

**DÜŞÜK SICAKLIK FARKIYLA ÇALIŞAN
BİR STİRLİNG MOTORUNUN TASARIMI VE İMALATI**

Derviş EROL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Ekim 2009

ANKARA

Derviş EROL tarafından hazırlanan DÜŞÜK SICAKLIK FARKIYLA ÇALIŞAN BİR STİRLİNG MOTORUNUN TASARIMI VE İMALATI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Can ÇINAR
Tez Danışmanı, Otomotiv Eğitimi

Bu çalışma jürimiz tarafından Makine Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Halit KARABULUT
Otomotiv Eğitimi, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Can ÇINAR
Otomotiv Eğitimi, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. H. Serdar YÜCESU
Otomotiv Eğitimi, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Atilla KOCA
Otomotiv Eğitimi, Gazi Üniversitesi

Y. Doç. Dr. Y. Önder ÖZGÖREN
Otomotiv Eğitimi, Afyon Kocatepe Üniversitesi

Tarih: 05/10/2009

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nail ÜNSAL
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Derviş EROL

**DÜŞÜK SICAKLIK FARKIYLA ÇALIŞAN
BİR STİRLİNG MOTORUNUN TASARIMI VE İMALATI
(Yüksek Lisans Tezi)**

Derviş EROL

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ekim 2009**

ÖZET

Bu çalışmada düşük sıcaklıklarda çalışabilen 770 cm³ süpürme hacmine sahip gama tipi bir Stirling motorunun tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Motorda bir yer değiştirme pistonu ve bir güç pistonu konsantrik olarak yerleştirilmiştir. Yer değiştirme ve güç pistonları arasında 90° lik faz farkı mevcuttur. Çalışma maddesi olarak atmosferik hava kullanılmıştır. İmalatı yapılan motorun, laboratuvar şartlarında ısı kaynağı olarak sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) yakıtlı bir ısıtıcı ile testleri yapılmıştır. Alüminyum ve MDF olarak iki farklı yer değiştirme pistonu ile yapılan deneylerde sıcak uç sıcaklığına bağlı olarak hız - moment ve hız - güç karakteristikleri incelenmiştir. Alüminyum yer değiştirme pistonu ile yapılan testlerde maksimum motor gücü 320 °C sıcak uç sıcaklığında ve 185 d/d motor hızında, 2,59 W olarak elde edilmiştir. MDF yer değiştirme pistonu ile yapılan testlerde ise maksimum motor momenti 160 °C sıcak uç sıcaklığında, 125 d/d motor hızında 0,166 Nm olarak ölçülmüştür. Maksimum motor gücü ise, 160 °C sıcak uç sıcaklığında ve 215 d/d da 3,06 W olarak elde edilmiştir.

Bilim Kodu : 708.3.026
Anahtar Kelimeler : Stirling motoru, düşük sıcaklık farkı, motor performansı
Sayfa Adedi : 89
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Can ÇINAR

**DESIGN AND MANUFACTURING OF A LOW TEMPERATURE
DIFFERENTIAL STIRLING ENGINE**

(M.Sc. Thesis)

Derviş EROL

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

October 2009

ABSTRACT

In this study, a gamma type, low temperature differential Stirling engine with 770 cc swept volume was designed and manufactured. In the engine, displacer piston and power piston were concentrically situated to each other with 90° phase angle. Atmospheric air was used as the working fluid. The engine was tested with a liquefied petroleum gas (LPG) fuelled heater at laboratory conditions. During the tests, speed-torque and speed-power characteristics were investigated depending on the hot end temperature with aluminum and MDF displacers. Maximum power output was obtained at 320 °C hot end temperature as 2.59 W at 185 rpm engine speed with aluminum displacer. Maximum engine torque was obtained as 0.166 Nm at 160 °C hot end temperature and 125 rpm engine speed and maximum power output was obtained at 160 °C hot end temperature as 3.06 W at 215 rpm engine speed with MDF displacer.

Science Code	: 708.3.026
Key Words	: Stirling engine, low temperature difference, engine performance
Page Number	: 89
Adviser	: Assoc. Prof. Dr. Can ÇINAR

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımın her aşamasında beni yönlendiren, destek ve yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve tecrübesinden her zaman faydalandığım değerli hocam Doç. Dr. Can ÇINAR'a teşekkür ve şükranlarımı sunarım. Bilgilerinden her zaman faydalandığım değerli hocalarım Prof. Dr. Halit KARABULUT'a, Prof. Dr. Selim ÇETİNKAYA'ya, Prof. Dr. H. Serdar YÜCESU'ya, Prof. Dr. Atilla KOCA'ya, araştırma kapsamında motorun imalatı aşamasında atölye imkanlarını bana sunan hocam Doç. Dr. İsmet ÇELİKTEN'e ve Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Otomotiv Anabilim Dalı'nda bulunan tüm hocalarıma, ayrıca büyük bir özveri ile bana destek olan aileme sonsuz teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
2. STİRLİNG MOTORLARI.....	3
2.1. Stirling Motorlarının Tarihçesi	3
2.2. Stirling Motorlarının Çeşitleri.....	9
2.2.1. Kinematik stirling motorları.....	10
2.2.2. Serbest pistonlu stirling motorları.....	14
2.2.3. Çift etkili stirling motorları	15
2.2.4. Düşük sıcaklık farkı ile çalışan Stirling motorları	16
2.3. Stirling Motorlarında Kullanılan Hareket İletim Mekanizmaları	18
2.3.1. Altı kenar hareket iletim mekanizması (Rhombic-Drive).....	18
2.3.2. Sallanan sürücü mekanizması	19
2.3.3. Krank-biyel mekanizmalı stirling motorları.....	20
2.3.4. Eğik plaka döndürme mekanizması	21

Sayfa

2.4. Stirling Motorlarının Avantaj ve Dezavantajları.....	22
2.4.1. Stirling motorlarının avantajları	22
2.4.2. Stirling motorlarının dezavantajları	23
2.5. Stirling Motorlarının Uygulama Alanları.....	24
2.6. Güneş Enerjisi ve ile Çalışan Stirling Motorları	25
2.7. Stirling Motorlarında Kullanılan Çalışma Maddeleri	27
3. STİRLİNG MOTORLARININ TERMODİNAMİK ANALİZLERİ	29
3.1. Stirling Çevriminin Teorik Analizi	29
3.2. Rejeneratörlü Stirling Çevriminin Analizi	31
3.3. Termodinamik Analiz Yöntemleri	34
3.3.1. İzotermal analiz.....	34
3.3.2. Nodal analiz	37
4. MOTORUN TERMODİNAMİK ANALİZİ	42
5. MATERYAL VE METOD	46
5.1. Motorun Çalışma Prensibi	47
5.2. İmalatı Yapılan Gama Tipi Stirling Motorunun Parçaları.....	49
5.2.1. Yer değiştirme ve güç silindirleri.....	50
5.2.2. Üst kapak.....	51
5.2.3. Güç pistonu ve biyel kolu	52
5.2.4. Yer değiştirme pistonu	53
5.2.5. Krank mili	54
5.2.6. Krank mili taşıyıcı ayakları.....	55
5.2.7. Motor volanı.....	56

Sayfa

5.3. Deneyde Kullanılan Ölçü Aletleri.....	56
6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	59
6.1. Alüminyum Yer Değiştirme Pistonu ile Elde Edilen Deney Sonuçları	59
6.2. MDF Yer Değiştirme Pistonu ile Elde Edilen Deney Sonuçları.....	61
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR	65
EKLER.....	68
EK-1 Deney motorunun fotoğrafları.....	69
EK-2 Deney motorunun montaj ve imalat resimleri	72
EK-3 Bilgisayar programları.....	84
ÖZGEÇMİŞ	89

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Hava, helyum ve hidrojene ait bazı termofiziksel özellikler	28
Çizelge 5.1. İmalatı yapılan LTD Stirling motorunun teknik özellikleri.....	46

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. 1816 yılındaki imal edilen ilk Stirling motoru	3
Şekil 2.2. MSI firması tarafından kullanılan LTD Stirling motoru.....	9
Şekil 2.3. Kinematik Stirling motorları	10
Şekil 2.4. Alfa tipi motorun temel parçaları.....	11
Şekil 2.5. Beta tipi Stirling motorunun şematik görünümü	12
Şekil 2.6. Beta tipi Stirling motorlarının farklı düzenlemeleri.....	12
Şekil 2.7. Gama tipi motorun temel parçaları	13
Şekil 2.8. Gama tipi Stirling motorların farklı düzenlemeleri	13
Şekil 2.9. Serbest pistonlu Stirling motoru	14
Şekil 2.10. Lineer alternatörle birleştirilmiş serbest pistonlu bir Stirling motoru	15
Şekil 2.11. Çift etkili Stirling motorunun şematik görünümü.....	16
Şekil 2.12. Rhombic hareket mekanizması	19
Şekil 2.13. Sallanan sürücü mekanizmalı bir Stirling motoru	20
Şekil 2.14. Krank-biyel mekanizmalı Stirling motoru.....	21
Şekil 2.15. Eğik plaka döndürme mekanizmalı Stirling motoru.....	22
Şekil 3.1. Stirling çevriminin P-V ve T-S diyagramı.....	29
Şekil 3.2. Rejeneratörlü Stirling çevriminin T-S diyagramı	32
Şekil 3.3. Stirling ve Carnot çevrimlerinin P-V ve T-S diyagramları.....	33
Şekil 3.4. Stirling motorunun beş hacimli model üzerinde izotermal analizi	35
Şekil 3.5. Karabulut tarafından termodinamik incelemesi yapılan motor	41
Şekil 4.1. LTD Stirling motorunun şematik görünümü	42

Şekil	Sayfa
Şekil 4.2. Krank mili açısına bağlı olarak hacim değişimleri	45
Şekil 4.3. İmalatı yapılan motorun p-V diyagramı	45
Şekil 5.1. İmalatı yapılan motorun çalışma prensibi.....	47
Şekil 6.1. Motor devrine bağlı olarak moment değişimi (Alüminyum yer değiştirme pistonu ile).....	60
Şekil 6.2. Motor devrine bağlı olarak güç değişimi (Alüminyum yer değiştirme pistonu ile).....	60
Şekil 6.3. Motor devrine bağlı olarak moment değişimi (MDF yer değiştirme pistonu ile).....	61
Şekil 6.4. Motor devrine bağlı olarak güç değişimi (MDF yer değiştirme pistonu ile).....	62

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Kinematik ve Ringbom Stirling motorları	18
Resim 2.2. Yuvarlak aynalardan oluşan sistem	26
Resim 2.3. Kare aynalardan oluşan sistem.....	26
Resim 5.1. İmalatı yapılan LTD Stirling motoru	49
Resim 5.2. Yer değiştirme silindiri	50
Resim 5.3. Güç silindiri ve yer değiştirme silindirinin soğuk hacmi.....	51
Resim 5.4. Üst kapak	52
Resim 5.5. Güç pistonu ve biyel kolu	53
Resim 5.6. Yer değiştirme pistonları.....	54
Resim 5.7. Krank mili	55
Resim 5.8. Krank mili taşıyıcı ayakları.....	55
Resim 5.9. Motor volanı	56
Resim 5.10. İmalatı yapılan Stirling motorunun deney düzeneği.....	57
Resim 5.11. Prony tip dinamometre.....	58
Resim 5.12. İnfrared termometre	58

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A	Alan, (m^2)
D_d	Yer değiştirme pistonu çapı, (m)
D_p	Güç pistonu çapı, (m)
g	Yer çekimi ivmesi, (m/s^2)
h	Isı taşınım katsayısı, (W/m^2K)
h_d	Yer değiştirme pistonu uzunluğu, (m)
h_p	Piston pimi ile tepesi arasındaki uzaklık, (m)
k	Isıl iletim katsayısı, (W/mK)
L	Kurs boyu, (m)
l_d	Yer değiştirme pistonu biyel kolu uzunluğu, (m)
l_{dr}	Yer değiştirme pistonu rod uzunluğu, (m)
l_p	Piston biyel kolu uzunluğu, (m)
m	Kütle, (kg)
n	Motor devri, (d/d)
p	Basınç, (kPa)
P	Güç, (W)
Q	Isı, (J)
R	Gaz sabiti, ($J/kg K$)
r_p	Güç pistonu krank yarıçapı, (m)
r_d	Yer değiştirme pistonu krank yarıçapı, (m)
T	Sıcaklık, (K)

Simgeler	Açıklama
t	Zaman, (sn)
U	İç enerji, (J)
U_{db}	Yer değiştirme silindiri soğuk ucunun krank mili eksenine olan uzaklığı (m)
U_{dt}	Yer değiştirme silindiri sıcak ucunun krank mili eksenine olan uzaklığı (m)
U_{pt}	Güç pistonu tepesi ile krank mili eksenini arasındaki mesafe (m)
U_{ps}	Güç silindiri tepesi ile krank mili eksenini arasındaki mesafe (m)
V_c	Soğuk hacim, (m ³)
V_h	Sıcak hacim, (m ³)
V_p	Güç pistonu genişleme hacmi, (m ³)
W	İş, (J)
β_d	Silindir eksenini ile yer değiştirme pistonu biyeli arasındaki açı, (rad)
β_p	Silindir eksenini ile güç pistonu biyeli arasındaki açı, (rad)
ρ	Yoğunluk, (kg/m ³)
θ	Krank mili açısı, (rad)
η	Verim, (%)

Kısaltmalar	Açıklama
AÖN	Alt ölü nokta
LTD	Low temperature differential
LPG	Liquefied petroleum gas

Kısaltmalar**Açıklama****MAN**

Maschinenfabrik Ausburg-Nürnberg

MWM

Motorenwerke Mannheim

NASA

National Aeronautics and Space Administration

SES

Stirling Enerji Sistemleri

ÜÖN

Üst ölü nokta

1.GİRİŞ

Sanayileşme ve gelişen teknolojiyle birlikte artan enerji ihtiyacı ve fosil kökenli yakıtların yoğun kullanımı yaşadığımız çevreyi olumsuz yönde etkilemektedir. Kömür, petrol ve doğal gaz gibi tükenbilir enerji kaynaklarının giderek azalması bilim adamlarını ve hükümetleri yenilenebilir, çevreye zarar vermeyecek, kolay bulunabilir ve tehlikelerden arındırılmış enerji kaynaklarının keşfedilmesine yönlendirmiştir [1].

Bütün enerji kaynaklarının temeli olan güneş enerjisi alternatif enerji kaynaklarının başında gelmektedir. Güneş enerjisinin kullanışlı enerjilere dönüşümü konusunda çok sayıda araştırma yapılmış ve devam etmektedir. Güneş enerjisi uygulamalarında fotovoltaiik sistem olarak adlandırılan ışığa duyarlı yarı iletkenler kullanılarak yaklaşık % 18'lik verimle elektrik üreten sistemlere alternatif olarak çanak/Stirling sistemlerinde verim % 33'lere kadar çıkmaktadır [2,3].

Dıştan ısı verme prensibine göre çalışan Stirling motorları imalat maliyeti ve bakım giderleri dışında masrafsız ve çevreyi kirletmeyen alternatif bir enerji kaynağıdır. Uzun teknolojisinde, sulama alanlarında, soğutmada, elektrik üretiminde vb. yerlerde kullanıma uygun olan Stirling motorları ısı makinesi olarak kullanılabildiği gibi, dışarıdan hareket verilerek ısı pompası veya soğutma makinesi olarak da kullanılabilmektedir. Helyum ve hidrojen gibi yüksek ısı iletim katsayısına sahip gazlarla termik verim % 40'lara kadar çıkabilmektedir [4].

Güneş enerjisi ile çalışan Stirling motorlarının birçok ülkede elektrik üretimi ve sulama amacıyla kullanımı için çeşitli tipleri geliştirilmektedir. Ülkemizde de tarımsal sulama ve güç üretimi için bu motorlar diğer içten yanmalı motorların yerine kullanılmak üzere geliştirilmesi enerji tasarrufu açısından olumlu bir çalışma olacaktır [5].

Özellikle son yıllarda araştırmacıların ilgi gösterdiği düşük sıcaklık farkı ile çalışan (LTD) Stirling motorları sıcak ve soğuk uç arasındaki çok küçük sıcaklık farklarında

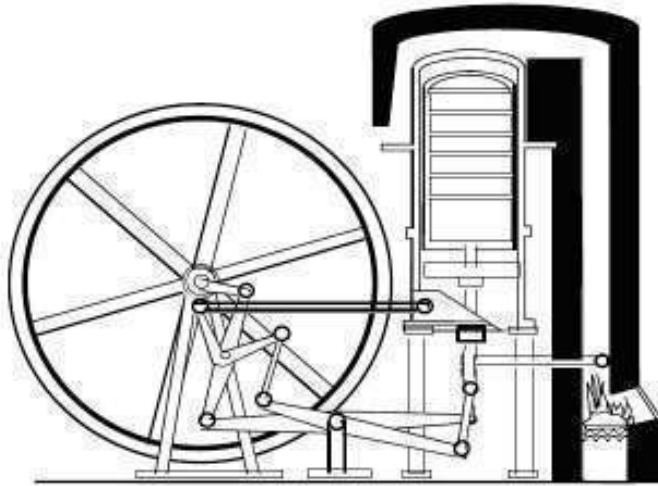
alışabilmektedir. Bu sebeple, bu motorlar güneş enerjisi ve jeotermal sıcak su uygulamalarında, atık ısı kaynaklarının değerlendirilmesinde tercih edilmektedir [6].

Bu çalışmada, düşük sıcaklıklarda çalışabilen 770 cm³ süpürme hacmine sahip gama tipi bir Stirling motoru tasarlanmış ve imal edilmiştir. Yer değiştirme ve g pistonları konsantrik olarak yerleştirilmiş ve aralarında 90° lik faz farkı mevcuttur. Motorda alışma maddesi olarak hava kullanılmıştır. İmalatı yapılan motor, laboratuvar şartlarında LPG (sıvılaştırılmış petrol gazı) yakıtlı bir ısıtıcı ile test edilmiştir.

2. STİRLİNG MOTORLARI

2.1. Stirling Motorlarının Tarihçesi

Stirling motorları ilk olarak İskoç Rahip Robert Stirling tarafından 1816 yılında imal edilmiştir. Robert Stirling tarafından imal edilen bu motorda, bir güç pistonu, sıcak ve soğuk hacimler arasında havayı hareket ettiren bir yer değiştirme pistonu ile bir rejeneratör bulunmaktadır [7]. Şekil 2.1’de bu motorun şematik resmi görülmektedir. Bu tip bir motor 1818 yılında taş ocaklarında su pompalarını çalıştırmak için kullanılmıştır.



Şekil 2.1. 1816 yılında imal edilen ilk Stirling motoru [8].

1850’li yıllara kadar daha çok iki ve üç silindirli, yer değiştirme pistonu - piston tipinde Stirling motorlarını geliştirmiştir. Ölü hacimlerinin fazla olması sebebiyle, bu motorların performansı tek silindirli motorlar kadar iyi olmamıştır [4].

1860’lı yıllarda Lehmann tarafından Almanya’da tek silindirli beta tipi bir Stirling motoru yapılmıştır. Bu motorda rejeneratör kullanılmamasına rağmen yüksek verimle çalıştırılmış ve iyi sonuçlar alınmıştır [9].

19. yüzyılın sonlarında içten yanmalı motorların icadı ile Stirling motorları üzerinde çalışmalar kesintiye uğramış ancak 1920’lerden sonra tarım alanlarında su

pompalamak ve küçük amaçlı elektrik üretimi amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. Birinci Dünya Savaşı sonuna kadar güçleri 4 kW' ı bulan bu motorlarda temel yakıt olarak kömür kullanılmış ve verimi % 7' yi geçmemiştir [4].

20. yüzyılda Stirling motorları üzerinde araştırmalar Philips laboratuvarlarında 1930'lerde başlamış, özellikle Asya ve Afrika'da düzenli güç kaynağı bulunmayan bölgelerde radyolar için küçük ve sessiz elektrik jeneratörü olarak kullanmak amacıyla Stirling motorları üretilmiştir. Philips firması bu tasarımından sonra günümüze kadar güçleri 16 W'tan 224 kW'a kadar ulaşan 54 farklı tasarım ortaya koymuştur [2].

İkinci Dünya Savaşı yıllarında Stirling motorları üzerindeki çalışmalar Almanya'da devam etmiştir. Savaştan kısa bir süre sonra Brillant Araştırma ve Mühendislik Merkezi, Stirling motoru ile çalışan küçük jeneratör setleri üretmiştir. 1950'lerden sonra transistörün icadı ve kuru bataryaların iyileştirilmesi Stirling motorlarına bu alanda duyulan ihtiyacı ortadan kaldırmıştır [10].

1947 yılında Rider tarafından rejeneratör ile sıkıştırma ve genişleme hacimleri dıştan boru ile birleştirmiştir [4]. Aynı yıl, Philips tarafından 1,5 kW' lık bir motor yapıldığı, motorda ısıya dayanıklı çelik alaşımlarının kullanıldığı, bunun sonucunda daha önce yapılan motorlara kıyasla ağırlık ve motor hacminde önemli ölçüde azalma meydana geldiği rapor edilmiştir [10].

1953 yılında rhombic-drive olarak adlandırılan altı kenar hareket mekanizması ilk olarak Philips şirketinde Meijer tarafından Stirling motorlarında uygulanmıştır. Bu sistemde piston üzerine net bir yatay kuvvet gelmediğinden piston sürtünmesi ve aşınma çok az olmaktadır. Bu sürücü iki senkronize dişli çark tarafından birleştirilen ve karşıt yönlerde dönen rot mekanizması ile dengeli dönen krank milinden oluşur. Titreşim ve sessizlik yönünden diğerlerinden daha iyidir. Aynı yıl Meijer çalışma maddesi olarak hidrojen, helyum ve hava kullanmış ve en iyi performans değerini hidrojen ile elde etmiştir [11].

1958 yılında yapılan bir anlaşma ile General Motors firması Philips lisansı ile çalışmalara başlamıştır. General Motors 1958'de, altı kenar hareket mekanizmalı motorların geliştirilmesi için bir program yapmıştır. 1970'lere kadar başta askeri amaçlı jeneratör setleri olmak üzere, uzay araçlarında, denizatlılarda, torpil sürücülerinde, taşıtlarda ve lokomotiflerde kullanılmak üzere, çeşitli Stirling motorları üzerinde araştırma ve geliştirme çalışmalar yapılmıştır [5].

1960'lı yıllarda William Beale tarafından mekanik karmaşıklığı ve yüksek basınç sızdırmazlık problemini en aza indirmek için serbest pistonlu Stirling motoru teorisi ortaya atılmıştır. 1970'li yıllarda gösteri amaçlı küçük bir serbest pistonlu Stirling motoru yapılmıştır. Bu motorda, yer değiştirme ve güç pistonu arasından mekanik bir bağlantı yoktur [12].

1968'de İsveç'te United Stirling yüksek güçlü motorların ısıtıcılarında, ısı borulu sistem geliştirerek kullanmış ve dört silindirli, çift etkili, V tipi bir motorun lisansını almış ve motor üzerinde çalışmalar yapmıştır [4].

1968 yılında Philips firmasının lisans garantisi ile United Stirling (İsveç) ve MAN-MWM (Alman) firmaları bir konsorsiyum kurmuşlardır. 1970'li yıllarda taşımacılık amaçlı araç ve gemi motorları geliştirmişlerdir [5].

General Motors 1970 yılından sonra denizaltı, uzay araçları, otomobiller ve sabit güç kaynağı olarak Stirling motorları üzerinde araştırmalar yapmıştır. 1971 yılında General Motors Philips firması ile olan anlaşmasını iptal etmiş ve Ford Motor Şirketi ile anlaşarak 1977 yılında yedi yıllık ve 180 milyon dolarlık bir çalışma sonunda otomobiller için bir Stirling motoru geliştirilmiştir [5].

1972' de, Detroit' deki Ford motor şirketi, otomobillerde kullanım için, Rinia eğik plaka sistemini geliştirme üzerinde çalışmalar yapmıştır. Bu tip motorlar, içten yanmalı motorlar ile karşılaştırıldığında termik verimi yüksek olan basınçlı kompakt tasarımlardır [4].

1974 yılında Zacharias MAN-MWM ortaklığında sualtı güç sistemleri için 370 kW ile 740 kW arası güçlerinde çok çeşitli motor geliştirmeleri için yoğun bir çalışma içerisine girilmiştir. 1975 yılında Amerika’da NASA-Lewis araştırma merkezinde otomotiv uygulamaları için iki Stirling motor projesi başlatılmıştır [10,11].

1977 yılında U.S. Enerji Bölümü’nde, dıştan yanmalı motorlar projesi kapsamında 370 kW’ dan 1480 kW gücüne kadar çeşitli Stirling motorları yapılmıştır. Bu motorlarda kömür, endüstriyel ve tarımsal atıklar ile alternatif yakıtları kullanma imkanı sağlanmıştır [10].

1978 yılında NASA tarafından California’da bulunan Jet Propulsion Laboratuvarları’nda yapılan bir çalışmada yatay konumda karşılıklı olarak çalışan çift krank miline sahip 9 kW gücünde bir Stirling motoru imal edilmiştir [12].

1983 yılında düşük sıcaklık farklarında çalışabilecek Stirling motoru prensibi ilk defa Profesör Ivo Kolin tarafından ortaya konulmuş ve ilk düşük sıcaklık farkıyla çalışan motor 1983’te Dubrovnik’ te tanıtılmıştır. Sıcak su ile ısıtılan bu motor 20 °C sıcaklık farkında ilk harekete geçmiştir. 50 °C sıcaklık farkında 50 d/d devirde dönebilen motorda, strafordan imal edilen kare şeklinde çok geniş ve ince bir yer değiştirme pistonu kullanılmıştır [6].

1983 yılında, Kolin’dan kısa bir süre sonra Senft tarafından ilk ringbom tipi düşük sıcaklık farkında çalışabilen Stirling motoru imal edilmiştir. Bu motor 7 °C gibi çok düşük sıcaklık farkında ilk harekete geçmiş ve 80 °C sıcaklık farkında, 125 d/d motor devrinde 1 W çıkış gücü elde edilmiştir [13].

1986 tarihinde, Senft tarafından L-27 adı verilen ringbom tipi düşük sıcaklık farkı ile çalışan bir Stirling motoru tasarlanmış ve imal edilmiştir. Bu motor 5 °C gibi çok düşük sıcaklık farkı ile 700 d/d motor devrinde çalışmıştır. Bu motorun yer değiştirme pistonu 130 mm çapında regeneratörlü olarak imal edilmiştir. L-27 Ringbom tipi düşük sıcaklık farklı Stirling motoru konik reflektör kullanarak güneş

enerjisiyle de çalıştırmıştır. Rob McConaghy tarafından Senft'in tasarladığı L-27 Ringbom tipi Stirling motorundan yüzden fazla üretilmiştir [13].

1989 yılında, Eckhart Weber ilk düşük sıcaklıkta çalışan Stirling motorlu bir su pompası yapmış ve bu motorla Alman buluş ödülünü almıştır [11].

1990 yılında Senft, Wisconsin Üniversitesi'nde yapmış olduğu bir araştırmada aşırı düşük sıcaklık farkı ile çalışan P-19 modeli olarak adlandırdığı motoru tasarlamış ve imalatını yapmıştır. P-19 motorunun sıkıştırma oranı 1,004' tür. Bu motor insan elinin sıcaklığında 100 d/d motor devrinde çalışmaktadır [13].

1990 yılında, biyomedikal alanda yapay kalp olarak kullanılmak üzere Stirling çevrimi ile çalışan minyatür bir cihaz geliştirilmiştir [14].

1991 yılında Profesör Senft, 2 °C ve daha küçük sıcaklık farkı ile çalışan bir Stirling motorunu geliştirmiştir. Bu motorun 0,5 °C sıcaklık farkı ile çalıştığı rapor edilmiştir [15].

1992 yılında, Senft tarafından NASA için N-92 modeli olarak adlandırılan bir LTD Stirling motoru yapılmıştır. N-92 modeli 1,8 °C sıcaklık farkında ilk harekete geçmekte ve 6 °C civarlarında 175 d/d devirde çalışabilmektedir. Bu motorda, 155 mm çapında regeneratörlü bir yer değiştirme pistonu kullanılmıştır [13].

1995 yılında Iwamoto ve arkadaşları tarafından, 100 °C ısıtıcı sıcaklığında 300 W çıkış gücü üretebilen bir LTD Stirling motorunun tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Bu motorda 800 mm çapında poliüretan köpük malzemeden yapılan yer değiştirme pistonu kullanılmıştır [16].

Iwamoto ve arkadaşları tarafından yapılan diğer bir çalışmada LTD ve yüksek sıcaklık farkıyla çalışan Stirling motorlarının performansı karşılaştırılmış ve yüksek hızlarda çalışan LTD Stirling motorlarının veriminin Carnot veriminin yaklaşık % 50'sine ulaştığı belirtilmiştir [17].

1997 yılına kadar Kolin tarafından 16 farklı LTD Stirling motoru yapılmıştır. Kolin, yer değiştirme silindirin soğuk ve sıcak uçları arasındaki sıcaklık farkı $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve daha küçük sıcaklık farkında çalışabilen farklı Stirling motoru modelleri ortaya koymuştur [15].

2003 yılında, Kongtragool ve Wongwises literatürdeki çeşitli Stirling motorlarının Beale sayılarını inceleyerek, LTD Stirling motorları için Beale sayısı üzerinde araştırma yapmışlardır [18].

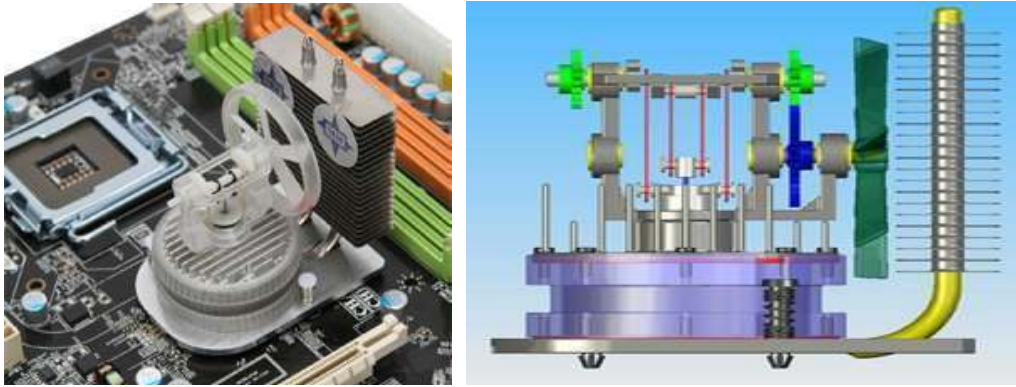
2005 yılında, Kongtragool ve Wongwises tarafından güneş enerjili düşük sıcaklık farkı ile çalışan bir Stirling motorunun maksimum verimini sağlamak için konik yoğunlaştırıcı tarafından sağlanması gereken en uygun sıcaklık teorik olarak araştırılmış ve sistemin toplam verimliliği için bir matematiksel model geliştirilmiştir [19, 20].

2006 yılında, Kongtragool ve Wongwises tarafından yapılan çalışmada, ısı kaynağı olarak projeksiyon bir lamba kullanılarak gama tipi çift güç pistonlu LTD Stirling motorunun performansı incelenmiştir. Bu motorda 436 K ısıtıcı sıcaklığında yapılan testlerde $52,1\text{ d/d}$ motor hızında maksimum $1,69\text{ W}$ çıkış gücü ve $23,8\text{ d/d}$ motor hızında maksimum $0,352\text{ Nm}$ moment elde edilmiştir [15].

2007 yılında Kongtragool ve Wongwises tarafından yapılan çalışmada, LPG yakıtlı bir ısıtıcı kullanılarak gama tipi, tek yer değiştirme pistonlu, iki güç pistonlu ve dört güç pistonlu olarak üretimi yapılmış iki ayrı LTD Stirling motorunun performansı test edilmiştir. İki güç pistonlu motordan atmosferik basınçta ve 589 K ısıtıcı sıcaklığında yapılan testlerde 133 d/d motor hızında maksimum $11,8\text{ W}$ çıkış gücü ve $67,7\text{ d/d}$ motor hızında maksimum $1,222\text{ Nm}$ moment elde edilmiştir. Dört güç pistonuna sahip diğer LTD Stirling motorundan, 771 K ısıtıcı sıcaklığında yapılan testlerde $42,1\text{ d/d}$ motor hızında maksimum $32,7\text{ W}$ çıkış gücü ve $28,5\text{ d/d}$ motor hızında maksimum $10,55\text{ Nm}$ moment elde edilmiştir [21].

2007 yılında Kongtragool ve Wongwises tarafından gama tipi dört adet güç pistonlu LTD Stirling motorunun performansı, atmosferik basınçta ve ısı kaynağı olarak dört adet projeksiyon lamba kullanılarak test edilmiştir. 439 K ısıtıcı sıcaklığında yapılan testlerde 20 d/d motor hızında maksimum 6,2 W çıkış gücü ve maksimum 2,91 Nm moment elde edilmiştir [18].

2008 yılında Micro Star International (MSI) firması tarafından, ana kart üzerinde soğutma amaçlı bir LTD Stirling motoru kullanılmıştır. Motor ana kart üzerindeki ısıyı alarak çalışmaktadır [22].



Şekil 2.2 MSI firması tarafından kullanılan LTD stirling motoru [22].

2009 yılında Karabulut ve arkadaşları tarafından kısmen düşük sıcaklıklarda çalışabilen beta tipi bir Stirling motorunun tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Atmosferik hava ile yapılan testlerde motor 93 °C ısıtıcı sıcaklığında çalışmaya başlamıştır. Helyum gazı kullanılarak 360 °C ısıtıcı sıcaklığında 545 d/d motor hızında maksimum 252 W çıkış gücü elde edilmiştir [3].

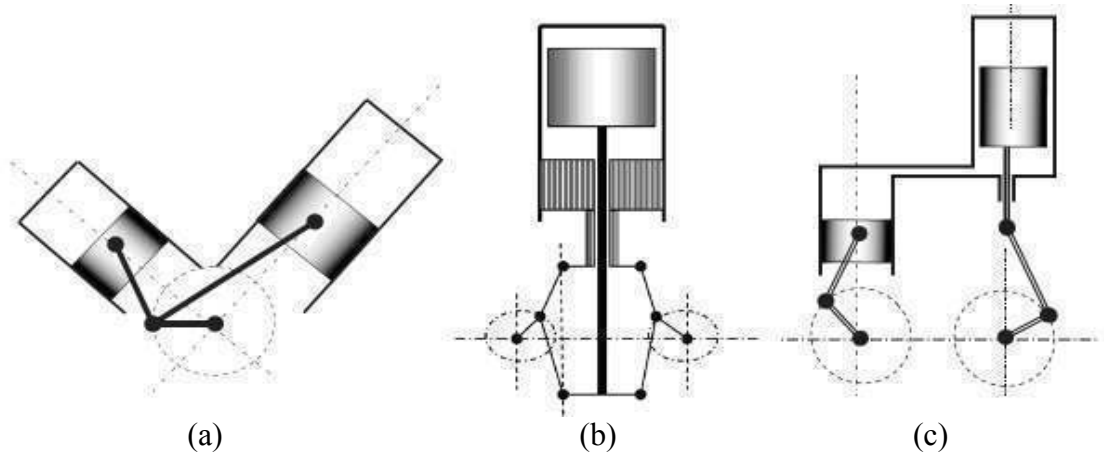
2.2. Stirling Motorlarının Çeşitleri

1816 yılında Robert Stirling tarafından imal edilen ilk Stirling motorundan sonra benzer birçok motor yapılmıştır. Çalışma prensipleri aynı olan bu motorların tasarım farklılıklarının temel sebepleri; ölü hacmin azaltılması, imalat ve bakım masraflarının en aza indirilmesi ve termik verimlerinin artırılması olarak sıralanabilir [10].

Stirling motorları hareket iletim mekanizmalarına göre kinematik ve serbest pistonlu motorlar olarak iki sınıfa ayrılır. Kinematik motorlarda hareket, krank-biyel veya altı kenar hareket (rhombic-drive) gibi mekanizmalar aracılığı ile volana iletilir. Serbest pistonlu motorlarında, çalışma maddesinin oluşturduğu basınç değişimleri ile sağlanan hareket piston tarafından lineer alternatöre iletilir. Bu motorlarda hareketli elemanlar arasında mekanik bir bağlantı yoktur [23].

2.2.1. Kinematik stirling motorları

Kinematik Stirling motorları hareketli parçaların yerleştirilme düzenine göre alfa, beta ve gama olarak üç sınıfa ayrılmıştır (Şekil 2.3.).

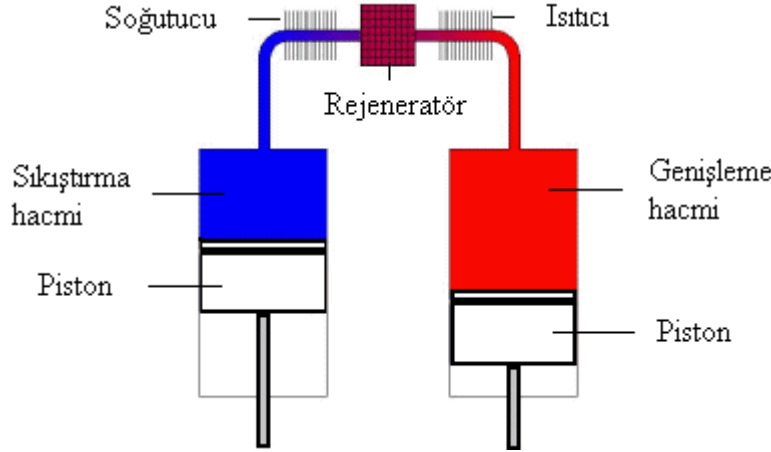


Şekil 2.3. Kinematik stirling motorları [24]

Alfa tipi stirling motorları

Alfa tipi Stirling motorlarında iki ayrı silindir, ısıtıcı, soğutucu ve rejeneratör vasıtasıyla birbirine birleştirilmiştir (Şekil 2.4). Çalışma maddesinin bir çevrim oluşturacak biçimde soğuk ve sıcak silindirler arasında sirkülasyon yapmasını sağlamak için pistonlar birbirine göre 90°'lik faz farkı ile hareket ettirilmektedir. Bunu sağlamak amacıyla, sıcak ve soğuk silindirler genellikle 90°'lik açı farkı ile V şeklinde yerleştirilmektedir. Eğer silindirler paralel olarak yerleştirilmişse, pistonlar

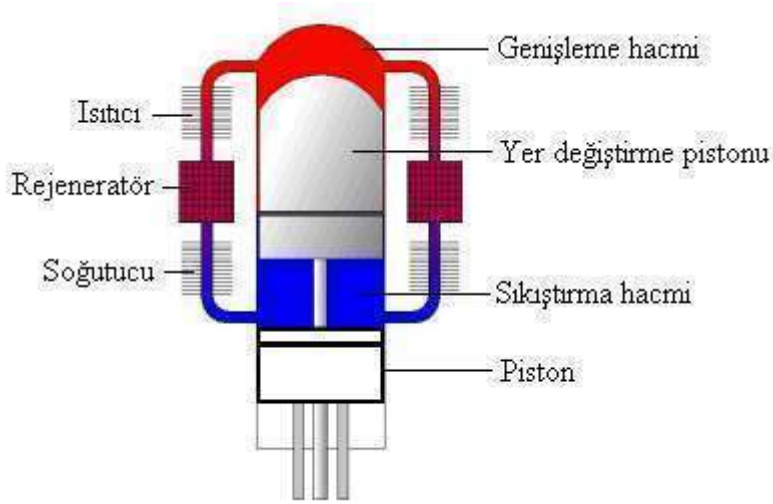
krank milinde bulunan ve aralarında 90°'lik açı farkı olan iki ayrı kol muylusu ile hareket ettirilmektedir [4, 5].



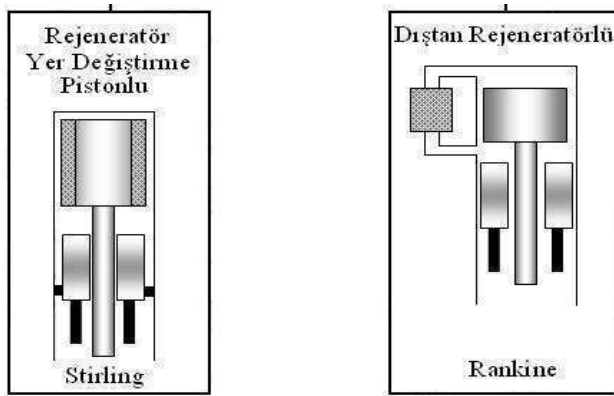
Şekil 2.4. Alfa tipi motorun temel parçaları [25].

Beta tipi stirling motorları

Beta tipi motorlarda çevrim, aynı silindir içerisinde çalışan bir piston ve bir yer değiştirme pistonu tarafından gerçekleştirilmektedir. Yer değiştirme pistonunun rodü güç pistonunun ortasından geçmektedir. Soğuk hacim güç pistonu ile yer değiştirme pistonu arasında, sıcak hacim ise yer değiştirme pistonunun üst kısmında bulunmaktadır (Şekil 2.5). Düşük basınçlı motorlarda rejeneratör yer değiştirme pistonunun etrafına yerleştirilmektedir. Bu motorlarda yer değiştirme pistonu ile silindir arasındaki boşluktan çalışma maddesinin sıcak ve soğuk hacimler arasındaki akışı sağlanmaktadır. Bu motorlarda yer değiştirme pistonunu uzunca yapmak gerekmektedir. Yüksek şarj basıncı uygulanan motorlarda ise, ısı transferi yüzey alanının artırılması gerekir. Bu sebeple ayrı bir ısıtıcı, soğutucu ve rejeneratöre ihtiyaç duyulur. β -tipi motorların rejeneratörlü yer değiştirme pistonu kullanılanları "Stirling tip", dıştan ayrı rejeneratör kullanılanları ise "Rankine-Naipier tip" olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.6) [2].



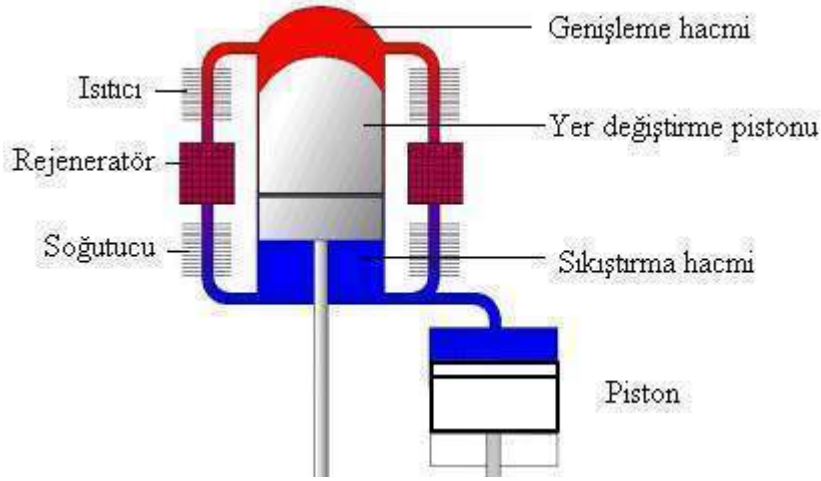
Şekil 2.5. Beta tipi Stirling motorunun şematik görünümü [25]



Şekil 2.6. Beta tipi Stirling motorlarının farklı düzenlemeleri [26].

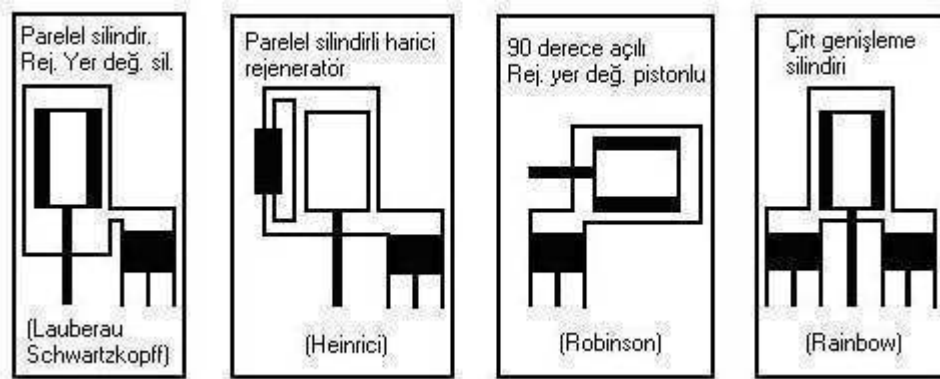
Gama tipi stirling motorları

Şekil 2.7’de görüldüğü gibi gama tipi motorlarda iki ayrı silindir mevcuttur. Silindirlerden biri bir piston vasıtası ile çalışma maddesinin genişleme ve sıkıştırılmasını, diğeri yer değiştirme pistonu aracılığıyla çalışma maddesinin ısıtılmasını ve soğutulmasını sağlar. İki silindir birbirlerine bir boru vasıtasıyla birleştirilmiştir. Rejeneratör, beta tipi motorlarda olduğu gibi yer değiştirme silindirinin içine veya dışına yerleştirilebilir [2].



Şekil 2.7. Gama tipi motorun temel parçaları [25].

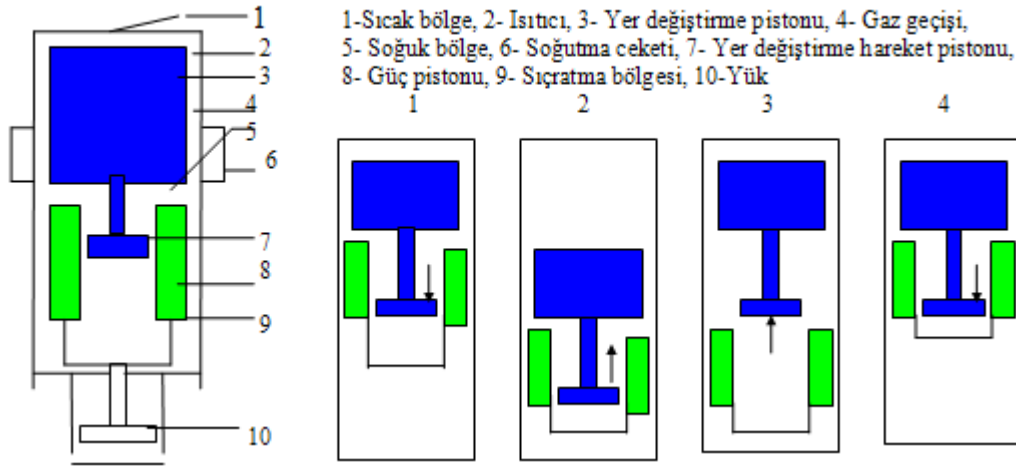
Gama tipi motorlara ait farklı düzenlemeler Şekil 2.8’de görülmektedir. Gama tipi motorlarda, rejeneratörlü yer değiştirme pistonuna sahip olanlar Laubereau-Schwartzkopff, harici rejeneratör olanlar ise Heinrici tip olarak adlandırılmaktadır. Gama tipi motorlarda silindir eksenleri arasında 90° olanlar Robinson motoru olarak bilinirler. Bu motorların bir diğer düzenlemesi de 1971 yılında H. Rainbow tarafından yapılmıştır. Bu motorlarda iki güç pistonu ve bir rejeneratörlü yer değiştirme pistonu vardır [2, 4].



Şekil 2.8. Gama tipi Stirling motorların farklı düzenlemeleri [2, 4].

2.2.2. Serbest pistonlu stirling motorları

Serbest pistonlu Stirling motorları ilk olarak William Beale tarafından tasarlanmıştır. Şekil 2.9’da görüldüğü gibi yer değiştirme pistonunun rodu içi boşaltılmış güç pistonunun içerisinden geçmektedir. Yer değiştirme pistonu ile silindir arasında çalışma maddesinin geçişine müsaade edecek bir boşluk bırakılmıştır. Silindir cidarları ısıtıcı, soğutucu ve rejeneratör olarak görev yapmaktadır. Pistonun salınımı sıkıştırma ve genişlemeyi meydana getirir. Yer değiştirme pistonu ise çalışma maddesini sıcak ve soğuk bölgeler arasında hareket ettirerek çevrim için gerekli olan ısı akışını sağlar [2, 5, 9].



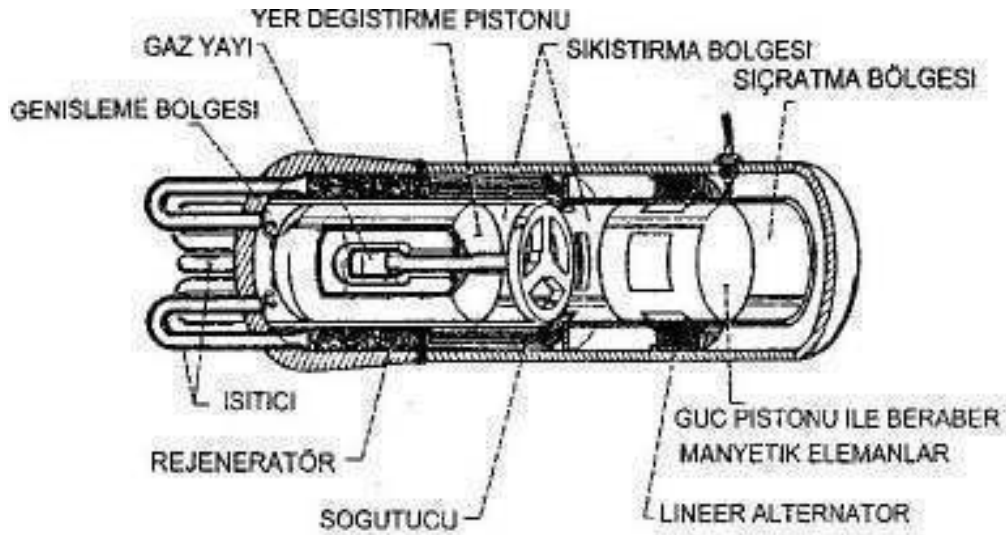
Şekil 2.9. Serbest pistonlu Stirling motoru [2, 5, 9].

Serbest pistonlu bir Stirling motorundan farklı yollarla iş elde edilebilir. Bunlardan bazıları:

- Hareketli piston daimi mıknatıslı endüvi ve etrafına bobin sarılmış silindir çevresi de ikaz sargıları olarak kullanılırsa, lineer bir alternatörde elektrik elde edilebilir.
- Tamamen sızdırmazlığı sağlayan bir silindirin avantajından faydalanılarak akışkan pompası olarak kullanılabilir. Bu, silindiri çok hafif yaparak onu akışkan pompasının pistonu olarak kullanmak suretiyle sağlanabilir.

- c) Sıkıştırma bölgesinin Stirling çevrim soğutucusu ile yer değiştirildiği durumda soğutucu olarak kullanılabilir [4].

Şekil 2.10'da lineer alternatörle birleştirilmiş serbest pistonlu bir Stirling motoru şematik olarak görülmektedir. Doğrudan lineer alternatöre bağlanan serbest pistonlu Stirling motorunda sınırlı sayıdaki parçalar hareket ettiği için uzun süreli çalışmaya elverişlidir. Aynı zamanda, esnek sekmanların kullanılması sürtünmeyi azaltma ve sızdırmazlık yönünde avantaj sağlamaktadır [9].

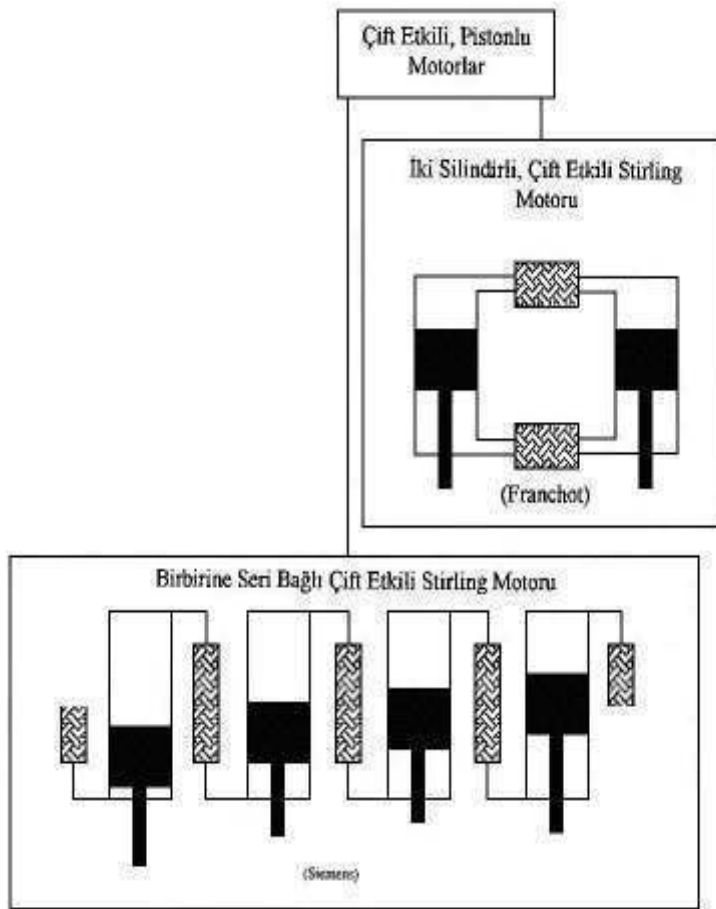


Şekil 2.10. Lineer alternatörle birleştirilmiş serbest pistonlu bir Stirling motoru [9].

2.2.3. Çift etkili stirling motorları

Çift etkili Stirling motorlarının çeşitli düzenlemeleri vardır. Motor düzenlemesi bir silindirin genişleme hacmi ile diğer silindirin sıkıştırma hacmi arasına ısı değiştirici yerleştirmek sureti ile oluşturulmaktadır (Şekil 2.11). Çift etkili Stirling motorlarının en büyük avantajı tek etkili Stirling motorunun yarısı kadar parça sayısına sahip olmasıdır. Bu özellik motorun hareket sistemini basitleştirmektedir. Çift etkili Stirling motoru teorisi 1853 yılında Fransız mühendis Franchot tarafından ortaya atılmış, 1885 yılında Babcock tarafından ilk çift etkili motor imal edilmiştir. 1959 yılında Finkestein ve Polanski çift etkili Stirling motorları üzerinde çalışmalar yapmışlardır. İngiliz bilim adamı Sir Williams Siemens tarafından dört silindri çift

etkili Stirling motoru fikri ortaya atılmıştır. Eğik plaka hareket sisteminin ortaya çıkması ile Van Weenan tarafından Philips programı çerçevesinde bu motor yapılmıştır. Philips ve Ford firmalarının ortaklığı ile imal edilen otomobil motorunda dört silindirli, eğik plakalı hareket sistemli Siemens motoru kullanılmıştır. MAN/MWM motorları V tipinde çift etkili Siemens Stirling motorunun farklı bir düzenlemesidir [4,5].



Şekil 2.11. Çift etkili Stirling motorunun şematik görünümü [11].

2.2.4. Düşük Sıcaklık Farkı ile Çalışan Stirling Motorları

Düşük sıcaklık farkı (LTD) Stirling motorları sıcak ve soğuk bölgeler arasındaki çok küçük sıcaklık farklarında çalışabilmektedir. Bu sebeple, bu motorlar güneş enerjisi ve jeotermal sıcak su uygulamalarında, atık ısı kaynaklarının değerlendirilmesinde

tercih edilmektedir. Ayrıca, bu motorlarda güneş enerjisini doğrudan işe dönüştürmek mümkündür.

LTD Stirling motorlarının bazı özellikleri şunlardır:

1. Yer değiştirme pistonunun süpürme hacmi, güç pistonuna göre çok büyüktür.
2. Yer değiştirme pistonu ve silindirin çapı büyüktür.
3. Yer değiştirme pistonunun boyu kısadır.
4. Yer değiştirme silindirin soğuk ve sıcak uçlarındaki etkili ısı transferi yüzey alanı büyüktür.
5. Yer değiştirme pistonunun kursu küçüktür.
6. Çalışma devirleri düşüktür.

Bir Stirling motorunda sağlanması gereken en önemli özelliklerden birisi, çalışma maddesinin sıcak ve soğuk bölgelerini ayırmak ve termal yönden ısı kayıplarını azaltmaktır. Böylece sıcak bölgeden soğuk bölgeye kondüksiyonla olan ısı iletimi azaltılabilir. Yer değiştirme pistonunun boyu azaltılırsa sıcaklık farkı da azalacaktır. Bu durumda sıcaklık farkının azalması, sıkıştırma oranının da azalması anlamına gelecektir. Sonuçta kısalan yer değiştirme pistonunun silindirinde gerekli hacmi sağlamak için silindir ve yer değiştirme piston çapı büyüyecektir. Genel bir değerlendirme yapılacak olursa, geniş yüzey alanlı ve düşük kurs boyuna sahip yer değiştirme pistonu, düşük sıcaklık farkı ile çalışan Stirling motorları için uygun özelliklerdir denilebilir [6, 13, 20].

Sınırlı uygulama alanları olmasına rağmen düşük sıcaklık farklı Stirling motorları ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Üstelik bu çalışmaların maliyeti oldukça düşüktür [13].

LTD Stirling motorları kinematik ve Ringbom olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Resim 2.1’de görüldü gibi kinematik motorlarda yer değiştirme ve güç pistonları mekanik olarak krank miline bağlanmıştır. Ringbom motorunda ise sadece güç pistonu mekanik olarak krank mile bağlanmıştır. Yer değiştirme pistonu ile krank mili arasında herhangi bir mekanik bağlantı yoktur.

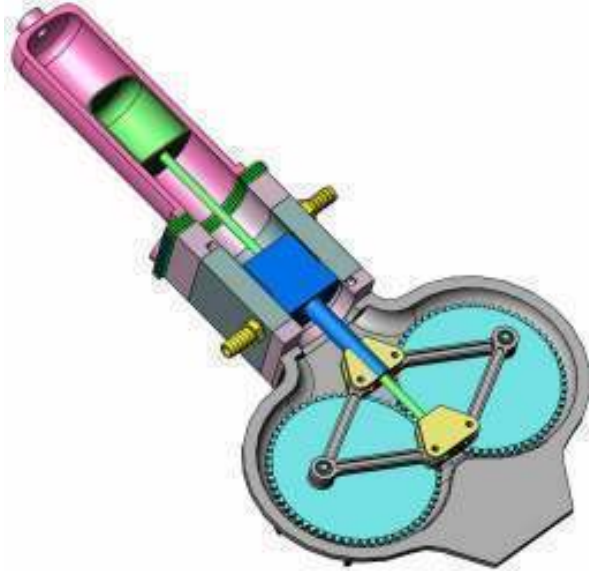


Resim 2.1. Kinematik ve Ringbom Stirling motorları [27, 28].

2.3. Stirling Motorlarında Kullanılan Hareket İletim Mekanizmaları

2.3.1. Altı kenar hareket iletim mekanizması (Rhombic-Drive)

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 beta tipi motorlarda tercih edilir. Şekil 2.12’de Rhombic sürücü mekanizmasının şematik resmi görülmektedir. Bu motorlarda yer değiştirme pistonunun rodu, iş pistonunun ortasından geçmektedir [2, 4].

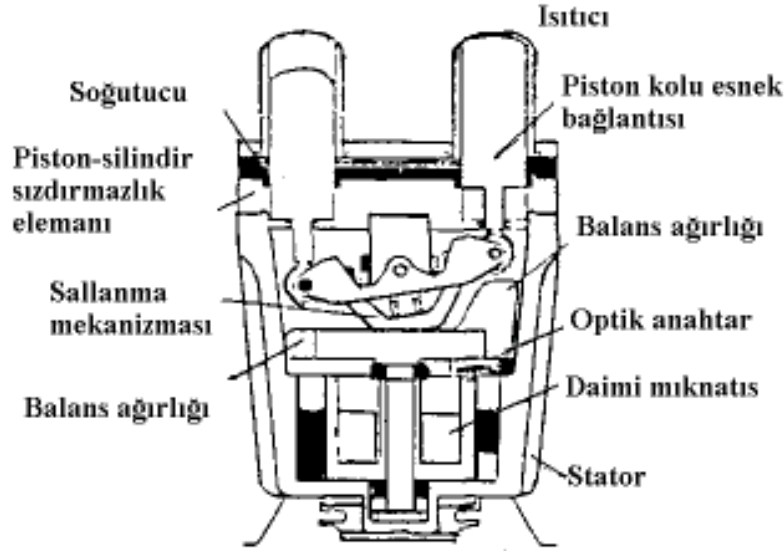


Şekil 2.12. Rhombic hareket mekanizması [29].

Güç pistonu ve yer değiştirme pistonu basit harmonik hareketle çalışmaktadır. Bu tip mekanizmada yanıl kuvvetler karşılıklı olarak dengelendiğinden piston ve silindir arasında ve yer değiştirme piston rodu ile güç piston rodu arasında yanıl sürtünme direnci olmadığından sürtünme direnci azalmakta ve parça aşınması en aza indirilmektedir [10].

2.3.2. Sallanan sürücü mekanizması

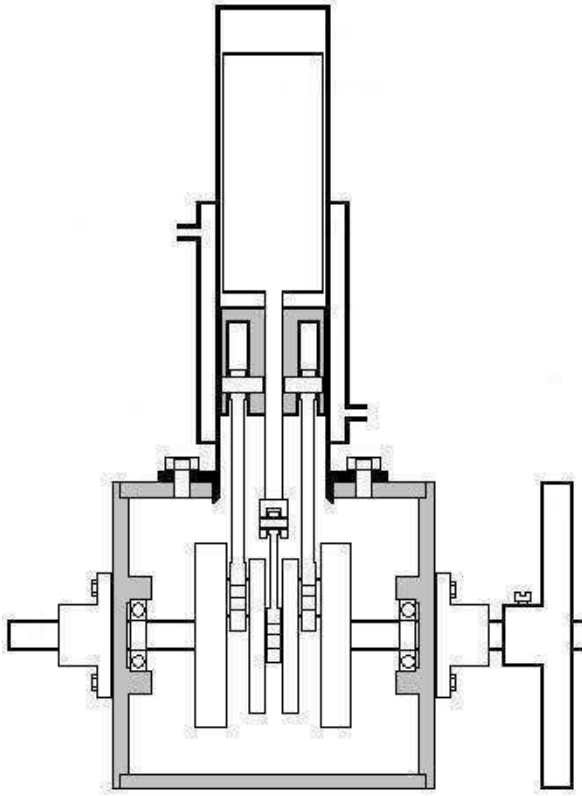
Bu sistemde, küresel külbütör manivelasına benzeyen bir mekanizma salınım yaparak her iki uçtaki piston bağlantı rotlarını hareket ettirmektedir. Şekil 2.13’de dört silindirli, çift etkili bir Stirling motorunda kullanılan sallanan sürücü mekanizması görülmektedir [2].



Şekil 2.13. Sallanan sürücü mekanizmalı bir Stirling motoru [2,4].

2.3.3. Krank-biyel mekanizmalı stirling motorları

Şekil 2.14’de Krank-biyel mekanizmalı Stirling motoru görülmektedir. Bu tür mekanizmaların yapımı basit olduğundan tek silindirli küçük motorlarda kullanılmaktadır. Ancak büyük motorlarda ağırlığı çok artırdığı için kullanışlı değildir. Yer değiştirme pistonunun rodu üzerinde yataklanması sebebiyle yanıl yönde gelen sürtünme direnç kuvvetleri en aza indirilmiştir. Ancak, güç pistonunun salınım yapan biyel vasıtası ile hareket alması sebebiyle yanıl yönde sürtünme kuvvetleri artmaktadır [10].



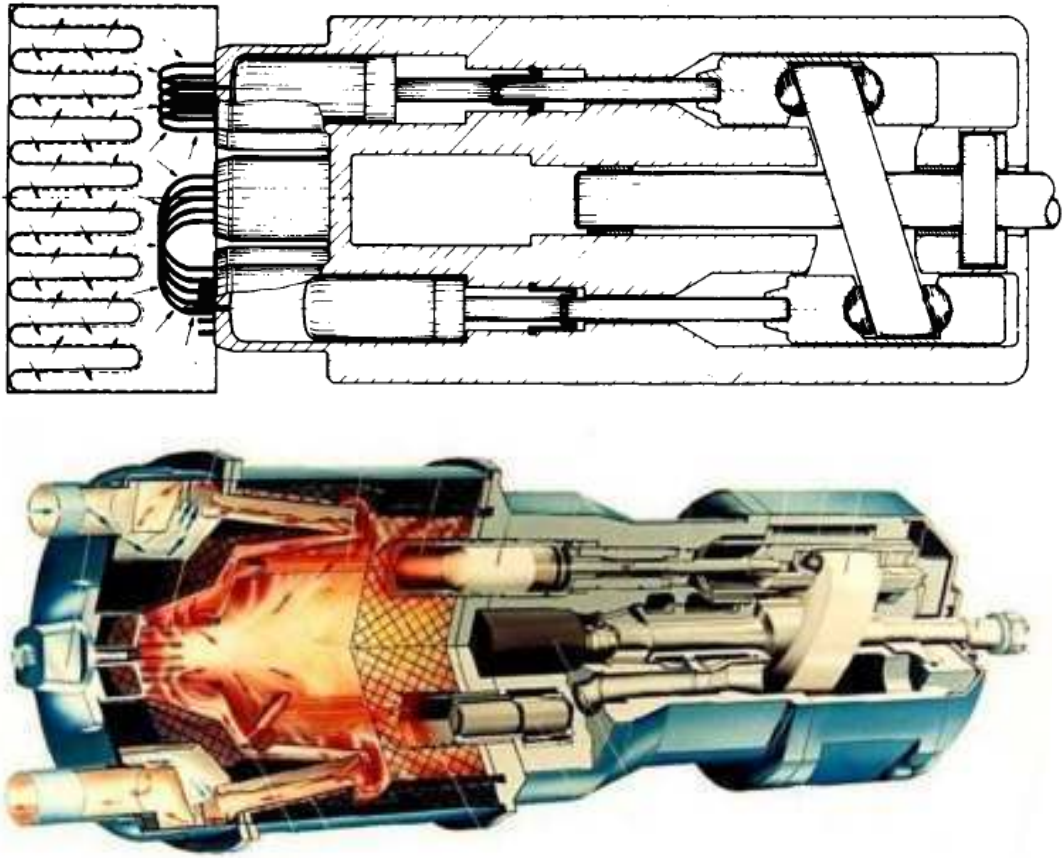
Şekil: 2.14. Krank-biyel mekanizmalı Stirling motoru [30].

2.3.4. Eğik plaka döndürme mekanizması

Genellikle kompresörlerde ve hidrolik pompalarda kullanılan eğik plaka döndürme mekanizması (swash-plate), Stirling motorlarına da başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Eğik plaka mekanizması çok silindirli motorlarda kullanılmakla birlikte, mekanizma boyutları ve ağırlığı rhombic sürücü mekanizmasından daha küçük ve hafif olması sebebiyle yüksek güç istenilen motorlarda da tercih edilmektedir [4].

Motor boyutlarını küçültme imkanı, kolay dengeleme, bir çok uygulama için moment karakteristiğinin uygun olması ve seri üretime uygunluğu gibi avantajlarının yanı sıra bu mekanizmaların kullanımında yağlama problemleri sebebiyle sürtünme kuvvetleri artmakta ve eğik plakaya karşı olan reaksiyon kuvveti nedeniyle piston kollarının yan yükleri artmaktadır [4].

Şekil 2.15’de eğik plaka döndürme hareket mekanizmalı bir Stirling motoru görülmektedir. Bu mekanizma, 1970’lerde otomobillerde kullanılmak amacı ile Ford ve General Motor şirketleri tarafından üretilen Stirling motorlarında kullanılmıştır. Eğik plaka döndürme mekanizmalı Stirling motorları su altı güç sistemleri için Philips lisansından ayrı olarak United Stirling, Malmo ve MAN-MWM şirketleri tarafından da üretilmiştir [11].



Şekil: 2.15. Eğik plaka döndürme mekanizmalı Stirling motoru [31].

2.4. Stirling Motorlarının Avantaj ve Dezavantajları

2.4.1. Stirling motorlarının avantajları

Stirling motorları diğer ısı motorlarına göre bir çok avantajı olan dıştan ısı vermeli bir motordur. Stirling motorlarının avantajları aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

1. Termik verimleri içten yanmalı motorlara oranla daha yüksektir. Rejeneratörlü Stirling motoru aynı sıcaklık sınırları içerisinde Carnot çevriminin ısı verimine eşdeğer bir verime sahiptir.
2. Stirling motorları gürültüsüz ve titreşimsiz çalışır. Sisteme ısı sürülmesi sürekli olduğu için gürültü yok denilecek kadar azdır. Basınç değişimlerinin sinüzoidal olması, emme ve egzoz supapları gibi mekanik parçaların olmayışı, gürültüyü azaltıcı, bakımı ve montajı kolaylaştırıcı etkenlerdir.
3. Motor çalışmaya başlamadan önce içeri ısı sürüldüğü için ilk harekete geçirilmeleri kolaydır.
4. Her türlü ısı enerjisi ve yakıtla çalışabilirler. Ayrıca güneş enerjisi, gaz yakıtlar, sıvı yakıtlar, fosil yakıtlar, biyodizel yakıtlar, nükleer enerji, termal ısı kaynakları vb. enerji kaynakları ile de çalışabilirler.
5. Parça aşınırları azdır. İçten yanmalı motorlarda olduğu gibi yanmadan kaynaklanan ani basınç yükselmeleri olmadığından hareketli motor parçaları zarar görmemektedir. Bu sebeple Stirling motorları daha uzun ömürlüdür.
6. Az bakım gerektirir, çünkü ateşleme, enjeksiyon ve supap sistemi gibi yardımcı parçalara ihtiyaç duymamaktadır.
7. Yağlama yağının soğutma özelliği olmadığı için içten yanmalı motorlardaki gibi ısı kaybı olmaz. Ayrıca yağ sarfiyatı daha az ve yağ değişim aralığı daha uzundur.
8. Dıştan yanma sebebiyle NO_x , CO, yanmamış HC ve partikül emisyonları daha az ve kontrollüdür.
9. Stirling motorları çok değişik mekanik düzenlemelerle, çok küçük ve çok büyük boyutlarda ve değişik güçlerde üretilebilir [2, 4, 5, 10].

2.4.2. Stirling motorlarının dezavantajları

1. Aynı güce sahip içten yanmalı motora göre daha büyük kütle ve boyutlara sahiptir.
2. Çalışma ve krank boşlukları açısından sızdırmazlık problemleri vardır.
3. Isıtıcı ve soğutucudaki termik ataletler nedeniyle yavaşlama ve hızlanma ivmesi düşüktür.

4. Birçok kısmında tasarım güçlüğü vardır ve deneysel bilgi gerektirmektedir. Bu sebeple maliyetleri yüksektir.
5. Araştırma ve geliştirme çalışmaları hali hazırda devam ettiği için seri imalat yapılamamaktadır. [2, 4, 5, 10].

2.5. Stirling Motorlarının Uygulama Alanları

Stirling motorlarının teknolojik gelişmeleri seri üretim yapılabilecek seviyeye geldiği zaman, dünyada giderek artan enerji sorununa ve çevre kirliliğine çözüm olabilecektir. Stirling motorlarının başlıca uygulama alanları şunlardır;

1. Elektrik üretiminde
2. Tarımsal sulamada
3. Yardımcı güç motoru olarak
4. Deniz araçlarında
5. Nükleer güç istasyonlarında
6. Askeri sistemlerde
7. Hidrolik pompalarda
8. İklimlendirmede
9. Uzay araçlarında [2, 4, 5].

2.6. Güneş Enerjisi ile Çalışan Stirling Motorları

Güneş enerjisi ile çalışan ilk sıcak hava motoru 1864 yılında Ericsson tarafından yapılmıştır. Parabolik bir ayna ile su sıcak buhar haline getirilmiş ve bu buhar motorda kullanılmıştır. 1872 yılında da ilk defa Ericsson tarafından bir Stirling motoru güneş enerjisi ile çalıştırılmıştır. Güneş enerjili toplam 9 adet motor deneysel amaçlı olarak Ericsson tarafından tasarlanmış ve imal edilmiştir. Güneş enerjisini bir alıcı yüzey üzerinde toplamak amacıyla çok çeşitli kolektörler imal edilmiştir. Bu toplayıcılar şekil olarak birbirinden farklı olmakla birlikte aynı işlevi yerine getirmektedirler. Odaklı güneş kolektörleri temel olarak üzerine gelen güneş ısılarını bir odak üzerinde toplar ve güneş ısıları burada ısı enerjisine dönüştürülür.

Stirling motoru ve çanak aynadan oluşan güneş enerjisi sistemlerinde, genel olarak ayna ve motor farklı platformlarda bulunmalarına rağmen küçük sistemlerde ayna ve motor aynı platformda bulunabilir. Küçük sistemlerde motorun ısıtıcı kısmı aynanın odağına gelecek şekilde yerleştirilir. Bk sistemlerde ise motor kollektörün karsısına yerleştirilir, güneş ısınları sodyumlu bir ısı borusu yardımıyla motorun sıcak ucuna iletilir [3].

Güneş enerjisi teknolojilerinin gelişiminde 1973 yılındaki petrol krizi çok bk etken olmuştur. Güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretmek için tasarlanan anak/Stirling sistemleri 1980’li yıllarda ticari üretim için geliştirilmeye başlamıştır. Modern anak/Stirling sistemlerinin ilk uygulaması 1984 yılında Advanco şirketi tarafından gerçekleştirilmiştir. Advanco şirketinin geliştirdiği kolektör ile otomotiv uygulamaları için geliştirilen United Stirling 4-95 Mod II Stirling motorunun kullanıldığı bu sistem % 29,4 verimle 25 kW güç üretebilmektedir. Bu sistem bu güne kadar geliştirilen en verimli sistem olmasına karşın yüksek maliyeti nedeniyle sadece bir adet üretilmiş ve test amaçlı kullanılmıştır [32].

Cummins Power Generations şirketi tarafından yapılan 5 kW’lık bir sistemde toplam 24 parça ayna kullanılmış olup, ayna alanı $47,2 \text{ m}^2$, ayna verimi % 76’dır. Kullanılan aynalar genellikle yuvarlak veya kare şeklinde küçük parçaların bir araya getirilmesi ile oluşturulmaktadır (Resim 2.2 ve Resim 2.3) [32].



Resim 2.2. Yuvarlak aynalardan oluşan sistem [33].



Resim 2.3. Kare aynalardan oluşan sistem [34].

2.7. Stirling Motorlarında Kullanılan Çalışma Maddeleri

Stirling motorları farklı çalışma maddeleri ile çalışabilme özelliğine sahiptirler. Bu çalışma maddeleri ısı transferi ve sürtünme kayıpları bakımından çok önemlidir [2]. Stirling motorlarında kullanılan çalışma maddelerinden hava, helyum ve hidrojen en çok üzerinde durulanlardır. Bu çalışma maddelerinden hava serbest olarak bulunması, helyum ve hidrojen ise termodinamik karakteristikleri dolayısıyla önemlidir. Helyum ve hidrojenin ısı transfer hızı yüksektir. Motorun performansı açısından hidrojen helyuma göre daha iyi ve çok daha ucuz olmasına rağmen, hava veya oksijen bulunduğu çok çabuk yanar. Bu nedenle hermetik motorlarda kullanılması önerilmektedir [2].

Çalışma maddesi olarak hava kullanılan motorlarda, hidrojen ve helyum kullanılan motorlara göre yüksek ısı ve kütle transfer hızlarına ulaşamaz. Bu makineler yapı olarak çok ağır motorlardır ve düşük özgül çıkış gücü ile düşük termik verime sahiptirler. Ancak çalışma maddesinin atmosferden kolaylıkla sağlanması sızdırmazlık ve malzeme problemlerini ortadan kaldırmakta ve bu da maliyeti oldukça düşürmektedir. Çalışma maddesi olarak hava kullanılan Stirling motorlarının bu düşük performansı ile içten yanmalı motorlarla otomotiv veya diğer uygulama alanlarında rekabet etmesi beklenemez. Ancak düşük güçlü ve yüksek güvenilirliği olan bu motorlar fosil veya radyoizotop yakıtları kullanarak çok uzun süre çalıştırılabilmektedir. Bu motorlar denizcilik veya meteorolojide elektrik güç jeneratörü olarak ve telekomünikasyonda kullanıma çok uygundur. Bunlara duyulan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır [2].

Motorun tasarım aşamasında çalışma maddesinin seçimi büyük önem taşımaktadır. Eğer yüksek hızlı ve yüksek performanslı bir motor yapılacaksa hidrojen veya helyum kullanılmalıdır. Motor alçak devirli ve performans açısından tolerans verilebilecekse basitlik ve maliyet açısından çalışma maddesi olarak hava kullanılabilir. Stirling motorlarında kullanılan hava, helyum ve hidrojene ait bazı termodinamik özellikler Çizelge 2.1’de verilmiştir [4].

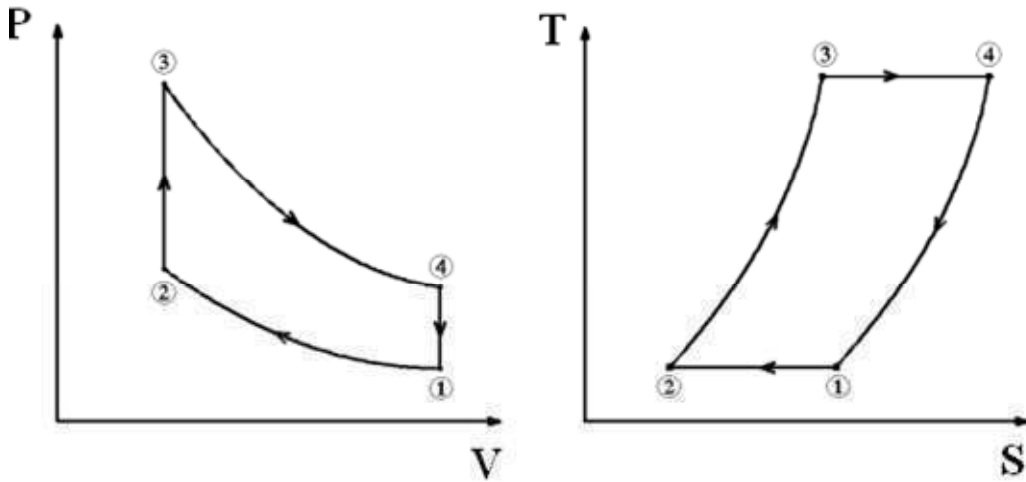
Çizelge 2.1. Hava, helyum ve hidrojene ait bazı termofiziksel özellikler [4].

Akışkan	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$C_p \text{ (kJ/kgK)}$	$C_v \text{ (kJ/kgK)}$	$\mu \cdot 10^7 \text{ (Pa s)}$	$\nu \cdot 10^6 \text{ (m}^2/\text{s)}$	$k \cdot 10^3 \text{ (W/mK)}$
Hava	1,1614	1,0035	0,7160	184,6	15,89	26,3
Helyum	0,1625	5,1926	3,1156	199	122	152
Hidrojen	0,08078	14,2091	10,0849	89,6	111	183

3. STİRLİNG MOTORLARININ TERMODİNAMİK ANALİZLERİ

3.1. Stirling Çevriminin Teorik Analizi

Teorik Stirling çevrimine ait P-V ve T-S diyagramları Şekil 3.1’de görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi çevrim, iki sabit sıcaklık ve iki sabit hacim işleminden oluşmaktadır. Çalışma maddesine ısı, özel bir ısı eşanjörü -ısıtıcı- tarafından verilir ve ısının dışarıya atılması ise diğer bir ısı eşanjöründen -soğutucu- olmaktadır. Motor için gerekli olan ısı, silindir dışındaki özel bir yanma odasından veya ısı kaynağından verilmekte ve burada kesintisiz bir ısıtma sürdürülmektedir.



Şekil 3.1. Stirling çevriminin P-V ve T-S diyagramı [2].

Stirling çevriminde ;

- 1-2 işlemi: Sabit sıcaklıkta sıkıştırma (Sistemden dış ortama ısı geçişi)
- 2-3 işlemi: Sabit hacimde harici bir kaynaktan (T_h) sisteme ısı verilmesi
- 3-4 işlemi: Sabit sıcaklıkta genişleme ve sisteme ısı verilmeye devam edilmesi.
(Çalışma maddesi pistonu iş yaptırır)
- 4-1 işlemi: Sabit hacimde dış ortama ısı geçişi

Sisteme sabit hacim durum değişimi (2-3) boyunca verilen ısı;

$$q_{2-3} = C_v(T_h - T_c) \quad (3.1)$$

Sisteme sabit sıcaklık durum değişimi (3-4) boyunca verilen ısı;

$$q_{3-4} = RT_h \ln \left[\frac{V_4}{V_3} \right] \quad (3.2)$$

Çevrimde $V_4=V_1$ ve $V_3=V_2$ olduğundan;

$$q_{3-4} = RT_h \ln \left[\frac{V_1}{V_2} \right] \quad (3.3)$$

olur. Sistemden sabit hacim durum değişimi (4-1) boyunca çekilen ısı;

$$q_{4-1} = C_v(T_h - T_c) \quad (3.4)$$

Sistemden sabit sıcaklık durum değişimi (1-2) boyunca çekilen ısı;

$$q_{1-2} = RT_c \ln \left[\frac{V_1}{V_2} \right] \quad (3.5)$$

olarak yazılabilir. Bu eşitliklerden sisteme verilen toplam ısı;

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

Sistemden atılan toplam ısı;

$$q_{out} = q_{4-1} + q_{1-2} \quad (3.7)$$

olur. İşe çevrilen ısı miktarı ise;

$$q_{NET} = q_{in} - q_{out} \quad (3.8)$$

olduğundan,

$$q_{NET} = (T_h - T_c)R \ln \left[\frac{V_1}{V_2} \right] \quad (3.9)$$

olur. Çevrimin termik verimi ise;

$$\eta_t = \frac{q_{NET}}{q_{in}} = \frac{(T_h - T_c)R \ln \left[\frac{V_1}{V_2} \right]}{C_V(T_h - T_c) + RT_h \ln \left[\frac{V_1}{V_2} \right]} \quad (3.10)$$

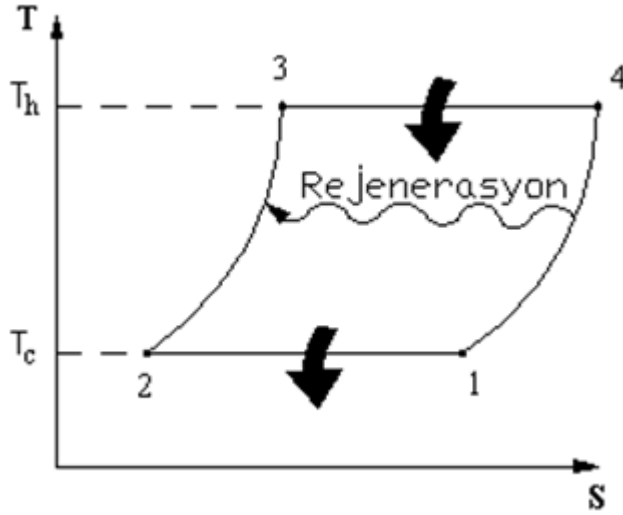
olacaktır [2, 10, 11].

3.2. Rejeneratörlü Stirling Çevriminin Analizi

Rejeneratör, çalışma maddesinin sıcak bölgeden soğuk bölgeye hareketi esnasında soğutucuya transfer edilen ısıyı depolar ve soğuk bölgeden sıcak bölgeye geçişi esnasında depoladığı ısıyı çalışma maddesine geri verir. Rejeneratör bu özelliğiyle hem soğutucu ölü hacminin azalmasını sağlar, hem de soğutucu yoluyla atılan ısıyı sisteme geri kazandırdığı için ısı tasarrufu sağlar ve sistemin verimini yükseltir.

Basit Stirling çevrimine bir rejeneratör eklenmesi durumunda; 4-1 sabit hacim işlemi boyunca dışarıya atılan ısıнын tamamı, rejeneratör denilen ısı enerji deposuna verilir, daha sonra 2-3 sabit hacim işlemi boyunca bu enerji aynen sisteme iade edilir.

Rejeneratörlü Stirling çevriminin T-S diyagramı Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, sisteme ısı verme 3-4 sabit sıcaklık işlemi, sistemden ısı alınması da sadece 1-2 sabit sıcaklık işlemi boyunca olmaktadır.



Şekil 3.2. Rejeneratörlü Stirling çevriminin T-S diyagramı [2, 10, 11].

Bu durumda sisteme verilen ısı;

$$q_{in} = RT_h \ln \left[\frac{V_4}{V_3} \right] = RT_h \left[\frac{V_1}{V_2} \right] \quad (3.11)$$

Sistemden atılan ısı

$$q_{out} = RT_c \left[\frac{V_1}{V_2} \right] \quad (3.12)$$

İşe dönüşen net ısı;

$$q_{NET} = (T_h - T_c) R \ln \left[\frac{V_1}{V_2} \right] \quad (3.13)$$

olur.

Rejeneratörlü Stirling çevriminin termik verimi ise;

$$\eta_t = \frac{q_{NET}}{q_{in}} = \frac{(T_h - T_c) R \ln \left[\frac{V_1}{V_2} \right]}{RT_h \ln \left[\frac{V_1}{V_2} \right]} \quad (3.14)$$

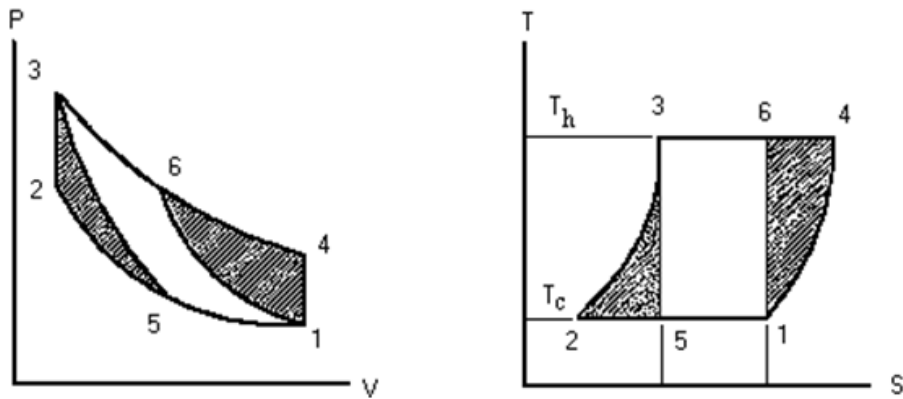
olacaktır. Gerekli sadeleştirmeler yapıldığında;

$$\eta_t = \frac{(T_h - T_c)}{T_h} = 1 - \frac{T_c}{T_h} \quad (3.15)$$

olacaktır [10, 11].

Stirling çevriminde iki sabit hacim işleminin yerini Carnot çevriminde iki izoentropik işlem almaktadır. Sisteme ısı T_h sıcaklığında verilir ve sistemden T_c sıcaklığında atılırsa rejeneratörlü Stirling ve Carnot çevrimlerinin verimleri aynı olur.

P_{max} ve P_{min} 'leri aynı olacak şekilde Stirling ve Carnot çevrimlerinin P-V ve T-S diyagramlarını üst üste yerleştirilirse, Stirling çevrimine ait iş alanının daha büyük olduğu görülür (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Stirling ve Carnot Çevrimlerinin P-V ve T-S diyagramları [2].

Şekil 3.3’de görüldüğü gibi 5-2-3 ve 1-6-4 alanları Carnot çevrimindeki izoentropik işlemleri yerine konulan, sabit hacimde yer değiştirme işlemleri ile P-V ve T-S diyagramlarında Stirling çevrimine ilave alanlar sağlanmaktadır.

Her iki çevrimde de sisteme sürülen ısınn işe dönüşen ısıya oranı aynıdır. Sisteme ısı verilmesi ve sistemden ısı atılmasının sabit sıcaklıkta olduğu kabul edilir ve termodinamiğin ikinci kanununa göre termik verimin maksimum olması gerekir.

Böylece Stirling çevriminin verimi Carnot çevriminde olduğu gibi $\eta_t = \frac{T_h - T_c}{T_h}$ olur.

3.3. Termodinamik Analiz Yöntemleri

Pratik Stirling çevrimi iki sabit sıcaklık ve iki sabit hacim 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 [4].

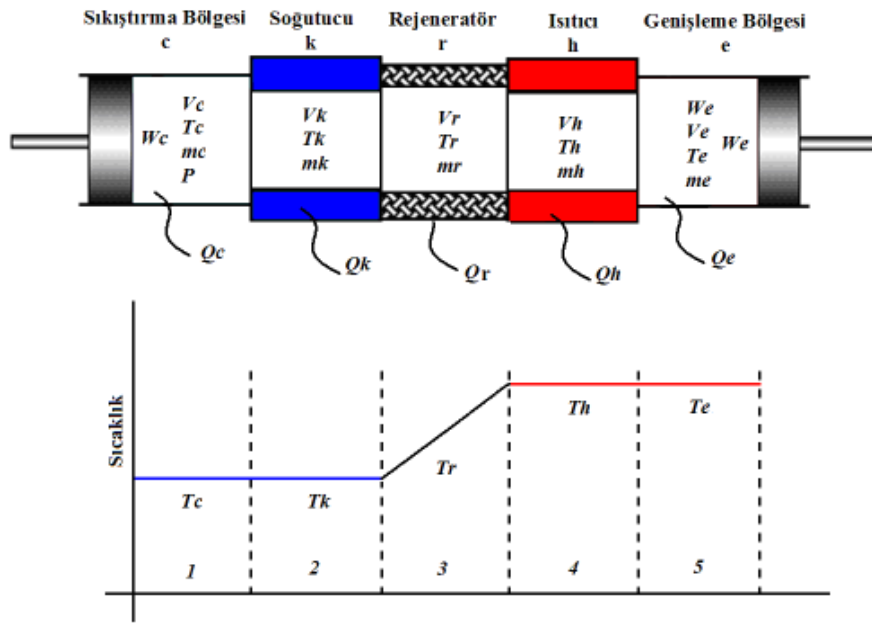
3.3.1. İzotermal analiz

Sıcak hacim, soğuk hacim ve rejeneratörde bulunan gaz kütlelerinin sıcaklıkları bu kısımların cidar sıcaklıklarına eşit kabul edildiği için bu analize izotermal analiz denmektedir [3].

İzotermal analiz, 1871 yılında Gustav Schmidt tarafından geliştirilmiştir. Schmidt tarafından yapılan bu analizde bütün ısı kayıpları ihmal edilmiş, sıkıştırma ve genişleme işlemlerinin sabit sıcaklıkta olduğu kabul edilmiştir. Bu analiz yapılan kabuller nedeniyle sistem performansını tam olarak ifade etmekten çok matematiksel çözüm kolaylığı ile dikkati çekmektedir [2, 3, 35].

Bu analiz metodu 1978 yılında Martini tarafından geliştirilerek bilgisayar simülasyonu ile beş hacimli nodal izotermal bir model üzerinde ortaya konmuştur.

Şekil 3.4’de izotermal nodal analizde kullanılan nodal hacimler ve hesaplanan termodinamik büyüklükler görülmektedir. Bu analizde nodal hacimlerde bulunan çalışma maddesinin sıcaklığının nodal hacmin cidar sıcaklığına eşit ve sabit kabul edilmiştir. Rejeneratörde sıcaklığın lineer olarak değiştiği varsayılarak ortalaması alınmak sureti ile rejeneratördeki gazın sıcaklığı belirlenmiştir [3, 35].



Şekil 3.4. Stirling motorunun beş hacimli model üzerinde izotermal analizi [35].

Martini tarafından yapılan izotermal analizde aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

1. Sıkıştırma ve genişleme bölgesinde hacim değişimi esnasında çalışma maddesinin sıcaklığı üniformdur.
2. Akışkanın rejeneratörden geçişi üniformdur ve sıcaklık dağılımı zamanla değişmez. Sıkıştırma bölgesinde T_c ve genişleme bölgesinde T_e sıcaklıkları arasında değişim lineer kabul edilir.
3. Akış sürtünmesizdir, geçiş sırasında akışkanın ivmelenmesine yol açan basınç değişimi yoktur.
4. Akışkan kütlesi çevrim boyunca sabittir, kaçaklar yoktur.
5. Sıkıştırma ve genişleme hacimleri krank açısının fonksiyonu olarak tarif edilir.
6. Çalışma maddesi ideal gaz kabul edilmiştir [2].

İzotermal analizde basınç,

$$P = mR \left(\frac{V_1}{T_1} + \frac{V_2}{T_2} + \dots + \frac{V_n}{T_n} \right)^{-1} \quad (3.16)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Motorun çalışma hacmindeki çalışma maddesinin iç enerjisi,

$$U = C_V (P_1 V_1 + P_2 V_2 + \dots + P_n V_n) / R \quad (3.17)$$

ile hesaplanır [2, 3].

İzotermal analizde krank milinin belli bir pozisyonundan başlanılarak çevrim boyunca çevrimin her bir kademesi için hacim, basınç ve iç enerji hesaplanır. Hesaplanan hacim, basınç ve iç enerji kullanılarak motorun çevrimlik net işi, sıcak kaynaktan aldığı ısı, soğuk kaynağa verdiği ısı ve verimi hesaplanabilir.

Net işi hesaplamak için,

$$W = \sum_{i=1}^{i=k} P_i (V_i - V_{i-1}) \quad (3.18)$$

eşitliği kullanılabilir.

Sıcak kaynaktan alınan ve soğuk kaynağa verilen ısıyı hesaplamak için Termodinamiğin Birinci Kanunu,

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W = (U_i - U_{i-1}) + P_i (V_i - V_{i-1}) \quad (3.19)$$

kullanılır.

Bu eşitlik ile çevrimin kademelerindeki iç enerji değişimleri hesaplandığında ΔQ 'nın bazı kademelerde pozitif, bazı kademelerde de negatif değerler aldığı görülür. Pozitif olanlar ısının sıcak kaynaktan çalışma maddesine, negatif olanlar ısının çalışma maddesinden soğuk kaynağa aktığını gösterir. Pozitif işaretli olan ΔQ 'lar kendi aralarında toplanarak çevrim boyunca sıcak kaynaktan alınan ısı belirlenir. Yine negatif işaretli ΔQ 'lar kendi aralarında toplanarak çevrim boyunca soğuk kaynağa aktarılan ısı hesaplanır.

Çevrimin verimini hesaplamak için, hesaplanan net iş sıcak kaynaktan alınan ısı ile bölünür.

$$\eta = \frac{W}{Q_h} \quad (3.20)$$

3.3.2. Nodal analiz

Nodal analiz programlarında motorda enerji ve akışkan akışı motor çevrimi ve performansı ile eşzamanlı olarak modellenmiştir. Bu analizde motorun belirli hücre veya elemanları için kütle korunumu, momentum ve enerji denklemleri yeniden düzenlenerek diferansiyel biçimde yazılmıştır. Bu eşitliklerin genel analitik çözümleri çok karmaşık olduğu için, çözümleri basınç, sıcaklık ve akışkan kütlelerinin dağılımı için verilen şartlarda eşzamanlı olarak çok küçük zaman aralığında nümerik olarak yapılır.

Bütün nodal analiz programları temel olarak diğer genel yaklaşımlara benzemektedir. Motor tasarımı için mekanik düzenlemesi, silindir duvar kalınlığı ve malzemesi, ısı değiştirgeci boru çapı ve rejeneratör çapının kesin detayları belirlenmelidir.

Theodor Finkelstein tarafından hazırlanan analizde bütün sistem kendi içinde alt bölümlere ayrılmıştır. Burada, genişleme hacmi bir, ısıtıcı uç, rejeneratör beş, soğutucu uç ve genişleme hacminin bir bölümden oluştuğu kabul edilmiştir. Bu analizde temelde izotermal işlemler kabul edilmiş ve daha da ilerletilerek ideal

olmayan rejenerasyon ve aerodinamik akış kayıpları, kararsız hız, sıcaklık şartları ve kaçaklara izin verilmiştir. Hazırlanan analizde yalnızca 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.

Diğer bir nodal analiz programı Shock tarafından hazırlanmış, örnek model de serbest pistonlu Stirling motorlarına uygulanmıştır. Bu modelde motor yirmi yedi kısma ayrılmıştır. Model üzerinde genişleme hacmi bir bölüm, ısıtıcı altı, rejeneratör on bir, soğutucu ise altı bölüme ayrılmıştır. Yirmi yedinci bölüm çalışma boşluğunu, yirmi altı ve yirmi beşinci bölümler motorda piston ve yer değiştirme pistonunun hareketini sağlayan gaz yaylanmalarını oluşturan boşluklardır.

Tew ve arkadaşları NASA için yaptıkları araştırmada Stirling motorlarının nodal analizi konusunda ayrıntılı bir literatür araştırması yapmışlar ve altı kenar hareket mekanizmalı motorlara uygulamışlardır.

Ladas ve İbrahim Beta tipi bir Stirling motorunu üç bölgeye ayırmışlar ve her bir bölgeye açık sistem işlemi uygulayarak bir termodinamik analiz yapmışlardır.

Urielli ve arkadaşları da Stirling motorlarının nodal termodinamik analizi ile motor gücü ve verime etki eden faktörleri incelemişlerdir.

Karabulut tarafından nodal analize dayalı bir termodinamik simülasyon programı geliştirilmiştir [2, 4, 5].

Bu programda yapılan kabuller ve kullanılan eşitlikler şunlardır;

1. Termodinamik açıdan her hücre bir açık sistem olup periyodik şartlarda gaz giriş ve çıkışına tabi tutulmuştur.
2. Çalışma maddesinin yer değiştirmesi esnasında hidrodinamik sürtünmeden doğan basınç farkları ihmal edilmiştir.

3. Rejeneratörün katı kısmında sürekli lineer ve değişmeyen bir sıcaklık dağılımı var olup, analiz rejeneratörün katı kısmının ısı balansını içermektedir.
4. Çalışma maddesi hava olup ideal gaz kabul edilmiştir.
5. Sistemin içerisindeki toplam kütle zamanla değişmemektedir.
6. Isıtıcı ve sıcak silindirin cidarları sıcak kaynak sıcaklığında, soğutucu ve soğuk silindirin cidarları soğuk kaynak sıcaklığındadır.

Isıtıcı, soğutucu ve rejeneratördeki hacimler sabit, sıcak ve soğuk silindirlerdeki hacimler krank açısı ile değişmekte olup yaklaşık olarak;

$$V_C = V_D + \frac{1}{2} V_s [1 + \cos(\theta - \phi)] \quad (3.21)$$

$$V_E = V_D + \frac{1}{2} V_s [1 + \cos(\theta)] \quad (3.22)$$

eşitlikleri ile hesaplanabilir.

Basınç, sıcaklık ve yoğunluk olmak üzere üç bilinmeyen mevcut olup, bunların belirlenmesinde kullanılacak eşitlikler; ideal gazların hal denklemleri, kütleinin korunumu ve enerjinin korunumu prensipleri olup sıra ile;

$$p = \rho RT \quad (3.23)$$

$$m_t = m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n \quad (3.24)$$

$$dU = dQ - dW + dH_{giriş} - dH_{cıkis} \quad (3.25)$$

şeklinde verilmektedir. Basıncın her yerde aynı olduğu dikkate alınarak (3.23) ve (3.24) eşitliklerinin beraber değerlendirilmesi ile,

$$p = \frac{m_t R}{\frac{V_1}{T_1} + \frac{V_2}{T_2} + \frac{V_3}{T_3} + \dots + \frac{V_n}{T_n}} \quad (3.26)$$

eşitliği elde edilir. Denklem (3.25) ile verilen enerjinin korunumu prensibi;

$$h_i A_i (T_{wi} - T_i) dt - p dV_i + (dH_{giriş} - dH_{cikis}) = m_i C_v dT_i + C_v T_i dm_i \quad (3.27)$$

olarak düzenlenebilir. (3.27) numaralı eşitlikte $(dH_{giriş} - dH_{cikis})$ terimi elemanın sınırlarından giren ve çıkan enerjiyi temsil etmekte olup aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

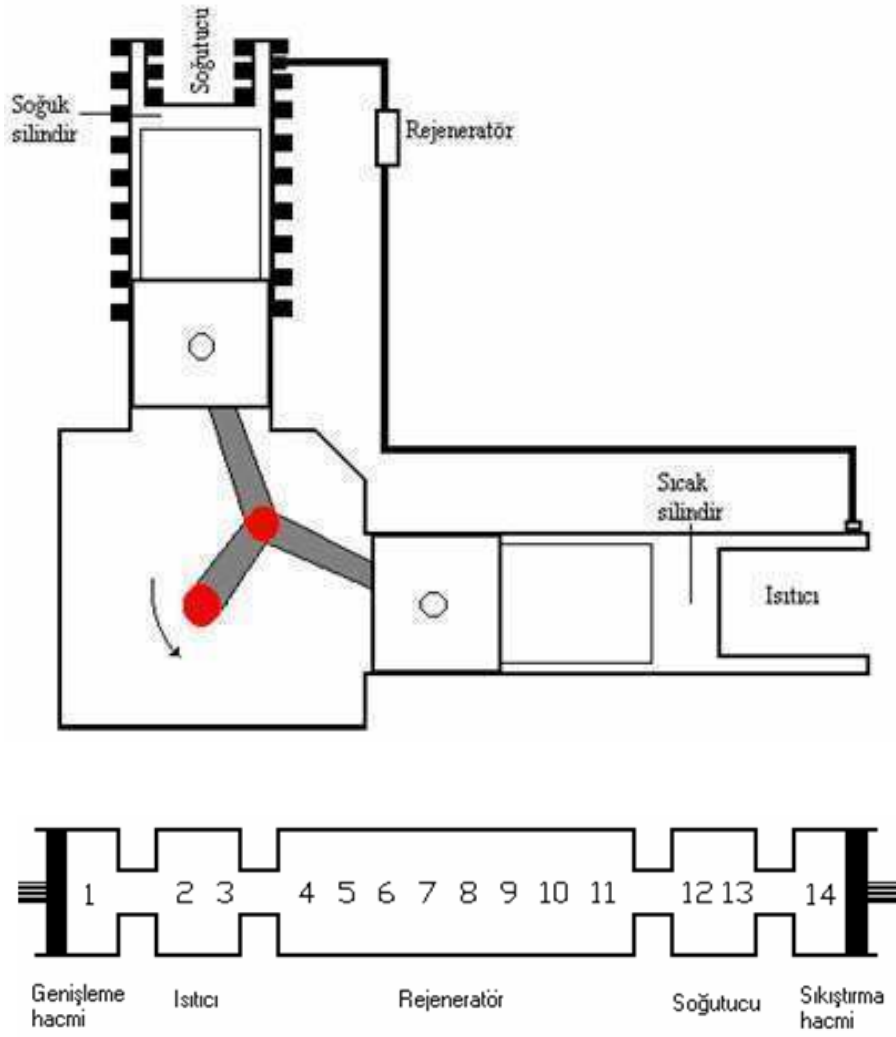
$$(dH_{giriş} - dH_{cikis})_i = C_p \left[(m_1^t + m_2^t + \dots + m_{i-1}^t) - (m_1^{t+\Delta t} + m_2^{t+\Delta t} + \dots + m_{i-1}^{t+\Delta t}) \right] \left[\frac{T_i}{T_{i-1}} \right] +$$

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

Son eşitlikteki birinci terim, elemana sol taraftan giren veya çıkan enerjiyi, ikinci terim ise sağ taraftan giren ve çıkan enerjiyi göstermektedir. Sütun matris içerisinde yazılan sıcaklıklardan üstte bulunanlar soldan sağa akışta, altta bulunanlar sağdan sola akışta kullanılacaktır. (3.27) numaralı eşitlik aşağıdaki gibi nümerik işlemlerde kullanılan hale dönüştürülür [2, 4, 5].

$$\Delta T_i = \frac{[h_i A_i (T_{wi} - T_i) \Delta t - (m_i^{t+\Delta t} - m_i^t) C_v T_i + (dH_{giriş} - dH_{cikis})_i - p \Delta V_i]}{C_v m_i} \quad (3.28)$$

Şekil 3.5’de Karabulut tarafından termodinamik incelemesi yapılan Stirling motoru ve nodal analiz için bölümlenmesi görülmektedir [2, 4, 5].



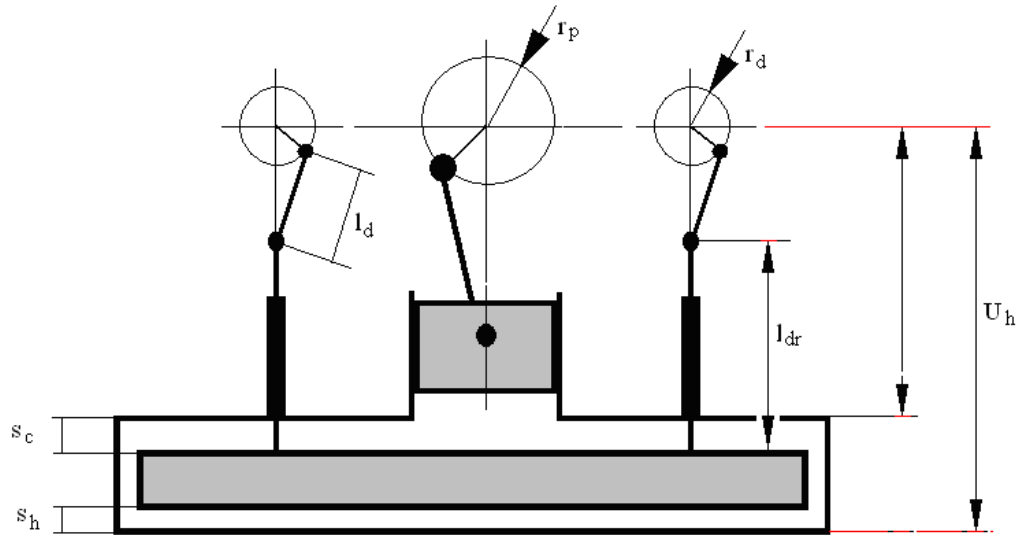
Şekil 3.5. Termodinamik incelemesi yapılan Stirling motoru [2, 4, 5].

4. MOTORUN TERMODİNAMİK ANALİZİ

İzotermal analiz metodu kullanılarak Stirling motorlarında, krank mili açısına bağlı olarak basınç, hacim ve kütle değişimlerini incelemek mümkündür. İmalatı yapılan gama tipi LTD Stirling motoru için hazırlanan Fortran bilgisayar programı ile her 1° 'lık krank mili dönüşüne karşılık bir çevrim boyunca bu değişimler hesaplanmış ve EK-3'de bu bilgisayar programı verilmiştir.

Hesaplamalarda imalatı yapılan motor için sıcak kaynak sıcaklığı 500 K, soğuk kaynak sıcaklığı 300 K olarak alınmıştır.

Analize güç pistonu ÜÖN' da iken başlanmış ve 1° krank mili açısı aralıklarla motorun sıcak ve soğuk hacmi ile genişleme hacmindeki değişim incelenmiştir. Başlangıçta krank mili eksenini orijin kabul edilerek, piston ve yer değiştirme pistonunun tepe noktaları analiz edilmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. LTD Stirling motorunun şematik görünümü

Şekil 4.1’ de görülen güç pistonu biyelinin silindir eksenine ile yaptığı açığı hesaplamak için;

$$r_p \sin \theta = l_p \sin \beta_p \quad (4.1)$$

$$\beta_p = \arcsin \left(\frac{r_p}{l_p} \sin \theta \right) \quad (4.2)$$

yazılabilir. Piston tepesinin krank merkezinde olan uzaklığı,

$$U_{pt} = r_p \cos \theta + l_p \cos \beta_p + h_p \quad (4.3)$$

olur. Buradan güç pistonu genişleme hacmi;

$$V_p = (U_{ps} - U_{pt}) \frac{\pi D_p^2}{4} \quad (4.4)$$

olarak yazılabilir.

Yer değiştirme pistonu biyelinin silindir eksenine ile yaptığı açığı hesaplamak için;

$$l_d \sin \beta_d = r_d \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \quad (4.5)$$

$$\beta_d = \arcsin \left[\frac{r_d}{l_d} \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \right] \quad (4.6)$$

olarak bulunur.

Yer değiştirme pistonu sıcak ucunun krank mili eksenine olan uzaklığı,

$$U_h = h_d + l_{dr} + l_d \cos \beta_d - r_d \cos \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \quad (4.7)$$

olur. Yer değiştirme pistonu soğuk ucunun krank mili eksenine olan uzaklığı ise;

$$U_c = l_{dr} + l_d \cos \beta_d - r_d \cos \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \quad (4.8)$$

olarak yazılabilir. Buradan ;

Yer değiştirme pistonunun üst kısmında bulunan sıcak hacim;

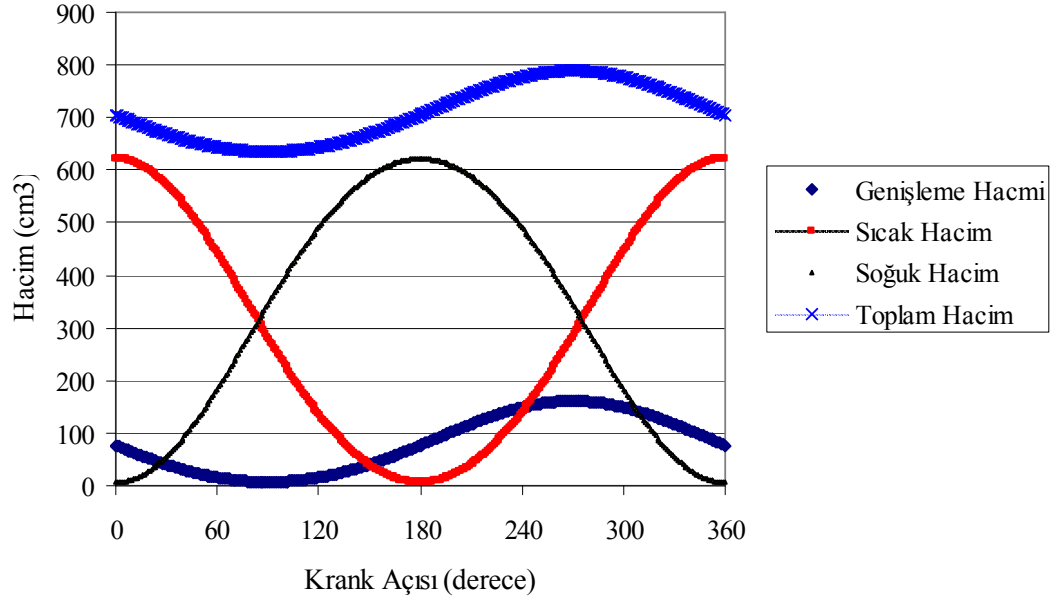
$$V_H = (U_{dt} - U_h) \frac{\pi D_d^2}{4} \quad (4.9)$$

Yer değiştirme pistonunun alt kısmında bulunan soğuk hacim ise;

$$V_C = (U_c - U_{db}) \frac{\pi D_d^2}{4} \quad (4.10)$$

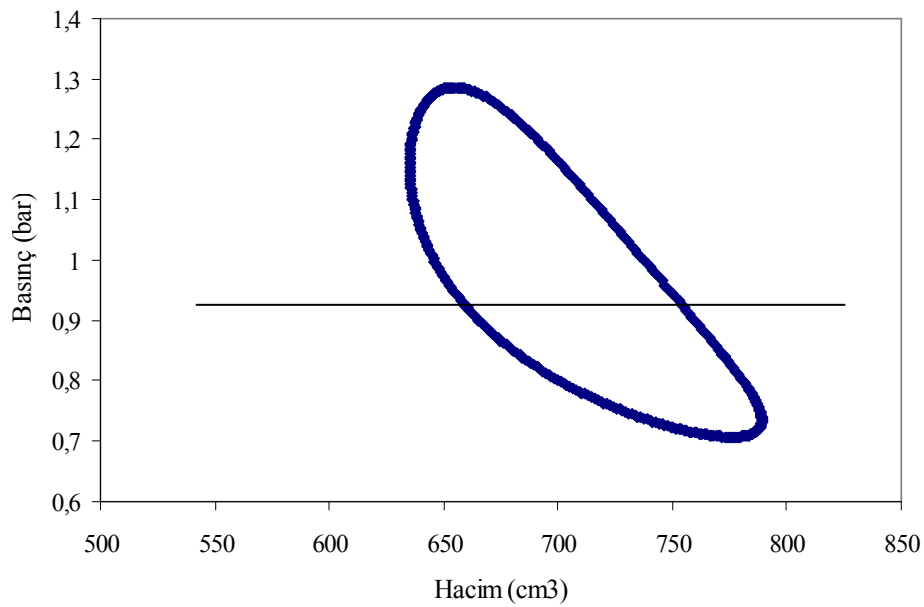
olarak hesaplanır.

şekil 4.2' de krank mili açısına bağlı olarak, motorun sıcak hacim, soğuk hacim, g pistonunun üzerinde bulunan genişleme hacmi ile toplam hacim değişimleri görülmektedir.



Şekil 4.2. Krank mili açısına bağlı olarak hacim değişimleri

Şekil 4.3' de izotermal analiz ile (3.16), (3.17) ve (3.18) numaralı eşitlikler kullanılarak elde edilen P-V diyagramı görülmektedir. Hesaplamalarda sıcak kaynak sıcaklığı 500 K, soğuk kaynak sıcaklığı 300 K, şarj basıncı 1 bar ve motor devri 500 d/d olarak alınmıştır. 1 bar şarj basıncında çalışma maddesi hava kullanılarak izotermal analiz ile 0,756 J net iş elde edilmiştir.



Şekil 4.3. İmalatı yapılan motorun P-V diyagramı

5. MATERYAL VE METOD

Motorun imalatı Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Otomotiv Anabilim Dalı atölyelerinde yapılmıştır. Motorun imalatında torna, freze, matkap gibi temel talaş kaldırma makinelerinin yanında silindirik taşlama ve burç honlama gibi özel makineler de kullanılmıştır.

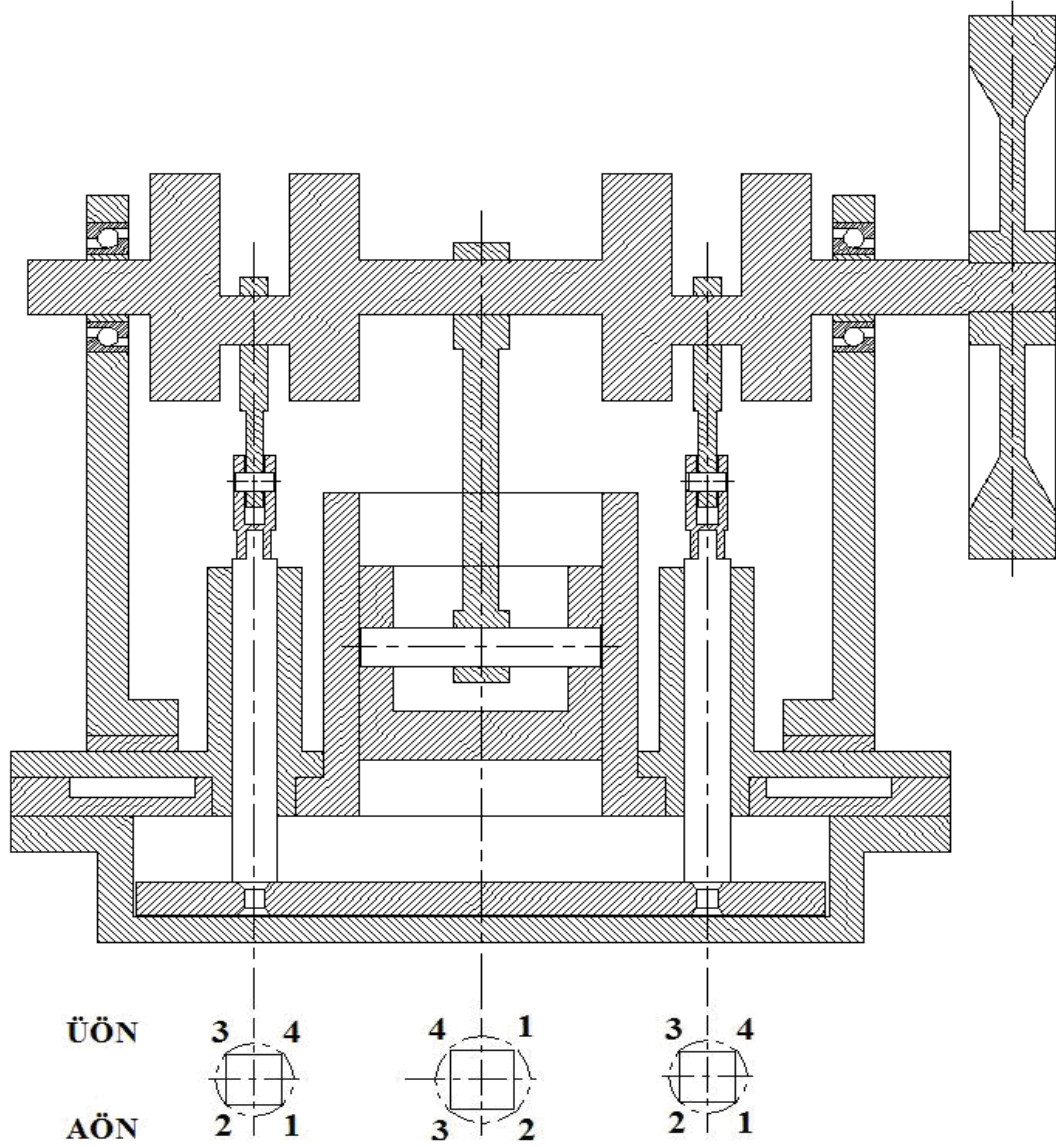
Öncelikle ısı kaynağı olarak LPG yakıtlı ısıtıcı kullanılması planlanmıştır. Daha sonraki aşamalarda odaklı güneş toplayıcısı kullanılması planlanmaktadır. Soğuk bölgenin soğutulması su ceketi içerisinde su dolaştırılarak yapılacaktır. Motor gama (γ) tipi olarak imal edilmiş, güç ve yer değiştirme pistonları birbirine paralel olarak yerleştirilmiştir. Yer değiştirme ve güç pistonları arasında 90° 'lik faz farkı mevcuttur. Motorun krank mili iki adet rulmanla yataklandırılmıştır. Motorda çalışma maddesi olarak hava kullanılacaktır. Motorun teknik özellikleri Çizelge 5.1' de verilmiştir.

Çizelge 5.1. İmalatı yapılan LTD Stirling motorunun teknik özellikleri

Motor tipi		Gama
Yer değiştirme pistonu	Çapı (mm)	198
	Kursu (mm)	20
	Süpürme hacmi (cm^3)	616
Güç pistonu	Çapı (mm)	70
	Kursu (mm)	40
	Süpürme hacmi (cm^3)	154
Çalışma maddesi		Hava
Faz açısı		90°
Sıkıştırma oranı		1,24
Isıtma sistemi		LPG yakıtlı
Maksimum motor gücü		3,06 W (215 d/d'da)
Maksimum moment		0,166 Nm (125 d/d'da)

5.1. Motorun Çalışma Prensibi

İmalatı yapılan gama tipi Stirling motorunun çalışma prensibi Şekil 5.1’de 360 derece krank mili açısı 4 eşit parçaya ayrılarak açıklanmıştır.



Şekil 5.1. İmalatı yapılan motorun çalışma prensibi

Şekil 5.1’de görüldüğü gibi 1-2 arası sabit sıcaklıkta dışarıya ısı verme işlemidir. Bu süreçte yer değiştirme pistonu AÖN civarında sabit kabul edilebilir. Güç pistonu ise ÜÖN’ dan AÖN’ ya doğru kurs boyuna yakın bir mesafede hareket ederek çalışma

maddesini sıcak bölge üzerinden yer değiştirme pistonunun üstünde bulunan soğuk bölgeye doğru aktarır. Bu süreçte çalışma maddesi bir taraftan sıkıştırılırken bir taraftan da ısı bırakmaktadır.

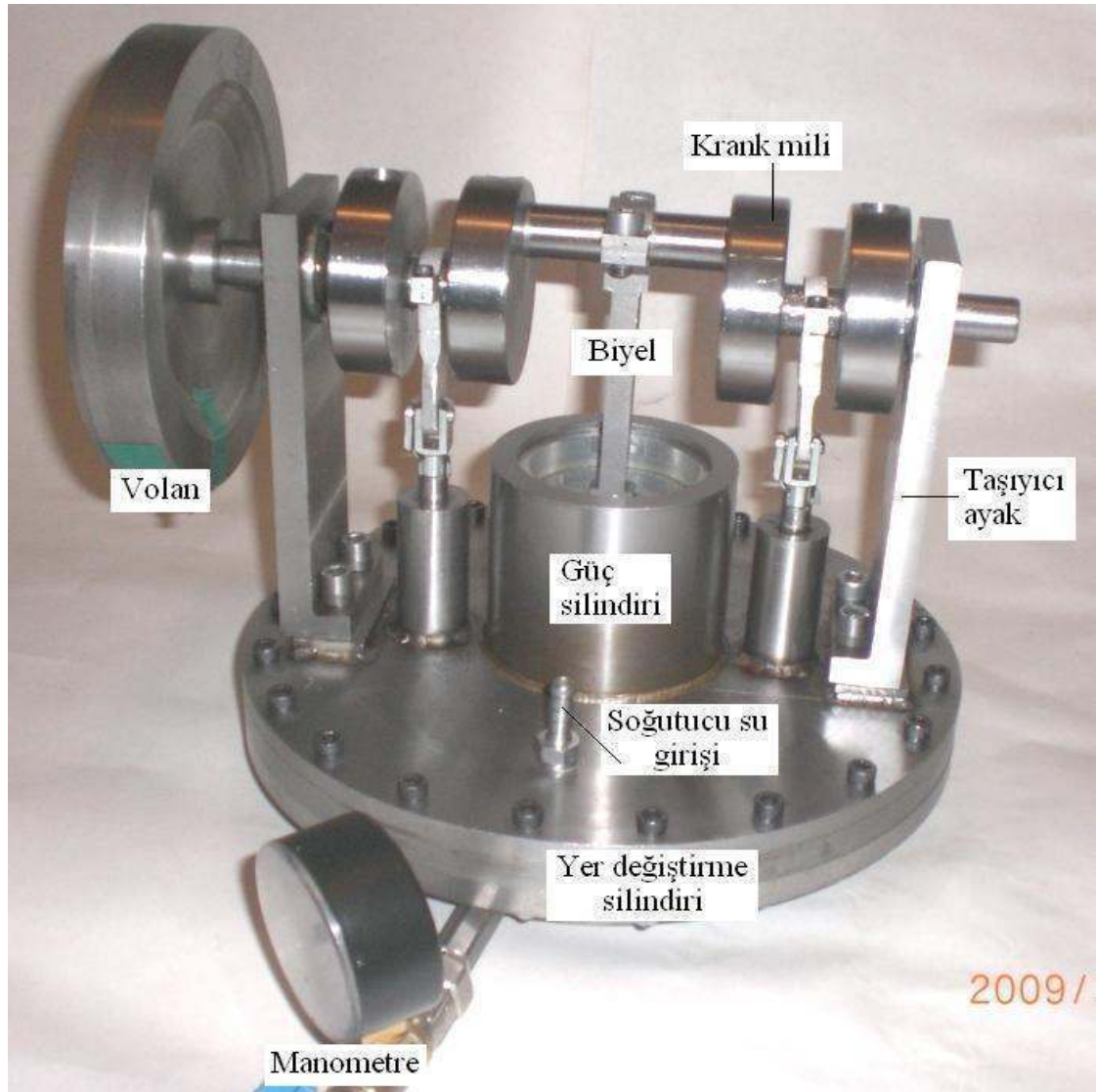
2-3 arası çalışma maddesine sabit hacimde ısı verme işlemidir. Başlangıçta çalışma maddesinin tamamı soğuk hacminde olup, soğutucu sıcaklığının biraz üzerinde bir sıcaklığa sahiptir. Bu süreçte güç pistonu AÖN civarında sabit kabul edilebilir. Yer değiştirme pistonu ise AÖN'dan ÜÖN'ya doğru kurs boyuna yakın bir mesafede hareket etmektedir. Yer değiştirme pistonunun yukarıya doğru hareketi soğuk hacimde bulunan çalışma maddesini sıcak hacme aktaracaktır. Yer değiştirme silindirinde soğuk hacim daralırken, sıcak hacim aynı miktarda genişlemektedir. Bu sebeple bu işlem esnasında çalışma maddesine sabit hacimde ısı verildiği kabul edilmektedir. Yer değiştirme pistonu ÜÖN'ya geldiğinde çalışma maddesinin tamamı sıcak hacimde toplanmış olup, basınç ve sıcaklık maksimuma ulaşmaktadır.

3-4 arasında sabit sıcaklıkta genişleme olmaktadır. Bu süreçte yer değiştirme pistonu ÜÖN civarında hemen hemen sabit iken, güç pistonu da ÜÖN'ya doğru kurs boyuna yakın bir mesafe kat ederek iş zamanını gerçekleştirirler. Bu işlem esnasında çalışma maddesi genişleyerek iş yapmaktadır.

4-1 arası sabit hacimde soğutma işlemidir. Yer değiştirme pistonu ÜÖN'dan AÖN'ya doğru kurs boyuna yakın bir mesafede hareket ederken, güç pistonu ÜÖN civarında sabit kabul edilebilir. Yer değiştirme pistonunun AÖN'ya hareketi sıcak hacimdeki çalışma maddesini yer değiştirme pistonu üzerindeki deliklerden ve çevresinden soğuk hacme süpürür. AÖN'ya gelindiğinde çalışma maddesinin çoğunluğu soğuk hacimde, geri kalanı da güç silindirinde bulunmaktadır. Bu durumda, soğuk hacimde bulunan çalışma maddesinin sıcaklığı soğutucu sıcaklığının biraz üzerinde, genişleme hacminde bulunan çalışma maddesinin sıcaklığı da sıcak kaynak sıcaklığının biraz aşağısındadır.

5.2. İmalatı Yapılan Gama Tipi Stirling Motorunun Parçaları

İmalatı yapılan gama (γ) tipi Stirling motoru resim 5.1’de görülmektedir. Motorun temel parçalarını oluşturan, krank mili, yer değiştirme silindiri ve pistonu, güç silindiri ve pistonu ile biyellere ait malzeme özellikleri ve şematik resimler aşağıda verilmiştir. Ayrıca motor parçalarının imalat resim çizimleri EK-2’ de verilmiştir.



Resim 5.1. İmalatı yapılan LTD Stirling motoru

5.2.1. Yer değiştirme ve g silindirleri

Resim 5.2’de görülen yer değiştirme silindiri ve sıcak hacmi oluşturan kısmı 1040 imalat çeliğinden tornada işlenerek yapılmıştır. Yer değiştirme silindirinin i çapı 200 mm olarak yapılmıştır. Sızdırmazlığı sağlamak için O-ring kullanılmıştır. İşleme tolerans değerleri EK-1’de imalat resminde görülmektedir.



Resim 5.2. Yer değiştirme silindiri

Resim 5.3’de g silindiri ve yer değiştirme silindirinin soğuk hacmini oluşturan kısım görülmektedir. G silindirinin olduğu kısım hassas olarak tornalanmıştır ve g pistonunun çalışacağı i yüzeyi honlanmıştır. G pistonu ile silindiri arasında 0,02 mm çalışma boşluğu verilmiştir. Yer değiştirme silindirinin soğuk hacmini oluşturan kapak ise imalat çeliğinden tornalanarak imal edilmiştir. G silindiri ile yer değiştirme silindiri soğuk hacmi kaynaklı olarak birleştirilmiştir.



Resim 5.3. Güç silindiri ve yer değıştirme silindirinin soğuk hacmi

5.2.2. Üst kapak

Üst kapak Ç1040 imalat çeliğinden yapılmıştır. Üst kapak ile yer değıştirme silindiri soğuk hacmi arasında kalan boşlukta soğutma suyu dolaştırılmaktadır. Ayrıca krank mili taşıyıcı ayakları bu parçanın üzerine kaynaklı olarak birleştirilmiştir. Resim 5.4’de üst kapak görülmektedir. Yer değıştirme silindiri soğuk ve sıcak hacimlerini oluşturan parçalar ve üst kapak civata ile birbirlerine birleştirilmiştir.



Resim 5.4. Üst kapak

5.2.3. Güç pistonu ve biyel kolu

Güç pistonu 7075 serisi alüminyum alaşımından imal edilmiştir. Dış yüzeyi hassas olarak tornalanmış ve güç silindiri ile arasında 0,02 mm çalışma boşluğu verilmiştir. Güç pistonu biyeli ise Ç1040 imalat çeliğinden imal edilmiştir. Krank mili kol muylusuna bağlamak için biyel iki parçalı olarak yapılmış, muylu ile sürtünme yüzeylerine bronzdan yapılmış parçalı yatak takılmıştır. Güç pistonu ve biyeli resim 5.5’de görülmektedir.



Resim 5.5. Güç pistonu ve biyel kolu

5.2.4. Yer değıştirme pistonu

İmalatı yapılan LTD Stirling motorunda alüminyum, kestamit, karbon fiber ve Suntalam MDF olmak üzere dört farklı malzemeden yapılan yer değıştirme pistonları kullanılmıştır. Yer değıştirme pistonu ile silindiri arasında 1 mm boşluk bırakılmıştır. İmalatı yapılan LTD Stirling motorunda yer değıştirme piston kursunun çok kısa olması sebebiyle çalışma maddesinin ısıtılma ve soğutulması için yer değıştirme pistonu çevresinden geçen çalışma maddesi miktarı yeterli olmamaktadır. Bu sebeple, çalışma maddesinin soğuk ve sıcak bölgeler arasında geçişini sağlamak amacıyla yer değıştirme pistonu üzerinde 3 mm çapında 60 adet delik açılmıştır. Resim 5.6’da imalatı yapılan yer değıştirme pistonları görülmektedir.



a) alüminyum



b) kestamit



c) karbon fiber



d) suntalam MDF

Resim 5.6. Yer değıştirme pistonları

5.2.5. Krank mili

Krank mili, 4140 ıslah çeliğinden tek parça halinde tornalanmış ve muylu yüzeyleri hassas olarak taşlanmıştır. Krank milinin dinamik balansı yatay balanslama cihazı üzerinde denge ağırlıkları üzerinden parça boşaltılarak yapılmıştır. Balans işlemine tabi tutulan krank mili muyluları taşlandıktan sonra polisaj işlemi yapılarak yüzey kalitesi iyileştirilmiştir. Krank mili, her iki ucundan sıkı geçme takılan rulmanlar aracılığı ile taşıyıcı ayaklara merkezlenmiştir. Krank mili resim 5.7’de görülmektedir.



Resim 5.7. Krank mili

5.2.6. Krank mili taşıyıcı ayakları

Krank mili taşıyıcı ayakları Ç1040 imalat çeliğinden imal edilmiştir. Krank mili, her iki ucundan sıkı geçme olarak geçirilen rulmanlar ile üst kapağın üstündeki taşıyıcı ayaklara yataklandırılmıştır. Krank mili taşıyıcı ayakları Resim 5.8’de görülmektedir. Taşıyıcı ayaklar üst kapağa 4 adet M8 civata ile bağlanmıştır.



Resim 5.8. Krank mili taşıyıcı ayakları

5.2.7. Motor volanı

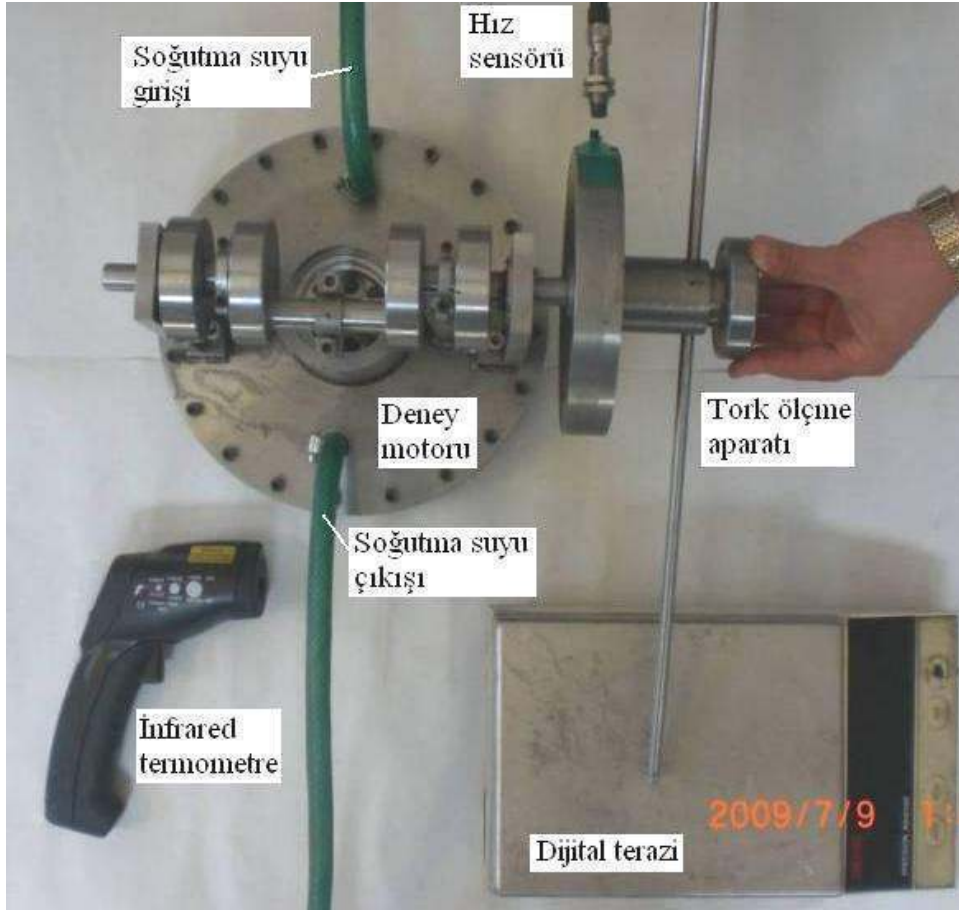
Motor volanı Ç1040 imalat çeliğinden imal edilmiştir. Volan ön yüzeyi dinamometre baskı parçası iç çapına uygun olarak tornalanmıştır. Volan krank miline H7-n6 toleransı ile sıkı geçme yapılarak, M4 civata ile sabitlenmiştir. Motor volanı resim 5.9’da görülmektedir.



Resim 5.9. Motor volanı

5.3. Deneyde Kullanılan Ölçü Aletleri

Deneyler Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Otomotiv Anabilim Dalı laboratuvarlarında yapılmıştır. Resim 5.10’da İmalatı yapılan Stirling motorunun deney düzeneği görülmektedir.



Resim 5.10. İmalatı yapılan Stirling motorunun deney düzeneği

İmalatı yapılan motorun, laboratuvar şartlarında ısı kaynağı olarak sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) yakıtlı bir ısıtıcı ile testler yapılmıştır. Motor devrinin ölçülmesinde, ESIT marka, manyetik puls ile çalışan elektronik bir takometre kullanılmıştır.

Motor momenti 0,003 Nm hassasiyetinde ölçüm yapabilen prony tip bir yükleme aparatı ile ölçülmüştür. Resim 5.11’de görülen prony tip moment ölçme aparatında, sürtünme yüzeyleri balatalı olarak yapılmış ve yükleme yapılan yerde oynak başlı rulman kullanılmıştır. Kuvvet kolu uzunluğu 31 cm’dir. Ölçüm sonucunda teraziye etki eden kuvvet ile kuvvet kolu uzunluğu çarpılarak motor momenti belirlenmiştir. Motorun döndürme kuvvetini ölçmek için 0,1 g hassasiyetinde ve 15 kg’a kadar ölçme yapabilen TARSAN B-15 marka elektronik bir terazi kullanılmıştır.



Resim 5.11. Prony tip dinamometre

Deneylerde motorun çeşitli noktalarındaki sıcaklıkları ölçmek için Resim 5.12’de görülen DT-8859 marka infrared bir termometre kullanılmıştır. Kullanılan termometre 2 °C hassasiyetinde -50 ile 1600 °C arasında ölçüm yapabilmektedir.



Resim 5.12. İnfrared termometre

6.DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

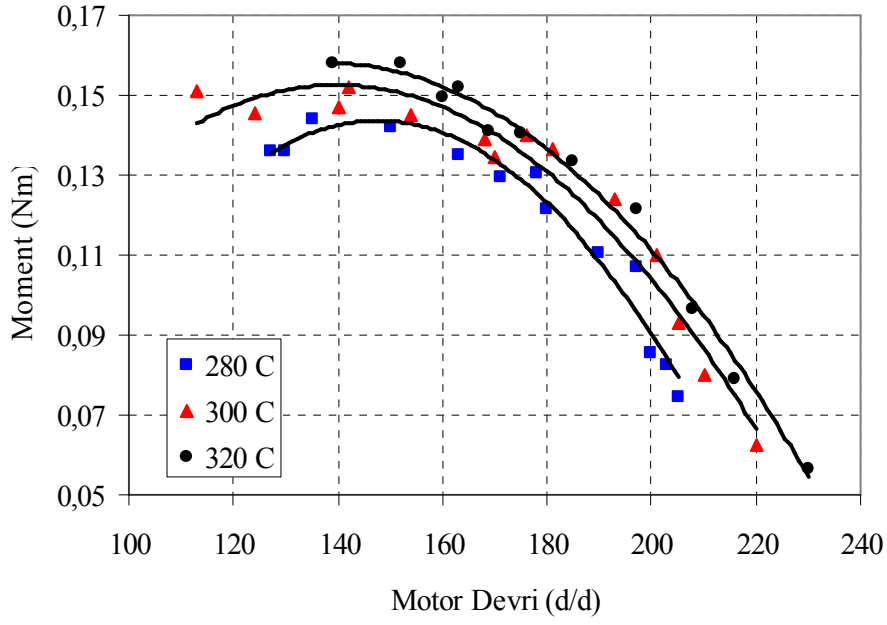
İmalatı yapılan LTD Stirling motoru, mekanik problemler giderildikten sonra LPG yakıtlı bir ısıtıcı kullanılarak laboratuvar koşullarında test edilmiştir. Motorda çalışma maddesi olarak hava kullanılmıştır. Deneyler atmosferik basınçta hava ile farklı ısıtıcı sıcaklıklarında yapılmıştır. Motorda alüminyum, kestamit, karbon fiber ve MDF olmak üzere 4 farklı malzemeden yapılan yer değiştirme pistonu kullanılmıştır. Kestamit ve karbon fiberden yapılan yer değiştirme pistonları motorun sıcak uç sıcaklığını 130°C'yi geçtiğinde şekil değişikliğine uğramıştır. Bu sebeple bu malzemelerden yapılan yer değiştirme pistonları testlerde kullanılmamıştır. Motor testleri alüminyum ve MDF malzemelerden yapılan yer değiştirme pistonları ile yapılmıştır.

Motorda farklı şarj basınçlarında deney yapabilmek ve helyum gibi farklı çalışma maddeleri kullanmak amacıyla yer değiştirme silindiri üzerine bir manometre takılmıştır. Ancak şarj basıncı uygulandığında gerek hava ve gerekse helyum ile motor herhangi bir tepki vermemiştir. Bu sebeple motor testleri atmosferik basınçta hava ile yapılmıştır.

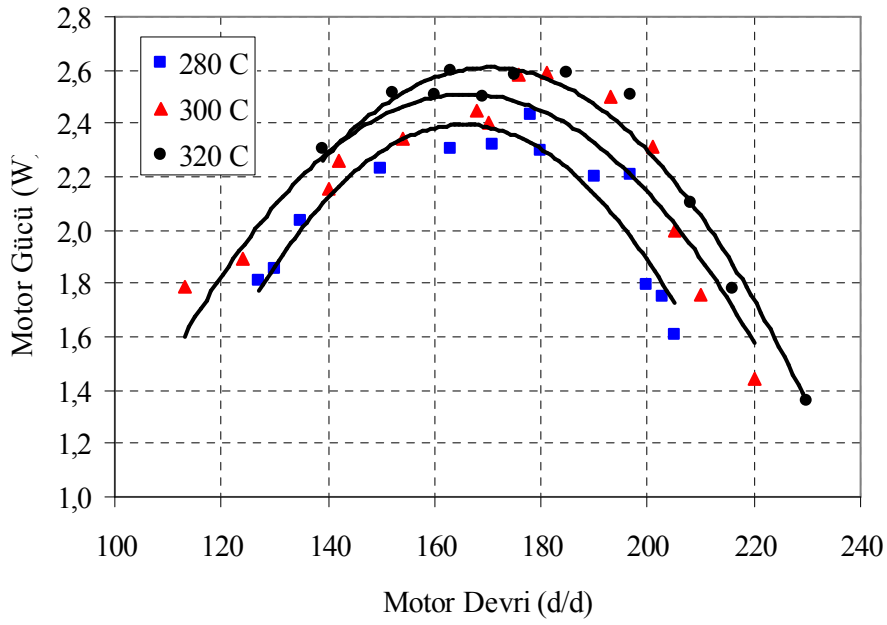
6.1. Alüminyum Yer Değiştirme Pistonu ile Elde Edilen Deney Sonuçları

İmalatı yapılan motorun ilk testleri alüminyum yer değiştirme pistonu ile yapılmıştır. Alüminyum yer değiştirme pistonu ile yapılan deneylerde motor 235 °C sıcak uç sıcaklığında çalışmaya başlamıştır. Bu esnada soğutma suyu çıkış sıcaklığı 27 °C olarak ölçülmüş ve bu sıcaklıkta sabit kalması sağlanmıştır.

Şekil 6.1. ve 6.2’de alüminyum yer değiştirme pistonu ile atmosferik basınçta hava ile motor devrine bağlı olarak moment ve çıkış gücü değişimleri görülmektedir. Deneyler LPG yakıtlı bir ısıtıcı kullanılarak 280 °C, 300 °C ve 320 °C sıcak uç sıcaklıklarında yapılmıştır. Maksimum motor momenti 320 °C sıcak uç sıcaklığında ve 152 d/d da 0,16 Nm olarak ölçülmüştür. Maksimum motor gücü ise, 320 °C sıcak uç sıcaklığında ve 185 d/d da 2,59 W olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.1. Motor devrine bağlı olarak moment değişimi (Alüminyum yer değiştirme pistonu ile)



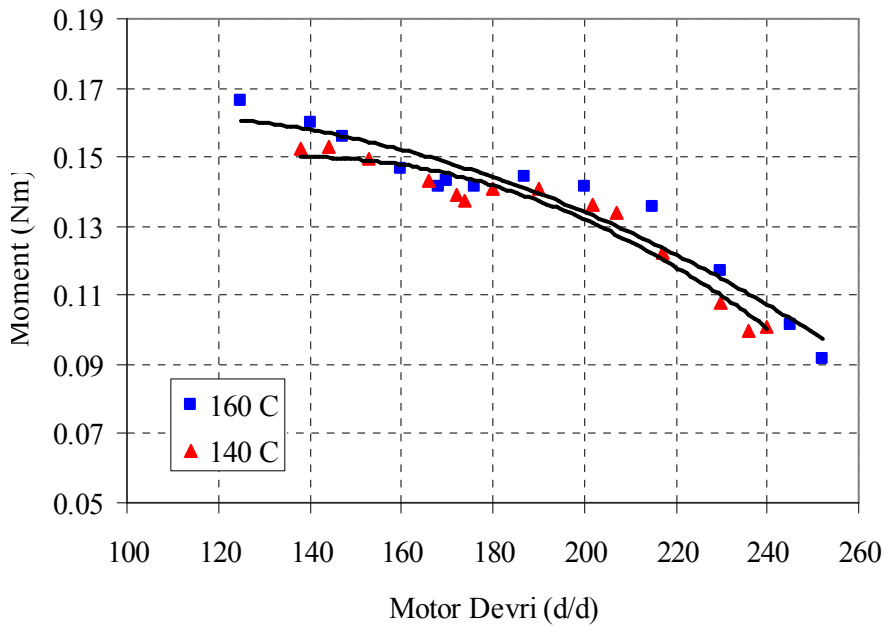
Şekil 6.2. Motor devrine bağlı olarak güç değişimi (Alüminyum yer değiştirme pistonu ile)

6.2. MDF Yer Değiştirme Pistonu ile Elde Edilen Deney Sonuçları

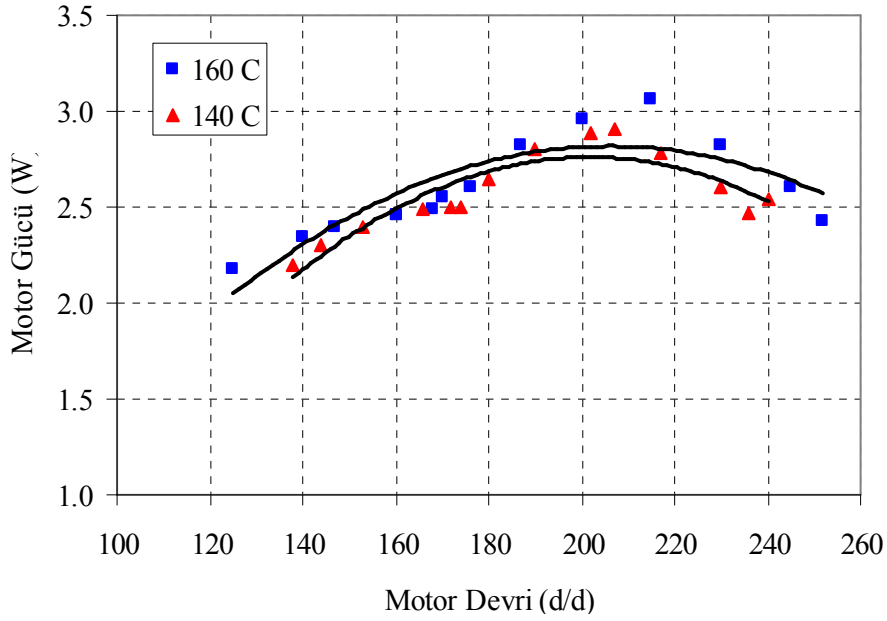
Motorun diğer özellikleri aynı kalmak şartı ile MDF'den imal edilen yer değiştirme pistonu motora takılmış ve farklı sıcak uç sıcaklıklarında test edilmiştir. MDF'den yapılan yer değiştirme pistonu ile yapılan deneylerde motor 115 °C sıcak uç sıcaklığında çalışmaya başlamıştır. Bu esnada soğutma suyu çıkış sıcaklığı 27 °C olarak ölçülmüş ve bu sıcaklıkta sabit kalması sağlanmıştır.

Şekil 6.3. ve 6.4'de MDF yer değiştirme pistonu ile atmosferik basınçta, 140 °C ve 160 °C sıcak uç sıcaklıklarında motor devrine bağlı olarak moment ve çıkış gücü değişimleri görülmektedir. Maksimum motor momenti 160 °C sıcak uç sıcaklığında ve 125 d/d motor hızında 0,166 Nm olarak ölçülmüştür. Maksimum motor gücü ise, 160 °C sıcak uç sıcaklığında ve 215 d/d da 3,06 W olarak elde edilmiştir.

Alüminyum yer değiştirme pistonu ile karşılaştırıldığında motor moment ve güçteki artış, MDF'nin alüminyuma göre daha hafif olmasından ve alüminyumun ısı iletim katsayısının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.3. Motor devrine bağlı olarak moment değişimi (MDF yer değiştirme pistonu ile)



Şekil 6.4. Motor devrine bağlı olarak güç değişimi (MDF yer değiştirme pistonu ile)

Kongtragool and Wongwises [18] tarafından imal edilen 83 mm piston çapı ve 82,6 mm piston kursu ile 320 mm yer değiştirme pistonu çapı ve 79,5 mm kursuna sahip 6394 cm³ süpürme hacminde iki güç pistonlu gama tipi bir LTD Stirling motorundan 316 °C sıcak uç sıcaklığında 133 d/d motor hızında 11,8 W çıkış gücü elde edilmiştir. Bu çalışmada imalatı yapılan 770 cm³ süpürme hacmindeki LTD Stirling motorundan 160 °C sıcak uç sıcaklığında 215 d/d da 3,06 W olarak elde edilmiştir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada düşük sıcaklıklarda çalışabilen 770 cm³ süpürme hacmine sahip bir Stirling motoru tasarlanmış ve imal edilmiştir. Gama tipi olarak imal edilen motorda bir adet yer değiştirme pistonu ve bir adet güç pistonu bulunmaktadır. Yer değiştirme ve güç pistonları arasında 90° lik faz farkı mevcuttur. Motorda çalışma maddesi olarak atmosferik hava kullanılmıştır. İmalatı yapılan motorun, laboratuvar şartlarında ısı kaynağı olarak LPG (sıvılaştırılmış petrol gazı) yakıtlı bir ısıtıcı ile testleri yapılmıştır. Alüminyum ve MDF olarak iki farklı yer değiştirme pistonu ile yapılan deneylerde sıcak uç sıcaklığına bağlı olarak moment-hız ve güç-hız karakteristikleri incelenmiştir.

Alüminyum yer değiştirme pistonu ile yapılan testlerde motor 235 °C sıcak uç sıcaklığında çalışmaya başlamış ve maksimum motor momenti 320 °C sıcak uç sıcaklığında, 152 d/d motor hızında 0,16 Nm olarak ölçülmüştür. Maksimum motor gücü ise, 320 °C sıcak uç sıcaklığında ve 185 d/d da 2,59 W olarak elde edilmiştir.

Motorun diğer bütün özellikleri aynı kalmak şartıyla, MDF yer değiştirme pistonu ile yapılan testlerde ise motor 115 °C sıcak uç sıcaklığında çalışmaya başlamış ve maksimum motor momenti 160 °C sıcak uç sıcaklığında, 125 d/d motor hızında 0,166 Nm olarak ölçülmüştür. Maksimum motor gücü ise, 160 °C sıcak uç sıcaklığında ve 215 d/d da 3,06 W olarak elde edilmiştir.

Deneylerde atmosferik basınçta hava kullanılmıştır. Motorda hem hava hem de helyum gazı ile şarj basıncı uygulandığında motor herhangi bir tepki vermemiş ilk harekete geçmemiştir.

Her iki yer değiştirme pistonu ile yapılan deneylerde, motor devri, moment ve motor gücü sıcak uç sıcaklığına bağlı olarak artmaktadır. Bunun sebebi sıcak uç sıcaklığındaki artış ile çevrim başına çalışma maddesine transfer edilen ısı miktarının artmasından ve artan ısıtıcı sıcaklığına bağlı olarak çevrimin üst ve alt sıcaklıkları

arasındaki farkın artmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, motor gücü motor hızına bağlı olarak bir maksimuma kadar artmakta ve bu noktadan sonra azalmaktadır. Güçteki bu azalma artan motor hızı ile çalışma maddesine olan ısı transferinin azalmasından kaynaklanmaktadır.

Motorun ısı transferi yüzey alanının arttırılması, ısı iletim katsayısı düşük ve hafif yer değiştirme pistonu ve helyum gibi ısı kapasitesi yüksek çalışma maddeleri kullanılarak motor performansı iyileştirilebilir. Bu motorların geliştirilmesi ülkemizdeki güneş enerjisi ve jeotermal sıcak su kaynaklarının değerlendirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR

1. TC. Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı, “Türkiye 1. Enerji Şurası Alt Komisyon Raporları”, **Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı**, Ankara, 20-38, (1998).
2. Çınar, C., “Gama Tipi Bir Stirling Motorunun Tasarımı, İmalı ve Performans Analizi”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 4-55, (2001).
3. Karabulut, H., Yücesu, H.S., Çınar, C., Aksoy, F., “Doğal Gazla Çalışan Bir Stirling Motorunun Tasarımı, İmalatı ve Testleri”, **Tübitak Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı** Proje No:105M256, Ankara, 1- 75 (2008).
4. Üstün, S., “Çift Yer Değiştirme Pistonlu V Tipi Küçük Güçlü Bir Stirling Motorunun Tasarım ve İmalı”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1-37, (2000).
5. Yücesu, H. S., “Küçük Güçlü Güneş Enerjili Bir Stirling Motoru Tasarımı”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 3-28 (1996).
6. Kolin, I., Kolin, S. K., Golub, M., “Geothermal Electricity Production by Means of the Low Temperature Difference Stirling Engine”, **Proceedings World Geothermal Congress** ., Japan, May 28-June 10, 3199-3203, (2000).
7. Finkelstein, T., Allan, J. O., “Air Engines” , **The American Society of Mechanical Engineers**, New York, 1- 19 (2004).
8. İnternet : Stirling Motorları, http://www.globalcooling.com/pdfs/general_history.pdf., (2009).
9. İnternet : Stirling Motorları, http://www.pacificsun.ca/~robert/travel2005/Munich/deutsches_museum.htm., (2009).
10. Özgören, Y. Ö., “Stirling Motorlarında Isı Kayıplarının Azaltılması İçin Termal Bariyer Kullanımı”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 5-45 (2004).
11. Demiralp, M., “Gama Tipi Bir Stirling Motorunun Tasarımı ve İmalatı”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 3-25 (2000).
12. Koca, A., “V Tipi Bir Stirling Motorunun Tasarım ve İmalı”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1-50 (1997).
13. Senft, J. R., “An Introduction to Low Temperature Differential Stirling Engines”, **Moriya Press**, New York, 1- 37 (2004).

14. Tekin, Y., “Stirling Çevrimi ile Çalışan V Tipi Soğutucunun Termodinamik Analizi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 6-23, Ankara, (2006).
15. Kongtragool, B., Wongwises, S., “Performance of a Twin Power Piston Low Temperature Differential Stirling Engine Powered by a Solar Simulator” *Solar Energy*, 81, 884-895 (2006).
16. Toda F., Iwamoto I., Takeuchi M., “Development of 300 W class low temperature difference Stirling engine”, *7th International Conference on Stirling Cycle Machines*, Waseda University Tokyo, 437-443 (1995).
17. Iwamoto I., Toda F., Hirata K., Takeuchi M., Yamamoto T., “Comparison of Low-and High Temperature Differential Stirling Engines”, In: *Proceedings of the 8th International Stirling Engine Conference*, 29–38 (1997).
18. Kongtragool, B., Wongwises, S., “A Four Power-Piston Low-Temperature Differential Stirling Engine Powered Using Simulated Solar Energy as a Heat Source” *Solar Energy* ., 82, 493-500 (2008).
19. Kongtragool, B., Wongwises, S., “Investigation on Power Output of the Gamma Configuration LTD Stirling Engines” *Renewable Energy*, 30, 465–476., (2005).
20. Kongtragool, B., Wongwises, S., “Optimum Absorber Temperature of a Once Reflecting Full Conical Concentrator of a LTD Stirling Engine” *Renewable Energy*, 30, 1671–1687., (2005).
21. Kongtragool, B., Wongwises, S., “Performance of Low-Temperature Differential Stirling Engines” *Renewable Energy*, 32, 547–566., (2007).
22. İnternet : Stirling Motorları, http://global.msi.com.tw/index.php?func=newsdesc&news_no=591., (2009).
23. Çınar, C., Koca, A., ve Karabulut, H., “Farklı Çalışma Gazlarının Stirling Motorunun Performansına Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20(2): (2005).
24. Thombare, D.G., Verma, S.K., “Technological Development in The Stirling Cycle Engines”, *Renewable and Sustainable energyReviews* ., (2006).
25. İnternet : Stirling Motorları, <http://www-ifkm.mach.uni-karlsruhe.de/Html-e/Project/Stirling/stirling.html>., (2009).
26. Demir, B., “Küçük Güçlü Güneş Enerjili Bir Stirling Motoru Tasarımı ve İmalı” Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 9-40, (2003).

27. İnternet : Stirling Motorları, <http://home.hccnet.nl/hvisser.5/stirling%205.html>., (2009).
28. İnternet : Stirling Motorları, <http://home.hccnet.nl/hvisser.5/stirling%205.html>., (2009).
29. İnternet : Stirling Motorları, <http://www.cnccookbook.com/img/StirlingEngines/BetaStirlingTG4webMed.jpg>., (2009).
30. Çınar, C., Topgöl, T., ve Yücesu, H. S., “Stirling Çevrimi ile Çalışan Beta Tipi Bir Motorun İmali ve Performans Testleri”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi* 20 (2) : (2007).
31. İnternet : http://knowledgepublications.com/alcohol/images/Rural_Development_Swashplate_Stirling_Engine_1.gif., (2009).
32. Pırasacı, T., “Güneş Enerjisi ile Çalışan, Stirling Motorlu Elektrik Enerjisi Üretim Sistemi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-45, (2002).
33. İnternet : Stirling Motorları, http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8c/SAICSTM_Dish_Stirling_System_at_SRP_in_Phoenix_Arizona.JPG., (2009).
34. İnternet : Stirling Motorları, <http://www.stirlingengines.org.uk/sun/sola3.html>., (2009).
35. İnternet : Stirling Motorları “Ideal Isothermal Analysis”, <http://www.ent.ohiou.edu/~urieli/Stirling/isothermal/isothermal.html>., (2009).
36. İnternet : Stirling Motorları “Stirling Motorları Hakkında Genel Açıklayıcı Bilgiler” <http://stirlingengines.blogspot.com/> (2009).

EKLER

EK -1 Deney motorunun fotoğrafları



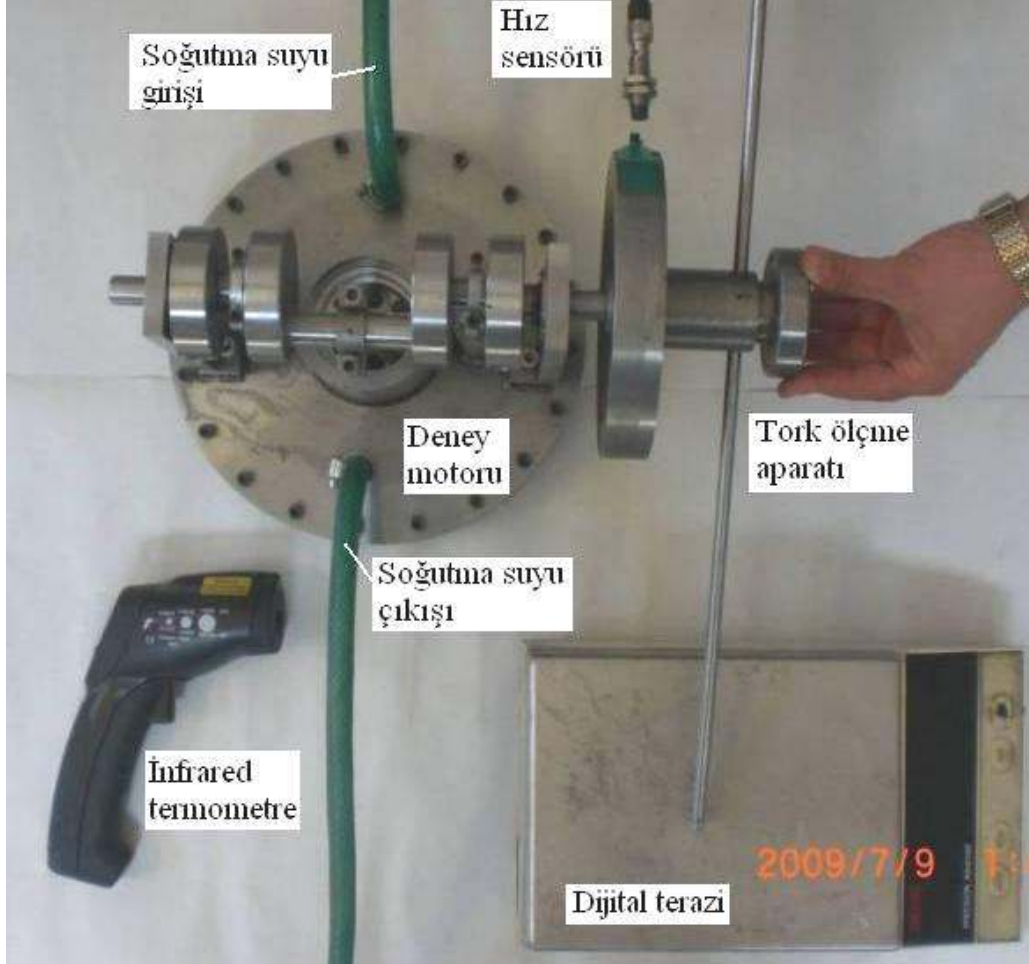
Resim1.1. İmalatı yapılan Stirling motorunun önden görünüşü

EK -1 (Devam) Deney motorunun fotoğrafları



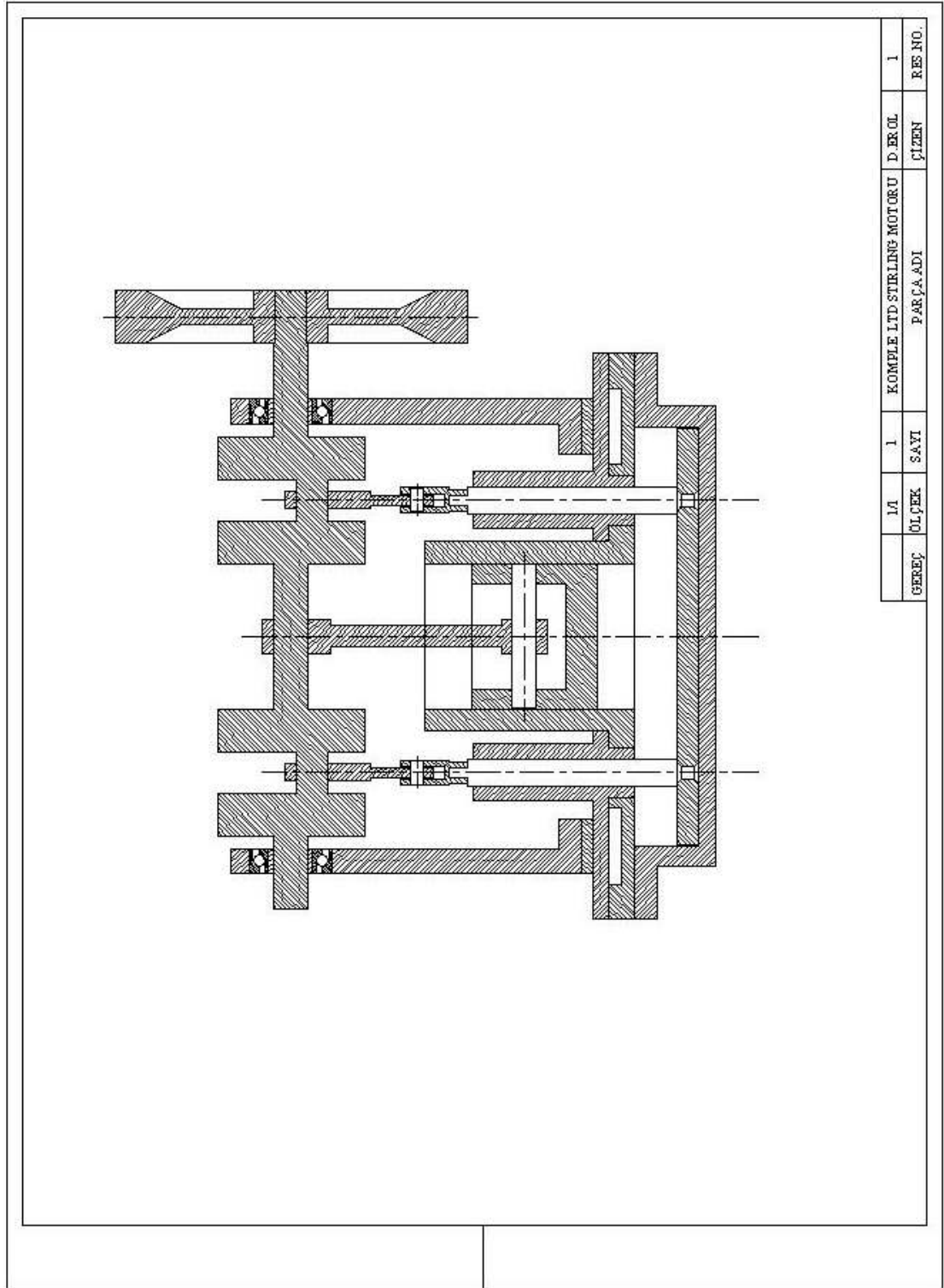
Resim 1.2. İmalatı yapılan Stirling motorunun üstten görünüşleri

EK -1 (Devam) Deney motorunun fotoğrafları



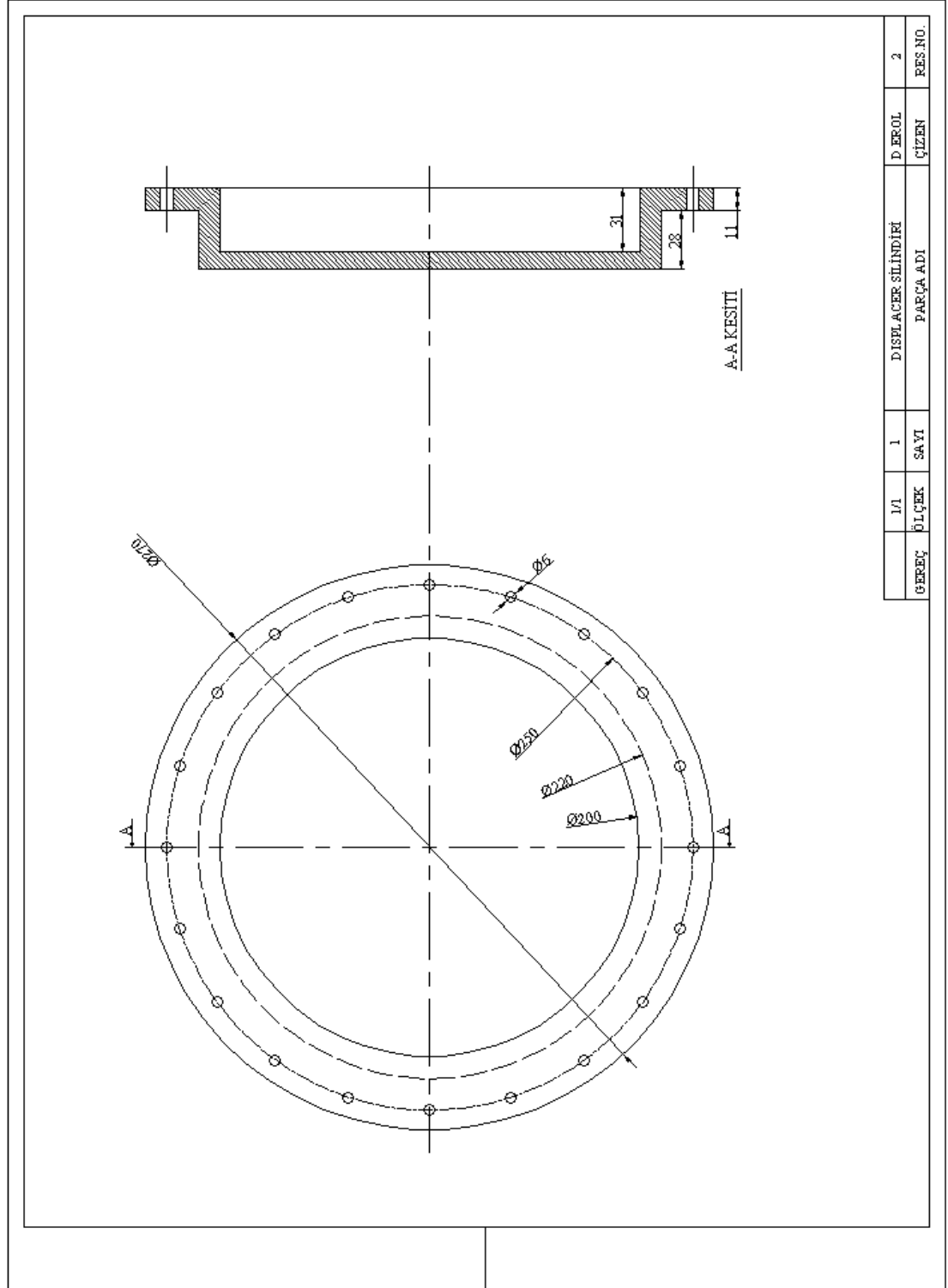
Resim 1.3. İmalatı yapılan Stirling motorunun deney düzeneği

EK -2 Deney motorunun montaj ve imalat resimleri



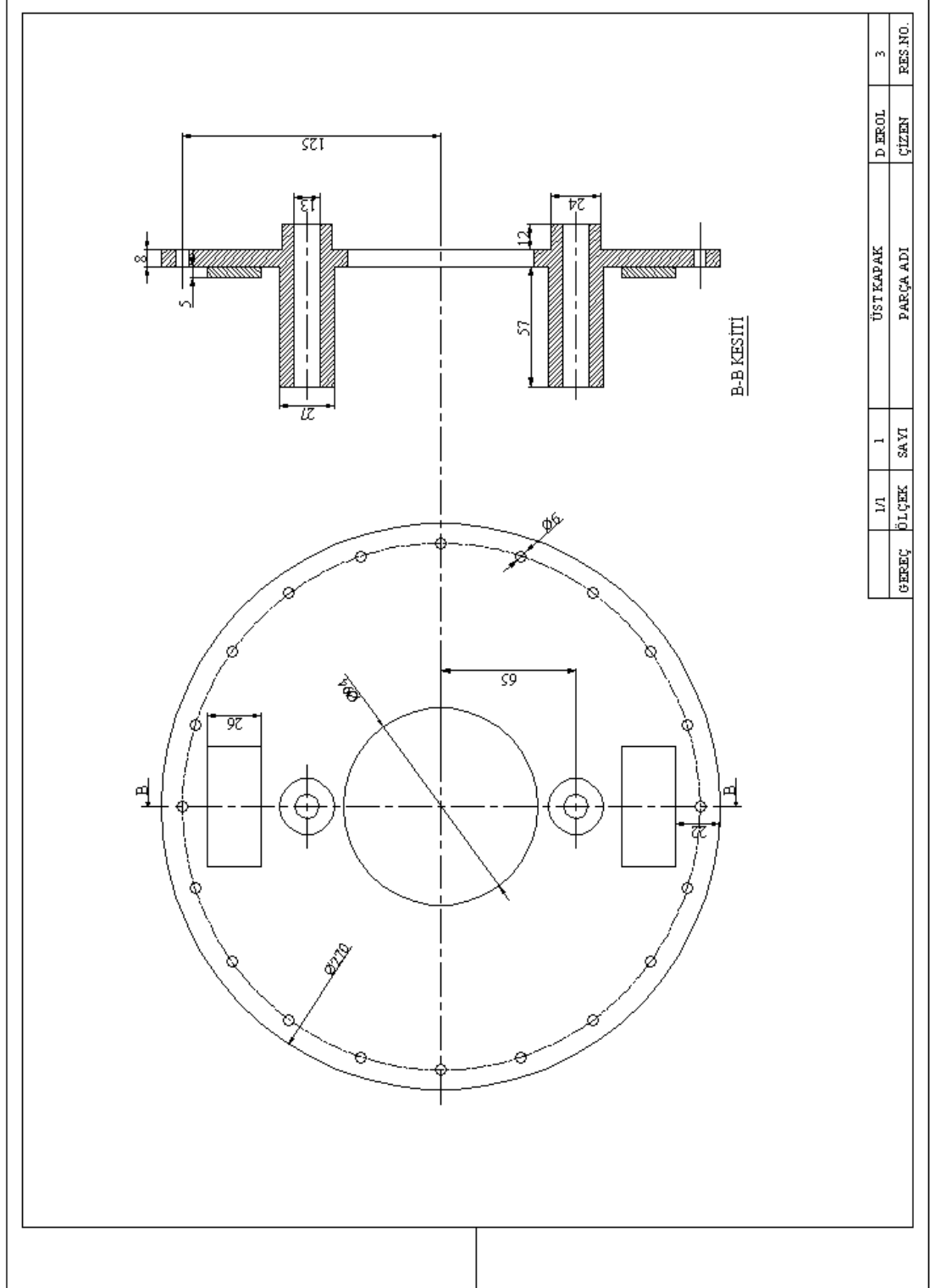
Şekil 2.1. Düşük sıcaklık farkıyla çalışan stirling motoru

EK -2 (Devam) Deney motorunun montaj ve imalat resimleri



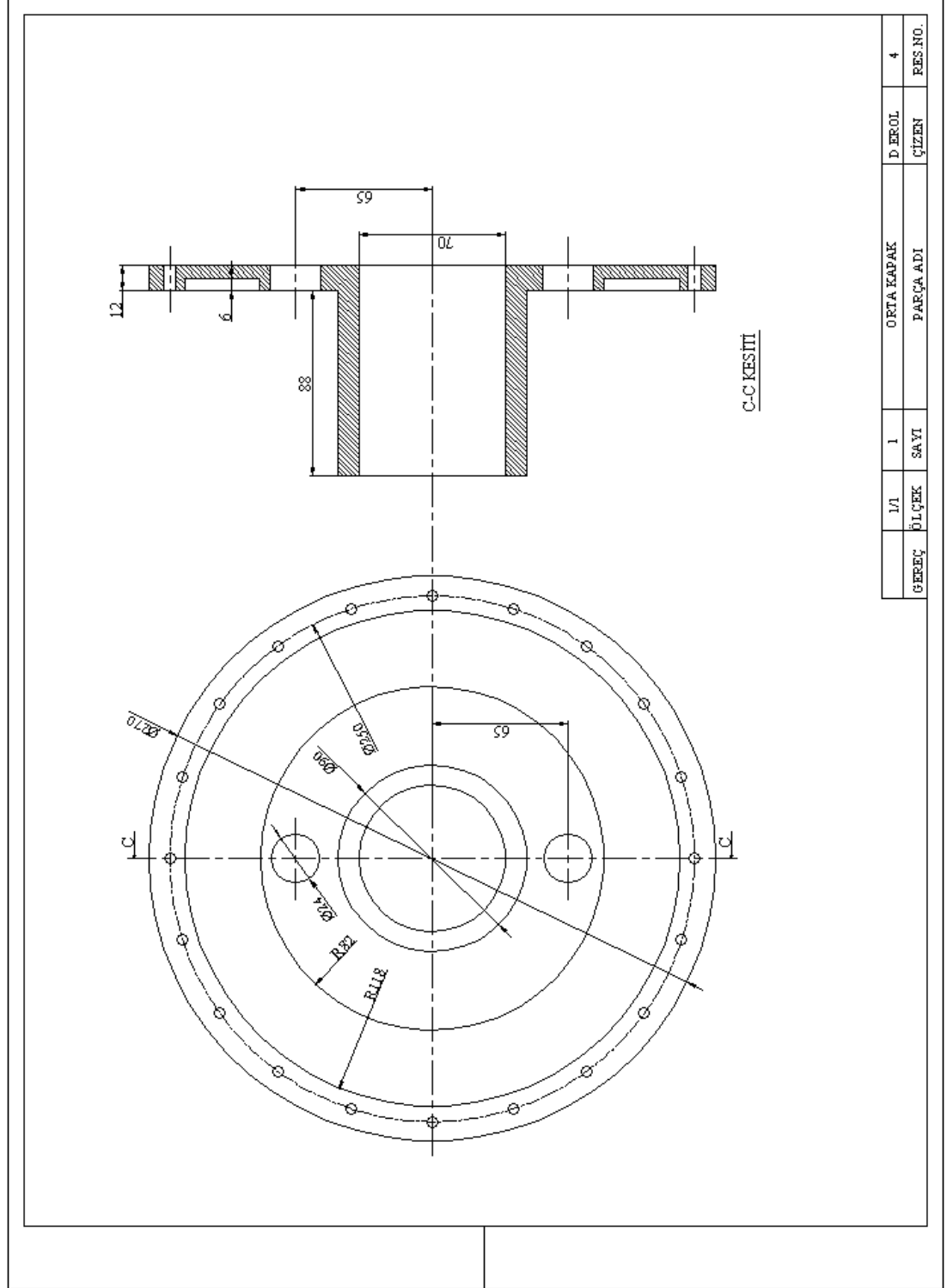
Şekil 2.2. Yer değistirme silindiri

EK -2 (Devam) Deney motorunun montaj ve imalat resimleri



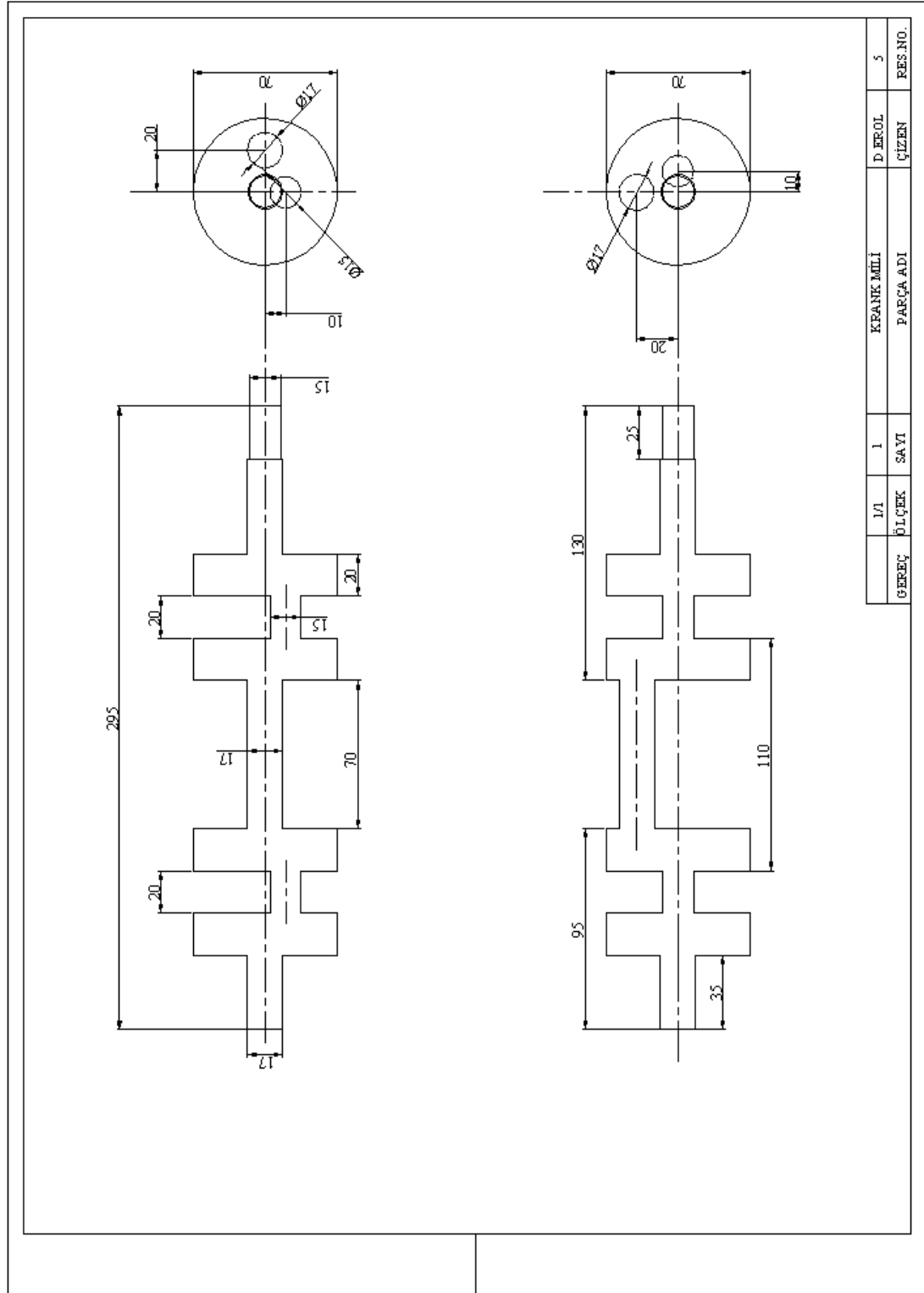
Şekil 2.3. Üst kapak

EK -2 (Devam) Deney motorunun montaj ve imalat resimleri



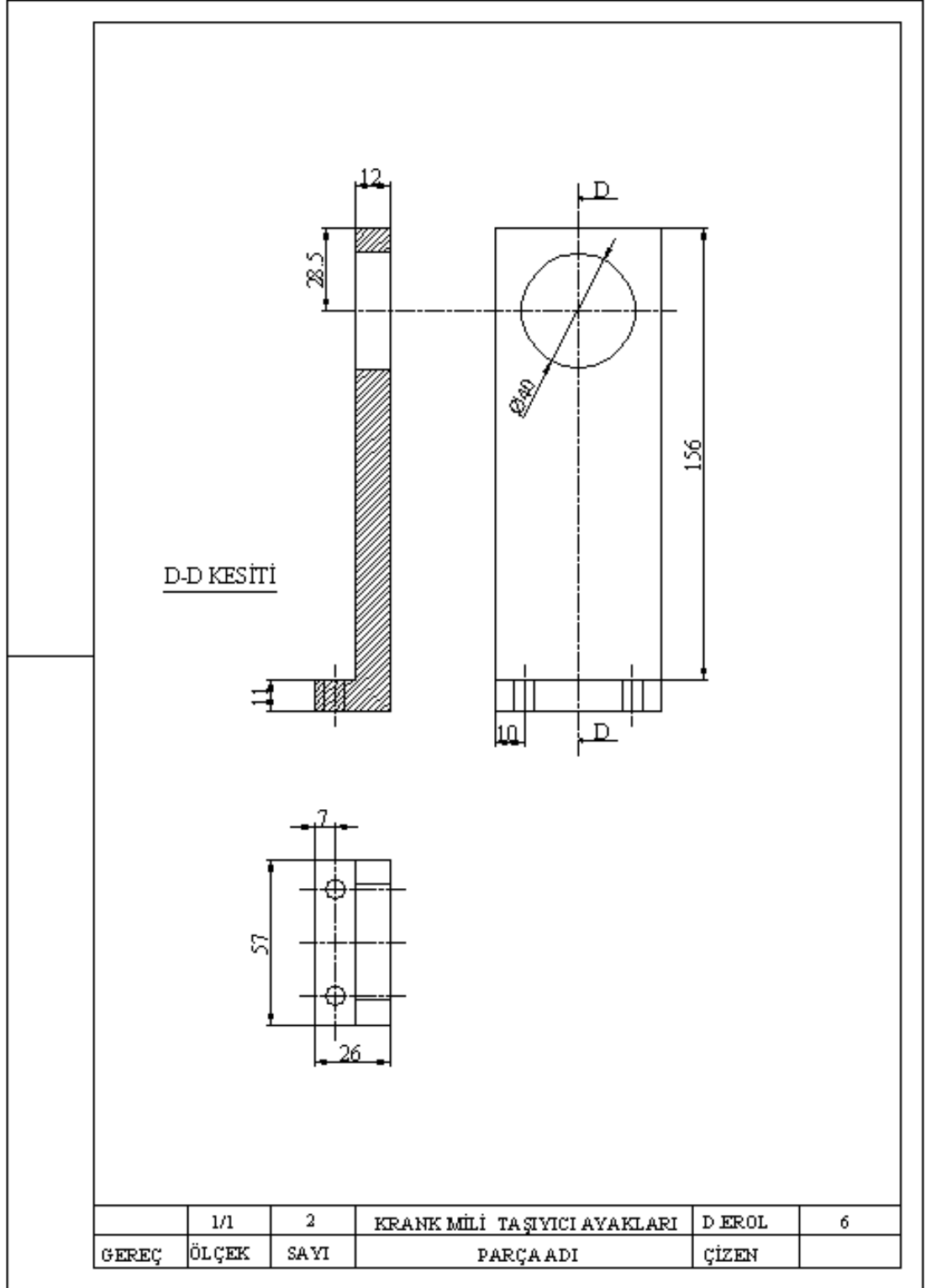
Şekil 2.4. Güç silindiri ve yer değiştirme silindirinin soğuk hacmi

EK -2 (Devam) Deney motorunun montaj ve imalat resimleri



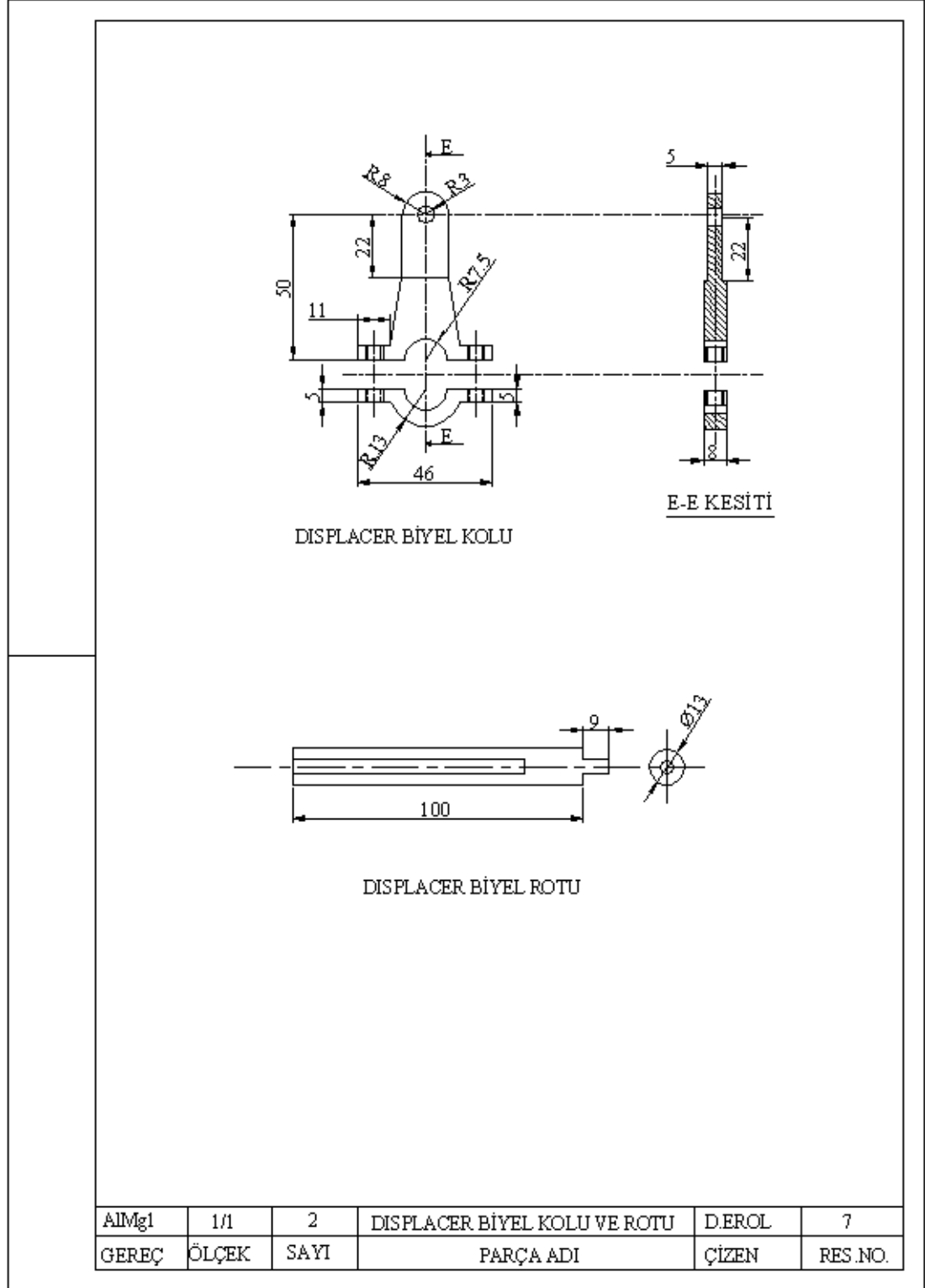
Şekil 2.5. Krank mili

EK -2 (Devam) Deney motorunun montaj ve imalat resimleri



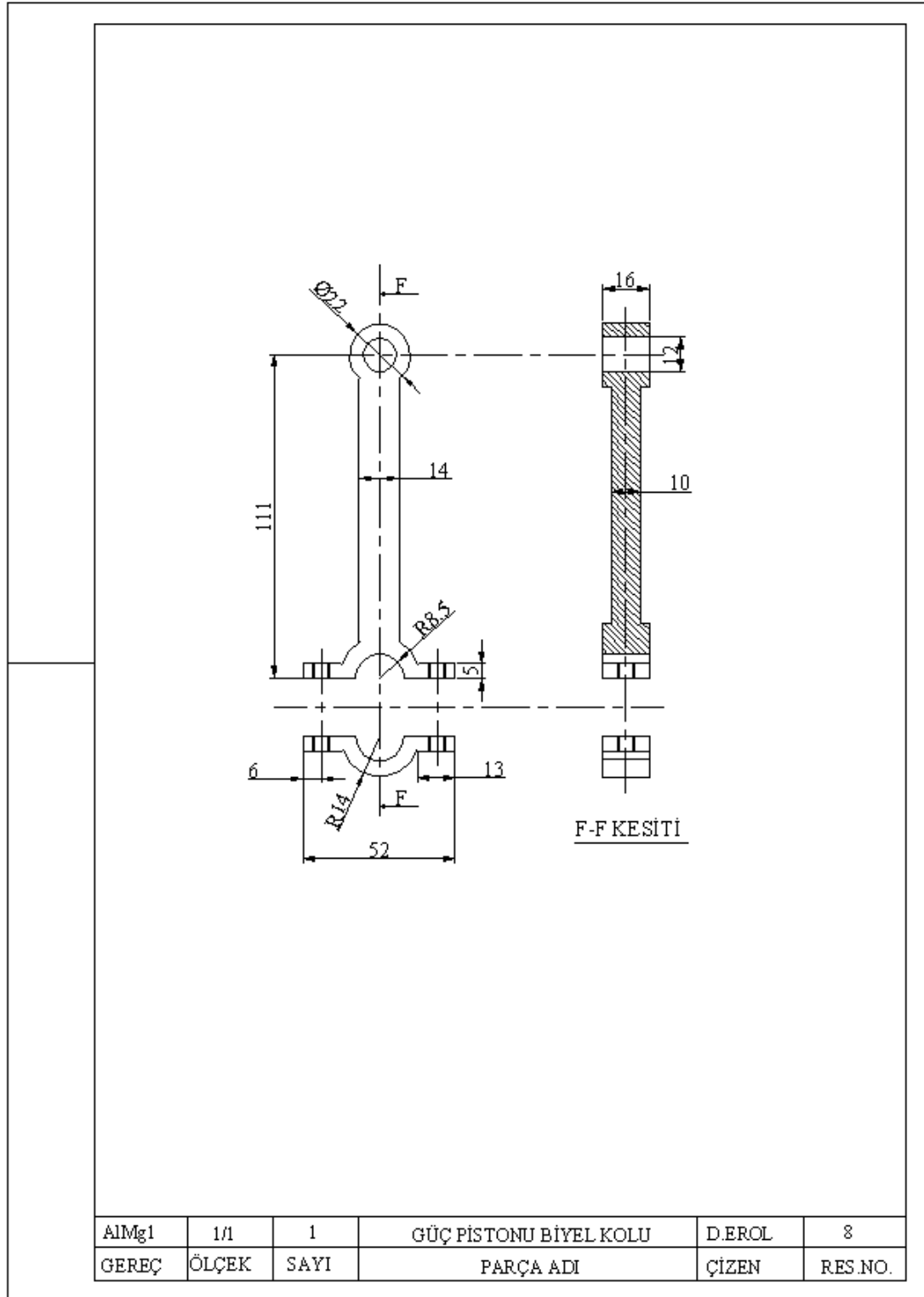
Şekil 2.6. Krank milî taşıyıcı ayakları

EK -2 (Devam) Deney motorunun montaj ve imalat resimleri



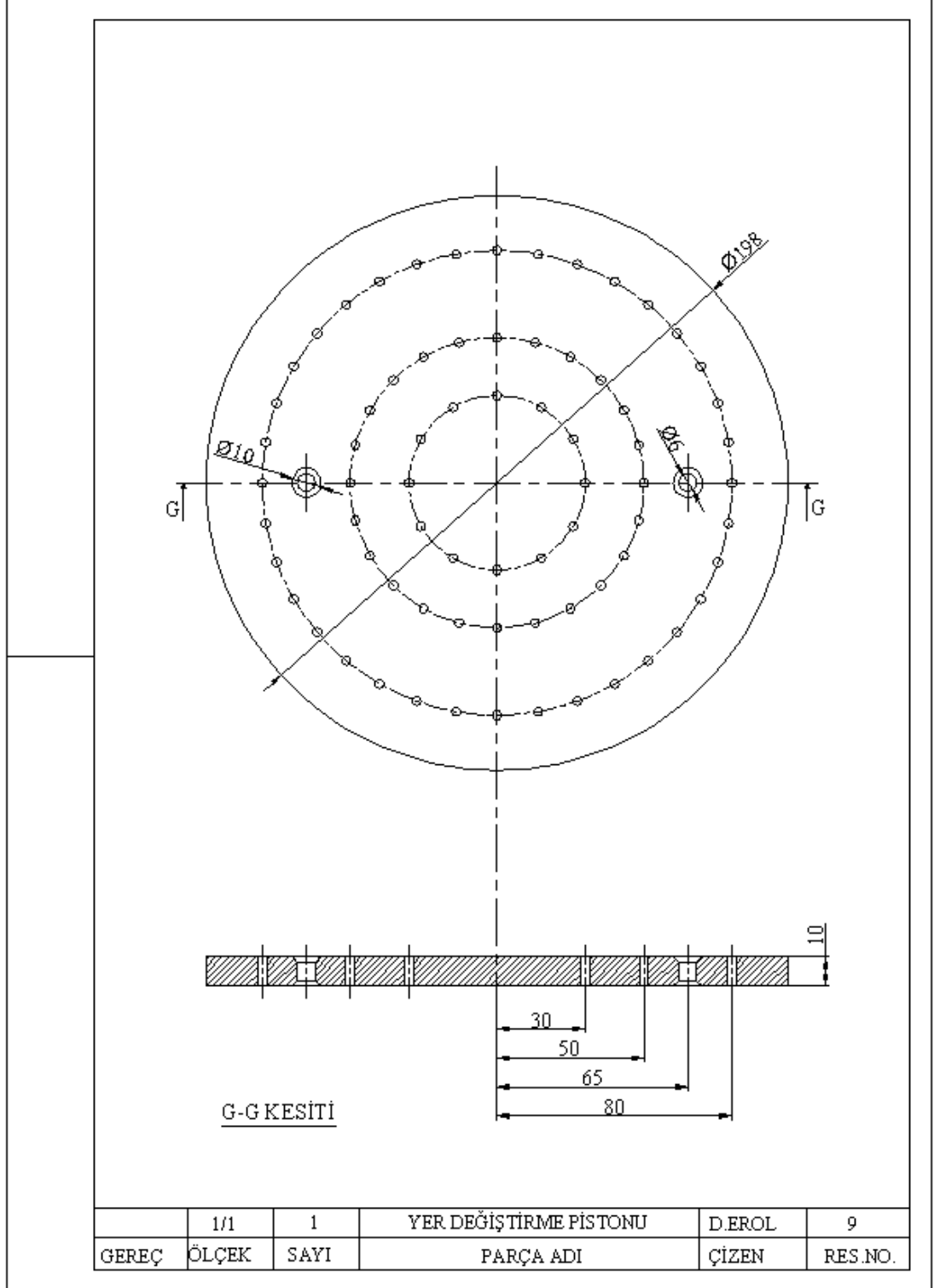
Şekil 2.7. Yer değiştirme silindiri biyel kolu ve rotu

EK -2 (Devam) Deney motorunun montaj ve imalat resimleri



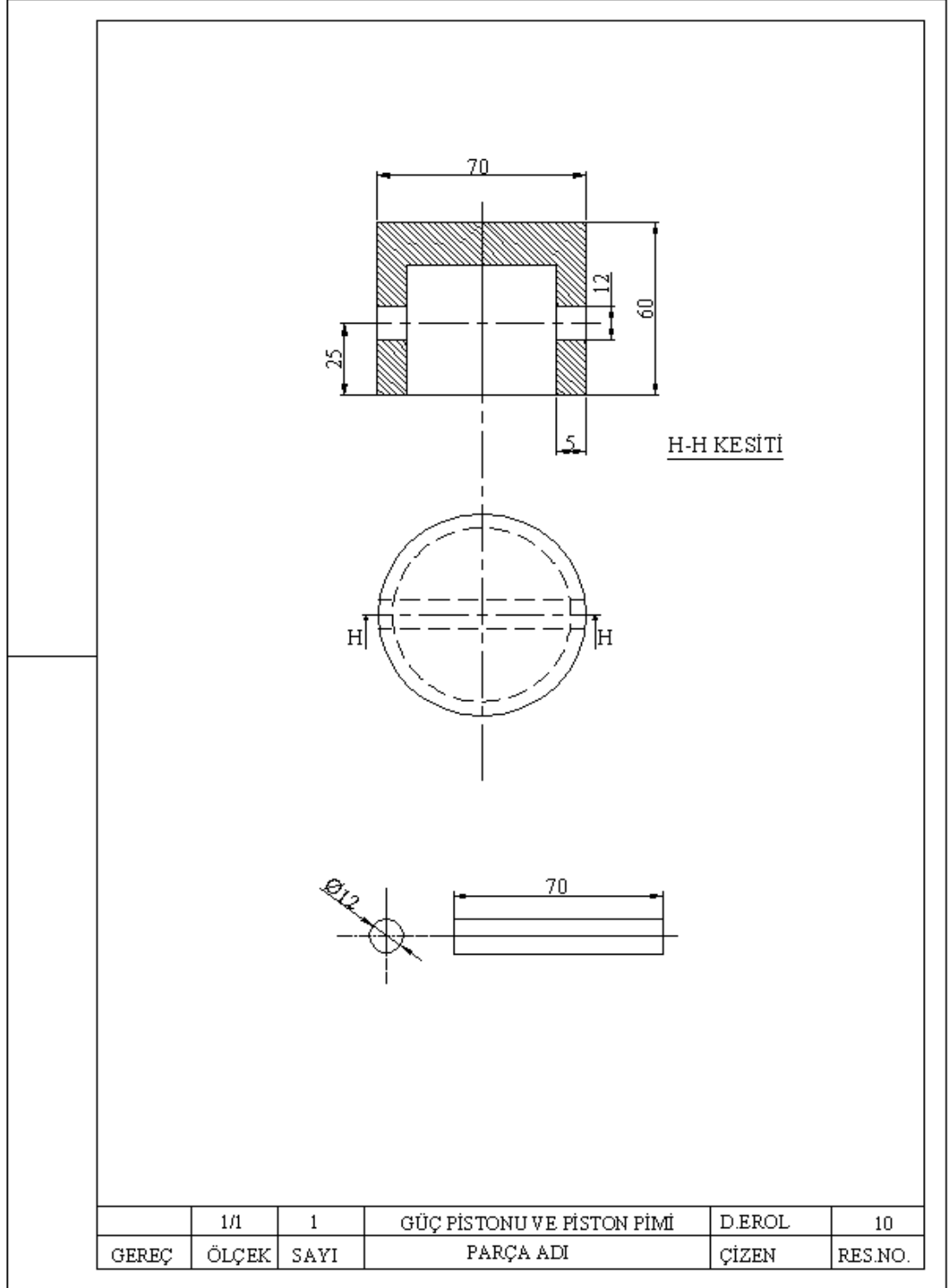
Şekil 2.8. Güç pistonu biyel kolu

EK -2 (Devam) Deney motorunun montaj ve imalat resimleri



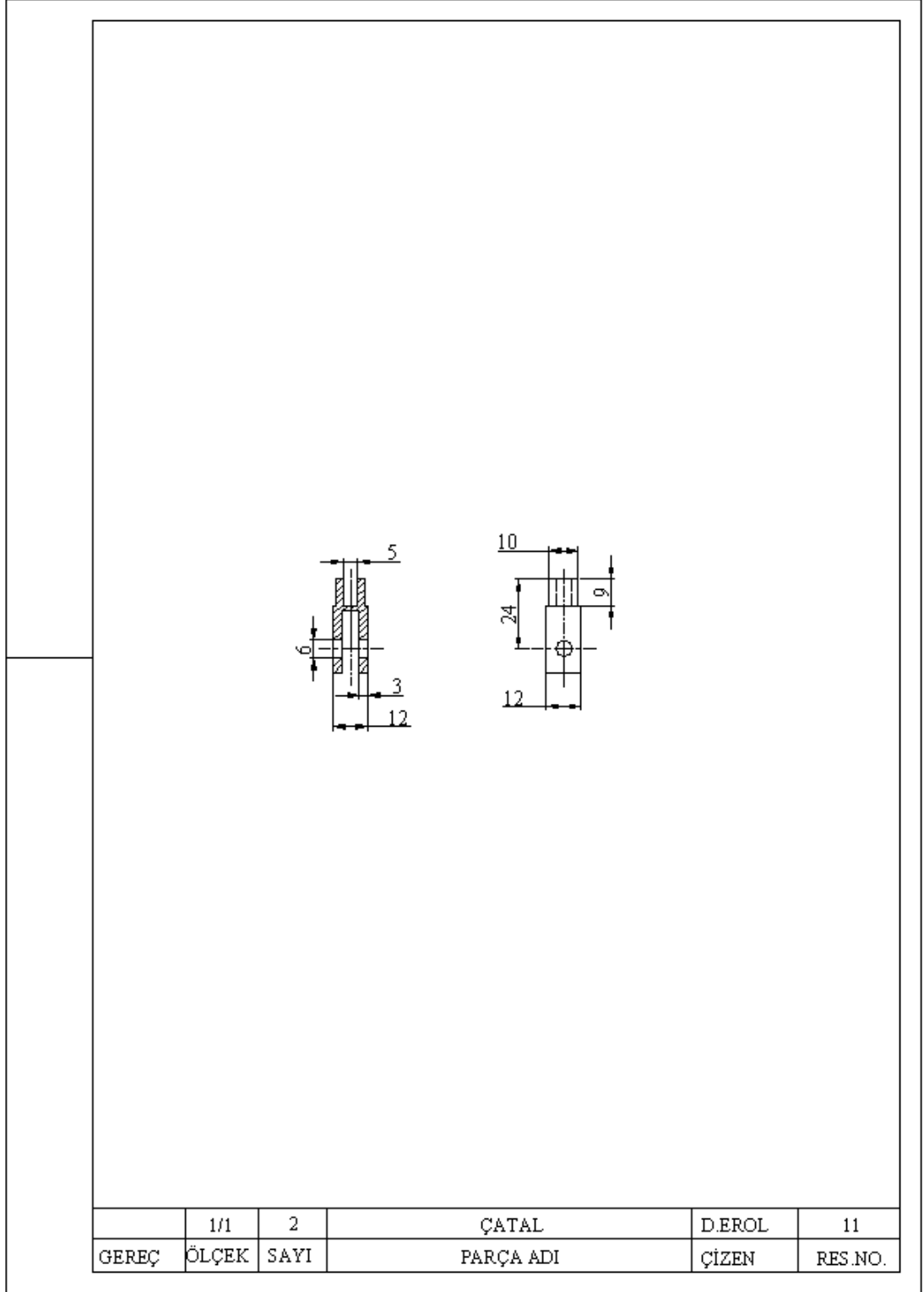
Şekil 2.9. Yer değiştirme pistonu

EK -2 (Devam) Deney motorunun montaj ve imalat resimleri



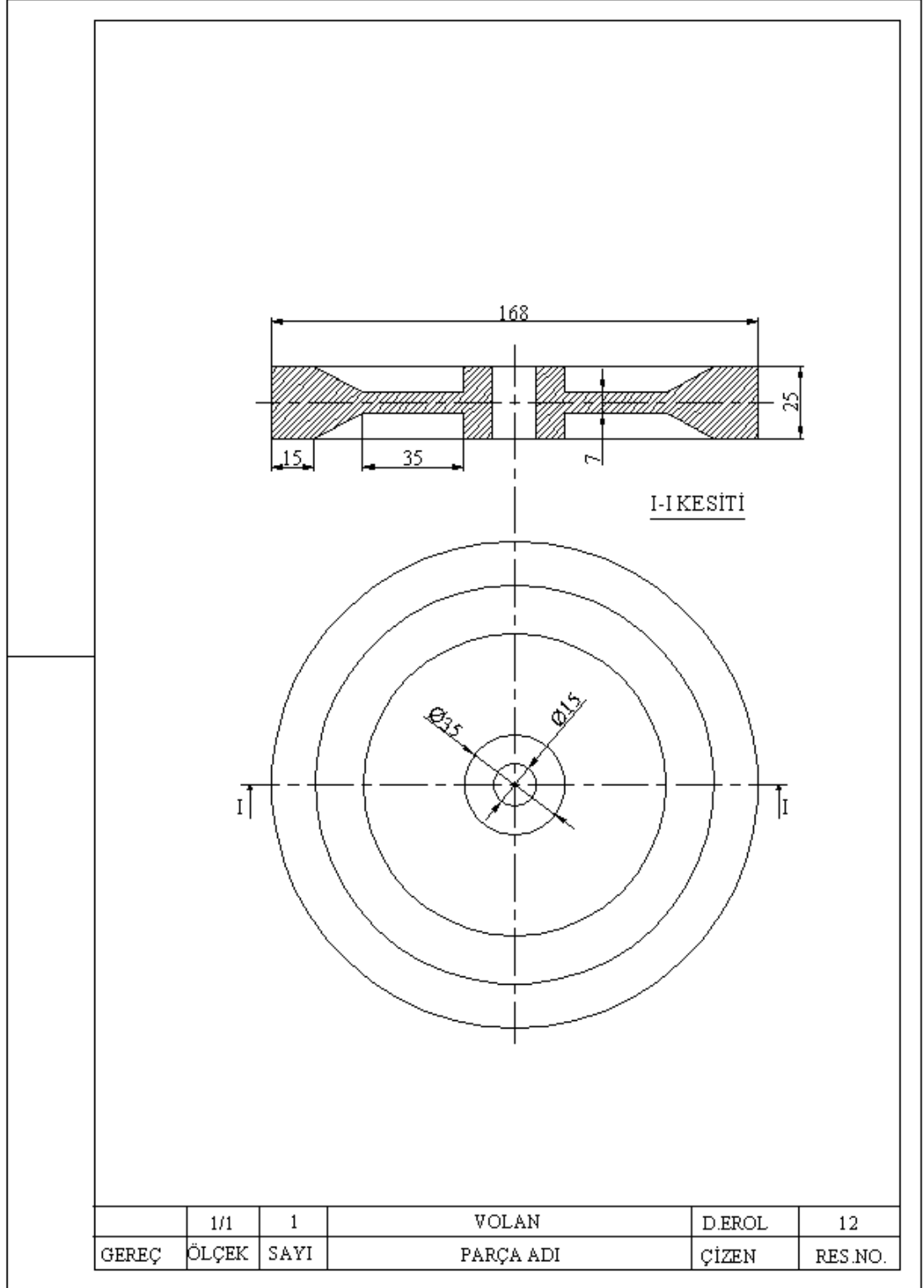
Şekil 2.10. Güç pistonu ve piston pimi

EK -2 (Devam) Deney motorunun montaj ve imalat resimleri



Şekil 2.11. Çatal

EK -2 (Devam) Deney motorunun montaj ve imalat resimleri



Şekil 2.12. Motor volanı

EK -3 Bilgisayar programları

PROGRAM DERSİS

DIMENSION BP(15000),BD(15000)

DIMENSION VT(15000),P(15000),H(1000),UPT(15000),UHB(15000)

DIMENSION UHT(15000),M(1000,15000),V(1000,15000),TW(1000)

DIMENSION A(1000,15000),TOP(15000),T(1000,15000)

REAL LP,MT,M,LR,LD

OPEN(UNIT=14,FILE='LOWT.DAT')

OPEN(UNIT=15,FILE='LOWP.DAT')

C Pİ SAYISI

PI=3.141592654

C STABİLİZER

STB=0.1

C DAKİKADA DÖNME SAYISI

RPM=500.0

C TOPLAM KUTLE

MT=0.00716/1000.0

C GAZ SABİTİ

RG=288.0

C PİSTON BİYELİ

LP=0.111

C KRANK YARI ÇAPLARI

RP=0.02

RD=0.01

C DİSPLACER BİYELİ

LD=0.05

C DİSPLACER ROT UZUNLUGU

LR=0.124

C PİSTON PİMİ İLE TEPESİ ARASINDAKİ UZUNLUK

HP=0.0325

C DİSPLACER UZUNLUGU

EK -3 (Devam) Bilgisayar programları

$$HD=0.01$$

C DİSPLACER SİLİNDİRİ SICAK BÖLGESİ İLE KRANK EKSENİ ARASI
MESAFE

$$UHS=0.1945$$

C DİSPLACER SİLİNDİRİ SOĞUK BÖLGESİ İLE KRANK EKSENİ ARASI
MESAFE

$$UCS=0.1635$$

C GÜÇ SİLİNDİRİ ÜST ÖLÜ NOKTASI İLE KRANK EKSENİ ARASINDAKİ
MESAFE

$$UPS=0.1635$$

C PISTON ÇAPI

$$DP=70.0/1000.0$$

C DISPLACER ÇAPI

$$DD=198.0/1000.0$$

C DISPLACER SİLİNDİR KESİT ALANI

$$AC=PI*(DD**2.0)/4.0$$

C PISTON CYLINDER KESİT ALANI

$$AP=PI*(DP**2.0)/4.0$$

C KUYRUK KESİT ALANI

$$AR=2.65/10000.0$$

C ÖZGÜL ISILAR

$$CP=1005.0$$

$$CV=717.0$$

C AÇININ DİFERANSİYELİ

$$DA=(PI/180.0)$$

C ZAMANIN DİFERANSİYELİ

$$DZ=60.0*DA/(2.0*RPM*PI)$$

C SOĞUK KAYNAK SICAKLIĞI

$$TC=300.0$$

C SICAK KAYNAK SICAKLIĞI

EK -3 (Devam) Bilgisayar programları

```

      TH=500.0
C REGENERATOR HACMI
      VRT=12.0/1000000.0
C REGENERATOR ALANI
      ART=150.0/10000.0
C KONVEKTİF ISI TAŞINIM KATSAYISI
      IM=111
      JM=361
      DO I=101,IM
        H(I)=200.0
      END DO
C CİDAR SICAKLIKLARI
      DO I=101,IM
        TW(I)=TC+(I-101)*(TH-TC)/(IM-101)
      END DO
C ACILARIN HESAPLANMASI
      DO J=1,JM+1
        TET=(J-1)*DA
        BP(J)=ASIN((RP*SIN(TET))/LP)
        BD(J)=ASIN(RD*SIN((PI/2.0)-TET)/LD)
C YUKSEKLİKLERİN HESAPLANMASI
        UHT(J)=HD+LR+LD*COS(BD(J))-RD*COS((PI/2.0)-TET)
        UHB(J)=LR+LD*COS(BD(J))-RD*COS((PI/2.0)-TET)
        UPT(J)=HP+LP*COS(BP(J))+RP*COS(TET)
C      PRINT*,J,UPT(J)
C      PAUSE
      END DO
C HACİMLER
      DO J=1,JM+1
        DO I=102,IM-1

```

EK -3 (Devam) Bilgisayar programları

```

      V(101,J)=2.0*(AP*(UPS-UPT(J)))+(AC-AR)*(UHB(J)-UCS)
      V(I,J)=VRT/(IM-101)
      V(IM,J)=AC*(UHS-UHT(J))
      END DO
      END DO
C TOPLAM HACİM
      DO J=1,JM+1
      DO I=101,IM
      VT(J)=VT(J)+V(I,J)
      END DO
      END DO
C ALANLAR
      DO J=1,JM+1
      DO I=102,IM-1
      A(101,J)=2.0*AP+AC+PI*DP*(UPS-UPT(J))+PI*DD*(UHB(J)-UCS)
      A(IM,J)=AC+PI*DD*(UHS-UHT(J))
      A(I,J)=ART/(IM-101)
      END DO
      END DO
C ÖNLEM OLARAK
      DO J=1,JM+1
      DO I=1,IM+1
      M(I,J)=0.0
      T(I,J)=TW(I)
      END DO
      END DO
C IZOTERMAL ŞARTLARDA KUTLE VE BASINÇ
      DO J=1,JM+1
      TOP(J)=0.0
      DO I=101,IM

```

EK -3 (Devam) Bilgisayar programları

```

      TOP(J)=TOP(J)+V(I,J)/T(I,J)
    END DO
    P(J)=MT*RG/TOP(J)
    DO I=101,IM
      M(I,J)=P(J)*V(I,J)/(RG*T(I,J))
    END DO
  END DO

```

C ISOTHERMAL İŞ HESABI

```

    WI=0.0
    DO J=1,361
      WI=WI+P(J)*(VT(J+1)-VT(J))
      PRINT*,WI
    END DO

```

C-----

```

      DO J=JM-360,JM
        K=J-(JM-360)
C      WRITE(15,33)UHT(J),UHB(J),UPT(J)
C      WRITE(15,33)(VT(J)*1000000.0),(P(J)/100000.0)
        WRITE(15,33)(P(J)/1000.0)
        W=W+P(J)*(VT(J)-VT(J-1))
        PRINT*,W
      END DO
C 33 FORMAT(F12.7,2X,F12.7,2X,F12.7,2X,F9.6,2X,F9.6)
      33 FORMAT(F12.7,2X,F12.5,2X,F10.2,2X,F9.6,2X,F9.6)
      STOP
    END

```

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : EROL, Derviş
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 01.06.1982 Kırşehir
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (505) 714 63 28
e-mail : eroldervis@myynet.com.tr
derol40@gmail.com
Web : <http://stirlingengines.blogspot.com/>

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Otomotiv Bölümü	2006
Lise	Kırşehir Endüstri Meslek Lisesi	1999

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2008 – 2009	Petlas Lastik Fabrikası Ar-Ge Departmanı	Tasarım Teknisyeni
2008 – 2009	Özel Vural Sürücü Kursu	Motor Öğretmeni
2005 – 2007	Türk Traktör Fabrikası Ar-Ge Departmanı	Tasarım Teknisyeni
1999 – 2001	Oto Elvanlar Iveco Yetkili Servisi	Teknisyen

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Bilgisayar teknolojileri, Malinua üreticisi