

**34568**

**GÜNEŞ ENERJİSİNİN TARIMSAL SULAMA VE  
ELEKTRİK ÜRETİMİNDE KULLANILABİLMESİ İÇİN  
TASARLANAN SERBEST DİSPLASERLİ BİR STİRLİNG  
MOTORUNUN ÇİZİM VE PROTOTİP HESAPLARI**

34568

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
(MAKİNA EĞİTİMİ)**

**Mehmet DEMİRALP**

**Aralık 1994**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu  
onaylarım

---

Danışman

Yrd. Doç Dr. Halit KARABULUT



Sınav Jürisi

Başkan : Prof. Dr. A. Hücel Uyarel



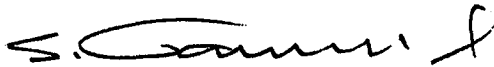
Üye : Yrd. Doç. Dr. Halit Karabulut.



Üye : Yrd. Doç. Dr. Duran Altıparmak



Bu Tez Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez  
Yazım Esaslarına Uygundur



GÜNEŞ ENERJİSİNİN TARIMSAL SULAMA VE ELEKTRİK  
ÜRETİMİNDE KULLANILABİLMESİ İÇİN TASARLANAN  
SERBEST DİSPLACERLİ BİR STİRLİNG MOTORUNUN  
ÇİZİM VE PROTOTİP HESAPLARI  
(Yüksek Lisans Tezi)

Mehmet DEMİRLAP

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
Aralık 1994

ÖZET

Güneş enerjisinin tarımsal sulamada kullanılması ve elektriğe dönüştürülmesi konusunda yapılan bu tezde, ilk etapta ülkemizin güneş enerjisi potansiyeli alanında elde edilen istatistiksel veriler incelenmiş ve birim alana düşen enerjinin yeterli olduğu kanaatine varılmıştır. Güneş enerjisinin söz konusu işlerde kullanılabilmesi için yapısı basit, ağırlığı az ve hacimce çok küçük olan dıştan ısıtmalı bir motorun geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Tezde Stirling motorlarının gelişmesine ilişkin literatür gözden geçirildikten sonra, şimdiye kadar yapılan çalışmalarda ortaya çıkan olumlu ve olumsuz sonuçları göz önünde tutarak, çalışma maddesi hava olan, serbest displacerli, Otto çevrimini kullanan bir model tasarlanmıştır. Tasarlanan modelin ısıl ve dinamik analizleri yapılarak 500 W enerji üretecek bir prototipin kısımlarının ölçüleri belirlenmiştir.

PROTOTYPE CALCULATIONS OF A FREE DISPLACER  
STIRLING ENGINE DESIGNED FOR THE USE OF SOLAR  
ENERGY IN IRRIGATION AND ELECTRICITY  
PRODUCTION  
(M. Sc. Thesis)

Mehmet DEMİRALP

GAZI UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY  
December 1994

ABSTRACT

In this study, made on the use of solar energy for irrigation and electricity production, initially the statistical data of solar energy density of Türkiye was examined and found to be adequate. In order to use the solar energy in irrigation and electricity production, the development of an externally heated, structurally simple, small and light engine is required. In the study, after examination of the literature of Stirling engines, an engine model has been designed that uses air as the working fluid and works with Otto cycle by means of a free displacer. The thermal and dynamic analyses of the model was carried out and the dimensions of a prototype with 500 Watt power output were estimated.

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda yardımlarını hiç bir zaman esirgemeyen Danışman Hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Halit KARABULUT' a teşekkürü borç bilirim.

Aralık 994

Mehmet DEMİRALP

## SEMBOLLER

Sembol	Anlamı
$a_D$	: Displacerin ivmesi ( $m/s^2$ )
$A_{DK}$	: Displacer kuyruk alanı ( $m^2$ )
$a_v$	: Volan kütlesi (kg)
$c_v$	: Sabit hacimde ısınma ısısı ( $kJ/kg^\circ K$ )
$D_d$	: Displacer pistonu çapı (m)
$d_k$	: Displacer kuyruğu çapı (m)
$D_v$	: Volan çapı (m)
$E_k$	: Kinetik enerji (Joule)
$F_D$	: Displaceri iten kuvvet (N)
$h$	: Kanal çapı (m)
$h_c$	: Sıkıştırma odası kurs boyu (m)
$k$	: Adyabatik katsayı, Isıl iletkenlik ( $W/mK$ )
$m_c$	: Çevrimlik hava (kg/çevrim)
$m_D$	: Displacer kütlesi (kg)
$\dot{m}_h$	: Bir saniyede kullanılan hava miktarı (kg/s)
$m_v$	: Volan kütlesi (kg)
$n_{max}$	: Azami volan devri (d/d)
$n_{min}$	: Asgari volan devri (d/d)
$P$	: Basınç (kPa)
$P_{BHH}$	: Pasıncılı hava haznesi basıncı (kPa)
$P_e$	: Efektif güç (watt)

Sembol	Anlamı
$Q_{IN}$	: Bir kg hava için sisteme verilen ısı (j/kg)
$R$	: Özgül gaz sabiti (kJ/kg°K)
$r_j$	: Jirasyon yarıçapı (m)
$S$	: Displacerin aldığı yol (m)
$T$	: Sıcaklı (°K)
$t$	: Zaman (s)
$T_w$	: Isıtıcı duvar sıcaklığı (°K)
$u$	: Hava hızı (m/s)
$x$	: Kanal boyu (m)
$V_0$	: Displacerin ilk hızı (m/s)
$v$	: Çizgisel hız (m/s)
$W_{comp}$	: Sıkıştırma işi (Joule)
$w_e$	: Efektif İş (j/kg)
$y$	: Kanal yarıçapı (m)
$y_w$	: Kanal ortası ile duvar arası mesafe (m)
$\varepsilon$	: Sıkıştırma oranı
$\eta_T$	: Teorik verim
$\eta_P$	: Pratik verim
$\delta$	: Volan düzgünsüzlük katsayısı
$\Delta E_k$	: Kinetik enerji farkı (Joule)
$\omega$	: Çevresel hız (rad/s)
$\gamma$	: Volan malzemesi yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )

## İNDİSLER

İndis      Analamı

BHH : Basınçlı hava haznesi

comp : Sıkıştırma

ç : Çevrimlik

D : Displacer

d : Displacer

DK : Displacer Kuyruğu

e : Efektif

h : Hava

IN : Çevrime giren

j : Jirasyon

k : Kinetik, Kuyruk

max : Azami

min : Asgari

P : Pratik

T : Teorik

w : Duvar

v : Volan, Sabit hacim

0 : Başlangıç



## KISALTMALAR

<u>Kısaltma</u>	<u>Anlamı</u>
A.Ö.N.	: Alt Ölü Nokta
İ.Y.M.	: İçten Yanmalı Motor
USMERDAC	: United States Military Equipment Resarch and Development Center
Ü.Ö.N.	: Üst Ölü Nokta



## TABLOLARIN LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 1. Çesitli illerde birim alana gelen günlük ortalama güneş enerjisi miktarının aylara göre dağılımı .....	3
Tablo 1.1. Hava, hidrojen ve helyuma ait bazı termofiziksel özellikler .....	12
Tablo 2.1. 5 cm makinanın test sonuçları .....	24
Tablo 2.2. 3.8 cm makinanın test sonuçları .....	25
Tablo 2.3. Prototipin temel dizayn parametreleri .....	29
Tablo 2.4. Dört silindirli Stirling makinası karakteristikleri .....	34
Tablo 2.5. Exoz emisyonları .....	35
Tablo 2.6. Çesitli ülkelerdeki emisyon standartları .....	36
Tablo 2.7. Piezoelektrik Stirling makinasının başlıca özellikleri .....	39

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. a tipi makina .....	5
Şekil 1.2. b tipi makina .....	5
Şekil 1.3. c tipi makina .....	6
Şekil 1.4. Stirling çevrimine ait P-v ve T-s diyagramları .....	7
Şekil 1.5. Regeneratörlü Stirling çevrimine ait T-s diyagramı .....	9
Şekil 1.6. Stirling makinasının şematik olarak çalışma prensibi ..	10
Şekil 1.7.Çalışma maddesi olarak hava, helyum ve hidrojen kullanılan Stirling makinasının performansının karşılaştırılması .....	11
Şekil 2.1. Serbest pistonlu Stirling makinasının şematik resmi ...	18
Şekil 2.2. Serbest silindirli güneş kolektörlü su pompası .....	20
Şekil 2.3. Atalet pompası .....	21
Şekil 2.4. Serbest silindirli makina .....	22
Şekil 2.5. 5 cm makina .....	23
Şekil 2.6. 3.8 cm makina .....	24
Şekil 2.7. Vuilleumeier makinası .....	26
Şekil 2.8. Displacer hareketine bağlı olarak basınç ve yay kuvveti değişimleri .....	27
Şekil 2.9. Vuilleumeier makinası prototip dizaynı .....	30
Şekil 2.10. Displacerli ve tek silindirli Stirling makinası .....	32

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.11. Rhombic drive makinanın şematik resmi .....	33
Şekil 2.12. Deneme amacı ile otobüse yerleştirilen Stirling motoru .....	35
Şekil 2.13. Swash-plate krank düzenli Stirling makinası .....	37
Şekil 2.14. Piezoelktrik jenaratör .....	38
Şekil 2.15. Suni kalp olarak tasarlanan Stirling makinası .....	40
Şekil 2.16. Dublex ısı pompası .....	41
Şekil 2.17. Dublex ısı pompasının şematik çalışması .....	42
Şekil 2.18. Benson Stirling-Stirling çevrimli ısı pompası .....	44
Şekil 2.19. Rezonans tüplü Stirling ısı pompası .....	45
Şekil 2.20. Rezonans tüpü basınç dalgalanmaları .....	46
Şekil 3.1. Tasarımı yapılan Stirling motorunun şematik resmi ....	52
Şekil 3.2. Displacerin kısımları .....	54
Şekil 3.3. Basınçlı hava haznesi .....	55
Şekil 3.4. Motor Silindiri .....	57
Şekil 3.5. Tasarımı yapılan motorun P-v diyagramı .....	60
Şekil 3.6. Havanın motor silindirine alınması .....	61
Şekil 3.7. Displacerin güç pistonuna doğru hareketi .....	62
Şekil 3.8. Tek yönlü valfin açılarak içeri hava dolması .....	63
Şekil 3.9. Çıkış portunun kapanması .....	64
Şekil 3.10. Havanın motor içinde sıkıştırılması .....	65
Şekil 3.11. Havanın ısıtıcı üzerinden geçirilmesi .....	66
Şekil 3.12. Isınan havanın genişmesi .....	68

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.1. Tasarımda kullanılması düşünülen ısıtıcı .....	75
Şekil 4.2. Isıtıcıya ait kanal .....	79
Şekil 4.3. Displacerin ivme-zaman, hız-zaman grafikleri .....	81
Şekil 4.4. Güç pistonunun bir devirlik peryot içindeki yol-zaman grafığı .....	82



## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	I
ABSTRACT .....	II
TEŞEKKÜR .....	III
SEMBOLLER .....	IV
İNDİSLER .....	VI
KISALTMALAR .....	VII
TABLoların LİSTESİ .....	VIII
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	IX
GİRİŞ .....	1
<b>BÖLÜM I</b>	
STİRLİNG MAKİNASININ TANITIMI .....	4
1.1. Stirling Makinasının Tarihçesi .....	4
1.2. Stirling Makinasının Çevrimi .....	7
1.2.1. Regeneratörlü Stirling Çevrimi.....	8
1.3. Stirling Makinasının Çalışma Prensibi .....	9
1.4. Stirling Makinasında Kullanılan Çalışma Maddesi ...	10
1.5. Stirling Makinasının Kullanılma İmkanları .....	12
1.5.1. Avantajları .....	12
1.5.2. Dezavantajları .....	14
1.6. Stirling Makinasının Uygulama Alanları .....	15
<b>BÖLÜM II</b>	
LİTERATÜR ÖZETİ .....	17

## BÖLÜM III

MATERYAL VE METOD .....	51
3.1. Tasarlanan Motorun Kısımları .....	53
3.1.1. Displacer .....	53
3.1.2. Basınçlı Hava Haznesi .....	55
3.1.3. Silindir .....	56
3.1.4. Krank - Biyel Mekanizması .....	57
3.1.5. Güç Pistonu .....	58
3.1.6. Volan .....	58
3.1.7. Tek Yönlü Valf .....	59
3.1.8. Motor Bloğu .....	59
3.1.9. Isıtıcı .....	59
3.2. Tasarımı Yapılan Motorun Çalışması .....	59
3.2.1. Havanın Motor İçine Alınması .....	61
3.2.2. Motora Alınan Havanın Sıkıştırılması .....	64
3.2.3. Sıkıştırılan Havanın Yer Değiştirirken Isınması .....	66
3.2.4. Isınan Havanın Genleşmesi .....	67

## BÖLÜM IV

SİSTEMİN ANALİZLERİ .....	69
4.1. Sistemin Isıl Analizleri .....	69
4.1.1. Termodinamik Analizler .....	69
4.1.2. Isıtıcının Analizi .....	74
4.2. Dinamik Analizler .....	81
4.2.1. Displacerin Dinamik Analizi .....	81
4.2.2. Volanın Dinamik Analizi .....	85

## BÖLÜM V

SONUÇ VE ÖNERİLER .....92

KAYNAKLAR .....94

ÖZGEÇMİŞ .....96





## GİRİŞ

Yarım yüzyıl kadar yakın bir zamanda, petrol rezervlerinin biteceği düşüncesi, zaman zaman ortaya çıkan petrol krizleri bilim adamlarını alternatif enerji kaynakları bulmaya ve bu kaynakları ihtiyaç olan enerjiye çevirecek makinalar üzerinde araştırma yapmaya yöneltmiştir. Ayrıca sanayi ve insan topluluklarının ihtiyacı olan enerjiyi karşılamak için petrol ve petrol türevi veya fosil yakıtların yakılması sonucu ortaya çıkan gazlar çevre ve insan sağlığı üzerinde istenmeyen kalıcı etkiler oluşturmaktadır. Bu sebepten dolayı dünyada giderek artan enerji ihtiyacı ve bu ihtiyaca bağlı olarak artan çevre kirliliğinin yanı sıra insan topluluklarındaki çevre bilincinin kurumlaşması, minimum düzeyde kirletici etkisi olan enerji kaynakları ve enerji dönüşüm makinalarına karşı olan ilgiyi arttırmıştır.

Bahsedilen sorunlara çözüm olarak kabul edilen fikirlerden bir tanesi de Stirling makinasıdır.

Dıştan yanma prensibine göre çalışan Stirling makinası, ilk olarak Iskoç bir Papaz olan Robert Stirling tarafından 1816 yılında inşaa edilmiştir. Fakat bu makinaya olan ilgi 19. yy'da başlamış ve geliştirme çalışmaları günümüze kadar devam etmiştir, günümüzdede yoğun bir şekilde devam etmektedir. Bu gün için Stirling makinaları ticari üretim seviyesine ulaşmış sayılmamakla birlikte, ulaşılan teknolojik

seviye bu makinalar hakkında son derece ümit vericidir. Halihazırda özel amaçlarla ticari firmaların veya araştırma kurumlarının imal etmiş olduğu Stirling makinalarının prototip veya deneme aşamasında olanları mevcuttur.

Isı veren veya ısıya dönüştürülebilien her türlü enerji kaynağı ile çalışan Stirling makinası, günümüzde fazla bilinmemesine rağmen gelecekte hareket makinası, soğutma makinası, ısı pompası ve basınç makinası olarak muhtemelen daha iyi tanınacaktır. Ayrıca bahsi geçen problemlere çözüm olabilecek makinalardan biri olmaya adaydır.

Özellikle Türkiye gibi bol güneş enerjisi, termal su kaynakları, düşük kalorili kömür yatakları v.s nin bol bulunduğu ülkelerde, bu makinadan faydalanmak sureti ile büyük ölçüde enerji tasarrufu sağlanabileceği gibi çevre ve insan üzerindeki etkisi de minimum düzeyde olacaktır. Örnek olması amacı ile aşağıdaki tabloda Türkiye şartlarına göre düzenlenmiş, kullanılabilir enerjiye dönüştürülebilien güneş enerjisinin bazı yerleşim yerlerimizdeki aylara göre dağılımı verilmiştir [1].

Güneş enerjisinin\* dıştan ısıtılmalı bir motor (mesela Stirling) ile mekanik enerjiye dönüştürülmesi için, motorun güneşi takip eden bir parabolik aynanın odak noktasına monte edilmesi ve ayna ile birlikte hareket etmesi gerekmektedir. Bu durum kullanılan motorun küçük olmasını gerektirmektedir. Bu sebeple güneş enerjisi uygulamalarında kullanılmak üzere parça

sayısı az ve yapısı basit olan (serbest pistonlu) motorlar üzerinde araştırmalar devam etmektedir.

Displacer olarak adlandırılan, çalışma gazını sabit hacim altında soğuk hacimden sıcak , sıcak hacimden soğuk hacme süpüren, pistonun hareket düzeni dıştan yanmalı bir motorun hacmini ve ağırlığını önemli ölçüde arttırmaktadır. Bu tez çalışması süpürme pistonunun hareket düzenini basitleştirmeye yöneliktir. Bu çerçevede serbest bir süpürme pistonu ile çalışan yaklaşık 500 watt güç üretebilecek bir motor tasarımı yapılacaktır.

Tablo 1. Çeşitli Yerleşim Yerlerimizdeki Birim Alana Gelen Günlük Ortalama Güneş Enerjisi Miktarının Aylara Göre Dağılımı(W/m<sup>2</sup>).

	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül
Adana	496.6	436.8	448.8	451.12	471.24
Adıyaman	503.81	457.0	419.26	397.25	396.0
Ankara	666.39	587.78	514.62	519.74	503.81
Konya	534.5	513.46	550.28	563.47	569.28
Siverek	676.4	615.2	550.28	563.47	569.28
G.Antep	520.0	486.83	460.78	490.55	545.61

# BÖLÜM I

## STİRLİNG MAKİNASI VE TANITIMI

### 1.1. Stirling Makinasının Tarihçesi

Sıcak hava makinaları grubuna dahil olan Stirling motoru ve benzerleri 19. yüzyılda yaygın bir şekilde kullanılmaya başlandı, hatta bu makinaların buhar makinaları ile rekabet edebileceği zannediliyordu.

O zamanlar ortaya çıkan sistemler şu şekilde sınıflandırılmıştır [2].

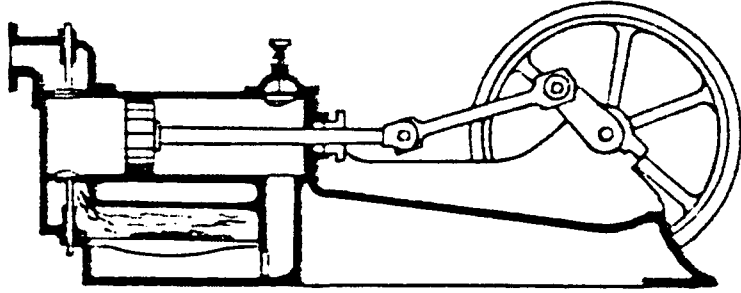
a. Her periyotta taze havanın emilip, bu havanın silindir dışında bir fırında doğrudan doğruya ısıtıldığı açık sistemler.

b. Her periyotta taze havanın emildiği fakat dolaylı olarak ısıtıldığı açık sistemler.

c. Birbirini takip eden periyotlarda aynı hava hacminin kullanıldığı kapalı sistemler.

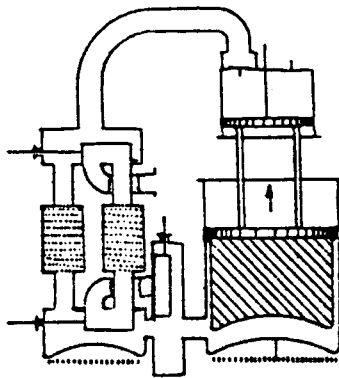
1807 de Sir George Cayley tarafından imal edilen ve çalışan ilk makina olan sıcak hava makinası (a) tipindedir. Su

pompalamak için kullanılan bu makinalar 1880 lerde imal edilmişlerdir. Bu tipten bir örnek Şekil. 1. 1. de görülmektedir.



Şekil.1.1. a Tipi Makina

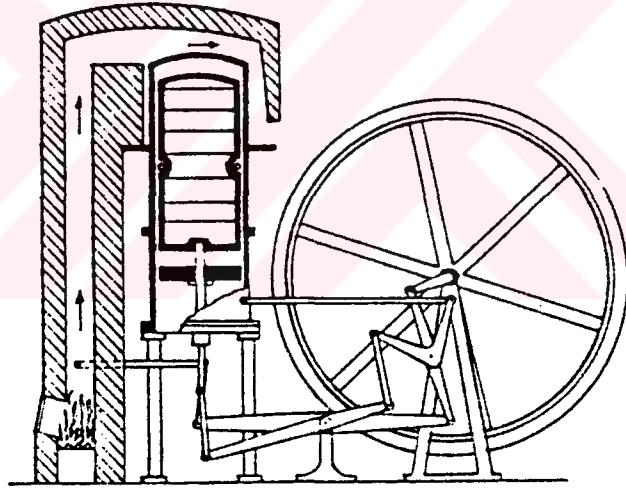
İsveçli Ericsson'nun kendi adını taşıyan 2200 tonluk gemi için 1853'te imal ettiği sıcak hava makinası (Şekil.1.2.) (b) tipindedir. Bunlar gelmiş geçmiş en büyük sıcak hava makinaları olup, güç pistonları çapı 4.2 m, strokları 1.8 m idi. Birim güç başına 1kg kömür yakan bu makinalar, birim güç başına 1.4 kg kömür yakan gemi buhar makinalarından daha ekonomikti.



Şekil.1.2. b Tipi Makina

Değişik yıllarda bu tiplere uygun modeller yapılmış olup araştırmalar halihazırda devam etmektedir.

(c) tipi makina, Iskoç bir rahip olan Robert Stirling tarafından ilk olarak 1816 yılında yapıldı (Şekil 1.3.) ve bir taş ocağından su pompalamak amacı ile kullanıldı [2]. Kardeşi James ile çalışan Stirling daha sonraki yıllarda yaptığı modellerde, özgül gücü arttırmaya yarayan bir kompresör ve sızıntıyı azaltan çift tesirli bir güç pistonu çalışmalarını yoğunlaştırmıştır. Bunu gerçekleştirmek için ayrı silindirlerde iki itme pistonu gerekmiş; buda ölü hacmi artırıp özgül gücü azaltmıştır[2].



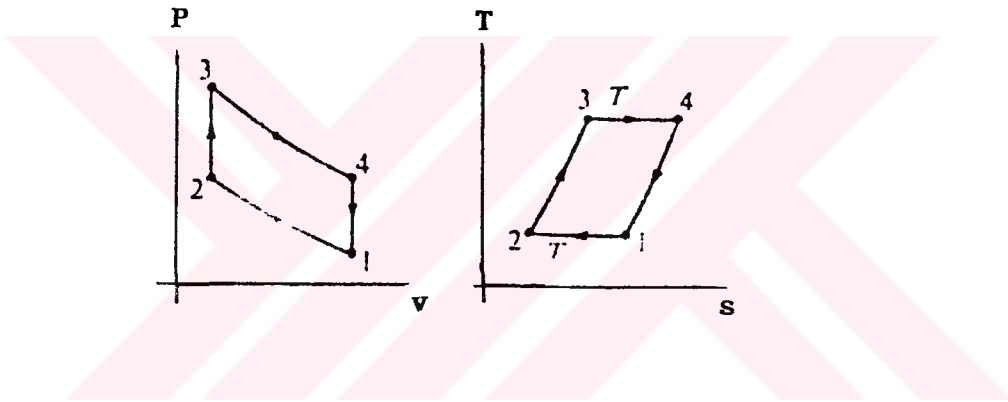
Şekil.1.3. c Tipi Makina

İçten yanmalı motorlar mükemmel hale getirildikten, bütün fayda ve zararları ortaya çıktıktan sonra Stirling makinası çeşitli laboratuvarlarda titiz bir incelemeye tabi tutuldu. Bu incelemeye yol açan faktörlerden birtanesi de, ikinci dünya savaşından önce pillerin güç bulunduğu veya bulunmadığı

bölgelerde radyo ve benzeri cihazları çalıştıracak ve yakacağı kolay bulunabilecek, ısı ile çalışan bir güç kaynağı gereksinimi idi[2].

## 1.2. Stirling Makinasının Çevrimi

Robert Stirling tarafından tasarlanan, dıştan ısı vermeli Stirling çevrimine ait P-v ve T-s diyagramları Şekil.1.4'de görülmektedir [3].



Şekil.1.4. Stirling Çevrimine Ait P-v ve T-s Diyagramları.

Çevrim iki sabit sıcaklık iki sabit hacim durum değişikliğinden ibarettir. Kapalı bir silindir içerisinde bulunan çalışma maddesine ısı, özel bir ısı dönüştürücü (ısıtıcı) tarafından verilir. Isının dışarıya atılması ise, diğer bir ısı dönüştürücüden (soğutucudan) olmaktadır. Makina için gerekli olan ısı silindirin dışındaki özel bir yanma odasından sağlanmakta ve burada kesintisiz bir yanma sürdürülmektedir.

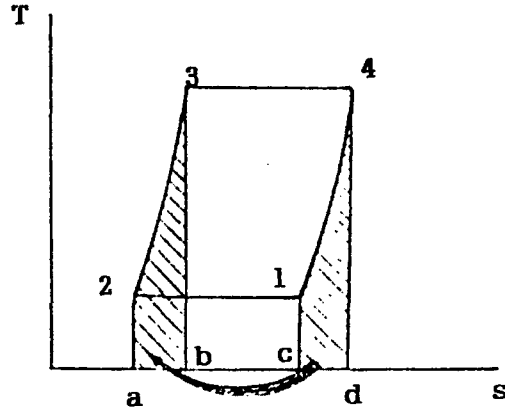
Stirling çevriminde; önce  $P_3$  basıncında  $T_h$  sıcak kaynak sıcaklığındaki çalışma maddesine 3-4 sabit sıcaklık durum değişimi boyunca ısı verilerek  $P_4$  basıncına kadar genişlemesi sağlanır. Daha sonra 4-1 sabit hacim durum değişimi boyunca sistemden ısı alındığından çalışma maddesinin basıncı  $P_1$ 'e, sıcaklığıda  $T_c$ 'ye kadar düşer. Bu işlemin ardından, sistemden ısı çekimi sürdürülerek çalışma maddesinin 1-2 sabit sıcaklık durum değişimi boyunca  $P_2$  basıncına kadar sıkıştırılması sağlanmaktadır. Son olarakta 2-3 sabit hacim durum değişimi boyunca sisteme ısı verilerek, çalışma maddesinin  $T_h$  sıcak kaynak sıcaklığına yükselmesi sağlanır [4].

### 1.2.1. Regeneratörlü Stirling Çevrimi

Basit Stirling çevrimine bir regeneratör (ısı dönüştürücü) eklenmesi durumunda; regeneratör 4-1 sabit hacim durum değişimi boyunca dışarıya atılan ısının tamamının depo ederek, 2-3 sabit hacim durum değişimi boyunca aynen sisteme iade eder. Bu işlem teorik olarak sonsuz sayıda ve belirli alanda, yada belirli sayıda ve sonsuz alanda ısı eşanjörü kullanarak gerçekleştirilebilir [4].

Şekil. 1. 5.'de regeneratörlü Stirling çevriminin T-s diyagramı görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi, a-2-3-b-a alanı, c-1-4-d-c alanı ve bunların karşılığı olan ısılar da birbirine eşit olacaktır[4].





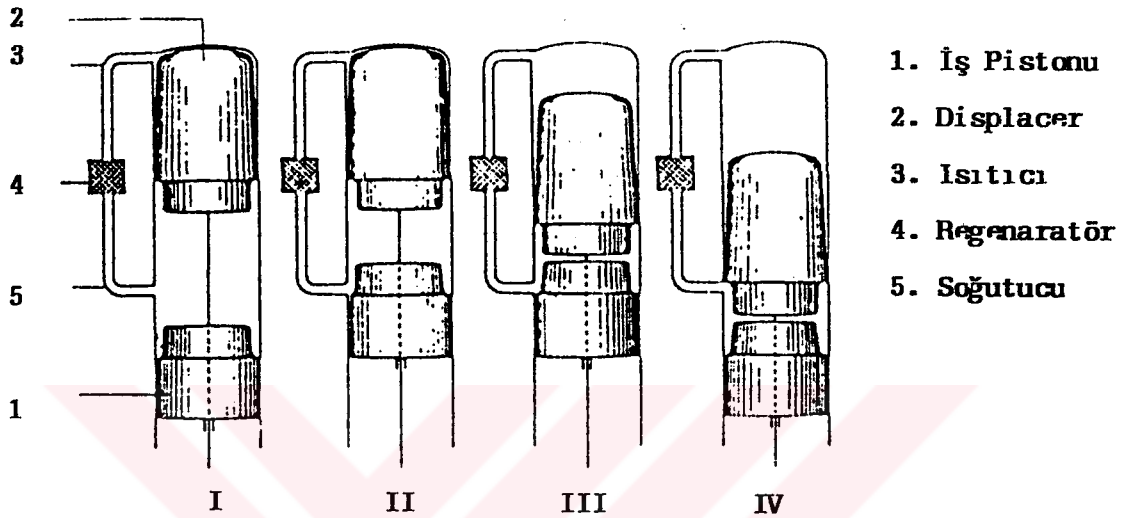
Şekil.1.5.Regeneratörlü Stirling Çevrimine Ait T-s Diyagramı

### 1.3. Stirling Makinasının Çalışma Prensibi

Stirling makinasının çalışma prensibi şematik olarak Şekil. 1. 6.'da gösterilmiştir. Motorun esas kısmı iki bölümden meydana gelmiş boşluk oluşturur. Displacerin (yerdeğiştirme pistonu) üst kısmındaki birinci bölme (sıcak bölge) sürekli olarak ısıtılan sıcak gazlar için genişleme boşluğunu; iş yapan piston ile displacer arasındaki ikinci boşluk da (soğuk bölge), sıkıştırma boşluğunu oluşturur.

İş yapan piston A.Ö.N.'da iken çalışma maddesinin büyük bir kısmı alt bölmededir (I. durum). iş yapan piston yukarıya doğru hareket ettiğinde sıkıştırma işlemi başlar (II. durum) Displacer aşağıya doğru hareket edince, gazlar alt bölmeden yukarıya doğru itilirler (III. durum). Bu geçiş sırasında gazlar ilk önce 5 numaralı soğutucuda soğutulduktan sonra, 4 numaralı regeneratörden geçerken daha önceki çevrimden depo

edilen ısı tarafından ısıtılır. Son olarakta, yakıtın yanması sonucu ısıtıcıdan elde edilen ısı yardımıyla ısıtılan gazlar iş pistonunu ve displaceri aşağıya doğru iterler (IV. durum), ve çevrim bu şekilde tamamlanmış olur [5].

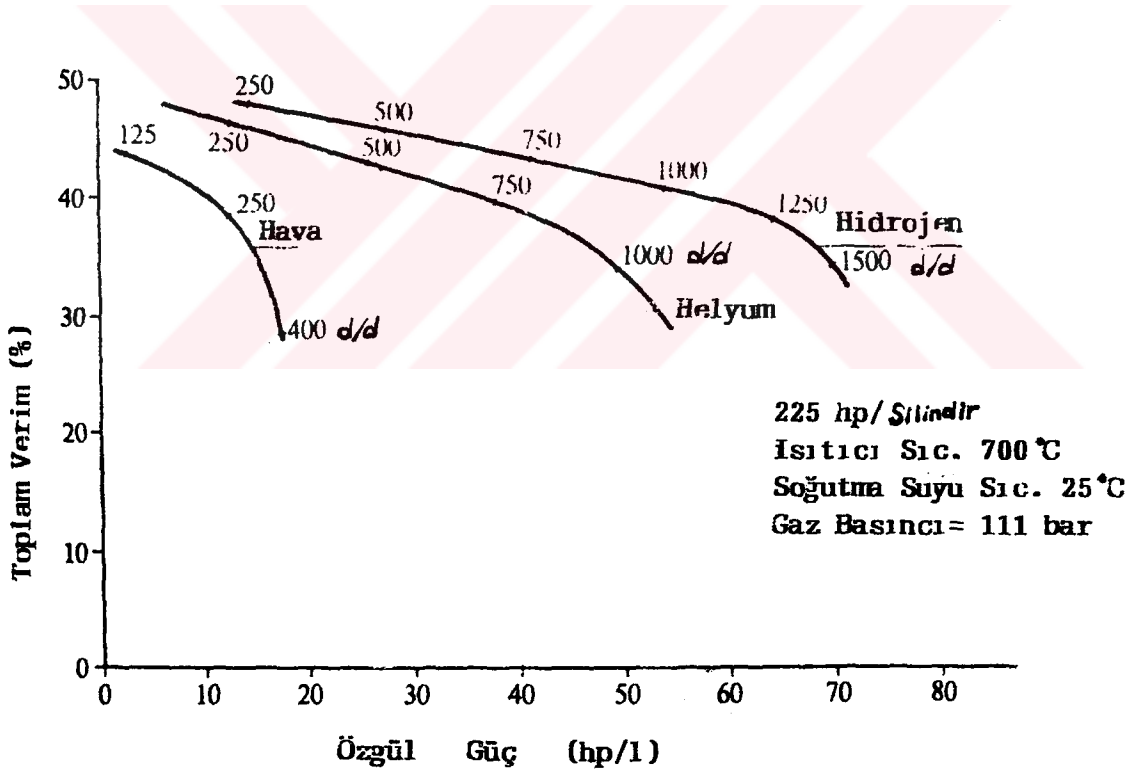


Şekil.1.6.Stirling Makinasının Şematik Olarak Çalışma Prensibi

#### 1.4. Stirling Makinasında Kullanılan Çalışma Maddesi

Stirling makinası uygulamalarında şimdiye kadar, yapılan denemelerde genellikle üç değişik çalışma maddesi kullanılmıştır. Bunlar hava, helyum ve hidrojen dir. Helyum ve hidrojen termofiziksel özelliklerinden dolayı yüksek oranda ısı transferine imkan vermektedirler ve hidrodinamik akış kayıpları azdır. Aynı şartlarda hidrojen helyumdan daha iyi motor performansı sağlar. Bunun yanında hidrojen ve helyum kullanımı birçok sızdırmazlık problemini ortaya çıkarır. Bu sebeple makinenin yapımı daha komplike hale gelir ve maliyeti artar.

Sistemde çalışma maddesi olarak hava kullanıldığı zaman, hidrojen ve helyumda olduğu gibi yüksek oranda ısı transferinin gerçekleşmesi mümkün değildir. Çalışma maddesi hava olan Stirling makinaları diğerlerine göre daha ağır, daha büyük, özgül güç çıkışı daha az ve termik verimide daha düşüktür. Bu özelliğinden dolayı genel amaçlı otomotiv uygulamaları için, çalışma maddesi hava olan Stirling makinaları İ.Y.M. lar ile rekabet edemezler [5]. Hava, hidrojen ve helyumla çalışan Stirling makinasının performans karakteristikleri Şekil 1.7' de verilmiştir [3].



Şekil.1.7. Çalışma Maddesi Olarak Hava, Helyum ve Hidrojen Kullanılan Stirling Makinasının Performansının Karşılaştırılması

Hava, hidrojen ve helyumun bazı termofiziksel özellikleri Tablo. 1. 1'de verilmiştir [5].

Tablo.1.1.Hava, Hidrojen ve Helyuma Ait Bazı Termofiziksel Özellikler

AKIŞKAN	ÖZELLİĞİ	SICAKLIK ( °K )		
		250	500	1000
Hava 1 bar M=28.9	Cp (kJ/kg°K )	1.003	1.029	1.141
	$\rho \cdot 10^3$ (kg/m <sup>3</sup> )	1.421	0.076	0.353
	$\mu \cdot 10^6$ (kg/ms )	15.99	26.70	41.53
	$k \cdot 10^6$ (kW/m°K )	22.27	40.41	67.54
Hidrojen 1 bar M=2	Cp (kJ/kg°K )	14.05	14.51	14.98
	$\rho \cdot 10^3$ (kg/m <sup>3</sup> )	0.098	0.0491	0.024
	$\mu \cdot 10^6$ (kg/ms )	7.92	12.64	20.13
	$k \cdot 10^6$ (kW/m°K )	156.1	271.8	452.2
Helyum 1 bar M=4	Cp (kJ/kg°K )	5.19	5.19	5.19
	$\rho \cdot 10^3$ (kg/m <sup>3</sup> )	0.195	0.097	0.048
	$\mu \cdot 10^6$ (kg/ms )	18.40	29.30	46.70
	$k \cdot 10^6$ (kW/m°K )	134.0	202.6	-----

## 1.5. Stirling Makinasının Kullanılma İmkanları

Stirling makinasının kullanılma imkanlarını ayrıntılı olarak açıklayabilmek için makinanın avantaj ve dezavantajlarını incelemek gerekmektedir.

### 1.5.1. Avantajları

Stirling makinasının avantajlı karakteristikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Stirling makinaları gürültüsüz ve titreşimsiz çalışır. Yanma sürekli olduğu için gürültü yok denecek kadar azdır. Basınç değişimlerinin sinüzoidal olması, emme ve eksoz subaplarının olmayışı gürültüyü azaltıcı etken olmuştur. Yanmadaki hava fazlalık katsayısının yüksekliği, karbonmonoksit ve yanmamış hidrokarbonların minimum düzeyde olmasını sağlamaktadır [6].

Ayrıca konsantre güneş enerjisi, radioizotop ve nükleer reaktör ısısı, termal ısı kaynakları gibi içerisinde depo edilmiş ısı enerjisi bulunan kaynakları kullanabilir[2]. Böylece, havayı kirletici etkisi minimum düzeyde olmaktadır.

Geliştirilmiş durumdaki makinalar özgül güçte otto motorlarından üstün olabilir, kısmi yükleme ekonomisi durumunda diesel motorları ile eşdeğer olabilirler. Diğer içten yanmalı motorlar ile kıyasladığımızda termik verim daha yüksektir [2]. Ayrıca yanma sistemi ve yanma odası motorun çalışma şekli ile ilgili olmadan, optimum yanma meydana gelebilecek şekilde dizayn edilebildiğinde ilk hareket kolaylığı sağlamaktadır (yanma motor çalışmaya başlamadan gerçekleştiği için) [6]. Yanma ürünlerinin hareketli parçalarla temasının olmayışı, yıpranmanın minimum düzeyde olmasını, dolayısıyla uzun ömür ve bakım aralığı kolaylığı sağlamaktadır. Yağlama gereksiniminin düşük seviyede olması yağ sarfiyatının azalmasına, yağ değişim aralığının uzamasını sağlamaktadır[2].

Ayrıca rhombic düzeninin uygulanması, atalet kuvvetlerinin dengesini sağlamış ve elastik bağlantının kullanılması sonucu döndürme momentlerindeki değişimler dengelenerek diğer pistonlu makinalara göre ( Çift tesirli buhar makinaları hariç ) moment değişiminin daha iyi olması sağlanmıştır [2].

Stirling makinaları son derece basit oyuncak ebadında yapılabildiği gibi, her silindir başına binlerce beygir gücünde büyük boyutlarda da yapılabilir.

### **1.5.2. Dezavantajları**

Stirling makinalarının başlıca dezavantajları:

Stirling makinalarının araştırma ve geliştirme çalışmaları henüz seri imalata geçecek seviyede olmadığı için seri olarak imali yapılamamaktadır. İmalatı yapılan makinaların hemen hemen hepsi araştırma safhasında olduğundan yapıları komplike ve maliyetleri yüksektir. Basit tiplerinin daha sade bir yapıda ve ucuz olmasına rağmen kullanımı pratik değildir. imalatı gerçekleşen makinaların miktarına bağlı olarak fiat indirimi olsa dahi geliştirilen Stirling makinalarının beygir gücü başına maliyeti, diesel motorlarındaki beygir gücü başına düşen maliyetinden daha aşağı düşürülmesi imkansız görülmektedir[5].

Anlatılan bu dezavantajların yanısıra materyal, dizayn, ısı iletim metodları ve sızdırmazlık yönünden sorunlar mevcuttur. Ayrıca soğutma için kullanılan radyatör, bir diesel motoru radyatörünün iki veya üç katı olabilir. Makina dizaynındaki diğer sorunlardan bazıları ise; geri besleme bölgesinde yüksek sıcaklıktan alçak sıcaklığa geçişte meydana gelen ısı gerilmeler, azalan çoğalan gerilmelerden dolayı yorulma aksaklıkları, motor balansı ve yataklama gibi sorunlardır[2].

### **1.6. Stirling Makinasının Uygulama Alanları**

Stirling makinalarının anlatılan müsbet ve menfi özellikleri incelendiği zaman, müsbet özelliklerinin menfi özelliklerine göre daha baskın çıktığı görülmektedir (maliyet hariç). Bu makinaların teknolojik gelişmesi seri üretim yapılacak seviyeye geldiği takdirde, dünyada giderek artan enerji sorununa ve çevre kirlenmesine çözüm olabilecektir. Bu sebeple yaklaşık olarak yılda 2000 bilim adamı bu konu üzerine çalışmaktadır [2].

Ekonomik yönden (birim güç başına maliyet) Stirling makinalarının diesel motorları ile başa çıkabilmesi şüpheli olmasına rağmen, araştırma safhasında olsa bile Stirling makinasının uygulandığı alanlardan bazıları aşağıda sıralanmıştır [2], [3], [5], [6], [7], [8].

- Otomotiv motorları,
- Deniz tipi motorlar,

- Denizaltı güç sistemleri,
- Basınç makinaları,
- Soğutma makinaları,
- Isı pompası,
- iklimlendirme makinaları,
- Elektrik jenaratörleri,
- Yardımcı güç motorları,
- Nükleer güç istasyonları,
- Suni kalp,
- Fırın aksesuarları,
- Hidrolik pompalar,
- Askeri sistemler,
- Uzay araçları.

Stirling makinasının uygulama alanlarının daha fazla olmasına rağmen yazılan alanlar yeterli görülmüştür.



## BÖLÜM II

### LİTERATÜR ÖZETİ

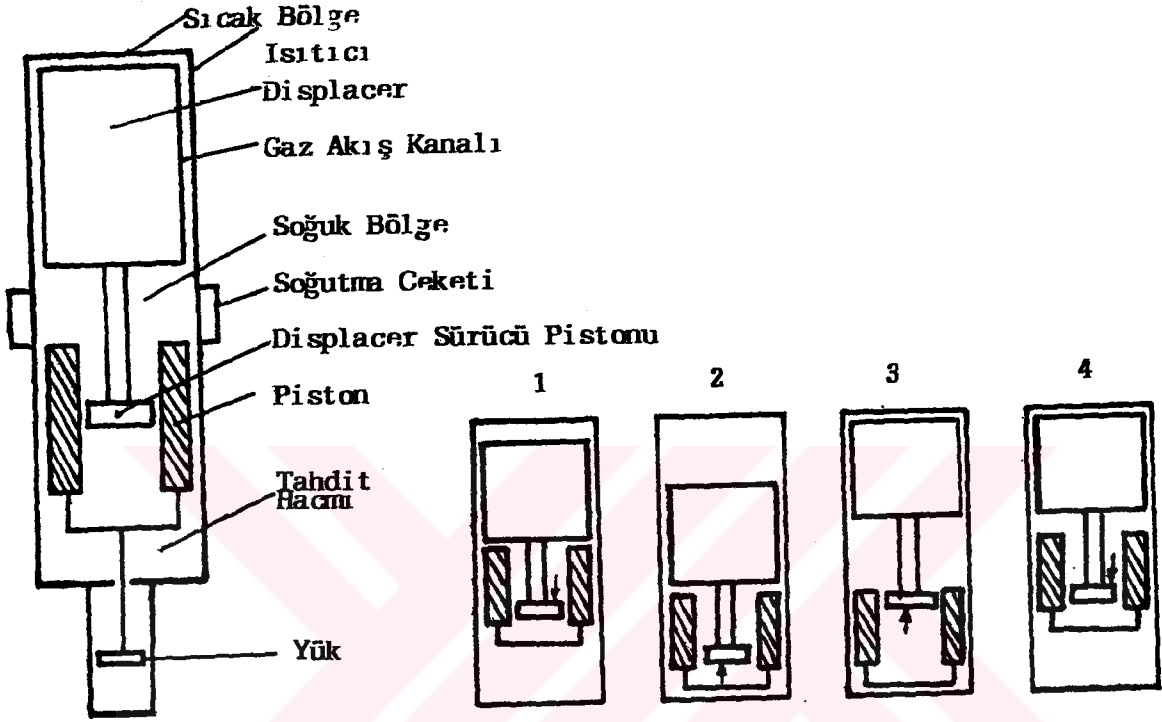
Stirling makinaları üzerine Robert Stirling' den bu yana çok değişik araştırmalar yapılmıştır. Yapılan bu araştırmalar her seferinde değişik konfigürasyonları ortaya çıkarmıştır. Fakat bu araştırmalar, Stirling makinalarını prototipler hariç ekonomik olarak kullanma safhasına getirmeye yeterli gelmemiştir. Bu bölümde Stirling makinaları üzerine yapılan araştırmaların bazılarından bahsedilecektir.

Beale, Holmes, Levis, ve Cheng Ohio Üniversitesinde serbest silindirli Stirling makinaları üzerine araştırmalarda bulunmuşlardır [9]. Yapılan çalışmanın başlangıcında serbest silindirli makina dizaynı amaçlanmış ve bu başarıldıktan sonra değişik dizaynlar denemiştir.

Bundan sonra yapılan bu dizaynlardan kısaca bahsedilecektir.

şekil.2.1. serbest pistonlu Stirling makinasının çalışma prensibini vermektedir. Bu sistem termal tahrikli bir osilatör olup bir ısı kaynağı ile ısı yutucu ortam arasındaki ısı akışından mekanik enerji üretmektedir. evrim klasik Stirling evrimi olup, iki sabit sıcaklıkta ve iki sabit hacimde ısı alışverişi

sürecinden oluşur. Displacer hareketi mekanik bağlantı ile değil, gaz kuvvetleri ile sağlanmıştır.



Şekil.2.1. Serbest Pistonlu Stirling Makinasının Şematik Resmi

1-2.Piston çalışma maddesini genişletir; displacer pistonun üzerindedir.

2-3.Sıçratma bölgesindeki basınç iç basınçdan daha büyüktür, basınç kuvveti displaceri sıcak bölgeye doğru hareket ettirir, çalışma akışkanı soğuk bölgeye dolar, basınç düşer.

3-4.Sıçratma bölgesi basıncının tesiri ile piston soğuk bölge içerisine itilir.

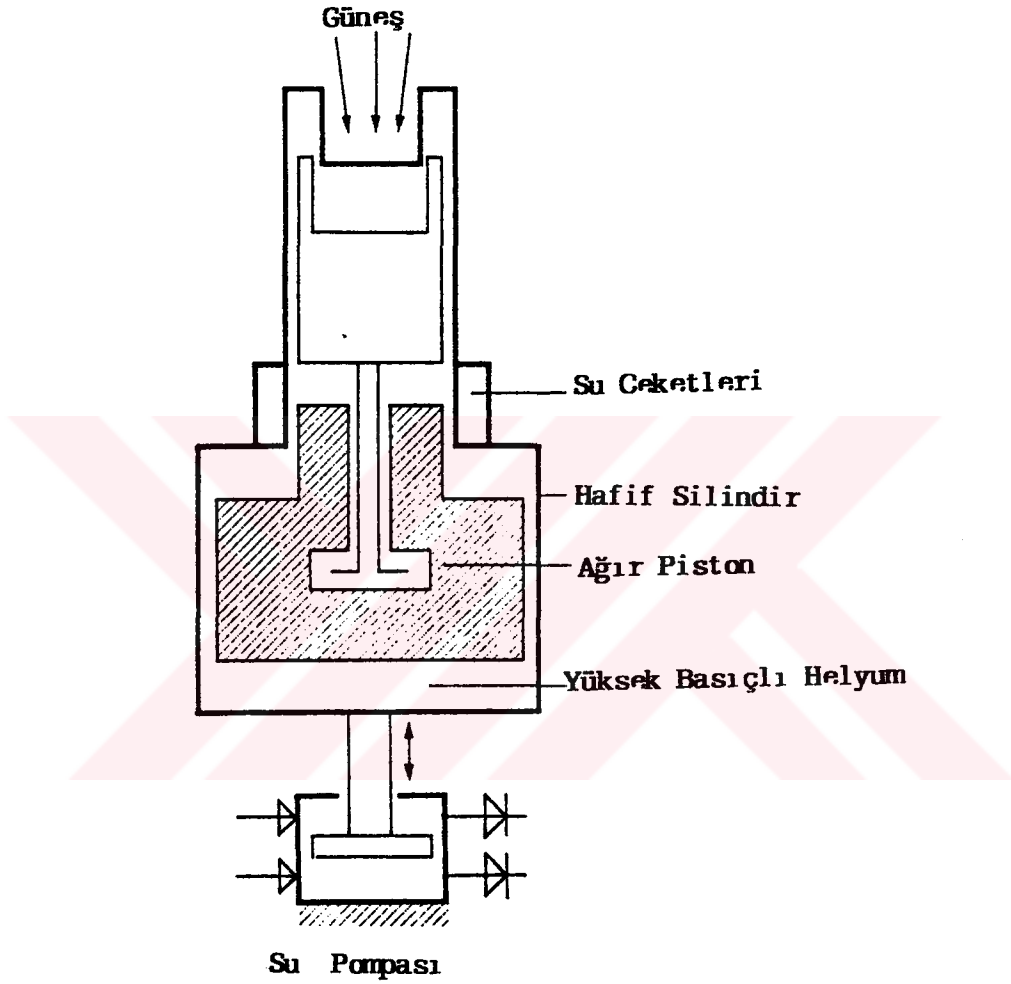
4-1.Sıcak bölgedeki basınç soğuk bölgedeki basınçtan daha büyük olduğu için displacer soğuk bölgeye doğru hareket eder.

Yapılan makinanın denemelerinde termal kondüktivitesinin yüksek olması sebebi ile genellikle helyum kullanılmıştır. Bunun yanısıra, bazı deneylerde sıcak kaynak sıcaklıklarında çevrim başına fazla iş vereceği ümidi ile helyum-su aerosolü kullanılmıştır. Bunun doğruluğu ısbatlanmıştır fakat, soğuk duvar yüzeyinde yoğuşmadan dolayı devamlı sıvı fazının bulunması ve bununda karbonik korozyona sebep olması makinada arıza meydana getirmiştir.

Araştırmalar esnasında bazı mekanik problemler de ortaya çıkmıştır. Özellikle piston sürtünmesi ve bunun sonucu olarak sekman problemi bunların başındadır. Düşük basınç oranlarında çalışan sekmanların, yüksek basınçta piston sürtünmesine sebep olması ve kullanılan teflon sekmanların aşını parçacıkları oluşturması en büyük problemlerdendir. Buda pistonun stabl pozisyonda çalışmasına engel olmuştur. Serbest pistonlu Stirling makinalarında yan yüzeylere gelen yüklerin azlığı nedeni ile, pistonun stabl durmasını sağlamak ve bahsi geçen problemin giderilmesi için aliminyum piston kullanılmıştır. Bu şekilde imal edilen makina yaklaşık 120 saat çalışmış ve aynı arızalarla çalışması son bulmuştur.

Aynı çalışmanın benzeri olarak Şekil. 2. 2.'de görülen makinaya bir güneş kollektörü ilave edilerek çalıştırılmıştır. Makina, tamamen yalıtılmış bir silindirin ağır bir pistonu tepki

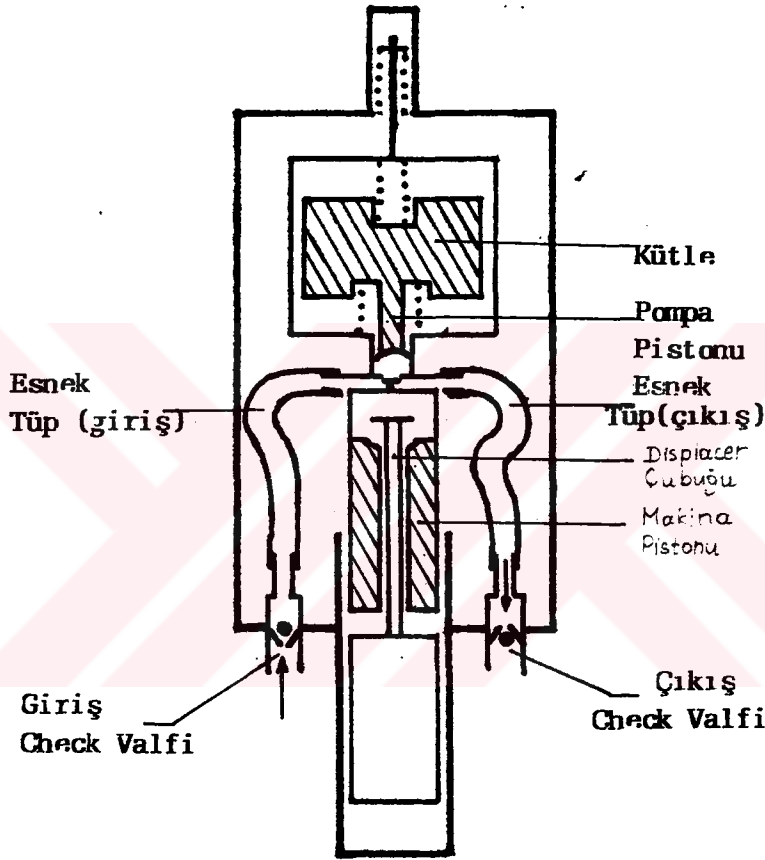
göstermesi ile silindirden güç alarak çalışır. Bu şekilde çalışan makina ile, güneş enerjisi kullanılarak 6 Watt civarında bir güçle su pompalamıştır. Bu makinalardan daha sonra ayrıca bahsedilecektir.



Şekil. 2. 2. Serbest Silindirli Güneş Kolektörlü Su Pompası

Sözü edilen bu makina kendi kendine çalışmaya başladığı ve uzun zaman çalıştığı halde bahsi geçen problemlerden dolayı, makina üzerindeki araştırmalar ileride geliştirilmek üzere bırakılmıştır.

Şekil.2.3.'de çalışmalardan başka bir örnek verilmiştir. Su pompası olarak kullanılan bu makinada pompalama işi, makina displacer çubuğunun ağır bir kütleyle çarpması sonucu bu ağır kütlelerin ataletinden faydalanarak yapılmıştır. Bu sebepten dolayı atalet pompası olarak isimlendirilmiştir.



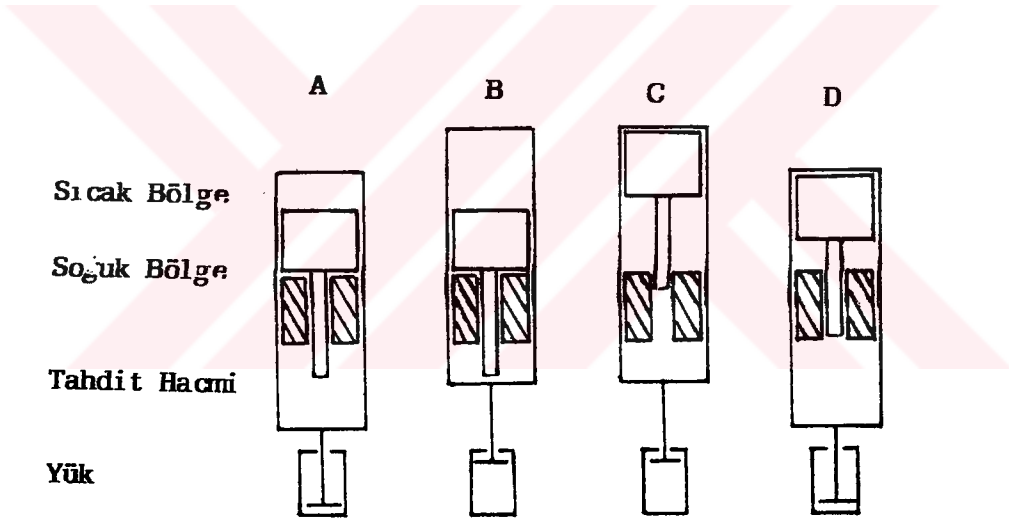
Şekil.2.3. Atalet Pompası

W.Beale ve arkadaşları [10] serbest pistonlu Stirling makinasını serbest silindirli biçimde tasarlayarak bir ısı motoru olarak kullanmışlar ve sulama suyunu güneş enerjisi ile pompalamayı hedef almışlardır.

Bu tip makinalar üzerine daha önce Beale çalışmış [11], [9] ve arkadaşları ile yapmış olduğu ortak çalışma ise yapılan makinayı daha geliştirmek amacını taşımaktadır.

Şekil.2.4. serbest silindirli makinanın şematik resmini göstermektedir.

Ağır bir piston gaz basınçlarına karşı haraketsiz, kalırken kütlesi daha hafif displacer çalışma hacmi ile tahdit hacmi arasındaki diferansiyel basınç farkı etkisi altında hareket eder. Silindirde aynı diferansiyel basınç farkı etkisi altında hareket ederek harici bir yüklemeye karşı iş yapar.

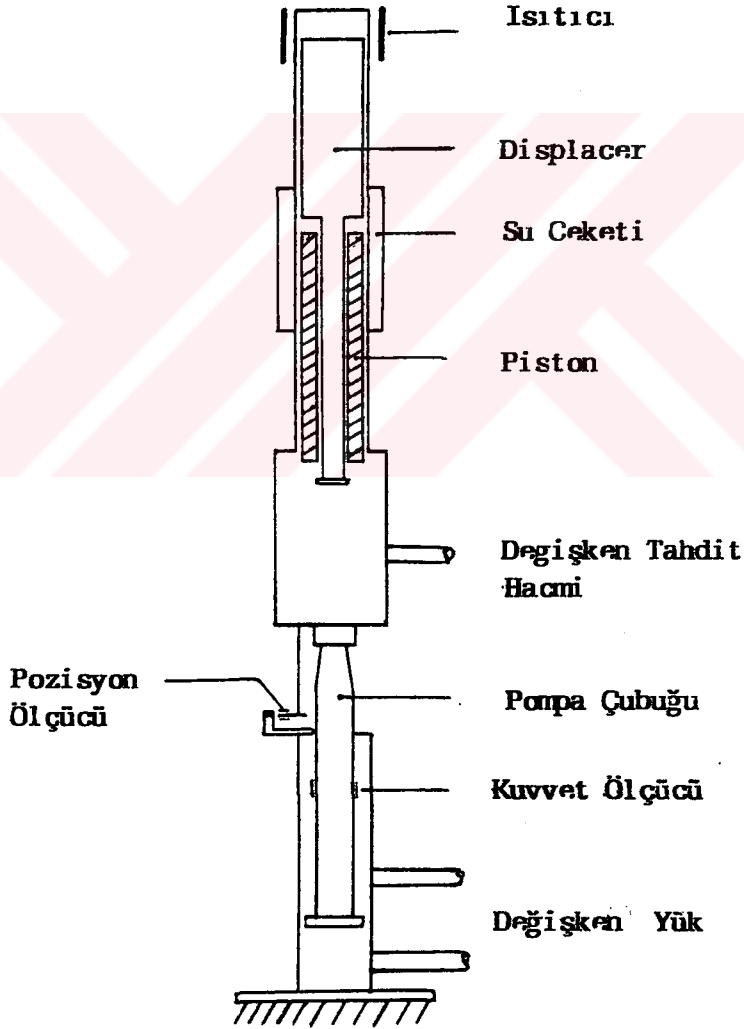


Şekil. 2. 4. Serbest Silindirli Makina

Basınçlı ve kapalı bölge bir bütün olarak hareket ettiğinden tamamen izole edilmiş kapalı bölgede bulunan gaz iş verir. Böylece yüksek basınçlı hafif gazın kullanımına imkan sağlayarak hareketli bir sızdırmazlık tertibatına ihtiyaç olmadan ve sistem cidarlarını tahrip etmeden iş elde edilebilmektedir.

Bununla birlikte herhangi bir dahili yükleme ve dişli v.s bağlantısı olmadığından, yağlamanın gereksiz olacağını, makina maliyetinin azalarak uzun ömürlü olacağını savunmuşlardır[10].

Prototipi yapılan 5 cm çapındaki serbest silindirli makina (Şekil.2.5.) test tezgahına bağlanarak değişik ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümlerden elde edilen sonuçlar Tablo.2.1.'de verilmiştir.

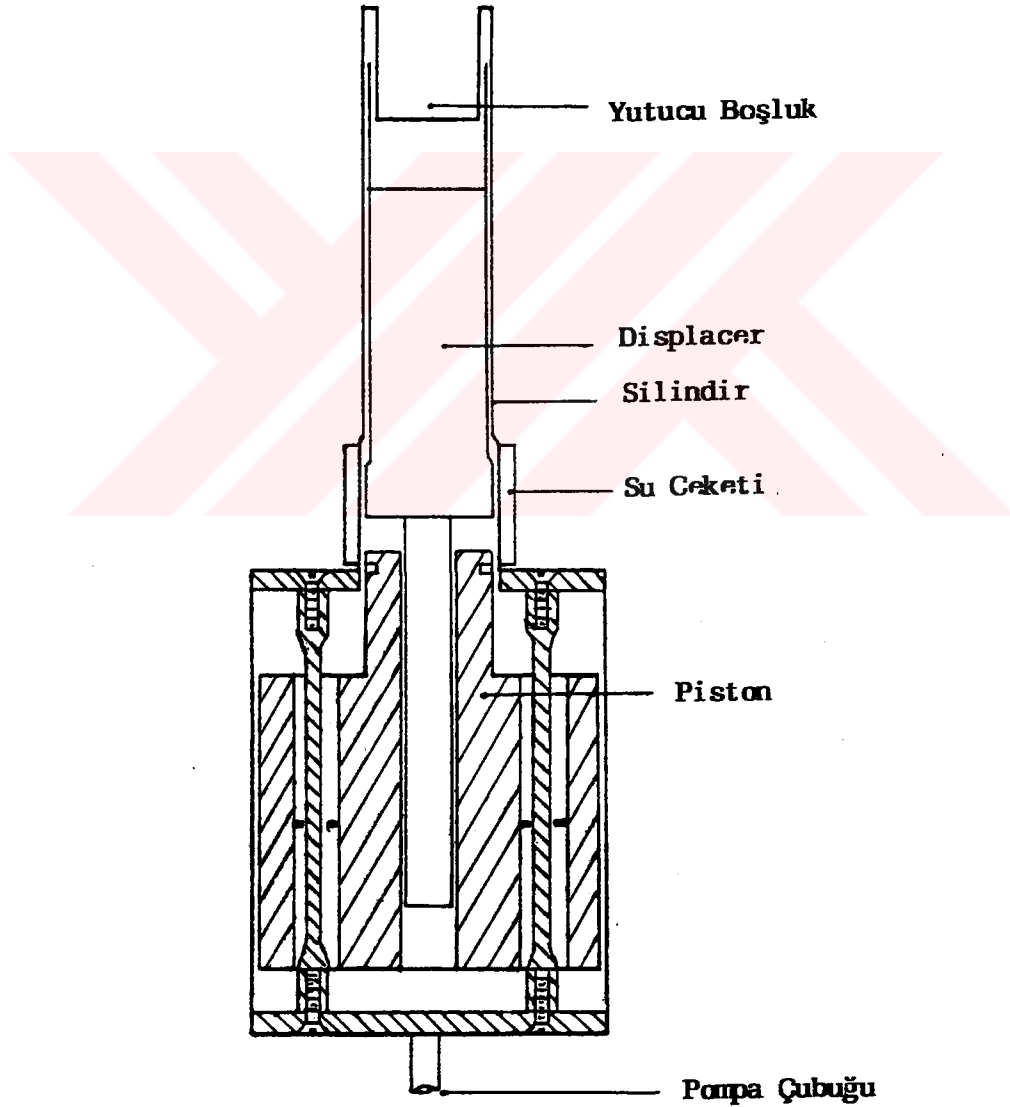


Şekil.2.5. 5cm Makina

Tablo. 2. 1. 5 cm Makinanın Test Sonuçları

Test Basıncı	Çalışma Gazı	Isıtıcı Gücü	Kapak Sıcaklığı	Güç Çıktısı	Termik Verim
500 kPa	Helyum	400 watt	873 °K	74 watt	% 18

Yapılan bu prototip deneme safhasında iken pistonun aşağı yukarı hareketinde faz bozulması sonucu gaz kaçaklarının oluşması makinanın bozulmasına sebep olmuştur.



Şekil.2.6. 3.8 cm Makina



Şekil.2.6.' da 3,8 cm çapında başka bir dizayn gösterilmektedir.

Burada iki taraftan yay zorlamalı büyükce bir piston kullanılmış olup faz bozulması problemini azaltmak amaçlanmıştır. Displacer çubuğunun hareketi sınırlandırılmamış, yalnız genişletilmiş bir etekle yavaşlatılmış ve absorbe edilen güneş enerjisi kullanılarak çalışma sağlanmıştır.

3,8 cm makinaya ısı kaynağı olarak 0,3 m<sup>2</sup> Fresnel merceği ilave edilmiş ve 5 cm makinaya göre daha tutarlı çalışmıştır. Makina değişik ısı değerlerinde saatlerce teste tabi tutulmuş, toplanan bilgiler karmaşık ve tutarsız bulunmuştur. Tablo.2.2. test sonuçlarını özetlemektedir.

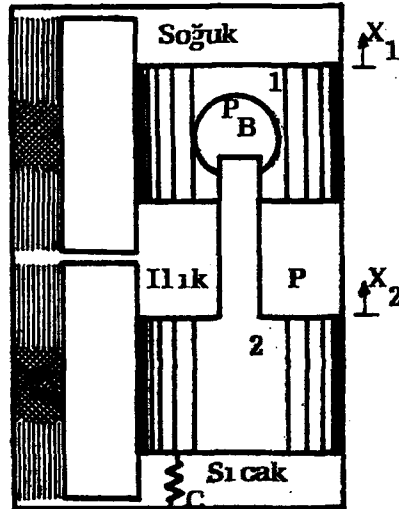
Tablo.2.2. 3.8 cm Makinanın Test Sonuçları

Çalışma No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Isı Kaynağı		*			*	*	*	*	*	*	*
Elektrik											
Gaz			*	*							
Güneş	*										
Güç Girdisi (W)	185				175	214		115	175	190	214
Güç Çıktısı(W)	11	12	20	8	7	5.3	11.3	2.7	1.7	1.2	
Sistem Verimi (%)	6.5				4	2.6	5.3	2.7	1.0		0.6
Sil. Başı Sic. (°C)	460	440	700		550	530	520	500		520	

Schulz ve Thomas, CFC'lerin green house (sera) etkisinden dolayı ozon tabakasını inceltmesi olayından yola çıkarak, Vuilleumier tipi makina üzerinde çalışmışlardır [12]. Bu makina serbest silindirli Stirling makinaları gibi hidrojen ve helyum ile çalışacak biçimde dizayn edilmiştir.

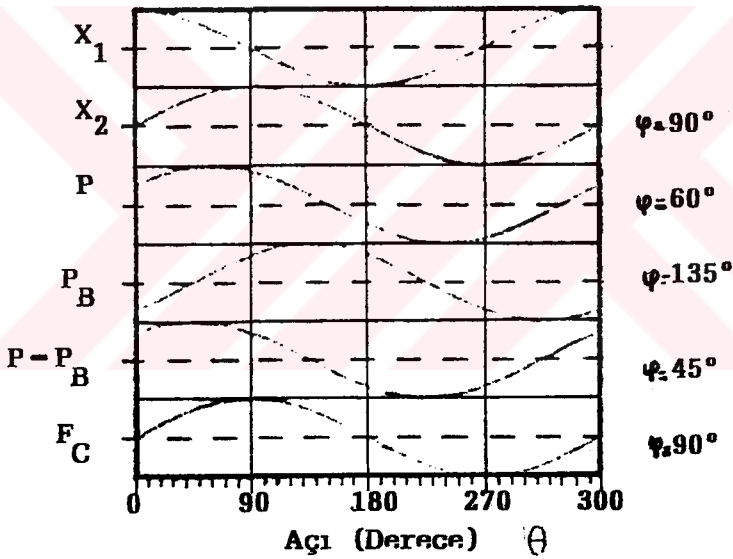
Şekil.2.7.' de görülen makina; gaz yaylanması ile irtibatlandırılan bir soğuk ve bir sıcak displacerden meydana gelmektedir. Sıcak displacere takılı olan C yayı kılıfa olan irtibatı sağlamaktadır. Makinanın çalışması sönümsüz bir titreşim sistemine benzerdir.

Gaz yayı basıncı mekanik kompresyon ve displacer sapının sebep olduğu genişlemeye bağlıdır. Çalışma boşluğu basıncı ise termal genişleme sonucu displacer pozisyonunun bir fonksiyonudur (eğer bütün çalışma boşluğu sabit kabul edilirse).



Şekil. 2. 7. Vuilleumeier Makinası

Şekil. 2. 7.' de görüldüğü gibi eğer her iki pistonu merkezde ise  $P-P_B$  sıfırdır ve bu durumda C yayı uzamış vaziyettedir. Soğuk displacer Ü.Ö.N.'ya götürüldüğünde ( $\theta=0$ , Şekil. 2. 8.) gaz ılık silindirden soğuk silindire aktarılır ve termal kompresyon yüzünden basınç yükselir. Tampon boşluk hacmi artar ve böylece gaz yayı basıncı ( $P_B$ ) küçülür.  $P-P_B$  basınç farkının doğması ile sonuçlanan bu basınç farkı soğuk displaceri aşağı sıcak displaceri yukarı doğru iter. Gaz yayı basıncı  $\theta=90^\circ$  oluncaya kadar artmaya devam eder. Çünkü, displacer çubuğu tampon bölgeye girecektir.



Şekil.2.8. Displacer Haraketine Bağlı Olarak Basınç ve Yay Kuvveti Değişimleri

Umumi hallerde soğuk ve ılık boşluklardaki sıcaklık farkı, sıcak ve ılık boşluklardaki farktan daha küçüktür. Sıcak displacer tarafından yapılan termal kompresyon soğuk displacer tarafından yapılandır daha büyüktür; böylece basınç artar. Yaklaşık olarak  $60^\circ\text{C}$  civarında maximum ulaşır (sıcaklığa

bağlı olarak). Basınç farkı  $P-P_B$  ise maximum değerine  $P'$  den önce ulaşır.  $\theta=90^\circ$  de basınç farkı hala pozitif olup soğuk displaceri aşağı, sıcak displaceri dahada yukarı zorlamaktadır. Bu noktada displaceri durdurmak ve hareketin yönünü değiştirmek için, ikinci. yaylanmaya, yani C yayına ihtiyaç vardır. Bu yay basınç farkını yener ve displaceri yavaşlatır.

Yeni çeyrek çevrim boyunca her iki displacer aşağı doğru hareket eder,  $\theta=135^\circ$  de maximum gaz yayı basıncı oluşturulacağından, minimum açıklık aralığına ulaşılır. Çalışma basıncı  $P$  azalır, çünkü displacerin aşağı doğru hareketi termal genleşmeye sebep olur. Mütakabil basınç farkı (düşen basınç)  $P-P_B$  sifira ulaşınca kadar gittikçe küçülür ve zıt yönlü olarak tekrar artar. Displacere etki eden bileşke kuvvet hareketini yavaşlatır.  $\theta=180^\circ$  olduğunda displacer durur ve tekrar yukarı doğru yola çıkar. Yay kuvvetleri ise tam tersine bütün çeyrek çevrim boyunca sıcak displaceri aşağı doğru hızlandırır.

İkinci çevrim boyunca aynı basınç farkı ve yay kuvvetleri oluşur, tek fark işaretlerin zıt olmasıdır.

Salınım için gerekli şart; esneme kuvveti, atalet kuvvetleri ve dış kuvvetlerin ( yay kuvveti ) dengede olmasıdır.

Vuilleumier makinasının bir prototipi yapılarak makinanın çalışabileceği isbatlanmış, fakat dizayn parametrelerin seçimi esnasında yüksek performansa ulaşmak

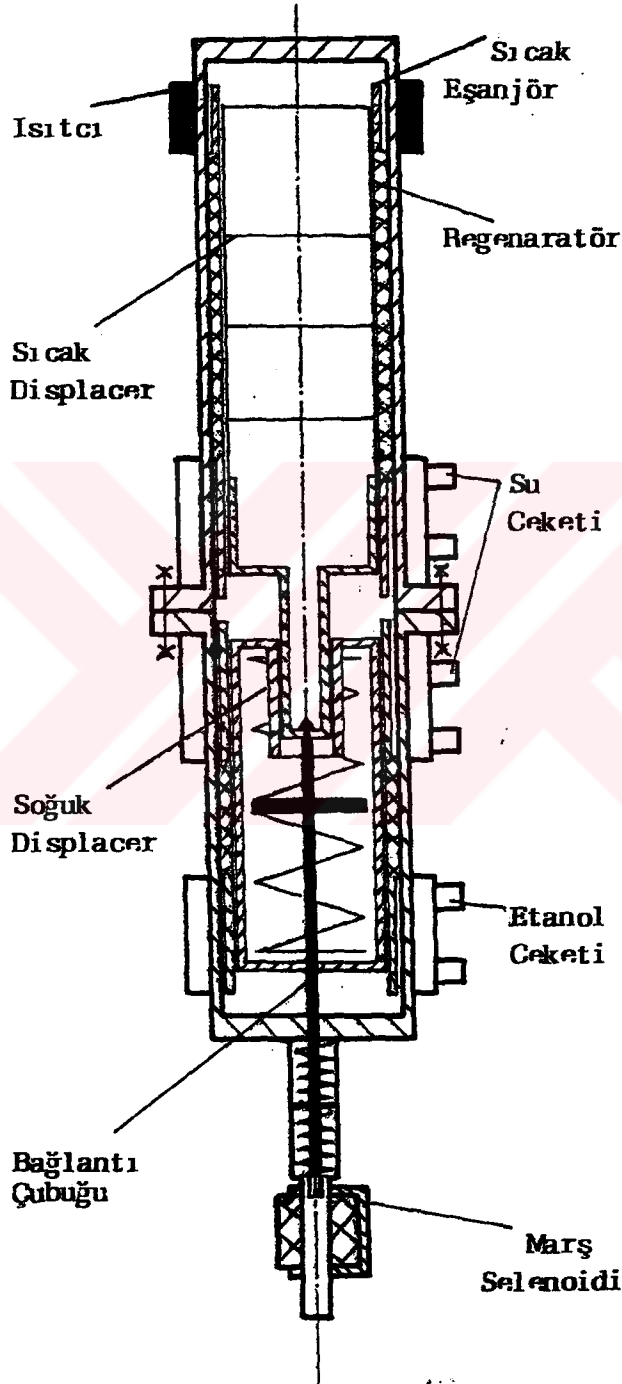
amaçlanmamıştır. Tablo.2.3. temel dizayn parametrelerini göstermektedir.

Tablo.2.3. Prototipin Temel Dizayn Parametreleri

Çalışma Gazı	Helyum
Sıcak Bölge Sıcaklığı (Duvar)	500°C
Ilık “ “ (Su Devri)	20°C
Soğuk “ “ (Soğutma Devri)	0°C
Ana Basınç	2.0 MPa
Silindir Çapı	66 mm
Dinamik Parametreler	
Displacer Stroku (Herbiri)	30 mm
Frekans	10 Hz
Displacer Fazı	90°

Şekil.2.9. prototipin dizayn özelliklerini göstermektedir. İki silindirden meydana gelen basınç kabı O-ring ile contalandırılmış ve beraber flanşlandırılmıştır. Isı ise basınç kabının dışındaki bir elektrikli ısıtıcı ile verilmektedir. Makinanın soğuk kısmında etanol, ılık kısmında ise su devirdaimi mevcuttur. Her bir silindir bir ısı eşanjörü-regeneratörü, ısı eşanjör ünitesi ve bir displacerden meydana gelmiştir. Displacerin sıfır durumunu devam ettirmek ve gaz yayı atalet kuvvetlerini azaltmak için bir çift mekanik yay ile gaz yayı desteklenmiştir. Displacer muhafazasının birleşme aralığını uygun tutmak için, bir çift yay ilave edilerek ana basınç kabının dış kısmına bir ayırıcı kap ile sabitlenmiştir. Bağlantı, basınç kabı ve soğuk displacer içinden geçen bir çubuk tarafından yapılır. Çubuğun bir ucu dışarıda bırakılarak, demir göbeğe

bağlanmış olup bu demir göbek üzerindeki selenoid sargılar ile makinanın çalışması sağlanmıştır.



Şekil. 2. 9. Vuilleumier Makinası Prototip Dizaynı

Dahili ısı eşanjörleri, aynı merkezli halkalar ile dış kısmındaki gaz akış kanallarından oluşur. Silindir çeperleri ile yeterli termal teması devam ettirmek için silindir içine sıkıştırılmıştır.

Regenaratörler 0,0025 mm kalınlığında paslanmaz çelik yaprakların ince bir tüpün etrafına sarılmasıyla yapılmıştır. Tabakaların birbirine temasını önlemek için ikinci bir katman kullanılmıştır. Isı taşınım katsayısının yüksek olması sebebiyle, bu makinalarda regenaratör diğer makinalara oranla daha uzundur

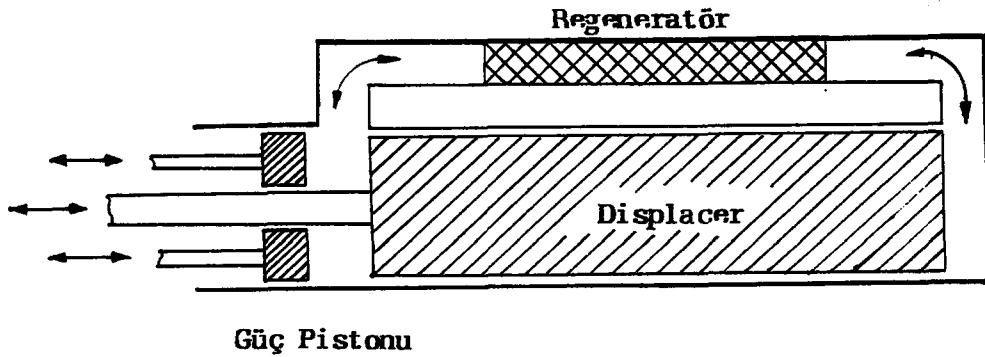
Kayıp ısı transferini azaltmak için, soğuk displacerin silindirik parçaları ve soğuk regenaratör POM (Polyoxmethylen)' den yapılmıştır Bu plastik gereği gibi işlenebilir ve metallere yapıştırılırsa, özellikle bu tip uygulamalar için elverişli bir malzeme olur. Düşük sıcaklıklarda esneyebilmesi ve düşük sürtünme katsayısına sahip olması sebebiyle, displacer çubuğunun hareketli yüzeylerinde de kullanılmıştır. Displacerin ılık ısı eşanjörleri içindeki hareketi ise grafit yataklarla desteklenmiştir.

Silindirler paslanmaz çelikten yapılmış olup, ılık ve soğuk ısı eşanjörlerinin yüzey alanları su ve etanol devirdaimi için yapılan soğutma ceketleri ile kaplıdır. Makinanın yaklaşık ağırlığı ise elektrikli ısıtıcı hariç 20 kg. dır.

Teorik ve uygulamalı olarak Vuilleumier makinasının yapılabilirliği denenmiş, soğutma kapasitesi ve displacer strokunun tahmin edilenden daha yüksek olduğu, kayıpların azaltılmadığı söylenmiştir.

Yapılan testler, ortalama basınç ve sıcak ortam düzeyinin performansa etki ettiğini, böylece bu parametrelerin makinaryı kontrolde kullanılabileceğini göstermiş ve ılık seviye sıcaklık göstergesini sabit tutma isteğinin tartışmaya açık olduğu vurgulanmıştır. Bunlardan başka, soğuk ortam sıcaklığının dinamik parametreler üzerindeki küçük etkisi yorum kapsamına alınmamıştır.

Philips laboratuvarlarında yapılan araştırmalar sonucu dizayn edilen Stirling makinası araçlar üzerinde denenmiştir[13]. Bu makina tek pistonlu displacerli tipten olup temel dizayn Şekil. 2. 10' daki gibidir.

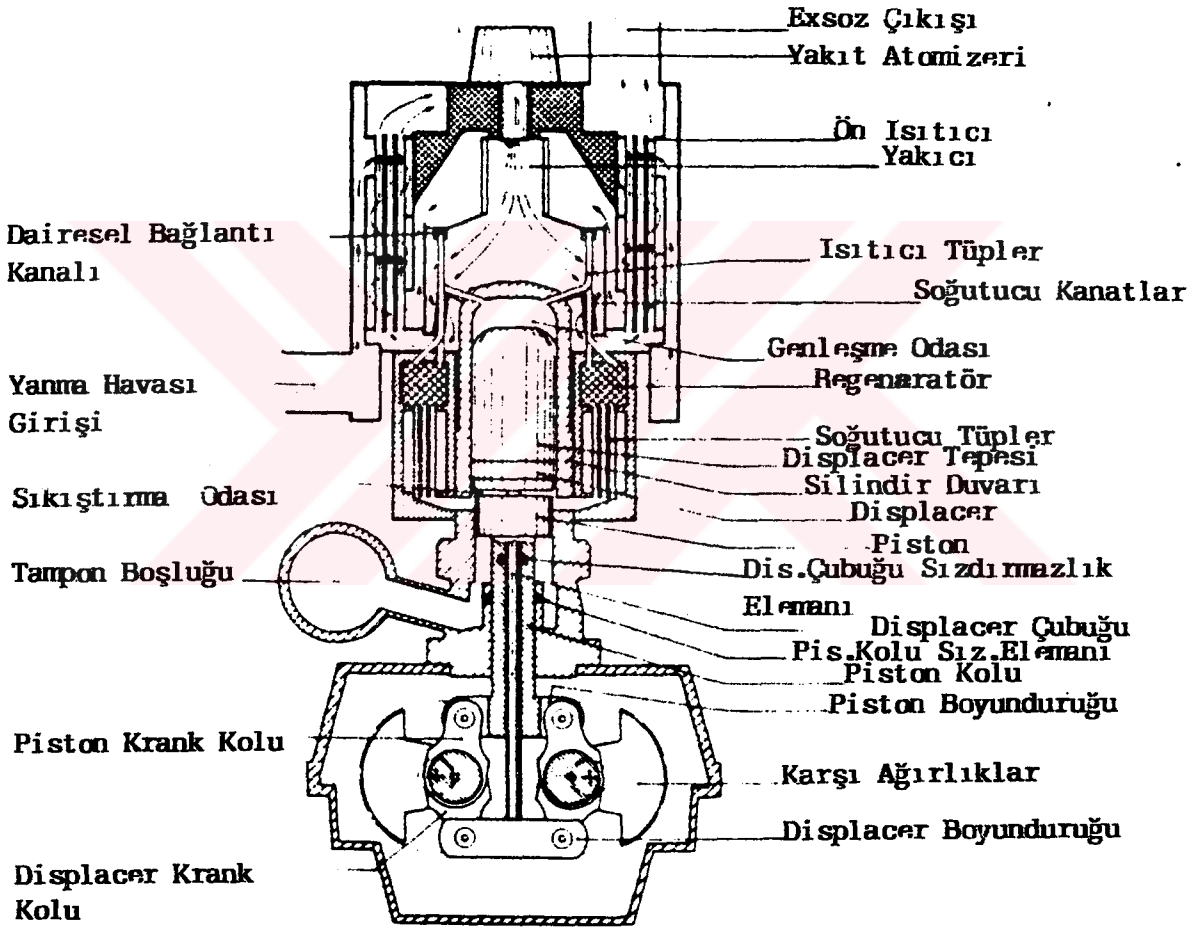


Şekil.2.10. Displacerli ve Tek Pistonlu Stirling Makinası

Makinanın ısıtma kısmı yeterince genişletilerek sıcak yanma gazları ile çalışma maddesi olan hidrojen arasında yeterli



ısı alışverişi sağlanmıştır. Regenarator gözenekli malzemedan yapılmış olup, kısa bir silindir içine yerleştirilmiştir. Sıcak ısı kaynağı ile soğuk ısı kaynağı arasındaki sıcaklık dönüşümü tamamen bu kısa silindir içerisinde meydana gelmektedir. Piston ve displacer kuyruğu çevresi dolgu tipi teflon halka ile donatılarak silindir ile olan ara yüzeyde sızıntı önlenmiştir (Şekil.2.11.).



Şekil.2.11. Rhombic Drive Makinanin Şematik Resmi

Yapılan deneyler sonucu, her 1000 saate ortalama 40-60 mikronluk aşınma görülmüş, böylece tam yükte 10.000

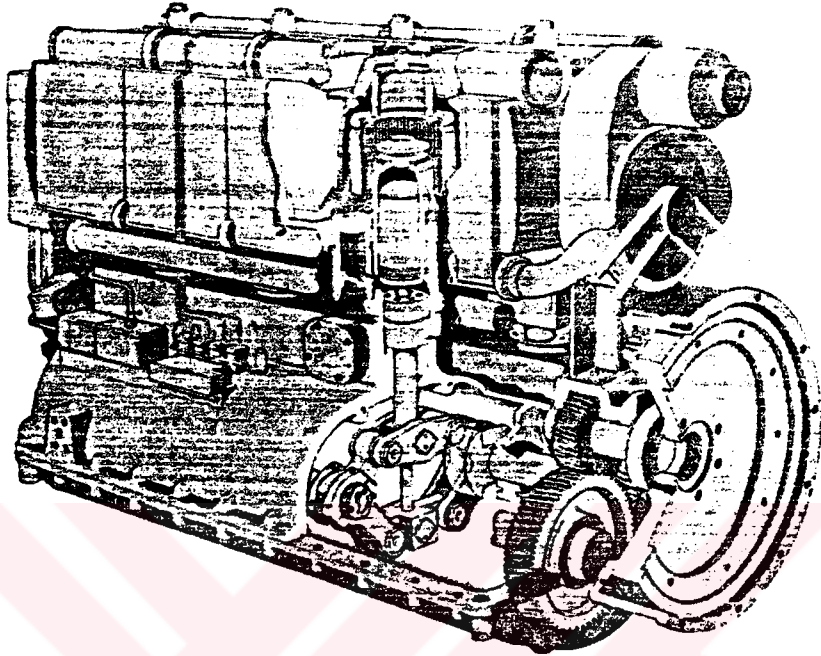
saatlik çalışma sağlanacağı söylenmiştir. Protiplerin bazıları yaklaşık 5 yıl çalışarak, teflon sekmanların 10.000 saat dayanabileceğini ısbatlamayı amaçlamaktadır. Tablo. 2. 4. bu motora ait verileri göstermektedir.

Tablo.2.4. Dört Silindirli Stirling Makinası Karakteristikleri

UzunlukxGenişlikxYükseklik	1244.6 mmx520.7 mm x1092.2 mm
Kuru Ağırlık	765.5 kg
Maximum Çıktı	157 kW, 3300d/d (220 atm'de Hidrojen)
Maximum Çıktı Ef. Verim	% 26.2
Maximum Ef. Verim	% 33 - 1300 d/d
Çap x Strok	77.47 mm x 49.78 mm
Özgül Birim Güç Ağırlığı	3.6 kg /HP

Krank muhafazası içindeki rhombic drive, piston ve displacer hareketini yöneterek Stirling motorunun bu tipine sessiz ve düzenli çalışma imkanı sağlamıştır. Dört silindirli bu tip bir motor bir otobüse yerleştirilmiştir. Şekil 2. 12' de otobüse yerleştirilip denemesi yapılan motor görülmektedir

Makinanın ısı kaynağı olan yakıcı alt sistem; hava üfleyici, yakıt pompası, atomizer, buji ve yakıt hattı üzerindeki algılayıcılardan meydana gelen bir bütündür. Makinadaki tam yanma değişik sıvı yakıtlarla sağlanmış ve çok az kirlenme etkisi gözlenmiştir. Giriş gazları içerisine bir miktar hava karıştırılarak alev sıcaklığı düşürülmüş ve böylece yüksek sıcaklıkta oluşan NOx miktarı azaltılmıştır.



Şekil.2.12. Deneme Amacı İle Otobüse Yerleştirilen Stirling Motoru

Tablo.2.5. Philips motorunun exsoz emisyonlarını, diğer içten yanmalı otomotiv motorlarındaki exsoz emisyonlarına göre U.S. Hükümetinin 1972 yılındaki standartlarına bağlı olarak mukayese etmektedir.

Tablo. 2 .5. Exoz Emisyonları (gram/mil)

	1963	Stirling Motoru	1975/1976
Hidrokarbon (CxHy)	5.7	0.1	0.41
Karbonmonoksit (CO)	87.2	0.31	3.4
Azotoksit (NOx)	5.8	0.1756	0.4

Mukayese etmek amacı ile tablo. 2.6.'da değişik değerlerdeki emisyon standartları verilmiştir. Tablo. 2.5.'deki değerlerle kıyaslandığı zaman Stirling makinasının emisyon yönünden daha avantajlı olduğu görülmektedir [14].

Tablo. 2. 6. Çeşitli Değerlerdeki Emisyon Standartları (gram/mil)

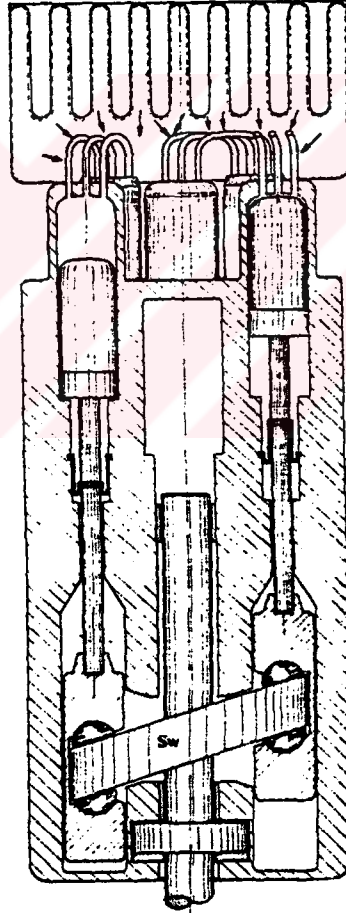
Yıllar	49 Devlet			California		
	HC	CO	NOx	HC	CO	NOx
1975	1.5	15.0	3.1	0.9	9.0	2.0
1977	1.5	15.0	2.0	0.41	9.0	1.5
1980	0.41	7.0	2.0	0.41	9.0	1.0
1981	0.14	3.4	1.0	0.41	7.0	0.7
1983	0.41	3.4	1.0	0.41	7.0	0.7

Motorlu araçlar için ikinci zorunlu alt sistem ise güç kontrolüdür. Philips makinasında güç, değişken motor basıncı ile kontrol edilmiş ve güç, yüksek basınç deposundan gaz ilavesi ile artırılarak tam yük basıncına 0.1-0.2 saniye içinde erişilmiştir. Güç, makina ve tahdit hacmi arasındaki bir tahliye valfinin açılması ile azaltılmıştır. Yardımcı bir kompresörün tahdit hacmi içerisindeki gazı yüksek basınçta depoya pompalaması ile 30 saniyeden az bir zaman içerisinde, içerisindeki basınca göre uygun bir düşük güç seviyesine geçer ve valf kapanır.

Anlatılan alt sisteme ilaveten, elektrikli starter, jeneratör, ateşleyici, basınçlı yağlama ve soğutma sistemi vardır. Ayrıca, aynı gücü üreten bir diesel motorunun 2.5 katı bir radyötöre ihtiyaç vardır.

Philips araştırma laboratuvarlarında geliştirilen Stirling makinasının değişik bir biçimi olan makina ise swash-plate krank düzenine sahip olanıdır[13]. Swash-plate krank sayesinde bütün pistonlar halka biçiminde bir blok içine yataklandırılmış ve hepsininde tek bir yakıcıdan ısı alması sağlanmıştır.

Swash-plate makinaya dolaylı yoldan ısı verildiği zaman daha düşük spesifik ağırlık elde edileceği söylenmiştir. Rhombic drive makinalara göre parça sayısı azaltılarak dahada basitleştirilmiştir. Şekil.2.13.'de böyle bir makina görülmektedir.

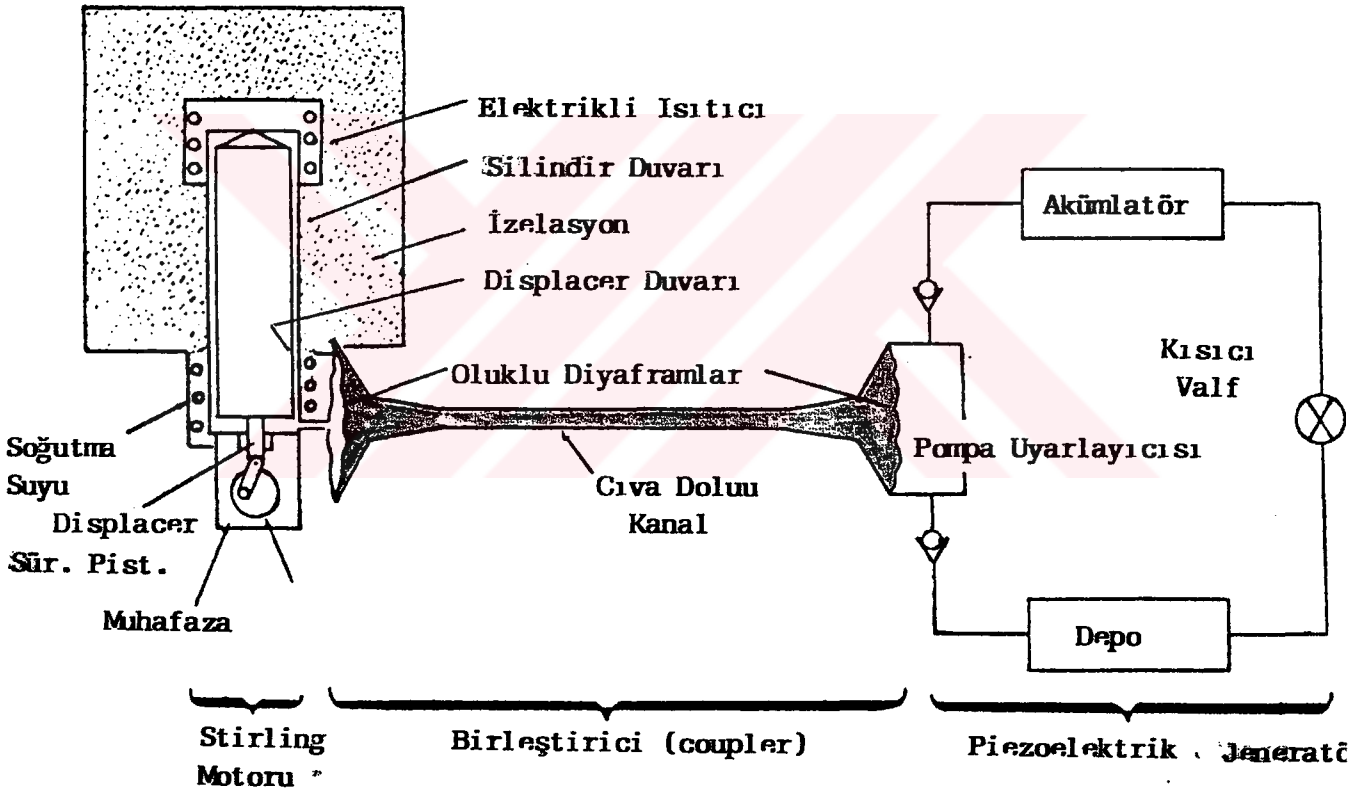


Şekil.2.13. Swash-Plate Krank Düzenli Stirling Makinası

General Motor Firması Stirling makinası kullanarak bir jenaratör düzeni geliştirmiş ve bu düzen U.S. Silahlı Hareket

Ekipmanları Araştırma ve Geliştirme Merkezi (USMERDC) tarafından desteklenmiştir [13]. Bu programın amacı sesiz bir elektrikli güç kaynağını ucuz maliyetle gerçekleştirmek olup; sessizlik sağlanmış fakat maliyet çok yüksek olmuştur.

Şekil.2.14.'de bu makinanın şematik resmini göstermekte olup, Tablo.2.7.'de başlıca özellikleri verilmektedir.



Şekil.2.14. Piezoelektrik Jeneratör

Çalışmalar sırasında, Stirling makinası ile tahrik edilen piezoelektrik jenaratörün temel sistemleri oluşturulmuş, gürültü ve aşıntıyı azaltmak maksadı ile serbest pistonlu Stirling makinasından mümkün olduğu kadar çok parça çıkarılmıştır. Piezoelektrik jenaratöründe, bir piezoelektrik materyalin her saniyede bir çok kez basınç uygulayıp sebest bırakması ile elektrik elde edilmiştir. Makinadaki coupler enerjiyi rezonant titreşimi ile depo ederek ve kuvvet arttırıcı olarak çalışmaktadır.

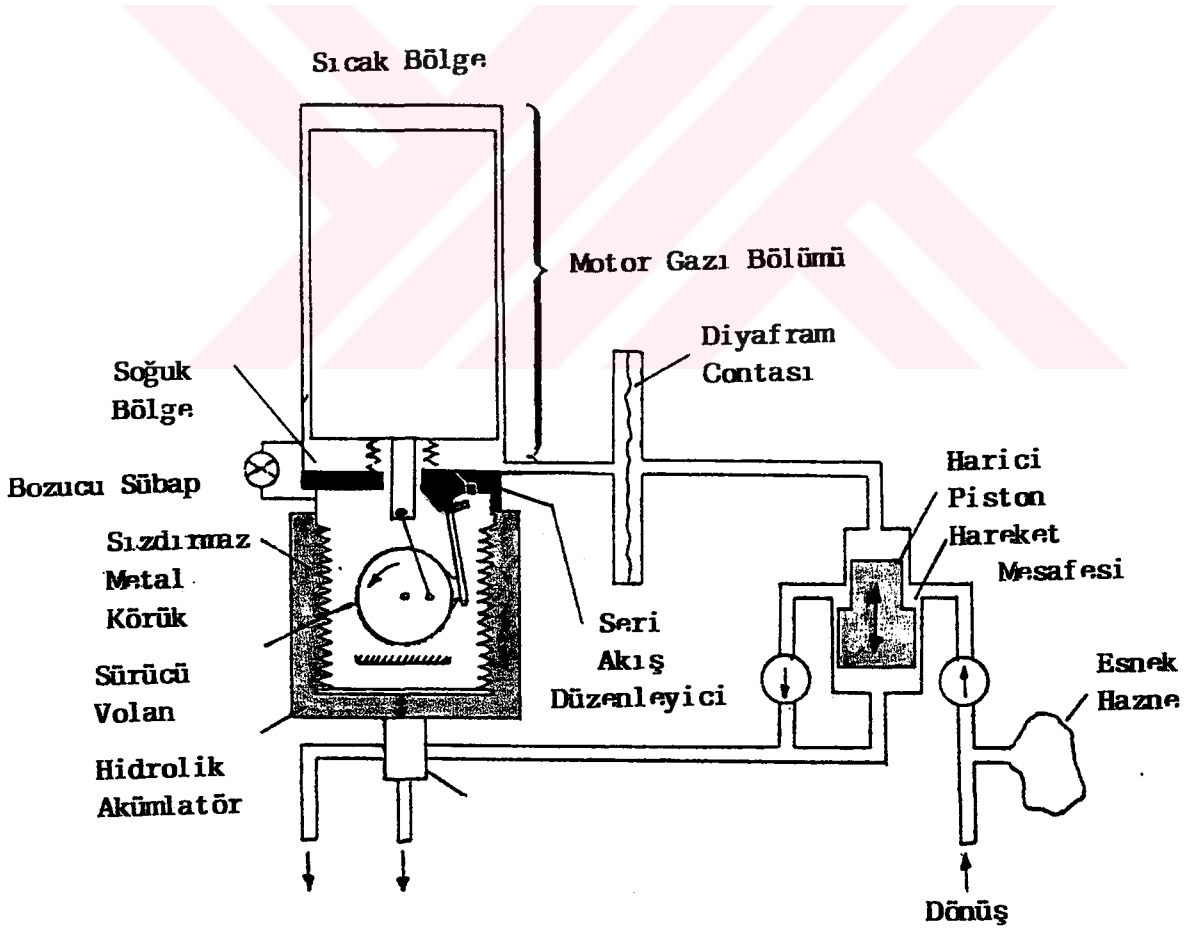
Tablo. 2.7. Piezo Elektrik Stirling Makinasının Başlıca Özellikleri.

PARAMETRELER	ÖZELLİKLER
Silindir Çapı	35.57 mm
Displacer İle Silindir Arası Boşluk	0.12 mm
Displacer Stroku	2.28 mm
Silindir Uzunluğu	181.88 mm
Isıtıcı Uzunluğu	38.60 mm
Regenaratör Uzunluğu	93.21 mm
Soğutucu Uzunluğu	50.03 mm
Krank Mili Yarıçapı	6.35 mm
Silindir Duvar Kalınlığı	2.54 mm
Displacer Duvar Kalınlığı	1.32 mm
Coupler Süpürme Hacmi	3506 mm <sup>3</sup>
Çalışma Frekansı	60 Hz
Isı Kaynağı Sıcaklığı	650 °C
Isı Atılan Ortamın Sıcaklığı	40 °C
Azami Çevrim Basıncı	17.996 MPa
Asgari Çevrim Basıncı	7.861 MPa
Isı Girdisi	2717 watt
Güç Çıktısı	540 watt
Hesaplanan Verim	% 24.8

Donald W. Douglas Laboratuvarlarında yapılan bir araştırmada Stirling makinası kanı pompalayan suni kalp olarak

tasarlanmıştır [13]. Tasarlanan bu makinada displacer hareketi kontrol edilerek hareketin devamı bir krank, volan mekanizması ile sağlanmıştır. Makina boşluğu içindeki gazı mekanik bir eşitleme valfi ile kontrol eder. Gaz basıncı bir diyafram conta vasıtası ile hidrolik değiştirici ve akümülatöre uygulanır. Normal kalp atışı sırasında max. 12 çevrim yapmaktadır.

Testi yapılan sistem 52 watt ısı girdisi ile, dakikada 6 litre suyu 130 mmHg basınçta fizyolojik bir devirdaim yapıyormuş gibi pompalamıştır. Şekil. 2.15' de bu makinanın şematik resmi görülmektedir.

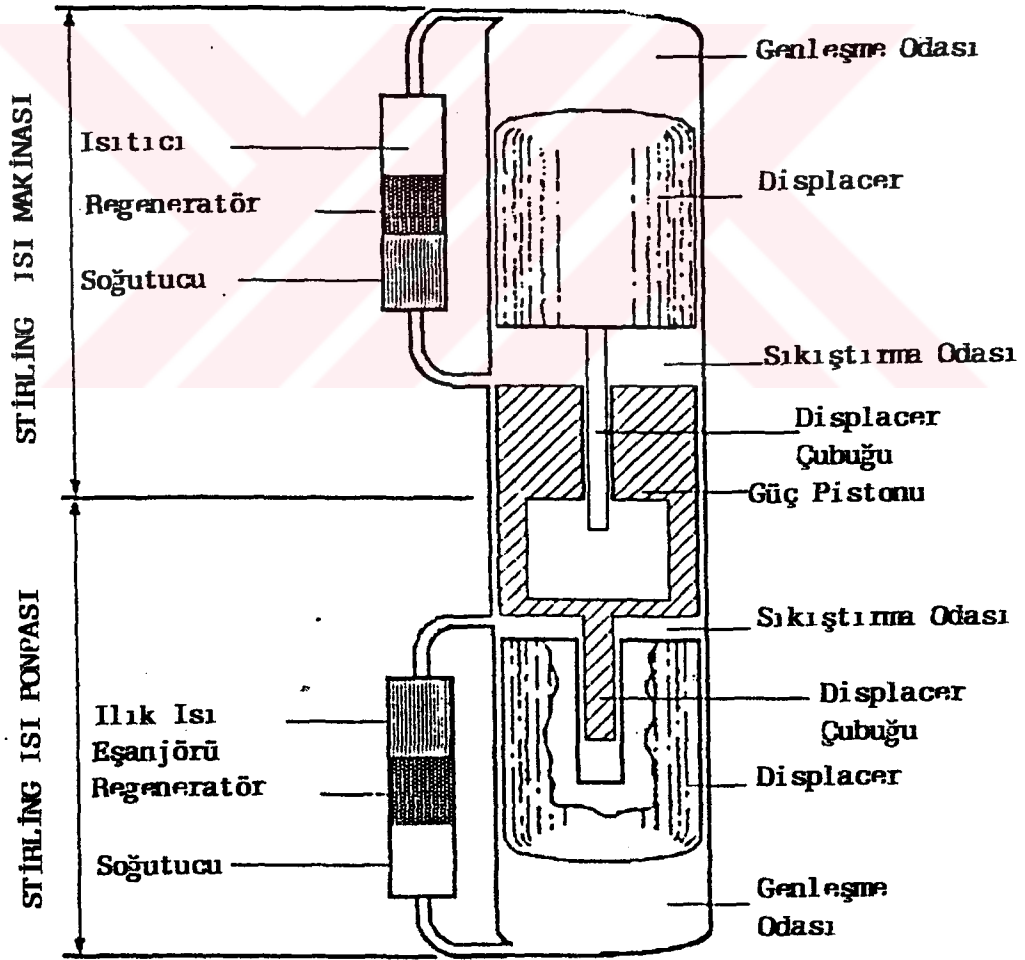


Şekil.2.15. Suni Kalp Olarak Tasarlanan Stirling Makinası

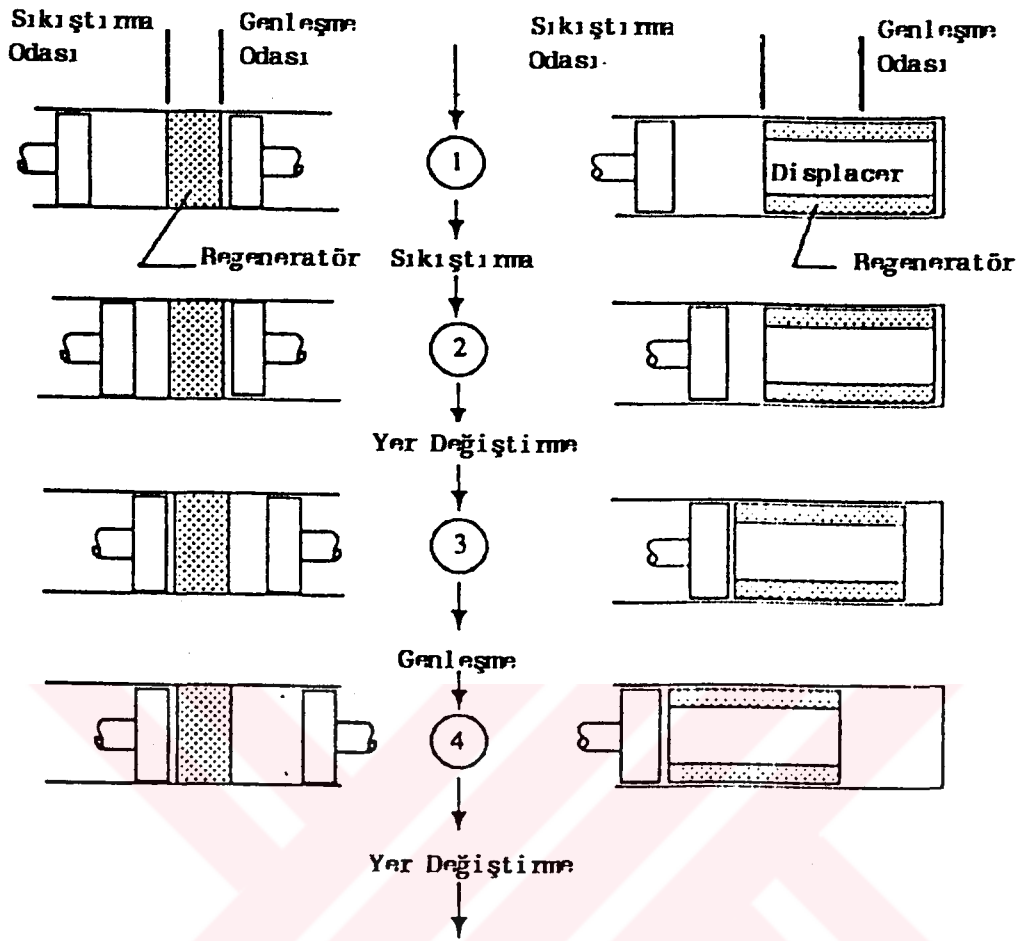


W. Beale tarafından tasarlanan başka bir Stirling motorunda serbest pistonlu dublex ısı pompasıdır[15].

Serbest pistonlu dublex ısı pompası ortak bir silindir içinde bulunan üç adet hareketli parçadan oluşur. Bu hareketli parçalar, silindiri motor kısmı ve ısı pompası kısmı olmak üzere ikiye bölen ağır bir güç pistonu ve iki tarafında birer tane olmak üzere hafif iki tane displacer pistonundan ibarettir. Şekil. 2. 16. da serbest pistonlu dublex ısı pompasının şematik resmi ve Şekil. 2.17 de şematik olarak çalışması görülmektedir[16].



Şekil.2.16. Dublex Isı Pompası



Şekil 2. 17. Dublex Isı Pompasının Şematik Çalışması

Güç pistonunun hareketi motor kısmındaki gaz basıncının periodik değişimini gerçekleştirir ve aynı zamanda ısı pompası kısmındaki benzer basınç dalgalanmasına meydana getirir. Displacer hareketi ile gaz periodik olarak genişleme ve sıkıştırma boşlukları arasında ileri geri yer değiştirir, bu yer değiştirmeler ısıtıcı sıcak regeneratör ve motor soğutucusu üzerinde olur. Isı pompası kısmında ise sırası ile soğutucu, soğuk regeneratör ve ısı pompası kısmının soğutucusu üzerinde olur. Kısmi küçük akış kayıplarından ayrı olarak ısı eşanjöründe, akıştan kaynaklanan küçük basınç düşmeleri hariç, motorun ve ısı

eşanjörünün her tarafında zamana bağlı aynı değerde basınç hüküm sürer.

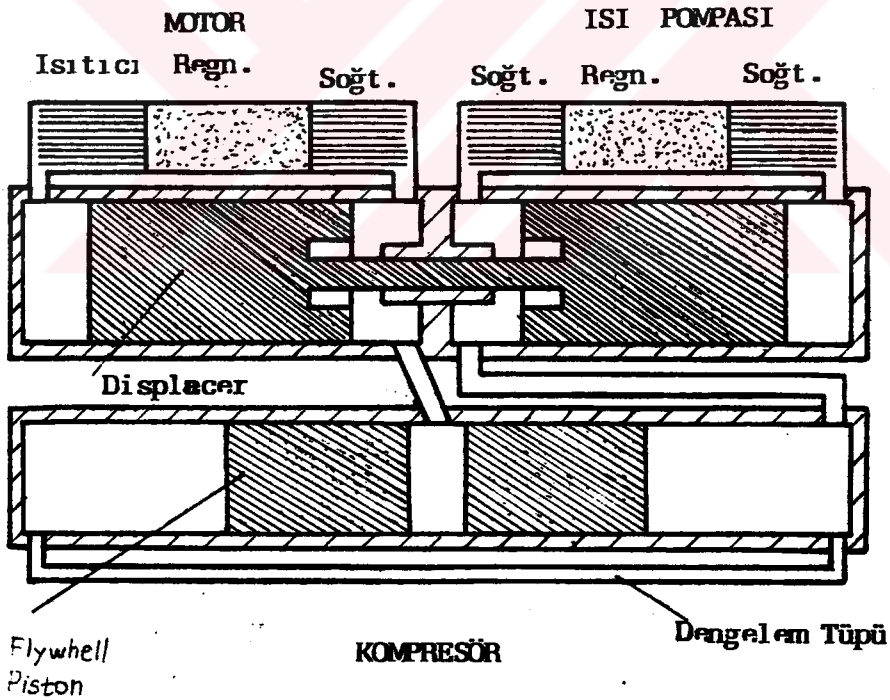
Her iki displacer pistonunun hareketi güç pistonunun hareketine öncülük eder. Motor bölmesindeki gazın tamamı, sıcak genleşme hücresi tarafından içine çekildiğinde, ısı pompası bölümündeki gaz ise soğuk genleşme hücresi tarafından çekilerek genleşme olayı tamamlanır. Gazın kompresyonu ise, her bir bölmedeki gazın tamamı çevre sıcaklığına yakın sıcaklıktaki kompresyon hücrelerinde toplandığında olur. Üç pistonun periodik eş zamanlı hareketi sistemin gaz basıncı ile devam ettirilir. Güç pistonu motor ve ısı pompası bölmesindeki gaz basıncı yayı ile askıda tutulur ve süreklilik şartları altında titreşim yapar. Displacer hareketi basınç dalgasının aktif bir küçük bileşeni olup güç pistonunun sönümleşme kayıplarını yener. Displacerler gaz yaylanmaları etkisi tarafından sürekli titreştirilir. Bu gaz yaylanmaları pistonu ya da dış kılıfta rölatif olarak oluşur

Beale'nin tasarladığı ısı pompasına benzeyen bir ısı pompasında Benson tarafından tasarlanmıştır[15].

İki displaceri bulunan bu motorun displacerleri, motor kuyruğundan ısı pompası kuyruğuna bağlanmıştır ve karşılık dengelenmiş piston ortak çalışma gazını güç çıktısı olmadan sıkıştırır veya genişletir. Piston öyle ayarlanmıştır ki sistemin motor kısmında güç üretilerek (gazın yer değiştirmesi sayesinde) karşı uçtaki ısı pompası tahrik edilir. Üretilen gücün küçük bir

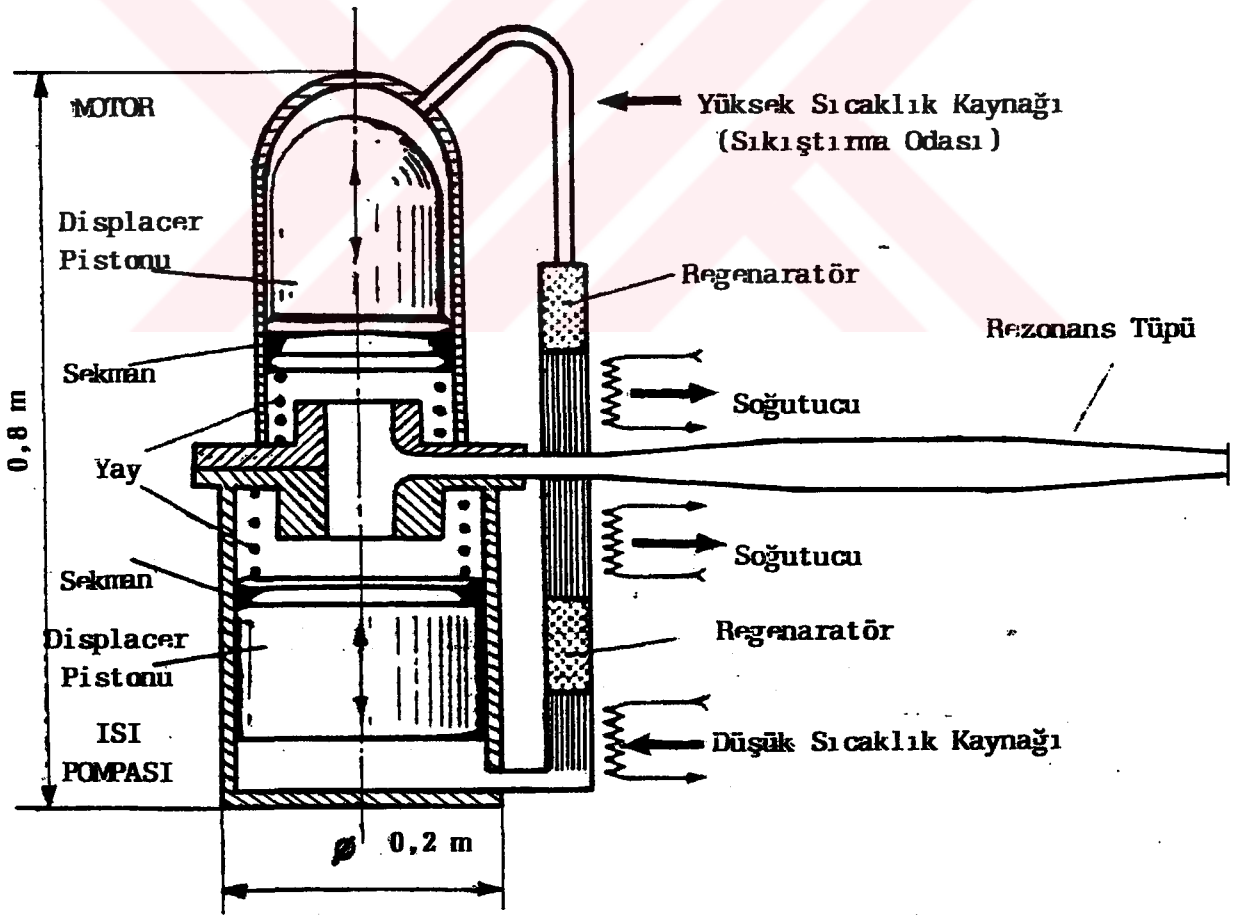
kısmı sürtünme kayıplarını yenmek üzere kullanılır, kalan kısmı ise pistonları periodik olarak titreşim yapar vaziyette tutar.

Motorun çevrimi geleneksel sinuzoidal stirling çevrimi olup ısı pompası geleneksel sinuzoidal soğutma çevrimidir. G. Benson, gerçek bir makinada ısı pompasının performansının izotermal sıkıştırma ve genişlemenin gerçekleşme nispetine bağlılığını vurgulayarak, bunun sağlanabilmesi için ısı pompasının değişken hacimli odalarının izotermalleştirmesi gerektiğini söylemiştir. Bu sebeple silindir kafasındaki ısı transferi yüzeylerine ısı transferi yüzeyi ilave edilir(Şekil 2.18).



Şekil.2.18. Benson Stirling-Stirling Çevrimli Isı Pompası

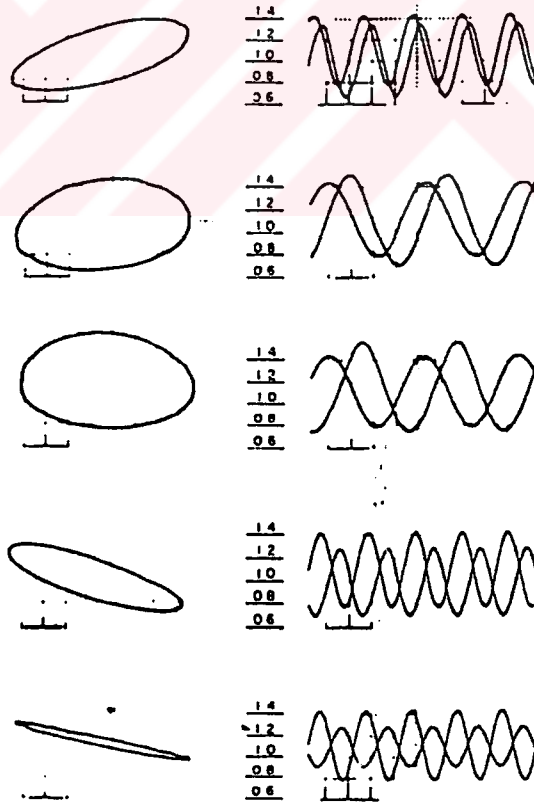
J. P. Budliger Beale' nin dublex ısı pompası, Benson ve Vuilleumier modellerinden esinlenerek rezonans tüplü Stirling ısı pompasını geliştirmiştir[17]. J.P. Budliger tasarladığı Stirling ısı pompasını evleri ısıtmak maksadı ile kullanmıştır. Prototipi yapılarak denen bu ısı makinasının oldukça ekonomik olduğunu, sadece yatırım maliyetinin biraz pahalı olduğunu söylemiştir. Geliştirilen bu yeni fikirde Vuilleumier ısı pompası ünitesinin basınç dalgalanmasını, sisteme ilave edilen rezonans tüpü içindeki peryodik basınç dalgalanmaları sayesinde kuvvetlendirmektedir. Şekil.2.19.' da tasarlanan rezonans tüplü Stirling ısı pompasının şematik resmi verilmiştir.



Şekil. 2. 19. Rezonans Tüplü Stirling Isı Pompası

Bu dizaynda çapraz kesiti sabit olan rezonans tüpü kullanılmıştır. Bu rezonans tüplerinin gidip-gelen kuvvetli çok dalagaları ürettiği ve yapılan denemelerde konik uçlu rezonans tüplerinin sinüzoidal basınç dalgaları oluşturduğu ve bu basınç dalgalanmalarının tüpün u kısmında kuvvetli, orta kısımlarında ise düşük seviyede kaldığı tesbit edilmiştir. Mevcut bilgilere göre boğaz kesitinin maximum ldeki kesit alanına oranın 1/5-1/10 olduğunda sinüzoidal dalgalanmaların minimum enerji kaybı ile gerçekleştiği anlaşılmıştır.

Yapılan denemelerde 4.20 m uzunluğunda bir tp kullanılmış olup elde edilen basınç dalgalanmaları şekil .2.20. deki gibidir [17]



şekil.2. 20. Rezonans Tüpü Dasiņ Dalgalanmaları

Amaçlanan yeni sistemin değişik bir özelliği ise güç pistonunun olmayışıdır. Yani sekmana gerek kalmayıdır. Böylece ihmal edilemez dercedeki sürtünme ve sızıntı kayıpları önlenmiştir.

Pompanın displaceri önden gerdirilmiş iki yay arasına boylamasına yerleştirilmiştir. Bu şekilde serbest piston belirli bir merkezi pozisyonun çevresinde salınım yapar, sistemin tümünün çalışması çalışma gazının basıncından tamamen ayırdır. Böyle bir düzende her displacer pistonu dinamik yalıtıcıları azami dercede basınç farklarına maruz kalmaktadır, bu farklar ısı eşanjörü elemanları arasındaki akışın sürtünme kayıplarına karşılıktır. Bu durum, ünitenin yüksek basınç farkları arasında çalışmasına imkanı sağlamıştır. Ayrıca kompakt ısı ünitesinin kurulabileceği de söylenmiştir.

Sistem düzenlenirken alternatif dizaynların kullanılması mümkün kılınmıştır. Yalnız bu dizaynlarda kullanılacak rezonans tüpüne değişik şekiller vermek gerekmektedir. Çünkü rezonans tüpünün şekli sistemin performansını direkt olarak etkilemektedir.

Günümüzde modern Stirling motorları ve ısı pompaları moleküler ağırlığı düşük olan helyum ve hidrojen gibi gazlar yardımıyla çalıştırılır. Bu ısı eşanjörü ünitesinde, en az akış sürtünmesi kayıpları ile sonuçlanan derli toplu ve yüksek performanslı ünitelerin dizaynına imkan verir. Bu sebeple istenilen moleküler ağırlıktaki çalışmaya akışkanı iki gazın

karşımı ile elde edilmiştir. Bu karışım öncelikle helyum azot veya helyum karbondioksit dir. Seçilen gaz karışımı aynı moleküler ağırlıktaki saf gazlara kıyasla benzer çalışma şartları altında ısı transferi miktarını arttırmaktadır. Denemeler sonucu; helyum karbondioksit karışımında bu artış türbülent akış için %25, laminer akış için %10-15 civarında olduğu görülmüştür.

Özellikleri anlatılan Stirling modülü ve rezonans tüpünden oluşan deney prototipi inşaa edilerek denenmiştir. Temel amaç, fikrin uygulanabilirliğini kanıtlamak olduğu için oldukça basit bir dizayn ve herhangi bir performans değeri amaçlanmamıştır.

Moleküler ağırlığı 24 ve 28 arasınada olan helyum ve karbondioksit karışımı kullanılarak 4.2 m boyundaki rezonans tüpünde 44 Hz çalışma frekansı elde edilmiştir. Silindir başı 3 kW' lık bir elektrikli ısıtıcı ile ısıtılmıştır. Elde edilen değerler analitik yollarla bulunan değerlere yakın çıkmıştır. Elde edilen sonuçlara bağlı olarak şunalar söylenmiştir.

Amaçlanan sistem diğer alelade ev ısıtma sistemleri ile mukayese edildiği zaman % 35-40° arası yakıt tasarrufu sağlamaktadır. Bunun yanında displacer pistonlarının salınım yapan yayları, zamanlama kaydırması sonucu basınç yüksekliğinin değişmesi ile geniş bir güç aralığında çalışacaktır. Böylece mevsime göre değişen çalışma şartları altında yüksek güç esnekliği ve yüksek performans sağlanacaktır.



Stirling motorlarının geliştirilmeye başladığı günden günümüze kadar; bu motorlarla ilgili çok değişik araştırmalar yapılmıştır.

Literatürde anlatılanlara bağlı olarak özetle Stirling motorları hakkında aşağıdakiler söylenebilir.

-Stirling motorları komplike olarak imal edildiği takdirde hacimleri çok büyük olmaktadır. Isı değiştiricileri arasındaki akışlarda basınç kayıplarına sebep olduğu gibi soğutma için kullanılan elemanları da hacim olarak etkilemektedir.

-Serbest pistonlu motorlarda termik verim düşük olmaktadır (% 15 civarında) ve çalışma basıncı yüksek değerlere çıkarılamamaktadır.

-Piston sürtünmesi yani pistonun stabil vaziyette çalışmaması problem olmaktadır. Buna; özellikle kullanılan ağır pistonlar sebep olmaktadır.

-Gaz kaçaklarının durdurulamaması; özellikle hidrojen ve helyum kullanılan motorlarda olumsuz yönde etkiler oluşturmaktadır. Gaz kaçakları ve sürtünmeyi asgari düzeye indirmek için kullanılan teflon sekmanlar ise aşınma parçacıkları oluşturarak sıkışmaya sebep olabilmektedir.

-Maliyetin yüksek olması araştırmaları olumsuz yönde etkilemektedir.

-Motorun yeterince tanınmaması araştırma yapan bilim adamı sayısını sınırlamaktadır.

-Motora ait problemleri minimum seviyeye düşürmek, ekonomik olarak üretimi gerçekleştirebilmek ve insanlığın hizmetine sunabilmek için araştırmaların desteklenerek devam etmesi gerekmektedir.



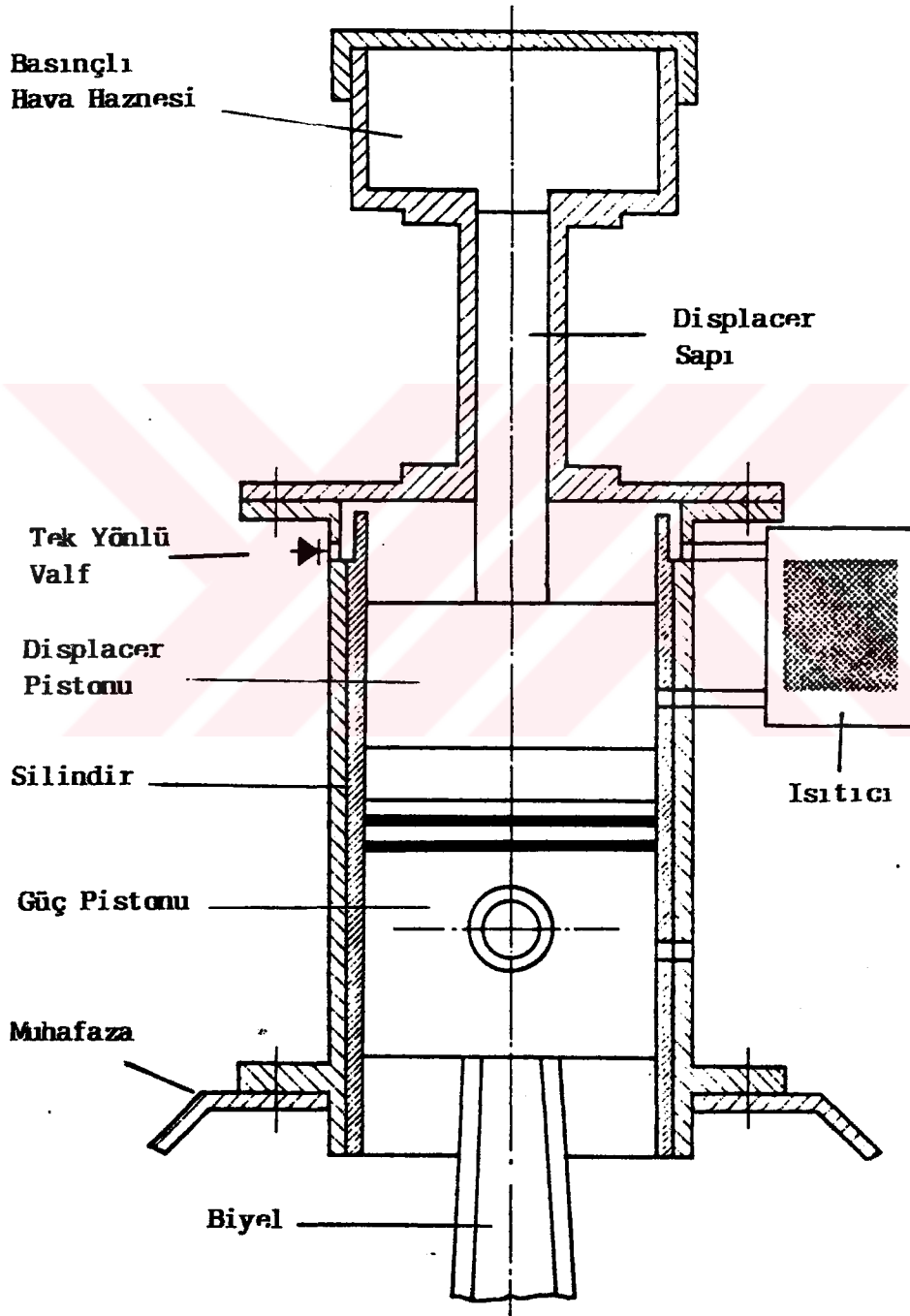
## BÖLÜM III

### MATERYAL VE METOD

Tasarımı yapılan motorda parça sayısı ve detayın mümkün olduğu kadar az olmasına dikkat edilmiştir. Bundaki amaç; yapım ve çalışma sırasında ortaya çıkacak problemleri azaltmaktır. Yapım esnasında ortaya çıkacak problemler dizayn üzerinde tadilat yapmak sureti ile giderilebilir. Fakat, yapım tamamlanıp çalıştırma işlemine başladıktan sonraki problemler dizaynın tamamen değişmesine sebep olacaktır. Bu sebeple çalışma sırasında ortaya çıkacak en büyük problem kullanılacak olan çalışma maddesine bağlı olacaktır.

Stirling motorlarında çalışma maddesi olarak genellikle helyum veya hidrojen kullanılmaktadır. Çalışma maddesi olarak bu gazların kullanılmasındaki amaç; hacimce küçük, derli toplu bir motor geliştirmektir. Stirling motorlarında sızdırmazlık problemi henüz bertaraf edilmediği için helyum ve hidrojen kullanılan sistemlerde bu gazların kaçışını önlemek amacı ile yapılan ilave sistemler, geliştirilmek istenen motorları dahada büyötmüştür. Bunun yanında bu gazların kullanılması mükemmel çalışan bir soğutucuyu da gerekli kılmaktadır. Helyum ve hidrojen gazının çalışma madesi olarak kullanılmasındaki diğler bir problemde bu gazların teminindeki zorluktrur.

Tasarımı yapılan ve hava kullanılarak çalıştırılması düşünülen Stirling motoru Şekil.3.1.'de şematik olarak görülmektedir.



Şekil. 3.1. Tasarımı Yapılan Stirling Motorunun Şematik Resmi

Bu zorluk ve detaylardan kurtulmak için çalışma maddesini her iş zamanının sonunda dışarı bırakan bir konstrüksiyon biçimi tercih edilerek, çalışma maddesi olarak hava kullanılması uygun görülmüştür. Havanın çalışma maddesi olarak kullanılması motor gücüne etki edecektir. Fakat yukarıda bahsi geçen problemlere çözüm olacak, aynı zamanda da tasarımı yapılan motora deneme safhasında maliyet bakımından büyük avantajlar sağlayacaktır.

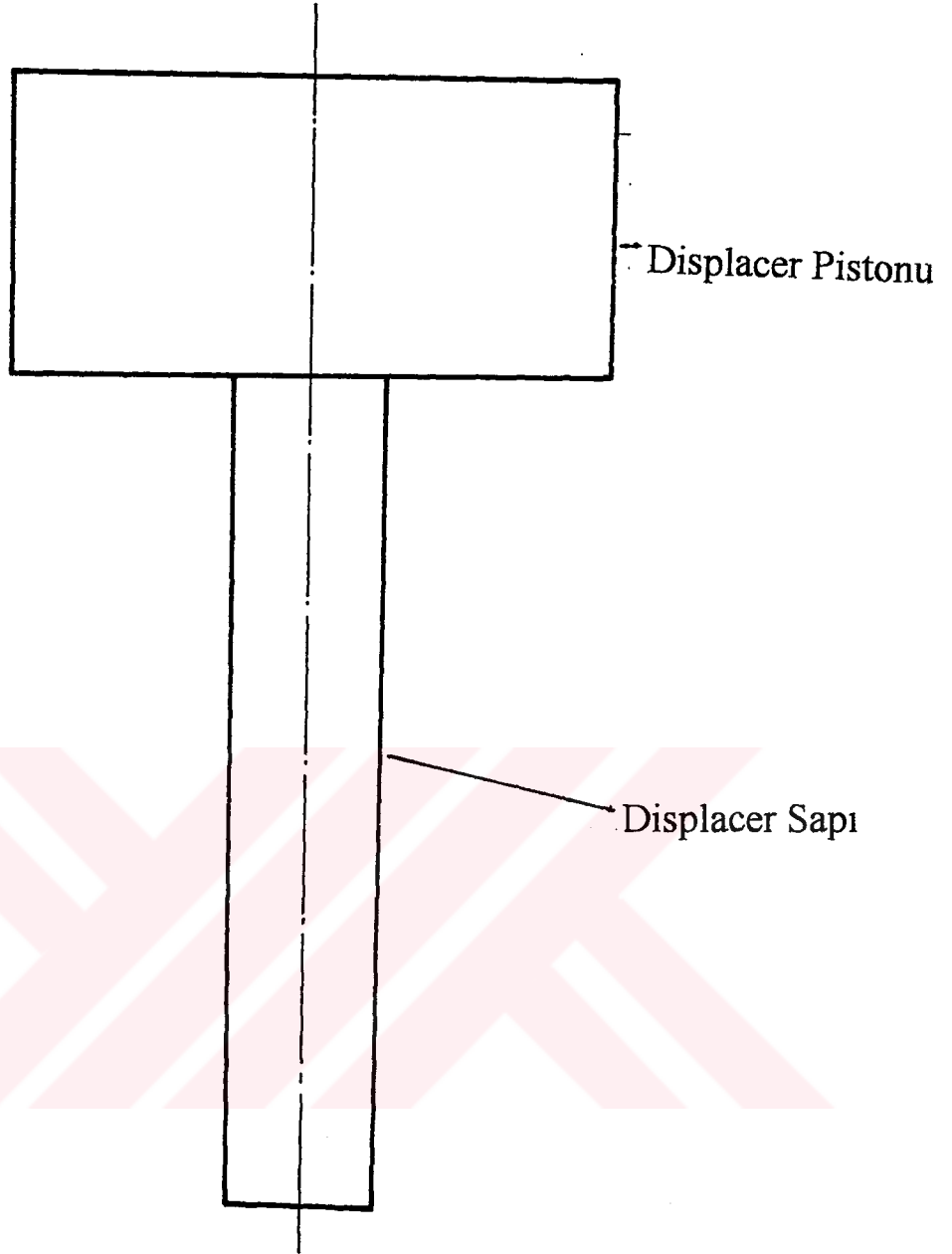
### **3.1. Tasarlanan Motorun Kısımları**

Motoru meydana getiren elemanlar ve görevleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

#### **3.1.1. Displacer**

Displacerin sistem içindeki görevi; çalışma maddesi olarak kullanılan havayı motor silindiri içine almak, motor silindiri içine almış olduğu havayı güç pistonu ile beraber sıkıştırmak, sıkıştırdığı havayı ısıtıcı üzerinden genişleme hacmine pompalamak ve genişleme sonunda silindir içindeki düşük basınçlı sıcak havayı dışarı pompalamaktır.

Displacer Şekil 3.2 de görüldüğü gibi iki kısımdan meydana gelmektedir. Bunlardan birincisi hareketin düzgünlüğünü sağlayan kuyruk kısmı, ikincisi ise emme ve pompalama işlemini gerçekleştiren piston kısmıdır.

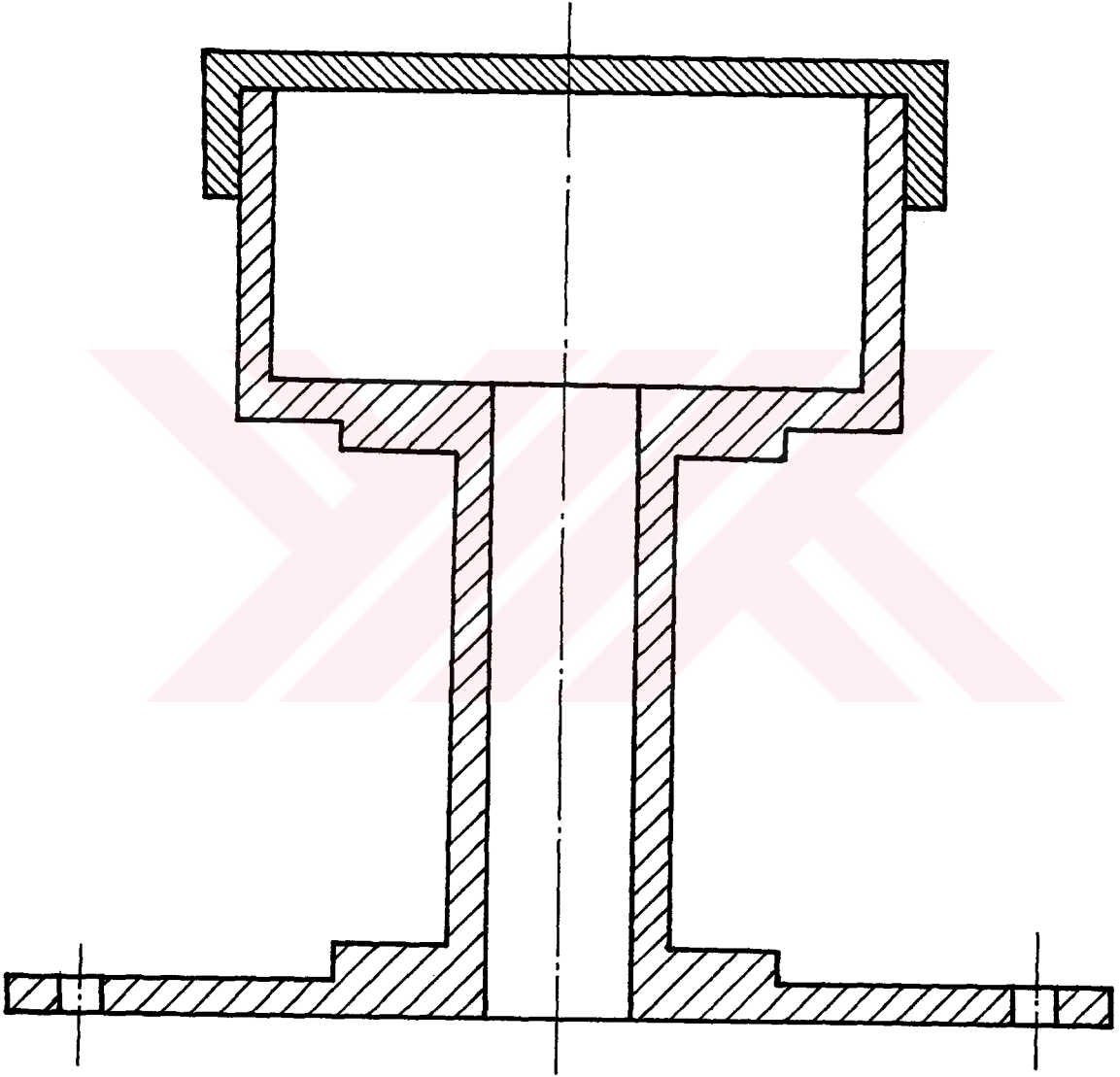


Şekil 3.2. Displcerin Kısımları

Çıkış portu açıldığında displacer ani olarak ivmelenerek, krank açısı cinsinden mümkün olduğu kadar kısa bir zaman aralığında artık gazları süpürmelidir. Bu ivmelenmenin gerçekleştirilebilmesi için kütlelerinin mümkün olduğunca küçük olması gerekmektedir. Bu sebeple displacerin hafif ve çarpmaya karşı dayanıklı bir malzemedan yapılması

gerekmektedir. Ayrıca displacer pistonu ile kuyruk bağlantısının kısmen mafsallı olması gerekmektedir.

### 3.1.2. Basınçlı Hava Haznesi



Şekil. 3.3. Basınçlı Hava Haznesi

Basınçlı hava haznesi içindeki basınçlı havanın amacı; basınç farkının olduğu periyotta displaceri güç pistonuna doğru

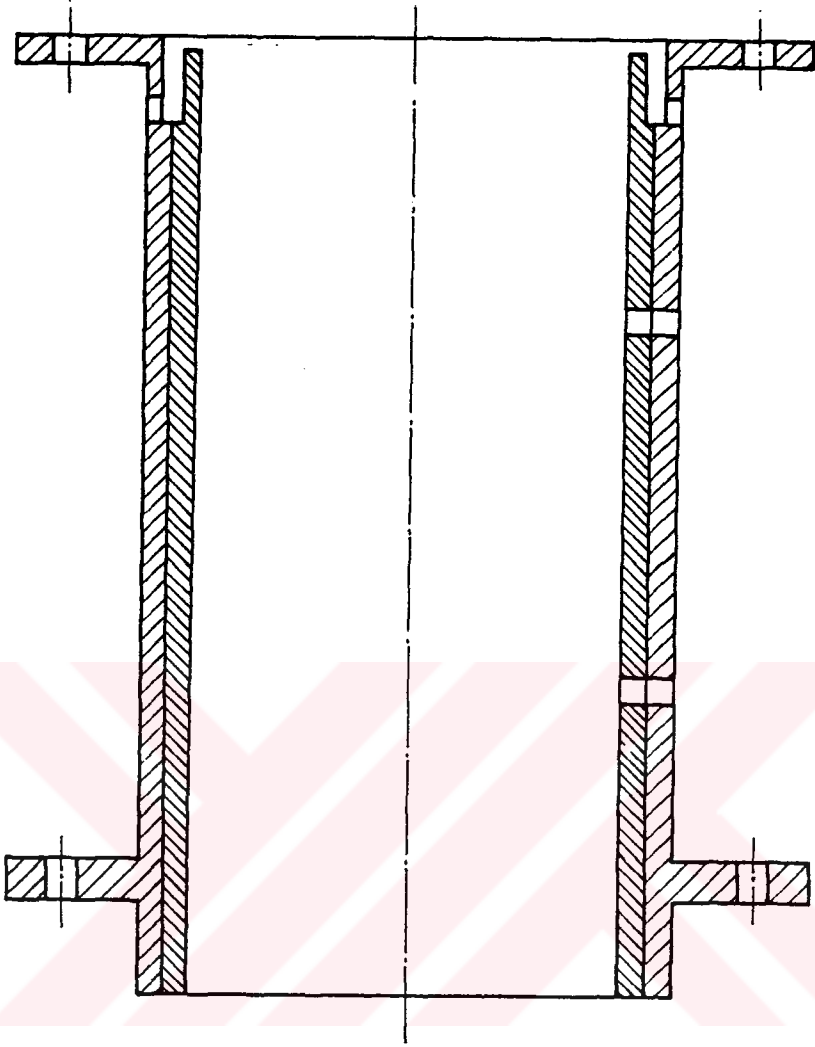
haraket ettirmektedir. Displacerin ani ivmelenmesi ve diğer işlevlerini gerçekleştirmesi ancak hazne içindeki havanın basıncına bağlıdır. Bu sebeple hazne basıncı ile, displacerin haraket periodunda displacer pistonu üzerine etki eden basınc arasındaki fark mümkün olduğu kadar fazla olmalıdır. Bu basınc farkı ancak hazne içerisindeki hacmin displacer kuyruğu hacminin on katı olduğu durumlarda gerçekleşebilmektedir. Bu durumun esas amacı displacerin g pistonuna doğru haraketini mümkün olduğu kadar tekdüze ivmelenen harakete yaklaştırıp dinamik analizi kolaylaştırmaktır.

Basıncılı hava haznesi displacerin ani ivmelenmesini gerçekleştirirken, displacer kuyruğuna yatakılık ederek displacer haraketinin doğrultu olarak konumunu muhafaza etmesini sağlar. Böylece displacer kuyruğunun basıncılı hava haznesi içinde haraketi daha düzenli olmaktadır.

### **3.1.3. Silindir**

Çalışma maddesi olarak kullanılan havanın termodinamik ameliyelere tabi tutuluduğu kısım olup, içerisinde g pistonu ve displacer çalışmaktadır. Ayrıca ısıtıcı, tek yönlü valf, çıkış portu bağlantıları gibi sistemin çalışmasına yardımcı olan diğer elemanları üzerinde taşımaktadır.





Şekil. 3.4. Motor Silindiri

### 3.1.4. Krank-Biyel Mekanizması

Pistonun doğrusal alternatif hareketini dönme hareketine çevirerek, zamanların meydana gelmesine yardımcı olur. Piston bir çevrimde iki defa doğrusal hareket yapar. Bunlardan birincisi Ü.Ö.N.' ya doğru olup sıkıştırmayı sağlar, ikincisi ise A.Ö.N.' ya doğru olup genişmeyi meydana getirir. Krank-biyel mekanizması birinci harakette volan ataleti ile

oluşan dairesel hareketi doğrusal harekete çevirip pistonu iletir. İkinci harekette ise, genişleyen gazın piston üzerine etki etmesi sonucu ortaya çıkan doğrusal hareketi dairesel harekete çevirip volana iletir.

### **3.1.5. Güç Pistonu**

Piston silindir içerisinde krank-biyel mekanizmasına bağlı olarak alternatif hareket yapmaktadır. Tasarımı yapılan tek silindirli motorda Ü.Ö.N.' ya doğru hareket volan ataleti ile gerçekleşir ve sıkıştırma periodunu meydana getirir. A.Ö.N.' ya doğru hareketi ise ısınan gazın genişmesi ile sağlanır ve güç zamanını meydana getirir. Güç pistonunun Ü.Ö.N.' ya doğru hareketi aynı zamanda çıkış portunu da açarak genişleyen havanın dışarı çıkmasını sağlar

### **3.1.6. Volan**

Krank miline bağlı olarak çalışan volan; güç üretimin durduğu periyotta motorun dönmesini sürdürür ve devir sayısı değişimlerini en aza indirir. Güç üretiminin durduğu periyotlar ölü noktalar ve sıkıştırma zamanıdır. Ayrıca motorda değişken olan döndürme momentini de sabitlemektedir.

### **3.1.7. Tek Yönlü Valf**

Tek yönlü valf; displacerin güç pistonuna doğru (aşağı) hareketinde oluşan basınç farkının etkisi ile açılarak havanın

silindir içine dolmasına müsade eder. Displacerin basınçlı hava haznesine doğru (yukarı) hareketinde kapanarak silindir içindeki havanın dışarı çıkmasını önler.

### **3.1.8. Motor Bloğu**

Motor silindirini üzerinde taşıyarak, krank miline yataklık eder. Bunun yanında motorun hareketli parçalarını dış etkilerden korur ve yağlama yağına depoluk eden karteri üzerinde taşır. Bu parçaları bir arada tutarak sistemin bütünlüğünü muhafaza eder.

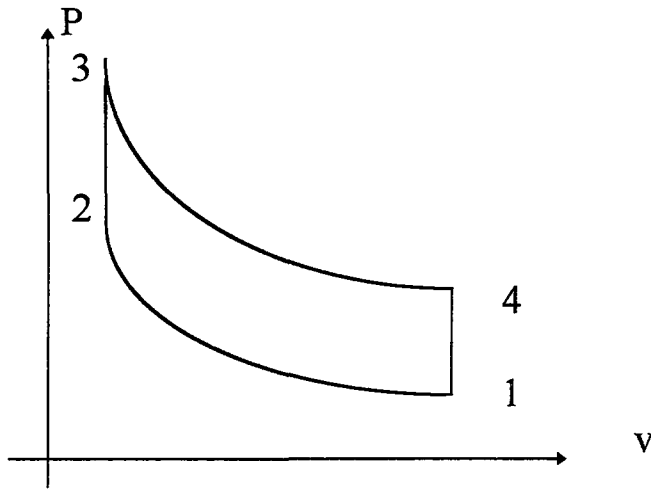
### **3.1.9. Isıtıcı**

Displacer tarafından güç pistonunun üzerine pompalanan havanın, geçiş esnasında ısınarak iş yapabilme kapasitesinin artmasını sağlar.

Motor elemanlarından ısıtıcı, volan ve displacerden sonraki kısımlarda ayrıntılı olarak bahsedilecektir.

## **3.2. Tasarımı Yapılan Motorun Çalışması**

Motor otto çevrimi esaslarına göre çalışmaktadır. Motora alınan hava dört durum değişikliğine uğrayarak çevrimi tamamlar (Şekil 3.5).



Şekil.3.5. Tasarımı Yapılan Motorun P-v Diyagramı

Bu durum değişiklikleri sırası ile:

1-2 İzoantropik sıkıştırma

2-3 Sabit hacimde ısıtma

3-4 İzoantropik genleşme

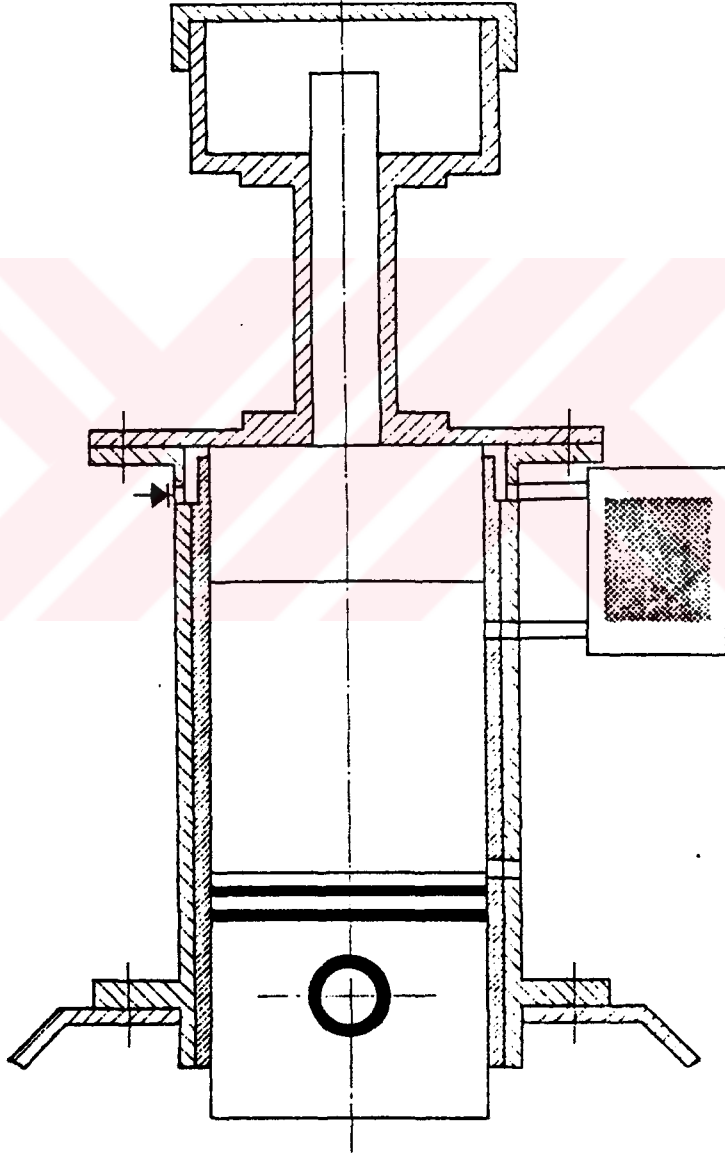
4-1 Sabit hacimde ısı atılması şeklindedir.

Motora alınan hava çevrimi tamamladıktan sonra dışarıya atılır. Bu işlem her çevrimde motor içine yeni hava alınmasını gerektirir. Motorun çevrimi birbirini takip eden dört ana bölümde incelenebilir. Bunlar:

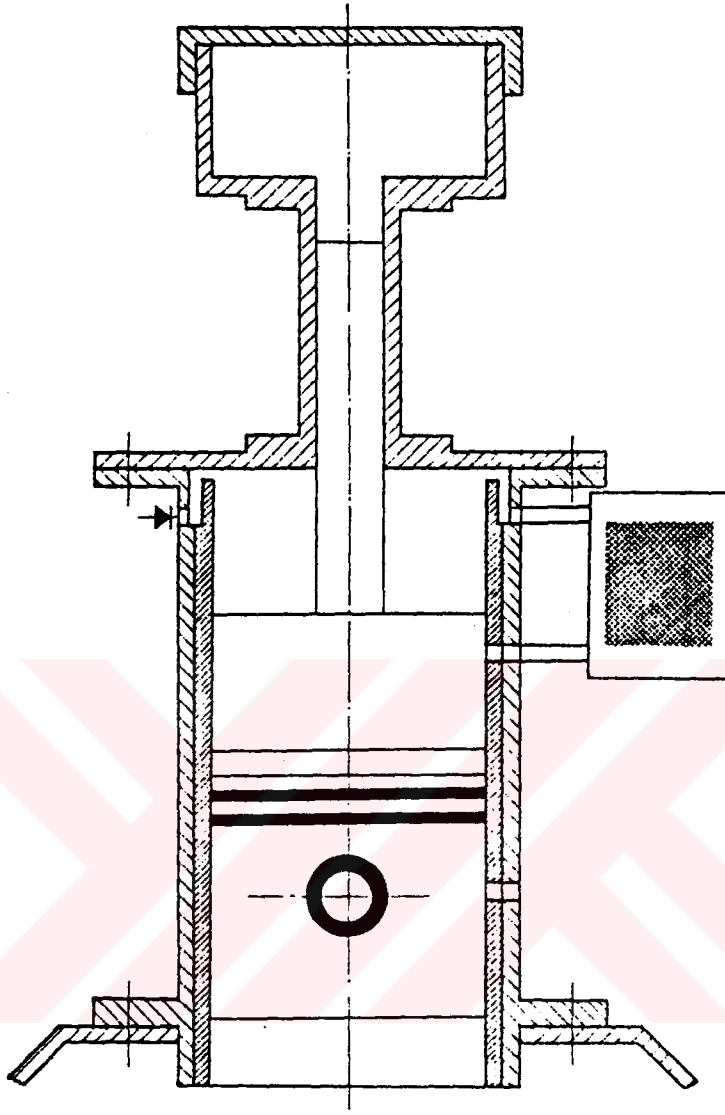
- Havanın motor içine alınması
- Alınan havanın sıkıştırılması
- Sıkıştırılan havanın yer değiştirirken ısınması
- Isınan havanın genleşmesi

### 3.2.1. Havanın Motor İçine Alınması

Havanın motor silindrine alınması başlangıcında güç pistonu A.Ö.N.' da ve çıkış portu açık durumdadır. Displacer ise üst flanşa yapışık vaziyettedir (Şekil 3.6).



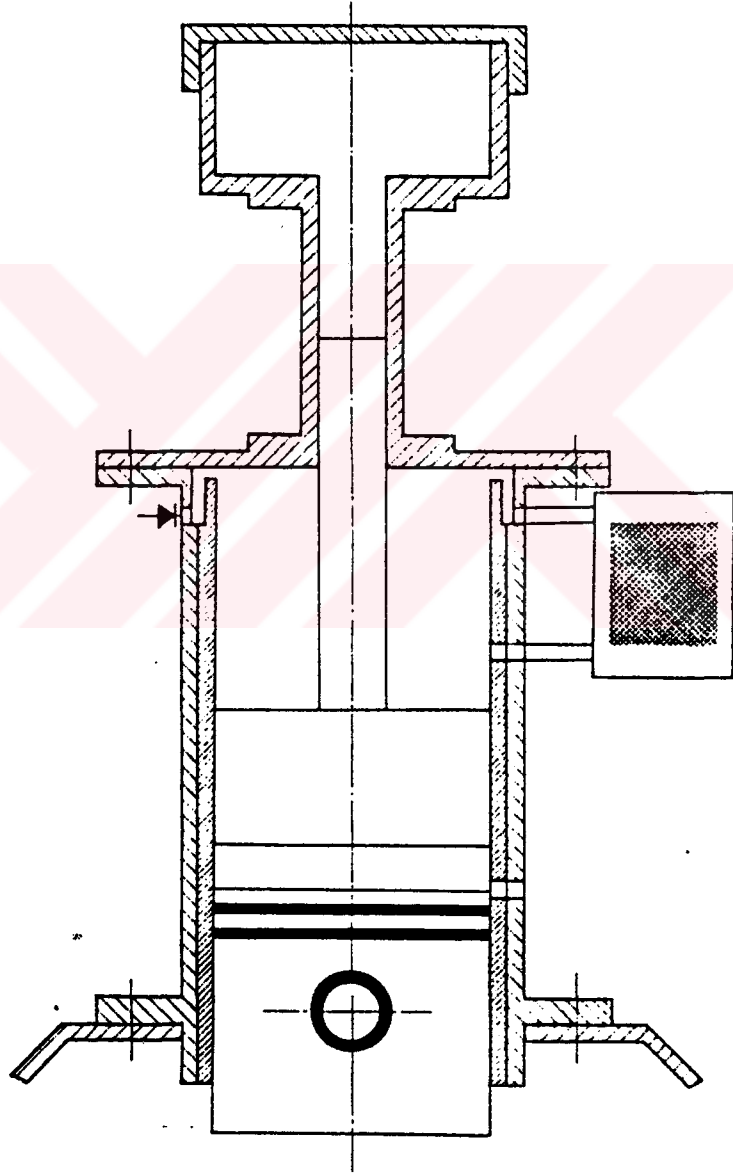
Şekil. 3.6. Havanın Motor Silindrine Alınması



Şekil.3.7. Displacerin Güç Pistonuna Doğru Hareketi

Dolayısıyla piston ile displacer arasında kalan, genişleme hacmindeki basınç atmosfer basıncına eşittir. Bu durumda displacer pistonunun ön yüzeyi atmosfer basıncının, kuyruk kısmı ise basınçlı hava haznesindeki yüksek basıncın etkisi altındadır. Haznedeki yüksek basınç displacer kuyruğuna etki ederek displaceri güç pistonuna doğru hareket ettirir (Şekil.3.7).

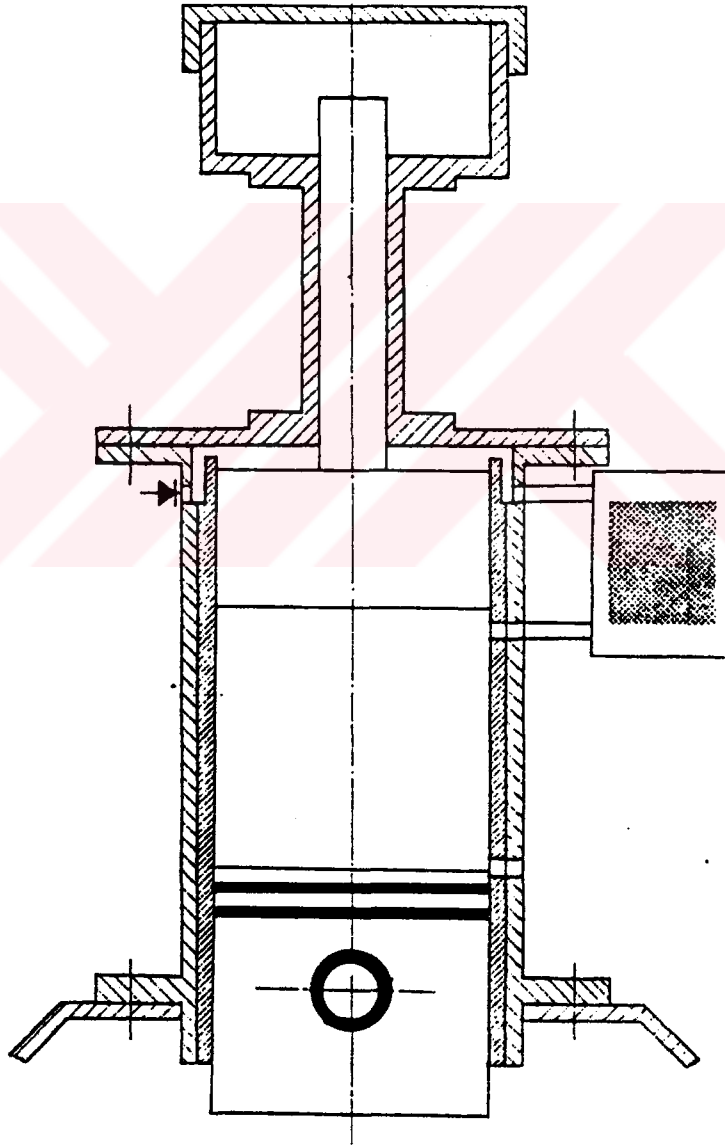
Haraket eden displacer ön tarafındaki hacmi daraltırken arka tarafında vakum oluşturur, bu vakumun meydana getirdiği basınç farkı ile tek yönlü valf açılır ve displacerin arka tarafına atmosferik şartlardaki hava dolar (Şekil 3.8.). Bu işlem displacerin kursu boyunca devam eder.



Şekil.3.8. Tek Yönlü Valfin Açılarak İçeri Hava Dolması

### 3.2.2. Motora Alınan Havanın Sıkıştırılması

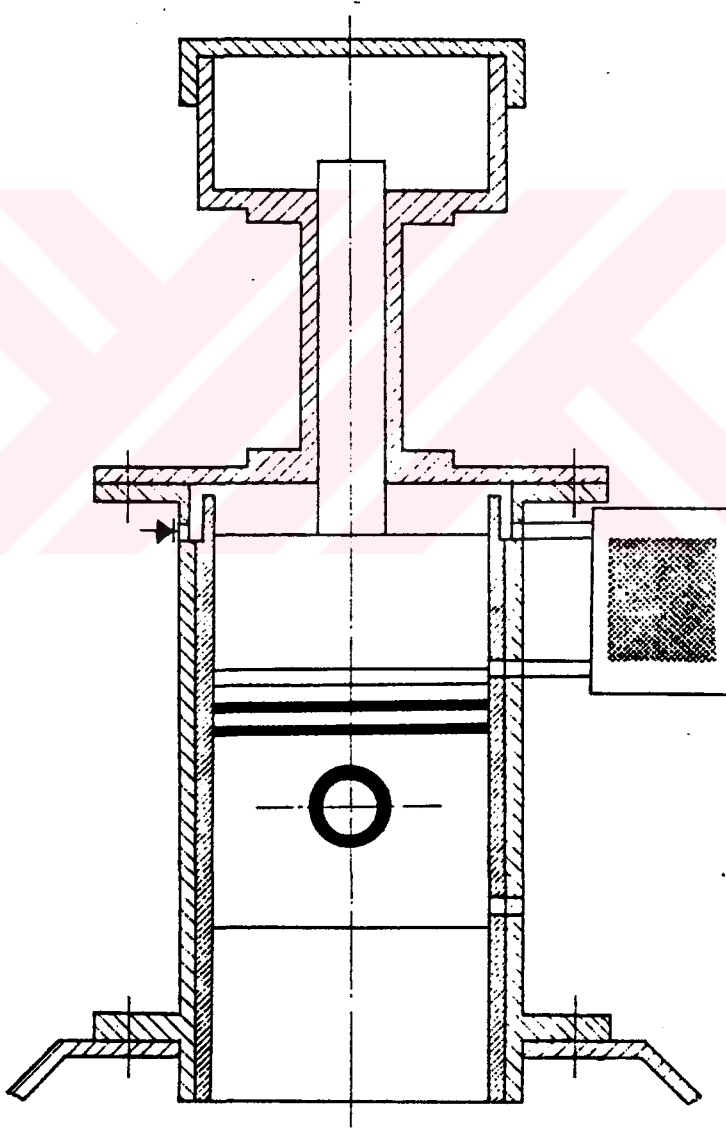
Sıkıştırma başlangıcında güç pistonu A.Ö.N.'da displacer ise bir önceki periyodun sonucu olarak güç pistonu üzerindedir. Volan üzerinde biriken enerji ile güç pistonunu yukarı doğru hareket ettirir. Bu hareket ile çıkış portunu kapanmaya başlar ve aynı zamanda güç pistonu üzerinde bulunan displacer de güç pistonu ile hareket etmeye başlar (Şekil.3.9)



Şekil.3.9. Çıkış Portunun Kapanması



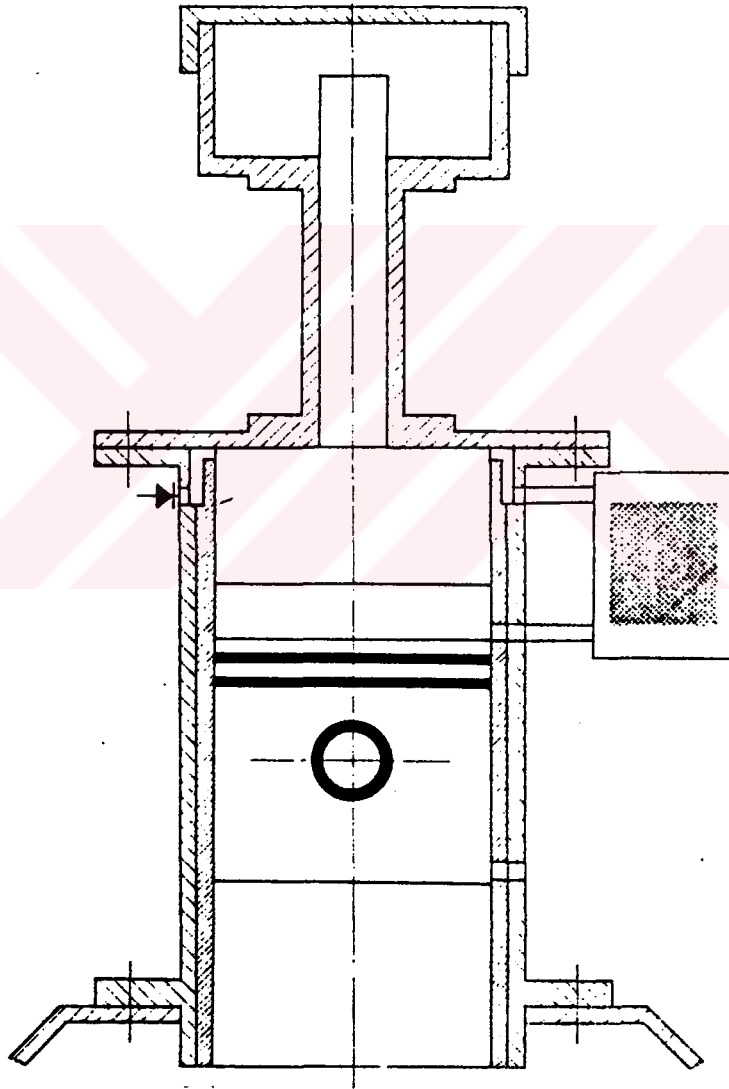
Displacerin güç pistonu ile yukarı doğru hareketi havayı sıkıştırmaya başlar ve bu sıkıştırma güç pistonunun Ü.Ö.N.'ya varması ile son bulur. Bu durumda, displacer arkasındaki hava sıkıştırma sonu basıncı değerine ulaşmış ve ısıtıcının genleşme bölgesine açık olan ucu açılmaya başlamış durumdadır (Şekil.3.10).



Şekil 3.10 Havanın Motor İçinde Sıkıştırılması

### 3.2.3. Sıkıştırılan Havanın Yer Değiştirerek Isınması

Bir önceki periyodun devamı olan bu işlem güç pistonu ile beraber hareket eden displacerin, ısıtıcının sıcak ucunu açması ile başlar (Şekil.3.11).



Şekil.3.11. Havanın Isıtıcı Üzerinden Geçirilmesi

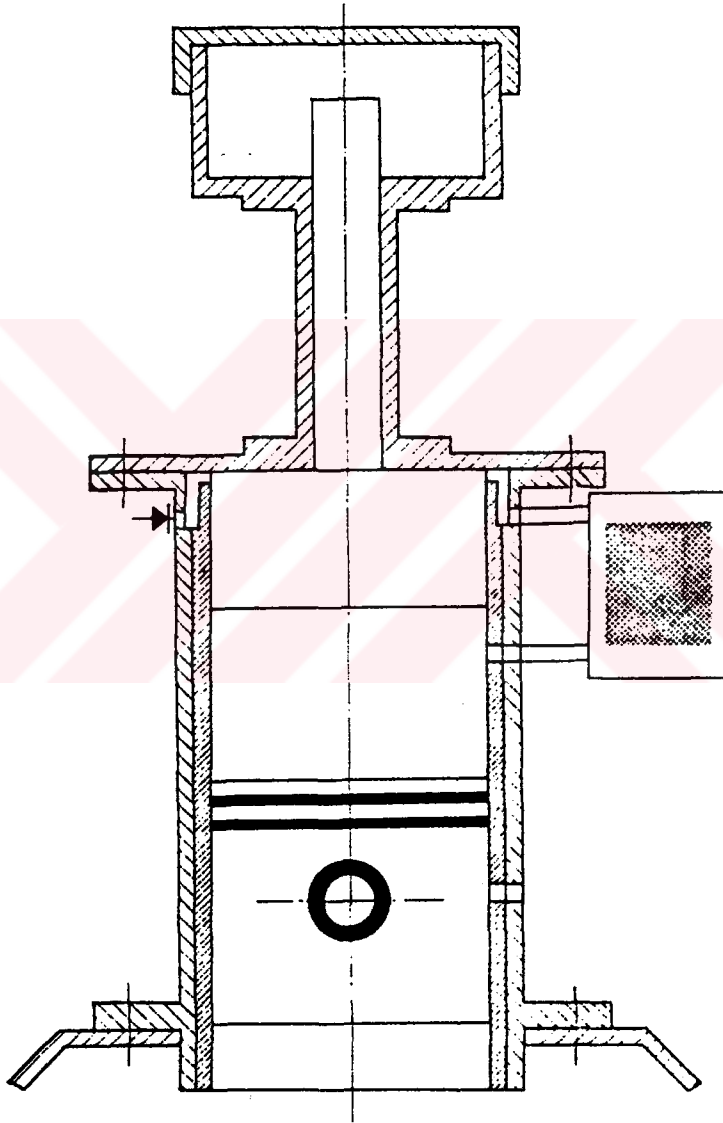
Isıtıcının sıcak ucunun açılmaya başlaması ile sıkışan hava ısıtıcı üzerinden geçerek piston ile displacer arasına dolmaya başlar. Isıtıcı üzerinden geçen havanın ısınarak basıncı artar, basıncı aratan hava displaceri yukarı doğru iterek arka tarafındaki sıkışmış havayı ısıtıcı üzerinden displacer ile güç pistonu arasındaki hacme pompalamaya devam eder. Displacer bu işlemi gerçekleştirirken güç pistonu yakalşmakta olup, hızı azalmıştır. Güç pistonu Ü.Ö.N.' ya geldiğinde displacer pompalama işini tamamlamış olur. Bu durumda displacer silindir flanşı ile temas halinde, güç pistonu ise tam Ü.Ö.N.'da yön değiştirmek üzeredir (Şekil 3.11).

#### **3.2.4. Isınan Havanın Genleşmesi**

Bu durumda güç pistonu Ü.Ö.N.'da, displacer ise silindir flanşı ile temas halindedir. Volanın ataleti ile Ü.Ö.N.' yı atlatan piston üzerine ısınarak basıncı artan gaz etki eder. Güç pistonu basınçlı gazın etkisi ile aşağıya doğru hareket etmeye başlar ve böylece genleşme başlamış olur (Şekil.3.12.).

Genleşme; yani motordan güç alınması işlemi güç pistonunun A.Ö.N.' ya gelmeden önce çıkış portunu açmaya başladığı ana kadar devam eder. Güç pistonu çıkış portunu açmaya başladığı anda genleşme hacmindeki sıcak ve basınçlı hava atmosfer şartlarındaki ortama doğru akmaya başlar. Bu işlem devam ederken sıcak gazın basıncı düşeceği için, basınçlı hava haznesindeki basınç displaceri ani olarak aşağıya doğru itecektir. Bu itme, genleşme hacmi içindeki artık sıcak havayı

çıkış portundan atmosfer ortamına atar. Aynı zamanda displacer arkasında basınç farkı oluşturup, tek yönlü valfin açılmasını sağlayarak diğer çevrim için motor içine tekrar hava alınmasına sebep olur (Şekil.3.6).



Şekil.3.12. Isınan Havanın Genleşmesi

## BÖLÜM IV

### SİSTEMİN ANALİZLERİ

#### 4.1. Sistemin Isıl Analizleri

##### 4.1.1. Termodinamik Analizler

Analizini yapacağımız motor daha önceki bölümlerde açıklandığı gibi otto çevrimi ile aynı termodinamik özelliklere sahiptir. Bu sebeple, analizler yapılırken termodinamik yönden otto ve diğer ısı makinalarının analizinde kullanılan formüller aynen kullanılacaktır.

Tasarlanan motordan alınacak güç 1200 d/d da 500 watt olarak düşünülmüştür. Amaçlanan güç çıktısını almak ve analizleri yapmak için bazı kabuller yapmamız gerekecektir. Bu kabulleri belli eden faktörler ortam ve malzemedir.

Tasarlanan stirling motoru hava ile çalışacağı için, havanın normal şartlardaki değerleri (minimum) başlangıç değerleri olarak alınacaktır. Maximum değerlerden sıcaklık ise malzeme faktörü dikkate alınarak belirlenecektir. Motorun çalışacağı alt ve üst sınırları belirledikten sonra, özellikle maximum basınç ve sıcaklığı etkileyen sıkıştırma oranının belli etmek gereklidir. Sıkıştırma oranı aynı zamanda çevrimin termik

verimini ve güç çıktısını direkt olarak etkileyeceği için mutlaka sonuca bağımlı olarak yapılmalıdır.

Kabul edilen oranlardan en uygun olan değer sıkıştırma oranı olarak kabul edilebilir. Günümüz motorlarında piston çapı ile piston kursu birbirine yakın değerlerde alınmaktadır. Bu nedenle displacer ve güç pistonu çapı ile pistonun hareket ettiği kurs boyu aynı kabul edilecektir.

Bahsedilen konulara bağlı olarak yapılan kabuller ise aşağıdaki gibidir.

$$P_e = 500 \text{ watt}$$

$$p_{\min} = 101300 \text{ Pa}$$

$$T_{\min} = 300^0 \text{ K}$$

$$T_{\max} = 900^0 \text{ K}$$

$$\varepsilon = 5$$

$$c_v = 717 \text{ J/kg}^0\text{K}$$

$$D_d = 0.08 \text{ m}$$

$$d_k = 0.02 \text{ m}$$

$$h = 0.08 \text{ m}$$

Displacerin hareketine bağılı olarak gazın sıkıştırıldığı kompresyon hacimindeki kurs boyu:

$$\varepsilon = \frac{\frac{\pi (D_d^2 - d_k^2)}{4} h}{\frac{\pi (D_d^2 - d_k^2)}{4} h_c} \quad (4.1.)$$

$$h_c = \frac{\varepsilon}{h} \quad (4.2.)$$

$h_c = 0.016 \text{ m}$  bulunur.

Yapılan kabullere bağılı olarak çevrimin durum değıştirdiğı noktalardaki basınç ve sıcaklık değerleri ise aşağıdaki gibidir.

$$T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1} \quad (4.3.)$$

$$T_2 = 300.5^{1.4-1}$$

$$T_2 = 571^0 \text{ K}$$

$$P_2 = P_1 \cdot \varepsilon^k \quad (4.4.)$$

$$P_2 = 101300 \cdot 5^{1.4}$$

$$P_2 = 964200 \text{ Pa}$$

$$T_3 = T_{\max}$$

$$P_3 = \frac{T_3}{T_2} P_2 \quad (4.5.)$$

$$P_3 = \frac{900}{500} \cdot 964200 = 1510754 \text{ Pa}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \varepsilon^{k-1} \quad (4.6.)$$

$$T_4 = \frac{T_3}{\varepsilon^{k-1}}$$

$$T_4 = \frac{900}{5^{0,4}}$$

$$T_4 = 472^0 \text{ K}$$

Bir kg hava için motora verilmesi gereken ısı miktarı:

$$Q_{\text{IN}} = c_v (T_3 - T_2) \quad (4.7.)$$

$$Q_{\text{IN}} = 717 \cdot (900 - 571)$$

$$Q_{\text{IN}} = 235893 \text{ J/kg} \text{ olarak bulunur.}$$

Bu değerlere bağlı olarak motorun teorik verimi ise;



$$\eta_T = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \quad (4.8.)$$

$$\eta_T = 1 - \frac{1}{5^{k-1}}$$

$$\eta_T \cong 0.47$$

olarak bulunur.

Hesaplanan bu değerler tamamen teorik olup, bulunan bu değerlerde radyasyon, soğutma, sürtünme ve atık ısı kayıpları tamamen ihmal edilmiştir. Genel olarak İ.Y.M. da bir kg hava için motora verilen enerjinin yaklaşık olarak %27-32 si efektif iş olarak dışarı alınır[18]. Aynı şekilde tasarımı yapılan motorda da bu kabulü yaparsak, motorun pratik verimini tayin edebiliriz. Dolayısıyla pratik verimi % 30 kabul ettiğimiz zaman, bulunan değere bağlı olarak efektif iş:

$$\eta_p = \frac{w_e}{Q_{IN}} \quad (4.9.)$$

$$w_e = Q_{IN} \eta_p$$

$$w_e = 235893 \cdot 0.30$$

$$w_e \cong 70700 \text{ J/kg} \text{ olarak bulunur.}$$

500 watt için bir saniyede kullanılan hava miktarı:

$$\dot{m}_h = \frac{500}{70700} = \frac{1}{141} \text{ kg/s}$$

$\dot{m}_h = 7.092 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$  olarak bulunur.

#### 4.1.2. Isıtıcının Analizi

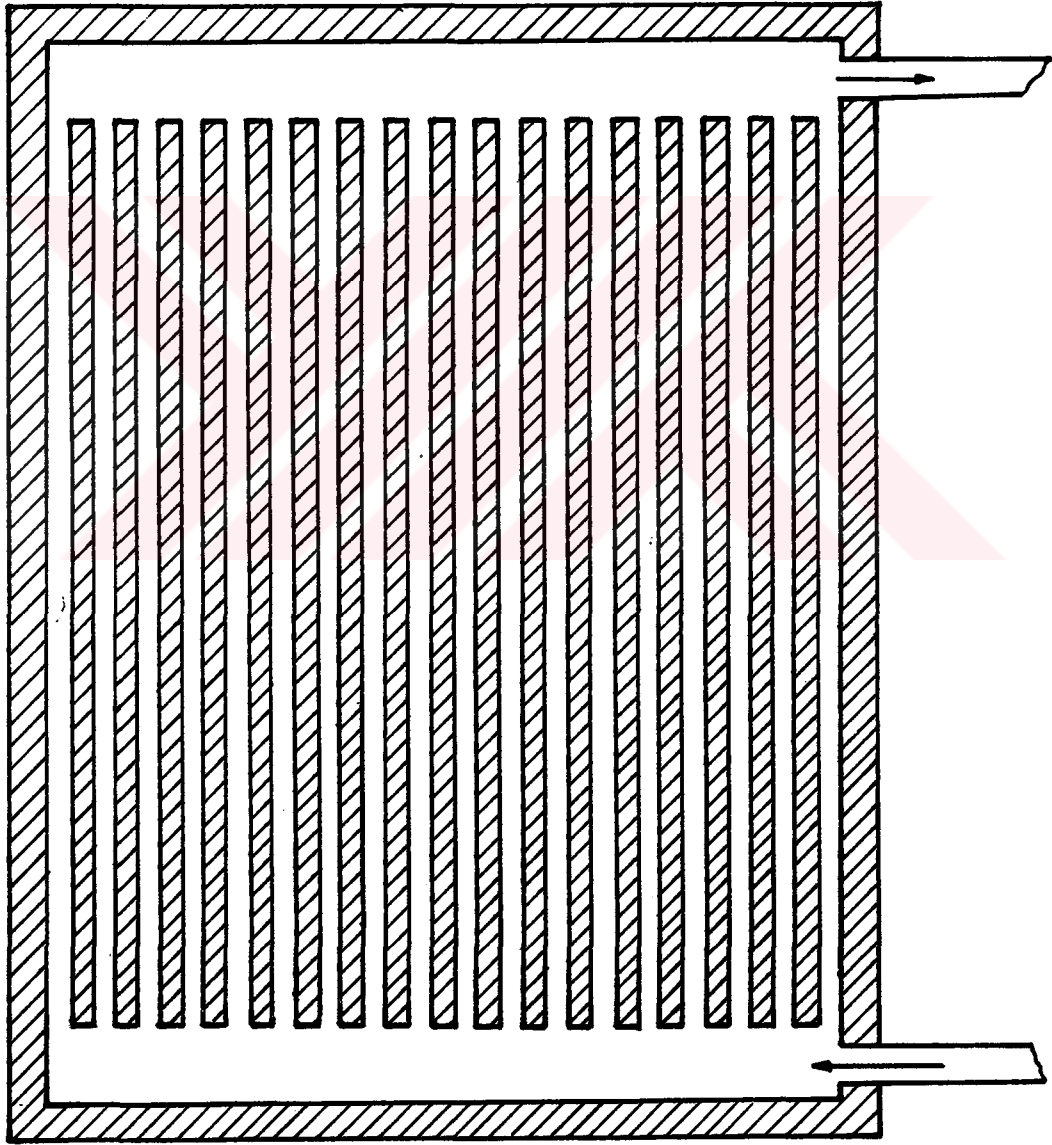
Günümüz Stirling motorlarında çalışma maddesi olarak genellikle helyum ve hidrojen kullanılmaktadır. Bu gazların temininin zor olması, tasarlanan motorda çalışma maddesi olarak hava kullanma zorunluluğunu ortaya çıkarmıştır. Kullanılacak olan hava her çevrimde yenisi ile değiştirilerek, silindir içerisinde sürekli bir akış gerçekleştirilecektir.

Her çevrimde havanın dışarıdan alınması bir miktar tozuda silindir ve ısıtıcı içine taşıyacaktır. Taşınan bu toz özellikle ısıtıcı içerisinde ısıl drenç meydana getirecektir. Bu sebeple emsal motorlarda kullanılan kılcal borulu ısıtıcı kullanılması mümkün değildir. Motorda kullanılacak olan ısıtıcının temizlenme özelliğine sahip olması dolayısıyla kolayca sökülüp takılacak biçimde olması gerekmektedir.

Düşünülen ısıtıcı pleyt şeklinde olup, motorda kullanılacak çalışma maddesi silindirler arası yer değiştirme sırasında ısıtıcının iç yüzeyleri arasından geçerken ısınacaktır. Isıtıcının pleyt şeklinde olması, ısı kaynağı olarak kullanılması

düşünülen güneş enerjisinin ısıtıcıya aktarılmasında kolaylık sağlayacaktır.

Isıtıcıdaki akış çizgilerinin bozulmadığını yani laminer ve duvar sıcaklığının her yerde aynı olduğu kabul edilerek ısıtıcının analizi yapılacaktır. Motorda kullanılması düşünülen ısıtıcının detaylı olmayan resmi Şekil 4.1.'de görülmektedir.



Şekil. 4.1. Tasarımda kullanılması düşünülen ısıtıcı

Paralel duvarlı ısıtıcıda hava hızı;

$$u = c_o [y_w^2 - y^2] \quad (4.10.)$$

$$u = \frac{3}{2} \bar{u} \left[ 1 - \frac{y^2}{y_w^2} \right] \quad (4.11.)$$

Hava tabakası için enerji denklemi;

$$u \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (4.12.)$$

Kabul edelimki sıcaklık profili ;

$$T = a_o + a_1 y + a_2 y^2 \quad (4.13.)$$

şeklindedir. Bu eşitliğin y' ye göre türevi alındığında;

$$\frac{\partial T}{\partial y} = a_1 + 2a_2 y \quad (4.14.)$$

olur. Kanalın ortasındaki sınır şartı;

$$y = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0$$

dan

$a_1 = 0$  bulunur. Sıcaklık profili;

$$T = a_o + a_2 y^2 \quad (4.15.)$$

olur. Duvardaki sınır şartı;

$$y = y_w, \quad T = T_w$$

kullanılırsa

$$T_w = a_o + a_2 y_w^2 \quad (4.16.)$$

$$a_o = T_w - a_2 y_w^2 \quad (4.17.)$$

olur. Bu denklemi 4.15 eşitliğine yazdığımızda;

$$T = T_w - a_2 y_w^2 + a_2 y^2 \quad (4.18.)$$

$$T = T_w + a_2 [y^2 - y_w^2] \quad (4.19.)$$

olur. Son ifadeden;

$$\frac{\partial T}{\partial x} = [y^2 - y_w^2] \frac{\partial a_2}{\partial x} \quad (4.20.)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 2a_2 \quad (4.21.)$$

İfadeleri elde edilir. Bunlar 4.12. eşitliğine yazılırsa;

$$u \frac{\partial a_2}{\partial x} [y^2 - y_w^2] = 2\alpha a_2 \quad (4.22.)$$

olur u, 4.10.' dan yerine yazıldığında;

$$c_o \frac{\partial a_2}{\partial x} [y^2 - y_w^2]^2 = 2\alpha a_2 \quad (4.23.)$$

diferansiyel denklemi elde edilir. Yeniden düzenlersek

$$\frac{\partial a_2}{\partial x} = \frac{2\alpha}{c_0[y^2 - y_w^2]^2} a_2 \quad (4.24.)$$

olur. Denklemin genel çözümü

$$a_2 = k e^{\frac{2\alpha}{c_0[y^2 - y_w^2]^2} x} \quad (4.25.)$$

olur.  $a_2$  nin bu değerini 4.19.' a yazdığımızda;

$$T = T_w + k e^{\frac{2\alpha}{c_0[y^2 - y_w^2]^2} x} [y^2 - y_w^2] \quad (4.26.)$$

olur.

$$x=0, \quad T = T_{in}$$

sınır şartından;

$$T_{in} = T_w + k[y^2 - y_w^2] \quad (4.27.)$$

$$k = \frac{T_{in} - T_w}{y^2 - y_w^2} \quad (4.28.)$$

olarak elde edilir.  $k$ ' nın bu değeri. 4.26. denklemine yazıldığında

$$T = T_w + \frac{T_{in} - T_w}{y^2 - y_w^2} e^{\frac{2\alpha}{c_0[y^2 - y_w^2]^2} x} [y^2 - y_w^2] \quad (4.29.)$$

$$T = T_w + [T_{in} - T_w] e^{\frac{2\alpha}{c_0[y^2 - y_w^2]^2} x} \quad (4.30.)$$

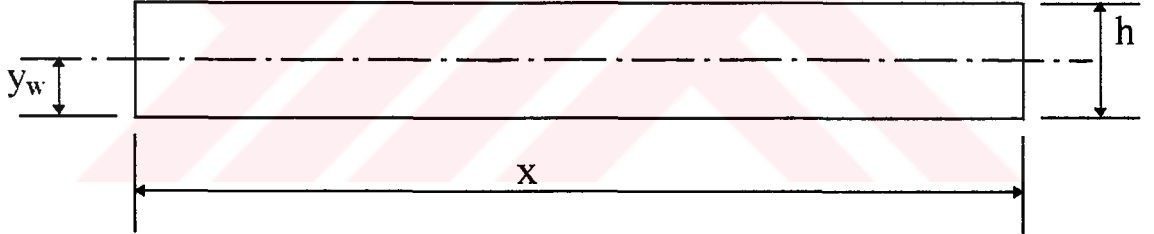
bulunur. 4.10. ve 4.11.' den  $c_0$ ' ı yerine yazdığımızda;

$$T=T_w + [T_\infty - T_w] e^{-\frac{2\alpha}{3\bar{u}} \frac{[y^2 - y_w^2]^2}{y_w^2} x} \quad (4.31.)$$

$$T=T_w + [T_\infty - T_w] e^{-\frac{4\alpha x}{3uy_w^2}} \quad (4.32.)$$

olarak elde edilir.

Bulunan bu denklemi tasarlanan ısıtıcının değişik değerleri için kullandığımız zaman, motora en uygun ısıtıcı ölçüleri belirlenecektir. Hesabı yapılan değerler ve sonuçları aşağıdaki gibidir.



Şekil 4.2. Isıtıcıya Ait Kanal

Kanal çapı;

$$h = 0.00025\text{m}$$

$$y_w = \frac{h}{2} = 0.000125\text{m}$$

Kanal boyu;

$$x = 0.1\text{m}$$

$$T = 900 + \left[ [500 - 900] \text{EXP} \left[ -4.0,75 \cdot 10^{-4} \cdot 0,1/3.160 [0,000125]^2 \right] \right]$$

$$T = 892^\circ \text{K}$$

$$x = 0.15\text{m}$$

$$T = 900 + \left[ [500 - 900] \text{EXP} \left[ -4.0,75 \cdot 10^{-4} \cdot 0,15/3.160 [0,000125]^2 \right] \right]$$

$$T = 899^\circ \text{K}$$

$$h = 0.0005\text{m}$$

$$y_w = 0.00025\text{m}$$

$$x = 0.1\text{m}$$

$$T = 900 + \left[ [500 - 900] \text{EXP} \left[ -4.0,75 \cdot 10^{-4} \cdot 0,1/3.80 [0,00025]^2 \right] \right]$$

$$T = 892^\circ \text{K}$$

$$x = 0.15\text{m}$$

$$T = 900 + \left[ [500 - 900] \text{EXP} \left[ -4.0,75 \cdot 10^{-4} \cdot 0,15/3.80 [0,00025]^2 \right] \right]$$

$$T = 880^\circ \text{K} \text{ bulunur.}$$

Isıtıcının değişik değerlerdeki kanal boyu ve kanal çapı ile yapılan hesaplamaları sonucu bulunan değerler incelendiğinde; kanal boyunun 0.15 m ve kanal çapının 0.0025m olan ısıtıcıdan elde edilen çıkış sıcaklığının istenilen değere

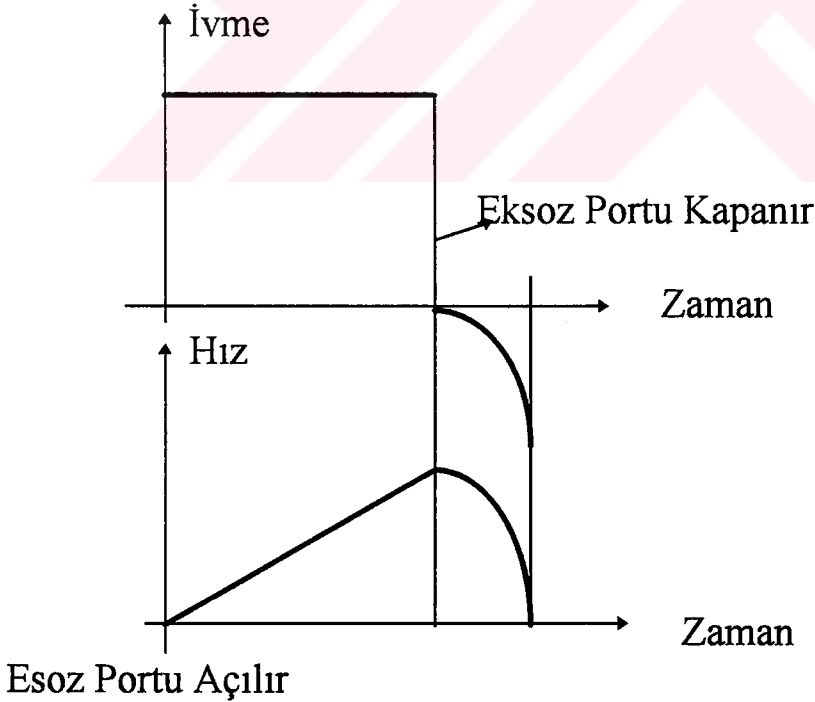


yakın olması ve tasarlanan motorda bu ölçülerdeki ısıtıcının kullanılmasının uygun olduğu anlaşılmıştır.

## 4.2. Dinamik Analizler

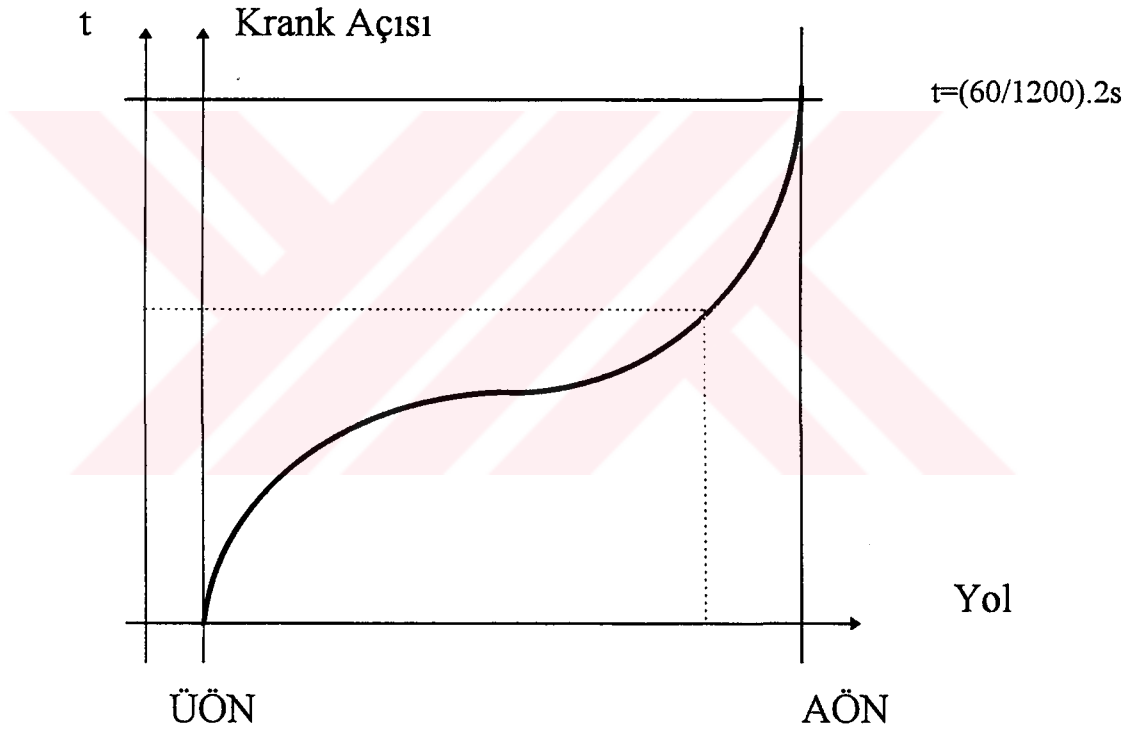
### 4.2.1. Displacerin Dinamik Analizi

Önceden açıklandığı üzere displacerin aşağı hareketi egzost portunun açılması ile başlayacaktır. hareket egzost portu tekrar kapanıncaya kadar sabit ivmeli olarak devam edecektir. Egzost portunun kapanmasından sonra displacer ile güç pistonu arasında kalan bir miktar hava çok büyük bir negatif ivme ile displaceri durduracaktır (Şekil. 4.3).



Şekil.4.3 Displacerin ivme-zaman,hız-zaman grafikleri

Burada önemli olan husus egzost portunun açık kaldığı süre içinde displacerin yaklaşık olarak piston kursuna denk bir yolu kat etmesi zorunluluğudur. Günümüz motorlarında piston kursu 60 mm ile 100 mm arası değişmektedir. Burada yapılacak olan hesapların 80 mm piston kursu ve 1200 d/d motor hızına göre yapılması uygun olacaktır. Güç pistonunun bir devirlik periyot içinde yol zaman grafiği Şekil 4.4.' de görülmektedir.



Şekil.4.4. Güç pistonunun bir devirlik periyot içindeki yol zaman grafiği

Ekzost portu alt ölü noktadan 6 mm önce açılır ve 6mm sonra kapanırsa portun açık kalma süresi yaklaşık olarak 70 krank derecesi açısına karşılık gelmektedir. Ekzost portu zaman

olarak 0.01 saniye açık kalır. Bu süre içerisinde displacerin en az 70 mm yol alması gerekmektedir.

Buna göre displacerin ivmesini hesaplamak için ;

$$S = V_0 t + \frac{1}{2} a_D t^2 \quad (4.33.)$$

kullanılabilir.

$V_0 = 0$  olduğu için

$$S = \frac{1}{2} a_D t^2$$

$$a_D = \frac{2 S}{t^2}$$

$$a_D = \frac{2 \cdot 0.08}{0.01^2}$$

$$a_D = 1400 \text{ m/s}^2$$

Displaceri iten kuvvet, basınçlı hava haznesindeki basınca bağlı olduğu gibi aynı zamanda da displacer kütlesi ile ivmesinin çarpımına da eşittir.

$$F_D = P_{BHH} A_{DK} \quad (4.34.)$$

$$F_D = m_D a_D \quad (4.35.)$$

Hazne içindeki basıncı bulmak için  $F_D$  nin bulunması gerekmektedir.

4.35. eşitliğinden;

$$F_D = 0.15 \cdot 1400$$

$$F_D = 210 \text{ N}$$

olarak bulunur. Basıncılı hava haznesindeki basıncı bulmak için 4.34. eşitliği kullanılabilir.

$$P_{BHH} = \frac{F_D}{A_D}$$

$$P_{BHH} = \frac{210}{\frac{\pi \cdot 0.02^2}{4}}$$

$$P_{BHH} = 668450.761 \text{ Pa}$$

olarak bulunur.

Yapılan hesaplamalar sonucu bulunan  $668450 \text{ Pa}$ 'lık basıncı, hesaplamalar başında ihmal ettiğimiz sürtünme kayıplarını telafi edebilmek için  $P_{BHH} = 7 \text{ kPa}$  olarak alabiliriz

#### 4.2.2. Volanın Dinamik Analizi

Motorlarda döndürme momenti oldukça değişkendir, bu sebeple motorlarda sabit bir döndürme momenti için volan kullanılması gereklidir. Volan; motorlarda bir enerji depolayıcı olarak görev yapar ve devir sayısı değişimlerini en aza indirir. Devir sayısı arttıkça düzensizlikler azalmakta, devir sayısı azaldığında ise düzensizlikler artmaktadır [19]. Tasarlanan Stirling motorunda bu düzensizliğe bağlı devir değişimleri  $\pm 10$  olarak kabul edilecektir. Buna bağlı olarak motor volanın ait düzgünlük katsayısı:

$$\frac{1}{\delta} = \frac{n_{\max} - n_{\min}}{n_{\text{ort}}} \quad (4.36.)$$

$$\frac{1}{\delta} = \frac{1210 - 1190}{1200}$$

$$\frac{1}{\delta} = \frac{1}{60} \quad \text{olarak bulunur.}$$

Devirli taşıt motorlarında bu değer 1/180-1/300 arasındadır [20]. Bu değerler dikkate alındığı zaman, 1/60 düzgünlük katsayısı tasarlanan motor için normal kabul edilebilir.

Tasarımı yapılan bu motor 1200 d/d da, iki zamanlı motorlar gibi her devirde sıkıştırma ve genişleme işi yapar. Bu nedenle güç pistonunun genişleme zamanındaki hareketinde

volan enerji depolayacak, sıkıştırma zamanında ise depoladığı bu enerjiyi kullanarak ölü noktanın atlatılmasını sağlayacaktır. Bu iki olay krank açısı cinsinden 360 derecede meydana gelir.

Motor devri 1200 d/d olduğuna göre, bir devirlik iş için harcanan zaman:

$$60/1200=1/20 \text{ s}$$

Volanın dinamik analizi, 1/20 s içinde yapılan sıkıştırma işi dikkate alınarak yapılmalıdır. Bu sebeple volanda değişken olan  $m_v$  ve  $r_j$  değerlerinden bir tanesi uygun değerde kabul edilip, yapılan hesaplamalar sonunda volan ölçüleri ortaya çıkarılmalıdır.

Analiz edilen volan genleşme zamanında üzerine depo ettiği kinetik enerjiyi, sıkıştırma zamanında pistonu aktarmalıdır. Yani; volanın genleşme ve sıkıştırma zamanındaki kinetik enerji farkları, sıkıştırma zamanında yapılan işe eşit olmalıdır.

$$\Delta E_k = W_{\text{comp}} \quad (4.37.)$$

olmalıdır. Volandaki kinetik enerji birikimi

$$\Delta E_k = E_1 - E_2 \quad (4.38.)$$

$$\Delta E = \frac{1}{2} m_v v_1^2 - \frac{1}{2} m_v v_2^2 \quad (4.39.)$$

Çizgisel hızı çevresel hıza çevirdiğimizde

$$v_1 = \omega_1 r_j \quad (4.40.)$$

$$v_2 = \omega_2 r_j$$

bulunur. Bulduğumuz bu değerleri 4.38. eşitliğine yazdığımızda

$$\Delta E = \frac{1}{2} m_v \omega_1^2 r_j^2 - \frac{1}{2} m_v \omega_2^2 r_j^2 \quad (4.41.)$$

$$\Delta E = \frac{1}{2} m_v r_j^2 [\omega_1^2 - \omega_2^2] \quad (4.42.)$$

bulunur.  $W_{\text{comp}}$ ' u  $\Delta E$  ye eşitlersek

$$W_{\text{comp}} = \frac{1}{2} m_v r_j^2 [\omega_1^2 - \omega_2^2] \quad (4.43.)$$

olur.  $r_j$  yi kabul ederek volan kütlesi

$$m_v = \frac{2 W_{\text{comp}}}{r_j^2 [\omega_1^2 - \omega_2^2]} \quad (4.44.)$$

bulunur. Bir s içinde motora akan hava ile yapılan hesaplama saniyelik işi verir.

Motor bir s içinde 20 sıkıştırma yapar. Bu sebeple bir çevrimlik hava, bir s içinde alınan havanın 1/20 si kadar olamalıdır.

$$\dot{m}_h = 7.142 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$$

$$m_c = \frac{7.142 \cdot 10^{-3}}{20} \quad (4.45.)$$

$$m_c = 3.571 \cdot 10^{-4} \text{ kg/çevrim}$$

olarak bulunur. Bir çevrimlik iş

$$W_{\text{comp}} = \frac{m_c R [T_2 - T_1]}{k - 1} \quad (4.46.)$$

olur. Değerlerini yerine yazdığımız zaman

$$W_{\text{comp}} = \frac{3.571 \cdot 10^{-4} \cdot 287 \cdot [571 - 300]}{0.4}$$

$$W_{\text{comp}} = 69.4 \quad \text{joule/çevrim}$$

olarak bulunur. Bu değeri kayıpları telafi edebilmek için

$$W_{\text{comp}} = 90 \quad \text{joule/çevrim}$$

olarak kabul edebiliriz.



$r_j=0.10$  m kabul ettiğimizde 4.44. numaralı eşitlikten

$$m_v = \frac{2.90}{0.10^2 \cdot [16055 - 15529]}$$

$$m_v \cong 34 \text{ kg}$$

$$m_v \cong 34000 \text{ gram}$$

bulunur. Volan düzgün geometrik şekilde olduğu için volan ağırlığı

$$m_v = \frac{\pi D_v^2}{4} a_v \gamma \quad (4.47.)$$

eşittir. Volan kalınlığı ise 4.47. numaralı eşitlikten

$$a_v = \frac{4 m_v}{\pi D_v^2 \gamma} \quad (4.48.)$$

olur.  $r_j = \frac{r}{\sqrt{2}}$  bağıntısı kullanılarak  $D_v$  bulunabilir

ve;

$$a_v = \frac{4 \cdot 3400}{\pi \cdot 28^2 \cdot 7.2} 10^{-2}$$

$$a_v = 0.076 \text{ m}$$

Olarak bulunur. Aynı işlemleri jirasyon yarıçapını 0.15 m ve 0.20 m kabul ederek yapabiliriz.

$$r_j = 0.15 \text{ m}$$

$$m_v = \frac{2.90}{0.15^2 \cdot [16055 - 15529]}$$

$$m_v = 15 \text{ kg}$$

$$m_v = 15000 \text{ gram}$$

$$a_v = \frac{4.15000}{\pi \cdot 42^2 \cdot 7.2} \cdot 10^{-2}$$

$$a_v = 0.015 \text{ m}$$

$$r_j = 0.20 \text{ m}$$

$$m_v = \frac{2.90}{0.2^2 \cdot [16055 - 15529]}$$

$$m_v = 8.5 \text{ kg}$$

$$m_v = 8500 \text{ gram}$$

$$a_v = \frac{4.8500}{\pi \cdot 56^2 \cdot 7.2} \cdot 10^{-2}$$

$$a_v = 0.0047 \text{ m}$$

Bulunan bu değerleri birbirleri ile kıyasladığımızda, 0.15 m jirasyon yarıçapına sahip volanın motor için daha uygun olduğu kanaatine varılmıştır.



## BÖLÜM V

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde, mevcut enerji kaynaklarını en iyi şekilde kullanmak ve alternatif enerji kaynakları ortaya çıkararak bunları en verimli şekilde kullanacak sistemler oluşturmak bilim adamlarının yegane emeli haline gelmiştir. Tezde incelenen ve tasarımı yapılan Stirling motorunda bu emelin bir parçasıdır.

Bu araştırmada amaç serbest pistonlu Stirling motoru parçalarından displacerin hareket düzeninin basitleştirilmesini sağlayacak teorik bir model ortaya koymaktır. Bu teorik modeli ortaya koyabilmek için yapılan araştırmalar sonucu ortaya çıkan sonuç ve düşünceler tezin muhtelif bölümlerinde açıklanmıştır.

Tezde; Stirling motorunun geçmişi ve temel prensipleri incelenerek motorun tanıtımı yapılmıştır. İkinci bölümde literatür taranarak motorun değişik dizaynları örneklerle ortaya konmuştur. Burada motora ait değişik dizaynlar olmasına rağmen, bunların sınırlı tutulmasının sebebi bu dizaynların çok sayıda olmasındandır.

Üçüncü bölümde; serbest pistonlu olarak tasarlanması düşünülen motor, değişik düşünce ve tasarımların bir araya gelmesi ile, tasarım serbest displacerli olarak ortaya

konmuştur. Tasarımda parça sayısı ve detayın mümkün olduğu kadar az olmasına özellikle dikkat edilmiştir.

Dördüncü bölümde; tasarlanan motorun termodinamik analizler ile motor parçalarından displacer, volan, ısıtıcının analizleri yapılmıştır.

Tasarlanan bu motorun çalışabileceği ve uygulanabilirliği, analizler neticesi elde edilen değerlerin istenilene yakın olmasına bağlı olarak söylenebilir.

Tasarımı yapılan bu motor kurs boyu uygun bir motora adapte edilerek denemelere tabi tutulabilir. Başlangıçta ısı kaynağı olarak elektrikli ısıtıcı veya bir pürmüz kullanılabilir. Daha sonra ısıtıcı üzerine güneşi takip eden parabolik bir ayna yerleştirilerek, bu aynaya gelen ısıyı da ısıtıcı üzerine aktararak sistemin güneş enerjisi ile çalışması sağlanabilir.

Denemelerde ortaya çıkabilecek en önemli problem ise displacer sapının hareket ettiği kısımlarda sıcaklıktan dolayı sıkışma olmasıdır. Bu sebeple, kullanılacak malzemenin ısıya ve aşırıya dayanıklı ve genişleme katsayısının çok küçük olmasına dikkat edilmelidir.

## KAYNAKLAR

1. TC, Başbakanlık Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü Bülteni, Türk Tarih Kurumu Matbaası, Ankara, 1984.
2. Özge, A., Regenaratör Verimini Arttırmak ve Sistemde Oluşan Kayıpları Enerji-Exerji Yönünden İncelemek Yoluyla Çevrim Termik Verimini İyileştiren Stirling Motor-Helyum Gaz Soğutmalı Yüksek Sıcaklık Reaktörü Kombinasyonunun Gemilere Sevk Sistemi Olarak Kullanılma Olanaklarının Araştırılması, İ.T.Ü., İstanbul, Eylül 1977.
3. Walker, G., Stirling Engines, Clarendon Press, Oxford, 1980.
4. Çetinkaya, S., Gaz Türbinlerine Giriş, G.Ü.T.E.F., Ankara 1989.
5. Walker, G., Stirling-Cycle Machines, Clarendon Press, Oxford, 1973.
6. Üner, N., "Stirling Motoru", Mühendis ve Makina Dergisi, C.16., Sayı 187, Eylül 1972.
7. Meijer, R. J., "The Potential of Stirling Engine for Pollution Reduction and Energy Conservation", Second Symposium on Low Pollution Development, Germany, November 4-8th. 1974.
8. Walker, G., Demirekle, Y., "Stirling Motorları Yeniden mi Ortaya Çıkıyor", Mühendis ve Makina Dergisi, C.16., Sayı 388., Mayıs 1974.
9. Beale, W., Holmes, W., Lewis, S., "Free - Piston Stirling Engines - A Progres Report", SAE, Paper No. 730647, 1973.
10. Beale, W., Rauch I., Lewis, R., "Free Cylinder Stirling Engines for Solar Powered Water Pump", ASME, Paper No. 71, 1971.

11. Beale, W., "Free Piston Stirling Engines - Some Models and Simulations", SAE, Paper No. 690230, 1969.
12. Schultz, T., Thomas, W., "Development Of A Free Piston Vuilleumier Machine For Cooling Purpose", 5. International Stirling Engine Conference, 8,9,10, May, Dubrovnik, 1991.
13. Martini, W., R., "Development in Stirling Engines", ASME, Paper No. 72-Wa/ENER-9.
14. Çevre ve İnsan Dergisi , TC, Çevre Bakanlığı, Ankara, 1990.
15. Budliger, J.P., "New Concept For a Stirling Heat Pump System", ASME, Paper No. 87/AES-5.
16. Berchowitz, D. M., Shander, J., "Estimated Size and Performance of a Natural Gas Fired Dublex Stirling for Domestic Refrigeration Applications", XVIIIth International Congress of Refrigeration, Montreal, August 10-17, 1991.
17. Budliger, J. P., "Stirling Heat Pump System With Rezonans Tube", V. International Stirling Engine Conference, Dubrovnik, 8-9-10 May, 1991.
18. Emiroğlu, I., Benzin Motorları Meslek Teknolojisi, E.T.Y.Ö.O. Matbaası, Ankara, 1979.
19. Çetinkaya, S., Motor Dinamiği Ders Notları, G.Ü.T.E.F., Ankara, 1989.
20. Borat, O., Balcı, M., Sürmen, A., İçten Yanmalı Motorlar Teknolojisi, C I, Ankara, 1992.

## ÖZGEÇMİŞ

1966 yılında Giresun' nun Şebinkarahisar ilçesinde doğdu. İlk, orta, lise öğrenimini sırası ile İstanbul Beyoğlu Cihangir İlkokulu, İstanbul Beyoğlu Fındıklı Lisesi orta kısmı, İstanbul Şişli Endüstri Meslek Lisesinde tamamladı. 1985 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makina Eğitimi Bölümü Otomotiv Anabilim Dalında yüksek öğrenimine başladı ve Temmuz 1989 yılında mezun oldu. Eğitimi sırasında ve mezun olduktan sonra stajer, personel olarak; Moğulkoç Motor Yenileme A. Ş., Renault-Mais Genel Müdürlüğü, Mercedes-Türk A. Ş. Davutpaşa Otobüs Fabrikası, TC Denizcilik İşletmeleri Haliç Tersanesi, Çalışkan Tekstil A. Ş. de çalıştı. Aralık 1989 da; o zamanlar Selçuk Üniversitesine, şu anda Niğde Üniversitesine bağlı olan Niğde Meslek Yüksekokulu'nda Öğretim Görevlisi olarak çalışmaya başladı. Halen bu kurumda Teknik Programlar Bölüm Başkanı olarak görevine devam etmekte. Evli ve bir çocuk babası.