ölçüm</u><br><u>No</u> | <u>Motor devri</u><br><u>(1/min)</u> | <u>Ağırlık</u><br><u>(gr)</u> | <u>Tork</u><br><u>(Nm)</u> | <u>Güç</u><br><u>(Watt)</u> |
|---------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 1                         | 397                                  | 212                           | 0.603                      | 25.1                        |
| 2                         | 459                                  | 158                           | 0.449                      | 21.6                        |
| 3                         | 485                                  | 123                           | 0.350                      | 17.8                        |
| 4                         | 503                                  | 96                            | 0.273                      | 14.4                        |
| 5                         | 545                                  | 0                             | 0                          | 0                           |

**900 °C, 0.5 bar şarj basıncında**

| <u>Ölçüm</u><br><u>No</u> | <u>Motor devri</u><br><u>(1/min)</u> | <u>Ağırlık</u><br><u>(gr)</u> | <u>Tork</u><br><u>(Nm)</u> | <u>Güç</u><br><u>(Watt)</u> |
|---------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 1                         | 488                                  | 178                           | 0.506                      | 25.9                        |
| 2                         | 505                                  | 162                           | 0.461                      | 24.4                        |
| 3                         | 535                                  | 116                           | 0.330                      | 18.5                        |
| 4                         | 575                                  | 95                            | 0.270                      | 16.3                        |
| 5                         | 596                                  | 0                             | 0                          | 0                           |

**900 °C, 1.0 bar şarj basıncında**

| <u>Ölçüm</u><br><u>No</u> | <u>Motor devri</u><br><u>(1/min)</u> | <u>Ağırlık</u><br><u>(gr)</u> | <u>Tork</u><br><u>(Nm)</u> | <u>Güç</u><br><u>(Watt)</u> |
|---------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 1                         | 502                                  | 225                           | 0.640                      | 33.6                        |
| 2                         | 545                                  | 192                           | 0.546                      | 31.2                        |
| 3                         | 591                                  | 109                           | 0.310                      | 19.2                        |
| 4                         | 614                                  | 86                            | 0.245                      | 15.8                        |
| 5                         | 646                                  | 0                             | 0                          | 0                           |



**900 °C, 1.5 bar şarj basıncında**

| <u>Ölçüm</u> | <u>Motor devri</u> | <u>Ağırlık</u> | <u>Tork</u> | <u>Güç</u>    |
|--------------|--------------------|----------------|-------------|---------------|
| <u>No</u>    | <u>(1/min)</u>     | <u>(gr)</u>    | <u>(Nm)</u> | <u>(Watt)</u> |
| 1            | 556                | 205            | 0.583       | 33.9          |
| 2            | 578                | 167            | 0.475       | 28.8          |
| 3            | 592                | 116            | 0.330       | 20.5          |
| 4            | 605                | 102            | 0.290       | 18.4          |
| 5            | 635                | 0              | 0           | 0             |

**900 °C, 2.0 bar şarj basıncında**

| <u>Ölçüm</u> | <u>Motor devri</u> | <u>Ağırlık</u> | <u>Tork</u> | <u>Güç</u>    |
|--------------|--------------------|----------------|-------------|---------------|
| <u>No</u>    | <u>(1/min)</u>     | <u>(gr)</u>    | <u>(Nm)</u> | <u>(Watt)</u> |
| 1            | 489                | 195            | 0.555       | 28.4          |
| 2            | 531                | 146            | 0.415       | 23.1          |
| 3            | 555                | 120            | 0.341       | 19.8          |
| 4            | 574                | 105            | 0.299       | 18            |
| 5            | 602                | 0              | 0           | 0             |

**950 °C, 0.5 bar şarj basıncında**

| <u>Ölçüm</u> | <u>Motor devri</u> | <u>Ağırlık</u> | <u>Tork</u> | <u>Güç</u>    |
|--------------|--------------------|----------------|-------------|---------------|
| <u>No</u>    | <u>(1/min)</u>     | <u>(gr)</u>    | <u>(Nm)</u> | <u>(Watt)</u> |
| 1            | 486                | 302            | 0.859       | 43.7          |
| 2            | 548                | 247            | 0.703       | 40.3          |
| 3            | 605                | 172            | 0.489       | 31.0          |
| 4            | 627                | 114            | 0.324       | 21.3          |
| 5            | 685                | 0              | 0           | 0             |

**950 °C, 1.0 bar şarj basıncında**

| <u>Ölçüm</u> | <u>Motor devri</u> | <u>Ağırlık</u> | <u>Tork</u> | <u>Güç</u>    |
|--------------|--------------------|----------------|-------------|---------------|
| <u>No</u>    | <u>(1/min)</u>     | <u>(gr)</u>    | <u>(Nm)</u> | <u>(Watt)</u> |
| 1            | 594                | 367            | 1.04        | 64.9          |
| 2            | 624                | 306            | 0.871       | 56.9          |
| 3            | 658                | 271            | 0.771       | 53.1          |
| 4            | 686                | 194            | 0.552       | 39.6          |
| 5            | 715                | 0              | 0           | 0             |

**950 °C, 1.5 bar şarj basıncında**

| <u>Ölçüm</u> | <u>Motor devri</u> | <u>Ağırlık</u> | <u>Tork</u> | <u>Güç</u>    |
|--------------|--------------------|----------------|-------------|---------------|
| <u>No</u>    | <u>(1/min)</u>     | <u>(gr)</u>    | <u>(Nm)</u> | <u>(Watt)</u> |
| 1            | 569                | 265            | 0.754       | 44.9          |
| 2            | 626                | 196            | 0.558       | 36.6          |
| 3            | 654                | 148            | 0.421       | 28.8          |
| 4            | 678                | 110            | 0.313       | 22.2          |
| 5            | 692                | 0              | 0           | 0             |

**950 °C, 2.0 bar şarj basıncında**

| <u>Ölçüm</u> | <u>Motor devri</u> | <u>Ağırlık</u> | <u>Tork</u> | <u>Güç</u>    |
|--------------|--------------------|----------------|-------------|---------------|
| <u>No</u>    | <u>(1/min)</u>     | <u>(gr)</u>    | <u>(Nm)</u> | <u>(Watt)</u> |
| 1            | 435                | 326            | 0.927       | 42.2          |
| 2            | 537                | 265            | 0.754       | 42.4          |
| 3            | 626                | 186            | 0.529       | 34.7          |
| 4            | 645                | 123            | 0.350       | 23.6          |
| 5            | 674                | 0              | 0           | 0             |

***1000 °C, 0.5 bar şarj basıncında***

| <u>Ölçüm</u> | <u>Motor devri</u> | <u>Ağırlık</u> | <u>Tork</u> | <u>Güç</u>    |
|--------------|--------------------|----------------|-------------|---------------|
| <u>No</u>    | <u>(1/min)</u>     | <u>(gr)</u>    | <u>(Nm)</u> | <u>(Watt)</u> |
| 1            | 440                | 295            | 0.839       | 38.7          |
| 2            | 525                | 208            | 0.632       | 34.7          |
| 3            | 585                | 158            | 0.449       | 27.5          |
| 4            | 615                | 146            | 0.415       | 26.7          |
| 5            | 735                | 0              | 0           | 0             |

***1000 °C, 1.0 bar şarj basıncında***

| <u>Ölçüm</u> | <u>Motor devri</u> | <u>Ağırlık</u> | <u>Tork</u> | <u>Güç</u>    |
|--------------|--------------------|----------------|-------------|---------------|
| <u>No</u>    | <u>(1/min)</u>     | <u>(gr)</u>    | <u>(Nm)</u> | <u>(Watt)</u> |
| 1            | 485                | 274            | 0.780       | 39.6          |
| 2            | 546                | 212            | 0.637       | 36.4          |
| 3            | 587                | 185            | 0.494       | 30.4          |
| 4            | 648                | 154            | 0.438       | 29.7          |
| 5            | 784                | 0              | 0           | 0             |

***1000 °C, 1.5 bar şarj basıncında***

| <u>Ölçüm</u> | <u>Motor devri</u> | <u>Ağırlık</u> | <u>Tork</u> | <u>Güç</u>    |
|--------------|--------------------|----------------|-------------|---------------|
| <u>No</u>    | <u>(1/min)</u>     | <u>(gr)</u>    | <u>(Nm)</u> | <u>(Watt)</u> |
| 1            | 496                | 228            | 0.649       | 33.7          |
| 2            | 517                | 203            | 0.578       | 31.3          |
| 3            | 581                | 146            | 0.415       | 25.3          |
| 4            | 643                | 107            | 0.304       | 20.5          |
| 5            | 762                | 0              | 0           | 0             |

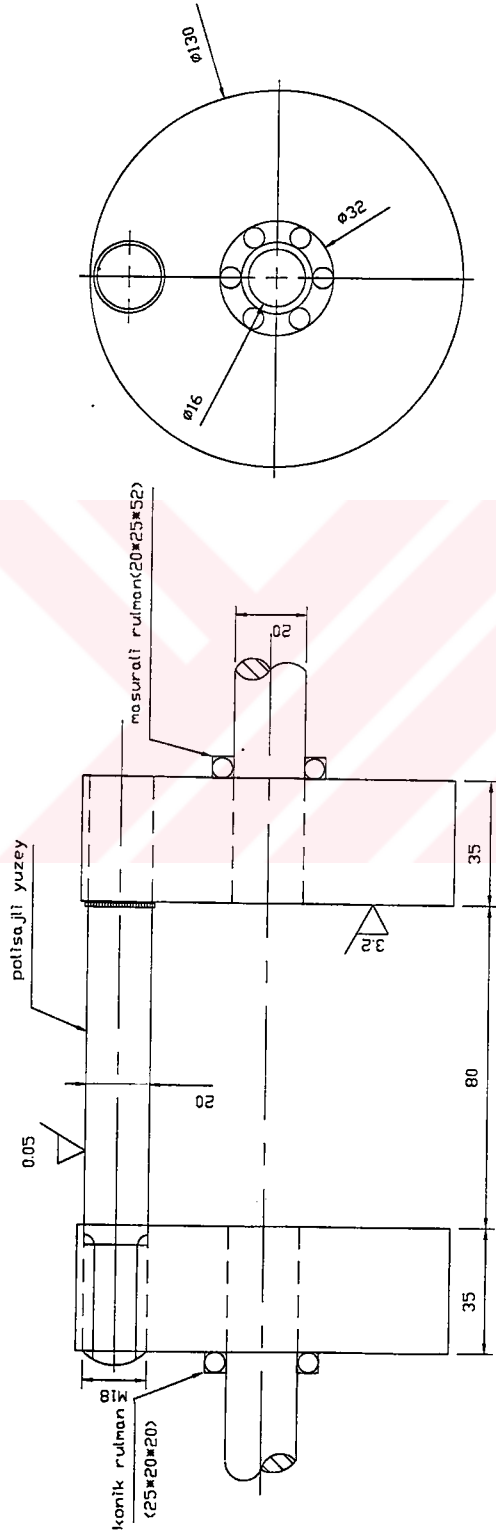
***1000 °C, 2.0 bar şarj basıncında***

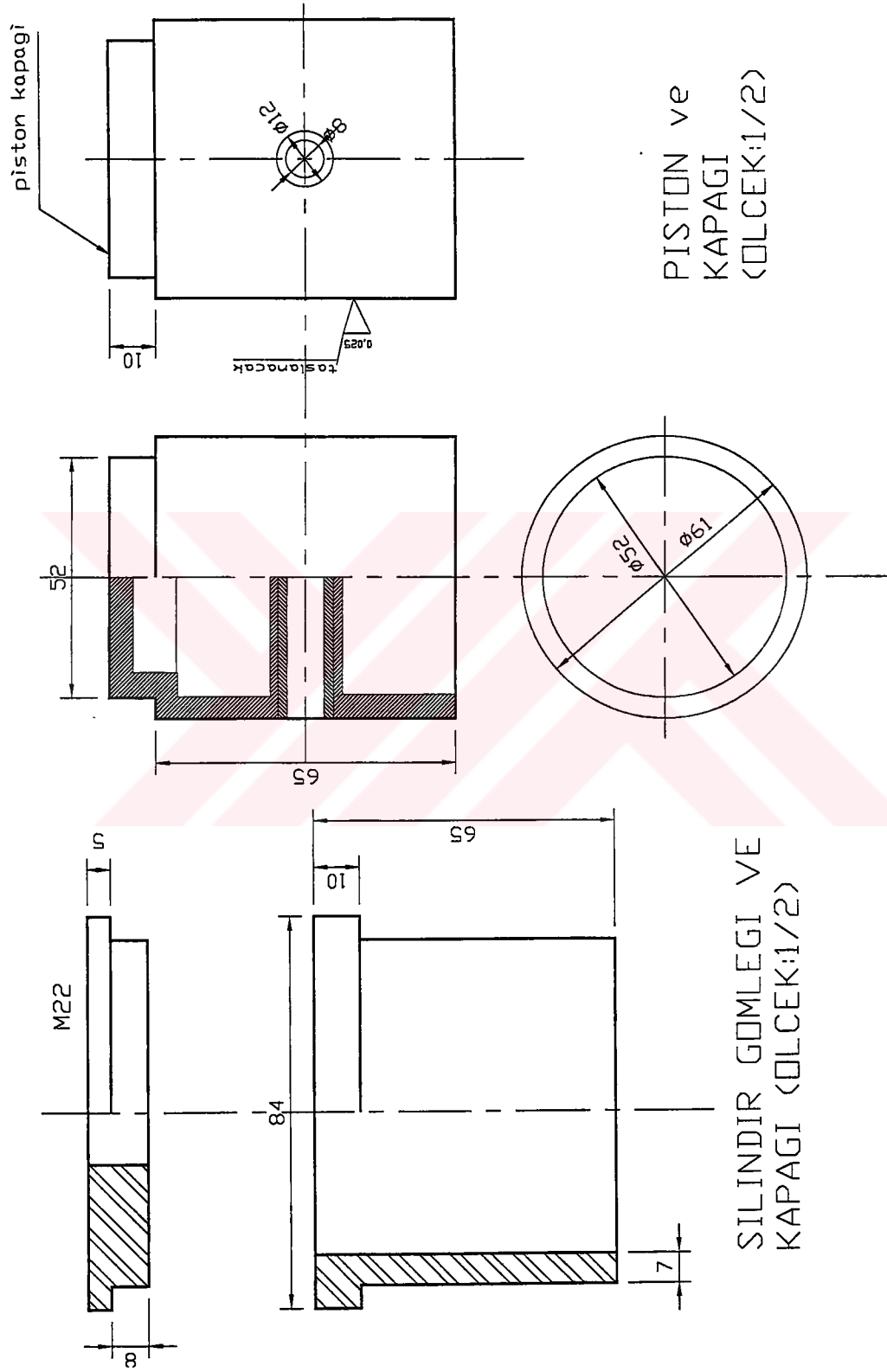
| <u>Ölçüm</u> | <u>Motor devri</u> | <u>Ağırlık</u> | <u>Tork</u> | <u>Güç</u>    |
|--------------|--------------------|----------------|-------------|---------------|
| <u>No</u>    | <u>(1/min)</u>     | <u>(gr)</u>    | <u>(Nm)</u> | <u>(Watt)</u> |
| 1            | 407                | 205            | 0.583       | 24.8          |
| 2            | 448                | 177            | 0.526       | 24.7          |
| 3            | 496                | 142            | 0.352       | 18.3          |
| 4            | 528                | 106            | 0.291       | 16.1          |
| 5            | 742                | 0              | 0           | 0             |

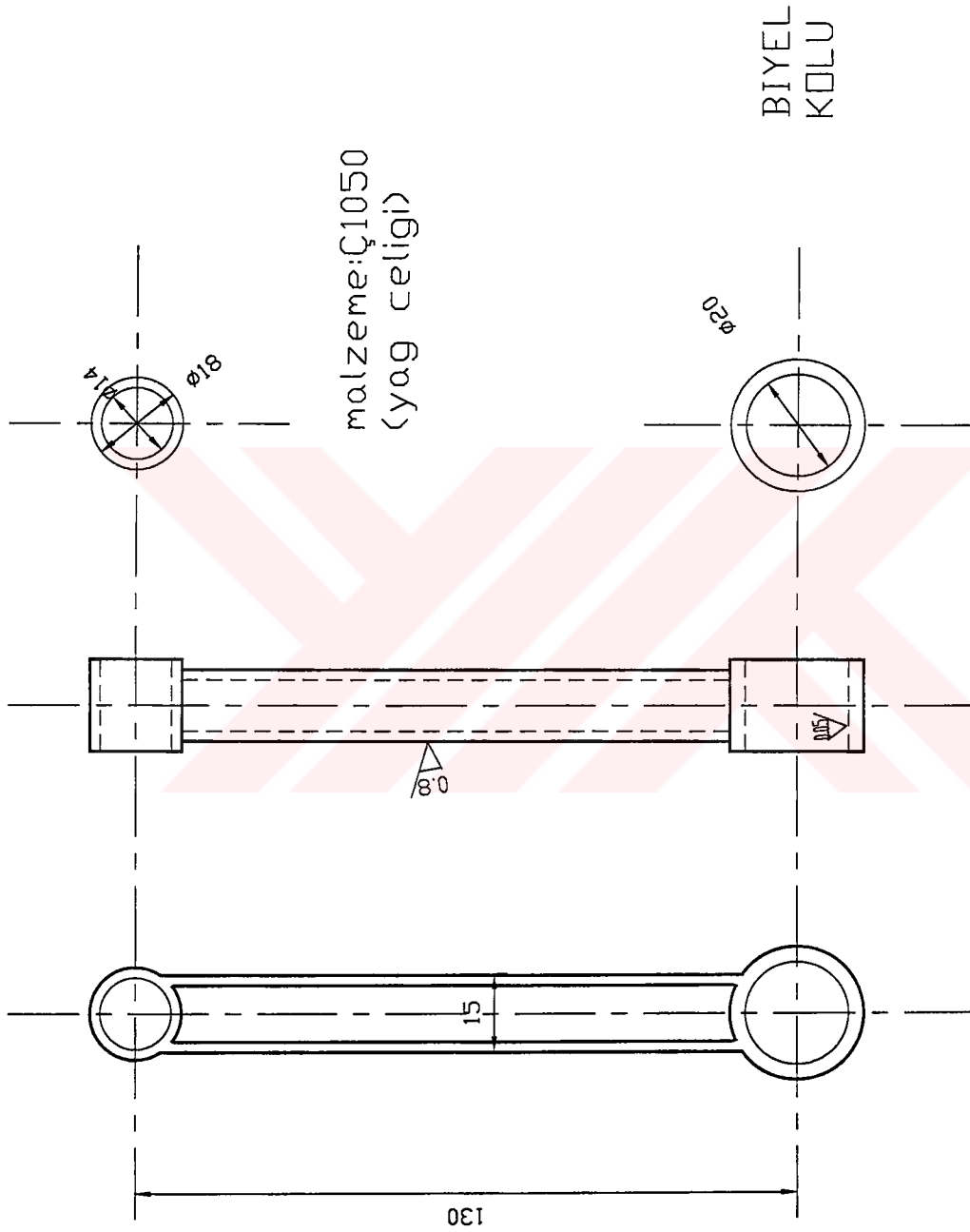
**7-Motor devrine göre titreşim değişimi**

| <u>Ölçüm</u> | <u>Motor devri</u> | <u>Titreşim</u> |
|--------------|--------------------|-----------------|
| <u>No</u>    | <u>(1/min)</u>     | <u>(µm)</u>     |
| 1            | 278                | 0.004           |
| 2            | 283                | 0.005           |
| 3            | 350                | 0.008           |
| 4            | 386                | 0.009           |
| 5            | 452                | 0.012           |
| 6            | 491                | 0.016           |
| 7            | 621                | 0.021           |
| 8            | 784                | 0.035           |

KRANK MILI







## ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta öğrenimini Ödemiş’ te yaptı. 1984 yılında Ödemiş Endüstri Meslek Lisesi Motor bölümünden mezun olduktan sonra aynı yıl Ankara Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makina Eğitimi Bölümü Otomotiv Anabilimdalı’ nda öğrenimine başladı. 1988 yılında iyi derece ile mezun oldu ve Afyon Merkez Endüstri Meslek Lisesi’ nde öğretmenliğe başladı. 1991 yılında Ankara Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Eğitimi bölümü’n de yüksek lisans eğitimine başladı. 1994 yılı Temmuz ayında “Benzinli Motorların Yakıt Ekonomisi” üzerinde Yüksek Lisans Eğitimini tamamladı. 1995 yılı Şubat ayında aynı enstitüde doktora çalışmalarına başladı. Afyon, Ankara ve Ödemiş’ te Endüstri Meslek Liselerinde öğretmenlik, Atelye şefliği, Bölüm Şefliği, Müdür Yardımcılığı ve Müdürlük görevlerinde bulundu. Halen İzmir Bayındır Teknik Lise ve Endüstri Meslek Lisesi ve Çıraklık Eğitim Merkezi Müdürü olarak görevini sürdüren Süleyman ÜSTÜN evli ve iki çocuk babasıdır.