

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

85030

**ROTO-DİNAMİK BİR MAKİNA VASİTASIYLA  
GÜNEŞ ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ÜRETİMİ**

**Makine Müh. Suphi KAMACIOĞLU**

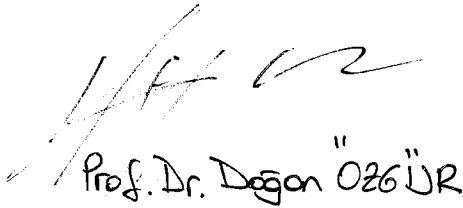
**F.B.E.Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Isı Proses Programında  
Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**



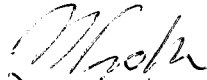
**Tez Danışmanı :Doç.Dr. İbrahim GENTEZ**

85030



Prof. Dr. Degan ÖZGÜR

**TC. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

  
Prof. Dr. Nurten YARDAK

**İSTANBUL, 1999**

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	i
ŞEKİL LİSTESİ.....	iii
TABLO LİSTESİ.....	v
ÖNSÖZ.....	vi
ÖZET.....	vii
ABSTRACT.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. STİRLİNG MOTORUNUN TARİHÇESİ VE ÇALIŞMA PRENSİBİ.....	3
2.1 Geçmişten Günümüze Stirling Motoru.....	3
2.2 Stirling Motorunun Çalışma Prensibi.....	10
3. TERMODİNAMİKSEL İDEAL ÇEVİRİMLER VE STİRLİNG ÇEVİRİMİNİN TEORİK ANALİZİ.....	12
3.1 Temel Prensiplerin Tanıtılması.....	12
3.2 Carnot Çevrimi.....	14
3.3 Stirling Çevrimi.....	17
3.4 Rejeneratif Motor Çevriminin Pratik Olarak İncelenmesi.....	21
3.4.1 İdeal Çevrim.....	21
3.4.2 Pratik Çevrim.....	21
3.5 Stirling Çevriminin Teorik Analizinin Yapılması.....	27
3.5.1 İdeal Stirling Çevrimi.....	27
3.5.2 Schmidt Çevrimi.....	28
3.5.3 Temel Denklemler.....	29
4. STİRLİNG / GÜNEŞ MAKİNASIYLA ELEKTRİK ÜRETİMİ.....	37
4.1 Odaklayıcılar.....	38
4.2 Isı Alıcılar.....	39
4.3 Makine.....	41
4.3.1 Çalışma Gazı.....	43
4.4 Sistem Maliyetinin İncelenmesi.....	44

5.	RÜZGAR ENERJİSİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİ.....	45
5.1	Rüzgar Enerjisi İçin Şartlar.....	47
5.3	Rüzgar Türbinlerinin Maliyeti.....	49
6.	GÜNEŞ PİLLERİ YARDIMIYLA ELEKTRİK ÜRETİMİ.....	50
6.1	Güneş Pillerinin Maliyetinin İncelenmesi.....	50
7.	DÜZ PLAKALI STİRLİNG MOTORU.....	51
7.1	Sürekli ve Süreksiz Çalışan Yerdeğiştirme Mekanizmaları.....	51
7.2	Prof. I. Kolin'in Plakalı Stirling Motoru.....	52
7.2.1	Düz Plakalı Stirling Motorunun Çalışma Prensibi.....	54
7.2.2	Düz Plakalı Stirling motoru sistemi.....	57
8.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	58
	KAYNAKLAR.....	60
	ÖZGEÇMİŞ.....	61



## SİMGE LİSTESİ

A	Bir faktör $(\tau^2 + 2\tau\kappa\cos\alpha + \kappa^2)^{1/2}$
B	Bir faktör $(\tau + \kappa + 2S)$
M	Çalışma akışkanının toplam kütlesi
N	Makinanın hızı
K	Sabit
p	Anlık çevrim basıncı
$p_{mak}$	Maksimum çevrim basıncı
$p_{ort}$	Ortalama çevrim basıncı
$p_{min}$	Minimum çevrim basıncı
P	Motor çıkış gücü
$P_{kütle}$	$P / RT_c$ çalışma akışkanının kütlesine bağlı boyutsuz güç parametresi
$P_{mak}$	$P / (p_{mak} V_T)$ , maksimum çevrim basıncına bağlı boyutsuz güç parametresi
Q	Genleşme bölgesindeki çalışma akışkanına iletilen ısı
$Q_{kütle}$	$Q / T_c$ çalışma akışkanının kütlesine bağlı boyutsuz soğutma parametresi
$Q_{mak}$	$Q / (p_{mak} V_T)$ , maksimum çevrim basıncına bağlı boyutsuz ısı
R	Çalışma akışkanının ideal gaz parametresi
S	$(2 X \tau) / (\tau + 1)$ , azaltılmış ölü hacim
$T_C$	Sıkıştırma bölgesindeki çalışma akışkanının sıcaklığı
$T_D$	Ölü bölgedeki çalışma akışkanının sıcaklığı
$T_E$	Genleşme bölgesindeki çalışma akışkanının sıcaklığı
$V_C$	Sıkıştırma bölgesindeki süpürme hacmi
$V_E$	Genleşme bölgesindeki süpürme hacmi
$V_D$	Isı değiştiricilerin ,rejeneratörün ,birleşme kanallarının ve boşlukların toplam iç hacmi
$V_T$	$(V_C + V_E) = (1 + \kappa)V_E$ ,birleştirilmiş süpürme hacmi
$V_W$	$1/2 V_E(1 + \cos\phi) + 1/2 V_C[1 + \cos(\phi - \alpha)] + V_D$ , toplam çalışma bölgesi hacmi
$V_{wmak}$	Toplam çalışma bölgesinin maksimum hacmi
X	$V_D / V_E$ , ölü hacim oranı

$\alpha$	Sıkıştırma bölgesi hacim değişiminin genişleme bölgesiyle olan faz farkı
$\delta$	$(\tau^2 + 2\tau\kappa\cos\alpha + \kappa^2)^{1/2} / (\tau + \kappa + 2S) = (A / B)$
$\theta$	$\tan^{-1} ((\kappa\sin\alpha) / (\tau + \kappa\cos\alpha))$
$\kappa$	$V_C / V_E$ , süpürme - hacim oranı
$\tau$	$T_C / T_E$ , sıcaklık oranı
$\phi$	Krank açısı ( = wt )
w	Krankın açısal hızı
n	Dakikadaki devir sayısı ( =60v)
v	$w / 2\pi$
$\eta$	Verim; ayrıca viskozite
d	Çap
$\gamma$	$(\phi - \theta)$ ; ayrıca $c_p / c_v$
$d_h$	Hidrolik çap
Re	$\rho v d_h / \eta$ , Reynolds sayısı
$\rho$	Çalışma akışkanının yoğunluğu
v	Gazın hızı
$c_p$	Sabit basınçta özgül ısı
$c_v$	Sabit hacimde özgül ısı
U	Gazın iç enerjisi
H	Entalpi
l	Bir kanalın veya rejeneratörün

Not: Bu tezde yer alan küçük harfli indisler sıcaklık, basınç , hacim ve kütledeki anlık değişimleri , büyük harfli indisler ise bu büyüklüklerin maksimum (veya sabit) değerlerini belirtmektedir. Bu şekilde ;E veya e genişleme bölgesini , C veya c sıkıştırma bölgesini, D veya d ölü bölgeyi nitelemektedir.

## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1.1	Sıcak Gaz Motoru Dizaynı.....3
Şekil 2.1.2	Ericson Sıcak Hava Makine.....4
Şekil 2.1.3	1816’da Patenti Alınmış İlk Stirling Motoru.....5
Şekil 2.1.4	1880’da Yapılan Stirling Motoru.....6
Şekil 2.2.1	Stirling Motorunun Çalışma Prensibinin Basit Modeli.....10
Şekil 2.2.2	Sıkıştırma Fazı.....11
Şekil 2.2.3	Genişleme Fazı.....11
Şekil 3.1	P-V ve T-S Diyagramlarının Termodinamik Prosesi.....13
Şekil 3.2	Carnot Çevrimi.....15
Şekil 3.3.1	Stirling Çevrimi.....18
Şekil 3.3.2	Stirling ve Carnot Çevrimlerinin Mukayesesi.....20
Şekil 3.4.2.1	Zıt Pistonlu Stirling Motorunun Şematik Gösterimi.....22
Şekil 3.4.2.2	Gerçek Motor İçin Basınç Hacim Diyagramları.....24
Şekil 3.4.2.3	Motorun Çalışması Sırasında Aerodinamik Akış Kayıplarının Etkisi.....24
Şekil 3.4.2.4	Fosil Yakıtlı ,Su soğutmalı Bir Stirling Motorunda Karakteristik sıcak.....26
Şekil 3.3.1	İdeal Stirling Çevrimi .....27
Şekil 3.5.3	Süpürme Hacim Oranı ve $\theta$ arandaki ilişkiyi gösteren vektör diyagramı.....29
Şekil 4.1	Parabolik Odaklayıcılardan Oluşmuş Stirling Güneş Makinası.....37
Şekil 4.1.1	Parabolik Yansıtıcı.....38
Şekil 4.2.1	Isı Alıcı.....40
Şekil 4.2.2	Sıvı Metal İle Çalışan Isı Alıcı.....41
Şekil 4.3.1	Stirling Güneş Makinası.....42
Şekil 4.3.2	Hidrojen,Helyum ve Havanın Mukayesesi.....43
Şekil 5.1	Rüzgar Türbini.....46
Şekil 5.2	Rüzgar Türbininin Elemanları.....47
Şekil 5.3	Hava Hızına Bağlı Rüzgar Türbini güç eğrisi.....48
Şekil 7.1	Stirling Motoru Çevrimleri.....51
Şekil 7.2	Düz Plakalı Stirling Motoru.....52
Şekil 7.3	Düz Plakalı Stirling Motorunun Çeşitli ısı kaynaklarıyla Çalıştırılması.....53

Şekil 7.4	Düz Plakalı Stirling Motorunun Mümkün Olabilen Teoriksel Güç Aralıkları.....	54
Şekil 7.5	Kolin'in Düz Plakalı Stirling Motoru.....	54
Şekil 7.6	Düz Plaklı Stirling Motoru Çalışmasının 1⇒2 Fazı.....	55
Şekil 7.7	Düz Plakalı Stirling Motoru Çalışması 2⇒3 Fazı.....	55
Şekil 7.8	Düz Plakalı Stirling Motoru Çalışması 3⇒4 Fazı.....	56
Şekil 7.9	Düz Plakalı Stirling Motoru Çalışması 4⇒1 Fazı.....	56



## TABLO LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1.1 Bölgelere Göre Güneş Enerjisi Potansiyeli.....	1
Tablo 2.1.1 Stirling Teknolojisinin Gelişim Durumu.....	9
Tablo 5.1 Türkiyenin Çeşitli Bölgelerin Ortalama Hızı.....	49
Tablo 8.1 Elektrik Üretim Sistemlerinin Karşılaştırılması.....	59



## ÖNSÖZ

Dünyada ve ülkemizde fosil yakıtlarının giderek azalması , temiz enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisinden elektrik üretimi ile ilgili bir tez konusu seçmeye beni yöneltmiştir. Önümüzdeki yıllarda daha ön plana çıkacak olan çevresel değerlerin ,bu tip yakıt türleri ile enerji sağlanmasına izin vermeyeceği bir gerçektir.

Bu tezdeki amacım Stirling motoru ile güneş enerjisinden elektrik üretimini, diğer temiz enerji kaynaklarına bir alternatif olarak getirmek ve ülkemizde hangi tip enerji kaynağının daha uygun olacağı konusunda bir yaklaşım sunmaktır.

Tezin hazırlanma aşamasında bana yol gösteren değerli hocam Doç. Dr. İbrahim Gentez'e, desteklerinden dolayı aileme, kaynak temini konusunda bana yardımcı olan Yeşim Aktaş'a teşekkürü bir borç bilirim.



## ÖZET

Bu yüzyılın sonuna doğru önemli bir elektrik üretim kapasitesi şu anki mevcut kapasiteye eklenecektir. Bunun yanında bu kapasiteyi karşılamak üzere yirmi birinci yüzyılın başında kurulması düşünülen güç santralleri daha çok güneş alan bölgelere kurulacak olması güneş enerjisinden elektrik üretimini ön plana çıkarmaktadır.

Günümüzde bu tip sistemlerin seçiminde kirlenme karbon dioksit üretimi gibi çevresel değerlerde önemli bir rol oynamaktadır.

Özellikle Stirling makinası , yapısından dolayı güneş enerjisinden elektrik üretimi konusunda diğer petrol ,diesel ve gaz türbinlerine karşın kendi alanında mukayese edilemeyecek bir üstünlüğe sahiptir.

Bu tezde ilk olarak bu makinanın nasıl olupta teorik olarak en yüksek verime sahip olan carnot verimiyle çalışmasını anlattım daha sonra bu makınayı bir güneş odaklayıcısı ile birlikte düşünüp verimini ve maliyetini inceledim.Daha sonraki bölümlerde Stirling makinasının rüzgar türbinleri ve fotovoltaik teknolojisi gibi diğer temiz enerji sistemlerine bir alternatif olarak sunmak için onların çalışma prensiplerini ilk yatırım ve işletme maliyetlerini karşılaştırdım.

Sonuç olarak ülkemizin doğal kaynak kapasitesi de göz önüne alındığı zaman rüzgar türbinlerinden elektrik üretiminin ülkemizin her bölgesinde verimli olamayacağı buna karşın güneş enerjisi bakımından bir hayli zengin olan ülkemizde stirling makinası daha verimli olacağından seçim aşamasında diğer istemler göre daha avantajlı bir konuma sahip olacağı ortaya çıkmıştır.

## **ABSTRACT**

Considerable worldwide electrical generation capacity will be added before the end of this century and during the first decade of the twenty - first century ,many of the new and replacement power plants providing this capacity are expected to be located in regions with large amounts of sunshine Therefore gaining electricity from solar energy becomes , one of the important way in electrical generation.

Environmental concerns about pollution and carbon dioxide generation are becoming driving forces in the selection of the technologies suitable for this build up .The ability to produce power from solar radiation is especially interesting for the generation of electricity and makes the Stirling engine almost unique in a field where petrol engines , diesel engines and gas turbines can not compete .

In this report, I tried to show a machine that runs with the Carnot efficiency and after it I made a combination of this machine with a solar concentrator in order to convert solar energy to electrical energy . To make a comparison with the other clean power converting systems such as wind turbines and photovoltaic cells , I did an explanation about their system ,and also their initial and operational costs.

As a result the natural sources of Türkiye showed that the electrical generation from wind turbines is not suitable for all regions in Türkiye . But the capacity of solar radiation that takes Türkiye, makes Stirling Engine the best choice in generating electricity from sun.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Dünya ihtiyaçlarının nüfusa paralel artması , enerjiye olan talebi de arttırmaktadır. Buna karşın kullanılan enerji kaynaklarının sınırlı ve her geçen gün azalıyor olması düşündürücüdür. İnsanlığın geleceği ve teknolojinin devamı için ,eldeki enerji kaynaklarını yaşam sürelerini uzatmak ve bazı uygulama sahalarında alternatif enerji kaynaklarının üzerinde ciddiye durmak gerekmektedir. Hele ülkemiz gibi doğal enerji kaynakları açısından zengin sayılmayan ve bu alanda dışa bağımlı olan bir yerde , her tür enerji kaynağı oldukça değerli sayılmaktadır.

Bugün ülkemizde tüketilen toplam enerjinin yaklaşık %50'si yurt içinden karşılanmakta ancak 2000 yılında bu oranın %45'e 2010 yılında ise %40 civarına düşmesi beklenmektedir. Görüldüğü gibi enerjinin yurt dışı kaynaklardan karşılanması oranı giderek düşerken ,dışa bağımlılık ve buna paralel olarak döviz kaybı oldukça artmaktadır. Günümüzde artan enerji fiyatları ve çevre kirliliği ,temiz ve yenilenebilir enerji olması bakımından ,güneş enerjisini gittikçe ön plana çıkarmaktadır. Türkiye güneş enerjisi açısından Avrupa'nın en avantajlı konumuna sahiptir.  $36^{\circ}$  -  $42^{\circ}$  Kuzey enlemleri arasında yer alan Türkiye'de ortalama 2640 h/yıl olan güneşlenme süresi vardır. Bu değer ortalama güneşlenme süresi 1500 h/yıl olan Kuzey Avrupa ülkelerine göre bir hayli yüksektir. Aşağıda ki Tabloda Türkiyede bölgelere göre güneş enerjisi potansiyeli gösterilmiştir. (OĞULATA , Standart)

Tablo 1.1 Bölgelere Göre Güneş Enerjisi Potansiyeli

BÖLGELER	YILLIK ORT. ENERJİ ( w/m <sup>2</sup> )	ORT. GÜNEŞLENME SÜRESİ (saat/gün)
Güney Doğu Anadolu	1697	8.2
Akdeniz	1666	8.7
Ege	1618	8.2
İç Anadolu	1513	7.5
Doğu Anadolu	1566	6.5
Marmara	1461	6.8
Karadeniz	1305	5.3

Bugün Avrupa Ülkeleri güneş enerjisinden daha etkin bir şekilde yararlanmak için çalışmalar yapmaktadır. Türkiye'den çok daha az alan İngiltere 'de sanayide güneş enerjisi uygulamaları ile toplam birincil enerji tüketiminin %1'inin karşılanabileceği öngörülmektedir. Bilindiği gibi Türkiyede harcanan enerjinin büyük bir kısmı ithal yoluyla sağlanan petrol kökenli yakıtlar ile katı yakıtlardan oluşmaktadır. Bu nedenle alternatif bir enerji kaynağı olarak güneş enerjisinden yararlanmak ,Türk ekonomisine büyük oranda kazanç getirecektir. Özellikle Güneydoğu Anadolu Akdeniz ve Ege Bölgelerinde güneş enerjisinden yararlanmak pek sorun olmayacaktır.

Stirling/Güneş makinası da güneş enerjisinden elektrik üretim sistemleri arasında hem en az bilineni hem de en etkili yöntemdir. Genel olarak üzerinde elektrik üretmek için entegre edilmiş bir jeneratör bulunan stirling makinası ve bu makinanın çalışması için gerekli olan enerjiyi güneşten yansıtan , parabolik odaklayıcılardan oluşmuş bir kollektörden oluşur. Teorik olarak en verimli çevrim olarak kabul edilen Carnot çevrimine çok yakın bir verim yüzdesiyle çalışan stirling makinası ,% 30'lara varan verimiyle güneş sistemini en iyi kullanan sistemdir.

Stirling motorunda ısı sürekli ve dışarıdan verilir. Kullanılan çalışma akışkanı Hidrojen veya Helyumdur ve tamamen kapalı bir çevrimde çalışmaktadır. Sürekli yanma yöntemi nedeniyle düşük gürültüye ve azaltılmış emisiyona sahiptir. Çalışması düzgün ve titreşimsizdir. Tezin ilk bölümlerinde stirling makinasının işleyişi ve çevrimi hakkında bilgi verilirken daha sonra motorun termodinamik hesapları incelenmiştir. Son bölümlerde ise diğer temiz enerji kaynakları ile stirling güneş makinasının mukayesesi yapılmış Ülkemiz için hangi sistemin daha uygun olacağı konusunda bilgi verilmiştir.

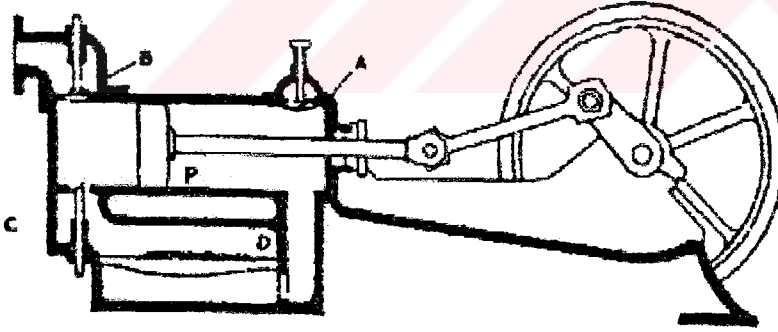
## BÖLÜM 2. STİRLİNG MOTORUNUN TARİHÇESİ ve ÇALIŞMA PRENSİBİ

### 2.1. Geçmişten Günümüze Stirling Motoru

Sıcak hava ile çalışan motorlar 19. Yüzyılda oldukça yaygın olarak kullanılmaktaydı. Güç elde etmek amacıyla buhar makinaları ile uzun süre rekabet etmesi düşünülmüş ve üzerlerinde uzun süreli araştırmalar yapılmıştır. Araştırmacılarından biri olan Slaby bu sistemleri aşağıdaki gibi gruplandırılmıştır:

1. Her çevrimde taze hava alan ve motorun silindirinin dış yüzeyinden direkt olarak ısıtılan açık sistemler.
2. Her çevrimde taze hava alan fakat dolaylı olarak ısıtılan açık sistemler.
3. Sürekli olarak aynı miktarda havayı kullanan kapalı sistemler.

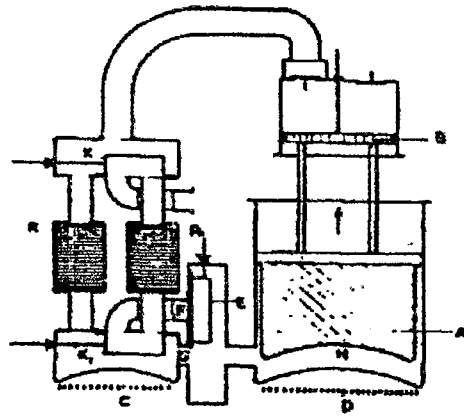
1.Gruba ait olan ve ilk olarak düzgün bir şekilde çalışan sıcak hava motorunun imalatı 1807 yılında Sir George Cayley tarafından yapılmıştır. şekil 2.1.1 bu grubun bir örneğı olan ve 1880' de su pompalamak için kullanılan bir motoru göstermektedir.



şekil 2.1.1 Sıcak gaz motoru dizaynı (1807'de Sir George Cayley tarafından yapılmıştır.)

A çek valfi içeri taze hava girmesini sağlamakta, çıkış valfi B ve giriş valfi C, motor tarafından kumanda edilmektedir. Piston P sağdan sola giderken A ve B açıktır. Böylece pistonun solundaki hava B'den dışarı atılırken silindire A'dan yeni hava emilmektedir. Piston diğer tarafa giderken A ve B kapalı C açıktır. Taze hava D ateşinin üzerinden geçer ve sıcak gaz halinde C'den P'nin solundaki kısma girer. Bu ısınma sonucu pistonun her iki tarafında ki basınç eşit oranda artar. Fakat piston çubuğunun konumundan doğan kesit farkı pistonun sağa gitmesine sebep olmaktadır.

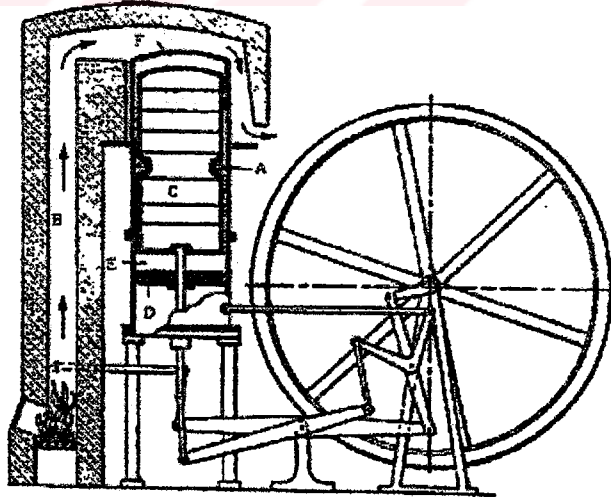
2. Gruba tipik bir örnek teşkil eden Ericson motorundan 1853 yılında 2200 tonluk bir gemi için Swede Ericson tarafından 4 adet sıcak gaz motoru yapılmıştır. Şekil 2.1.2'de bu makinanın şematik resmi gösterilmiştir. Bunlar büyük ihtimalle o zamana kadar yapılan en büyük sıcak gaz motorları olup, güç pistonunun çapı 4.2 m ve stroku 1.8 m dir. Bu tip motorlar arzu edilen gücü testlerde vermemişlerdir. Buna karşılık, yakıt tüketimi gemilerde kullanılanlarına göre daha düşük olmuştur. Bu resimde güç pistonu A ve kompresör pistonu B, çubuklar yardımıyla rijid olarak bağlıdır. B pistonu aşağı strokunda havayı emer ve yukarı strokunda rejeneratöre (R) gönderir. Hava C cidarında ön ısıtmaya tabi tutulur ve H silindirine gönderilir. Burada D cidarından ana ısıtma yapılır. Yaklaşık 2/3 strokta E valfi F ve G 'yi kapatır. Böylece sıcak silindirdeki hava H silindirinde genişlemeye çalışır. Strok sonunda E süratle aşağı itilir, aşağı strokta da hava F'den rejeneratöre R<sub>1</sub>, oradan da atmosfere çıkar. K ve K<sub>1</sub> valfleri yaklaşık olarak 50 devirde yer değiştirerek rejeneratör biriktirdiği ısıyı geri verir. Bu işlem karşılıklı olarak devam eder.



Sekil 2.1.2 Ericson sıcak hava makinası (1883)

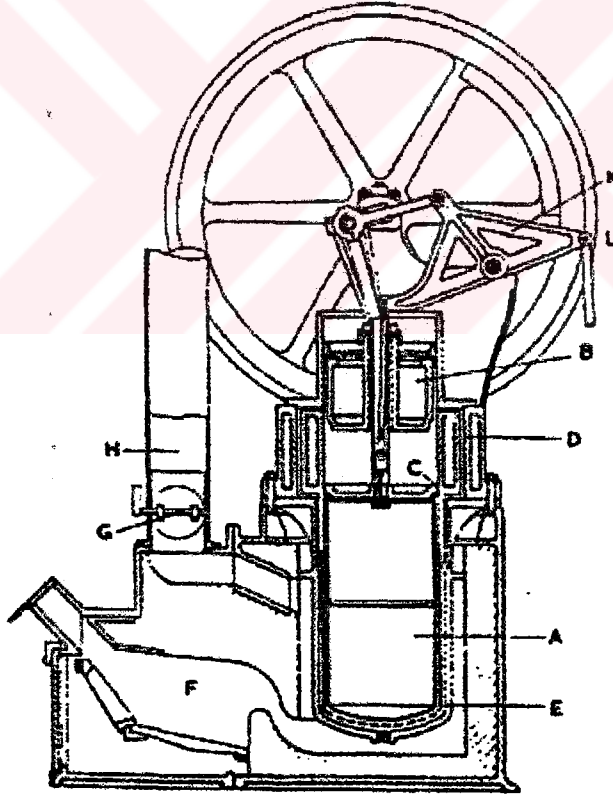
3. gruba ait bir örnek te İskoç rahip Robert Stirling tarafından yapılmıştır. Stirling 1816'da bir iş pistonu (veya güç pistonu), bir yerdeğiştirici piston (veya itme pistonu) ve bir rejeneratörü içeren sıcak gaz motorunu tanıtmıştır. Şekil 2.1.3'teki ilk model bir taş ocağının dışına su pompalamak için 1818 yılında kullanılmıştır. Burada B firmından gelen sıcak gazlar, uzun dik silindiri A tepeden ısıtır. Dip kısım suyla veya havayla soğutulabilir.

Silindirde yer değiştirici piston C ve iş pistonu D bulunmaktadır. Yerdeğiştirici piston yukarı aşağı hareket ederken hava alternatif olarak soğuk bölge E (yerdeğiştirici ve iş pistonları arasındaki bölge) rejeneratör ve sıcak bölge F (yerdeğiştirici pistonun üstü) arasında yerdeğiştirir. Rejeneratör (burada gözükmemektedir) halka şeklinde itme pistonu ve silindir arasında yer alır. Tel yumak şeklindedir. Hava sıcak ve soğuk bölgeler arasında yer değiştirirken ortaya çıkan sıcaklık ve basınç değişimleri D pistonu üzerinde iş yapılmasına sebep olur. Robert kardeşi James ile birlikte yaptığı çalışmalarda yeni modeller ortaya çıkarmışlardır. Bu modellerde özgül gücü arttırmak için bir komprösör, ve sızıntıyı önlemek için de çift yönde hareketli iş pistonu kullanmışlardır. Yaptıkları son modelde farklı silindirlerde iki yer değiştirici pistonu ihtiyaç olduğu ve bu yüzden de ölü bölgenin artması ve özgül gücün azalması gibi problemler ortaya çıkmıştır



Şekil 2.1.3. 1816'da patenti alınmış ilk Stirling motoru

Prensip olarak daha iyi olan ilk (1816) modeli 1868' e kadar unutulmuştur.1868 de W.Lehman yerdeğiştirici ve iş pistonlarının aynı silindirde yer almalarının küçük ölü hacim avantajını sağlaması açısından verdiği önemi anlamıştır. 19. Asrın ikinci yarısında büyük miktarlarda satılan yeni mekanik ekleriyle birlikte imal edilen motor şekil 2.1.4 'te gösterilmiştir. Bu motor genellikle rejeneratörsüz kullanılmıştır. Yer değiştirici piston A ve iş pistonu B aynı silindir içindedirler.Yerdeğiştirici piston C'de silindir içine tamamen uymaktadır. Ayrıca rejeneratör yoktur. F Fırından, gelen sıcak gazlar E ısıtıcı çevresini sararlar ve G damperinden, geçerek H bacasından çıkmaktadır. şayet motor su pompalamak için kullanılacaksa ,pompa çubuğu direkt olarak L güç çıkış koluna bağlanabilir. Bir Alman firmasının 1885 yılında yapmış olduğu en büyük stirling motoru 4100 kg. ağırlığında ve 21 m<sup>3</sup> hacminde olup 2 B.G. güç vermekteydi.



şekil 2.1.4. 1880'de yapılan Stirling motoru

İçten yanmalı motorların daha büyük özgül gücü, verimi ve ilk yatırım maliyetlerinin Stirling motorlarına göre daha az oluşu, sıcak gaz motorlarının yerini almasını sağlamıştır. İçten yanmalı motorların ön plana çıkışı, gelişimi bu tip motorların avantaj ve dezavantajlarının görülmesine fırsat vermiştir. Fakat Stirling sıcak gaz motoru üzerinde ileri seviyede çalışmalara ise sadece Philips laboratuvarında (Philip's Gloeilampenfabriek, Eindhoven, Hollanda) devam edilmiştir. Bunun sebebi ise; Philips, 2. Dünya savaşıdan önce dünyada yakıtın az olduğu yerlerde, radyo ve benzeri cihazlar için bataryalardan daha kolay enerjinin sağlandığı, her çeşit ısıyla çalıştırılabilen bir güç kaynağının ihtiyacını hissetmiş olmasıydı. Bu güç kaynağı için isteklere uygun çözümler arasında şunlar sayılabilir; Termo eleman, kapalı çevrim buhar motoru ve sıcak gaz motoru. İlk incelemelerden sonra, söz konusu piyasada bulunan sıcak gaz motorlarında, modern malzemelerin yanısıra akışkanlar mekaniği ve ısı transferi konularındaki yeni buluşların sonucunda Stirling motorunda rejeneratörün kullanılmasının tamamen gerçekleştirilemediği, şayet gerekenler yapılırsa istenilen tipte bir sıcak gaz motorunu geliştirilebileceğinin farkına varılmıştır.

Radyo tüplerinde ki yeni gelişmeler ve kısmen transistörlerin icadı, büyük miktarda enerji tüketimini azalttı. Bu amaçla incelenen sıcak gaz motorları daha az çekici hale gelmiştir. Bunun sonucu olarak araştırmalar daha büyük güçte modellere yöneltildi. Bu prensiple çalışan bazı küçük rejeneratörler, gerçek amacına uygun olarak 1953 yılında özel olarak imal edildi. Rejeneratörlerin sıcak gaz motoru, ilk olarak Rhombic çalışma mekanizmasıyla birlikte uygulanmıştır.

Bundan sonra Amerikalı yatırımcıların da konuya eğilmeleri ile araştırmanın boyutları genişletilmiştir. 1969 yılında General Motors Corp. Ve Philips sıcak gaz hareket mekanizmalarının geliştirilmesi ile ilgili bir anlaşma yapmışlardır. Bugüne kadar çeşitli ülkelerde araştırma laboratuvarlarında Stirling motoruyla ilgili pek çok deneyler yapılmıştır 1978 yılına kadar Stirling çevriminin tek ticari uygulaması soğutucu bir makinada sıvı hava üretmek için kullanıldı. Daha sonraları, Stirling motorunun ağır tonajlı kamyonlara uygulanmasında bazı geliştirme çalışmaları yapıldı ve askeri amaçlı uygulamalar için küçük bir üretim gerçekleştirildi. Philips'le yapılan lisans anlaşması sonucu Amerikan Enerji Departmanının (DOE) gözetiminde FORD firması arabalar için 4 silindirli 170 BG. Stirling motorunun fizibilite çalışmalarına başladı.

Motorun laboratuvar testi 1976'ta tamamlandı. İkinci aşama olarak yol testlerinde motor dayanıklılık ve performansını geliştirmek , fizibilite potansiyelini tesbit etmek , motor boyutlarını küçültmeye çalışmak ve diğer firmalarla araştırma geliştirme çalışmasına başlamak için çözüm yolları arandı. 1977'de FORD, DOE nin fonuyla 1334 - 1361 kgf. ağırlıkta 80 - 100 B:G de yolcu taşıtlarında kullanılabilecek bir stirling motoru dizaynı ve gelişimi için gerekli fizibilite çalışması tamamlandı. Bunu takiben FORD,DOE -Stirling programından çekildi.

DOE'nin 55 130 BG. arasında üç motor tipinin geliştirilmesi için bir fonla çalışmaya katıldığı firmalar şunlardı : Mechanical Technology Inc., United Stirling of Sweden AM General Corporation olmuştur. İlk Çalışma Opel Record'a Stirling motoru takılmasıyla başladı. 1978 yılında yol testleri tamamlandı. Stirling OPEL yakıt ekonomisinde dizel motorlu Opel motoruna denk bir çalışma sergilemiştir. Egzos emisyonlarında standart tüzüklerine göre oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. 1978 yılında DOE'nin Stirling motoruna ayırdığı fon iki misline (100 milyon dolar) çıkarılmıştır. Fakat tüm çalışmalara rağmen Stirling motorunun otomotiv piyasasında 1980 - 2000 yılına kadar pazarı olabileceği düşünülmemektedir. Çeşitli yerlerde bu motorun kullanılabileceği araştırılmaktadır.

Çeşitli yakıtlarla çalışabilme özelliği olan Stirling motorları özellikle güneş enerjisi ile kullanıldığı zaman temiz ve verimli bir enerji eldesini mümkün kılmaktadır.

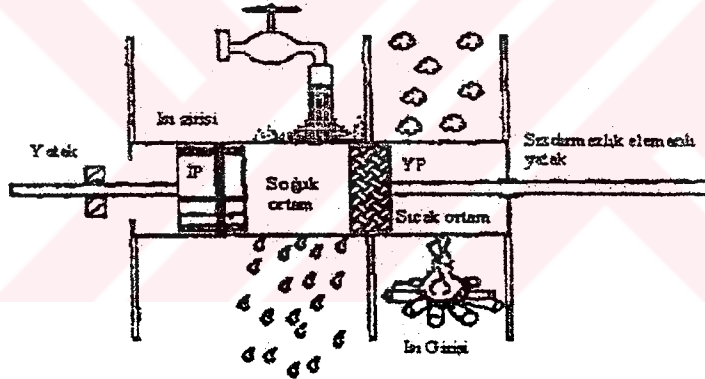
### Gelişim Durumu

		İnceleme	Tecrübe araştırma çalışmaları	Pratik araştırma çalışmaları	Prototip, Pilot proje	Ön seri model	Seri üretim
Uygulama Alanları							
P (Cade) kW - L (Kamyon) kW - Tahrik			X				
Gemi tahriki, Denizaltı	250 kW' ta kadar		X				
	250 kW' ın üstünde		X				
Lokomotif							X
Uzay çalışmaları	5 kW' ta kadar		X				
	5 kW' ın üstünde						X
Madencilik			X				
Jeneratör tahriki	15 kW' ta kadar		X				
	15 kW' ın üstünde			X			
Rejeneratif ısı pompası			X				
Gelişmekte olan ülkeler için basit motor		X					
Yapay kalp					X		
Soğutma makinası		X					
Soğutma ve eğitim motorları	100 W' ta kadar	X					

Tablo 2.1.1 Stirling Teknolojisinin Gelişim Durumu

## 2.2 Stirling Motorunun Çalışma Prensibi

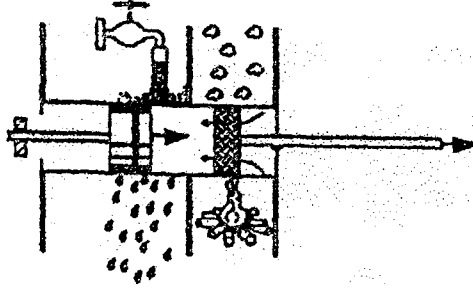
Stirling motoru sıkıştırma ve genişleme olayı ile çalışmaktadır, fakat iki ana sebepten dolayı içten yanmalı bir motordan farklılık gösterir; ısı dışarıdan ve sürekli olarak verilmektedir. Kullanılan çalışma akışkanı genellikle hidrojen veya helyumdur ve tamamen kapalı bir sistemde çalışmaktadır. Stirling prosesinin en basit tasvir edilen modeli soğuk ve sıcakta çalışan iki pistondan oluşmasıdır. Pistonlar arasındaki çalışma akışkanı soğuk ve sıcak hacimler arasında sürekli olarak ileri ve geri hareket eder. Bu sırada sürekli olarak ısıtılır ve soğutulur. Gaz soğuk taraftan sıcak tarafa geçerken ısı depolayan bir rejeneratörden geçmektedir. Gaz aksi yönde hareket ettiği zaman ise ısı verir. Mümkün olan en basit şekilde anlaşılması için Stirling motorunun çalışma prensibi şekil 2.2.1 de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.2.1 Stirling motorunun çalışma prensibinin basit modeli

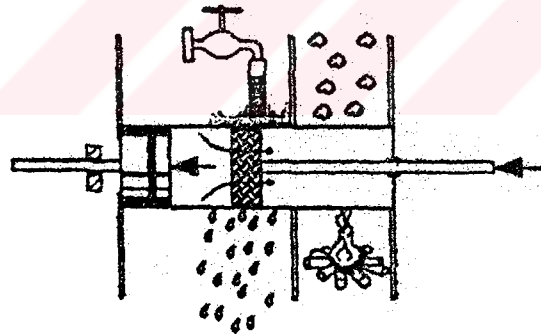
İP: İş Pistonu      YP: Rejeneratörle beraber yerdeğiştirme pistonu

Şekil 2.2.2 'de Yerdeğiştirme pistonu sağa doğru hareket ettiğinde sıcak gaz rejeneratörden geçerek soğuk ortama iletilir. Bu geçiş sırasında ısının büyük bölümü rejeneratörde kalmaktadır. Daha sonra soğuk bölgede daha da soğumakta ve bu soğuma sonucunda yoğunluğu artmaktadır. Bu da sıcak tarafta alçak basınca ve oluşan basınç farkı nedeniyle pistonunda iş yapılmasına sebep olmaktadır.



Şekil 2.2.2 Sıkıştırma Fazı

Bu aşamadan sonra şekil 2.2.3’de görüleceği gibi yerdeğiştirici piston sola doğru hareket eder ve böylece soğuk taraftaki çalışma akışkanı sıcak rejeneratörün içinden geçerek sıcak ortama ulaşır. Bu aşamada rejeneratörde bıraktığı ısı enerjisini geri alır ve ayrıca bu bölgede ısı almaya devam eder . Bu durumda gaz tekrar genişler ve yeniden güç pistonuna iş yaptırır.



Şekil 2.2.3 Genişleme Fazı

## BÖLÜM 3. TERMODİNAMİKSEL İDEAL ÇEVİRİMLER VE STİRLİNG ÇEVİRİMİNİN TEORİK ANALİZİ

### 3.1 Temel Prensiplerin Tanıtılması

Termodinamiğin birinci ve ikinci kanunu Stirling motoru da dahil olmak üzere bütün ısı -güç makinalarına uygulanabilir görünmektedir.

Termodinamiğin birinci kanunu enerji korunumu prensibini yinelemektedir, burada ; herhangi bir yakıt ikmalı yapılmaksızın motorun sürekli bir şekilde çalıştırılabilmesi bunun neticesinde de güç veya işin elde edilmesinin mümkün olmayacağı, prensibini savunmaktadır. Birinci kanun en az makinadan elde edilen enerji kadar bir enerji (herhangi bir formda ) gereksinimi olduğunu belirtmektedir. Buji ateşlemesiyle çalışan bir motorda petrol ve havayı düşünelim. İlk olarak petrol ve hava bir yanma işlemiyle birleşir ve bunun neticesinde sıcak gazlar motoru çalıştırır. Yakıttan sağlanan enerjinin yaklaşık olarak üçte biri motordan elde edilen yararlı güç çıkışıdır, diğer üçte biri soğutma sistemine ve kalanı ise düşük derecede ısı enerjisi olarak egzostan atılır. Şayet yakıt kaynağı tükenirse motor durur. Bu termodinamiğin birinci kanununun direkt bir uygulamasıdır.

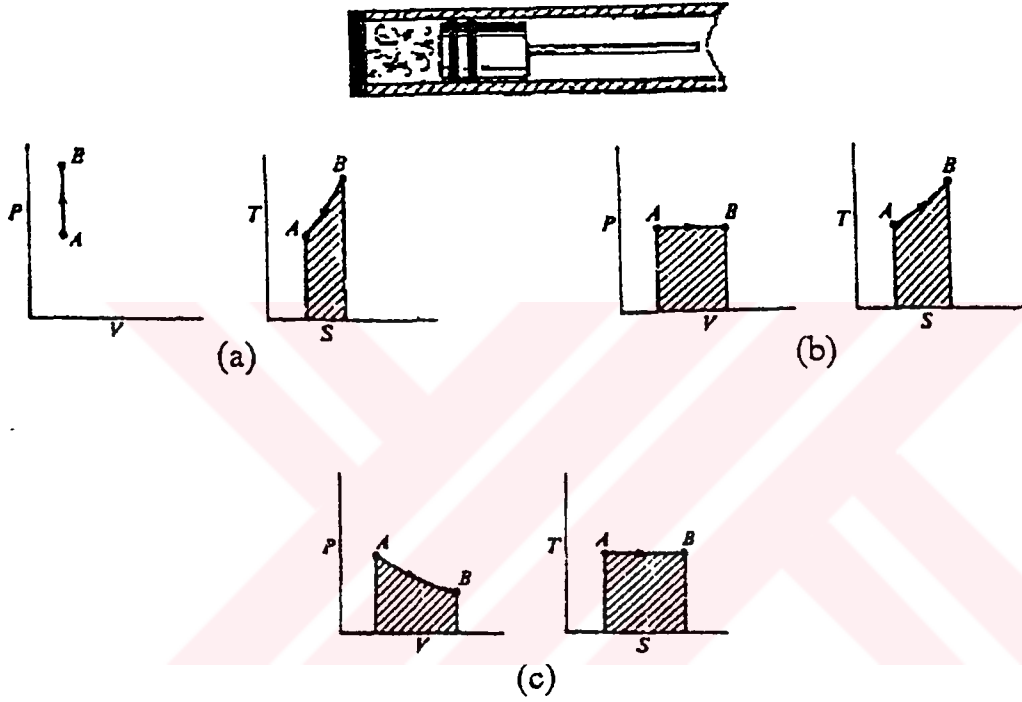
Termodinamiğin ikinci kanununun daha az anlaşılmiş olduğu düşünülmektedir. Birinci kanun üretilen işin, sağlanan ısıdan asla daha büyük olmayacağını vurgulamakla birlikte ikinci kanun biraz daha ileri giderek üretilen işin daima daha az olması gerektiğini savunmaktadır. Diğer bir deyişle buji ateşlemeli bir motorda , yakıttan elde edilen bütün enerjinin yararlı işe dönüşmesinin mümkün olmadığı belirtmektedir. Enerjinin bir kısmı soğutma sisteminden veya egzostan atık ısı olarak atılmaktadır.

Isıl verim, üretilen işin (W), verilen işe (Q) oranı ısı verim ( $\eta = W/Q$ ) olarak adlandırılır.

Carnot verimi , verilen herhangi bir durum için , teorik maksimum ısı verim sadece çevrimin maksimum ve minimum sıcaklıklarına bağlı olup  $\eta_{\max} = (T_{\max} - T_{\min}) / T_{\max}$  şeklinde ifade edilebilir. Verilen bu ilişki oldukça önemli olup “ Carnot Verimi ” olarak isimlendirilir. Bu mümkün olabilen en yüksek değerdir. Sırasıyla  $T_{\max}$  ve  $T_{\min}$  sabit sıcaklıklarında sistemde meydana gelen bütün ısı iletimlerini içine almaktadır.

P - V ve T - S diyagramları şu şekilde açıklanabilir : En basit ısı makinalarında meydana gelen işlemin nasıl gerçekleştiğinin tam olarak hesaplanması çok komplike bir iş olduğundan bunun yerine teorik bir model kurularak ve çeşitli olayları ideal hale getirerek sistemin çalışma analizinin yapılması mümkün olmaktadır. Bu yolla, bir çok makinanın

çalışması, farz edilen tekrarlı termodinamik işlemlerle simüle edilebilir. Bu da bir çevrim olarak nitelendirilmektedir. Genellikle her işlemin, akışkanın bir yerden diğer bir yere hareketi sonucunda ortaya çıkan termodinamik fonksiyonların değişimlerinden meydana geldiği farz edilmektedir. Fakat fonksiyonlardan biri sabit kalmaya devam eder. Önemli termodinamik fonksiyonlar basınç (P), hacim (V), sıcaklık (T), iç enerji (U), entalpi (H) ve entropi (S)'dir.



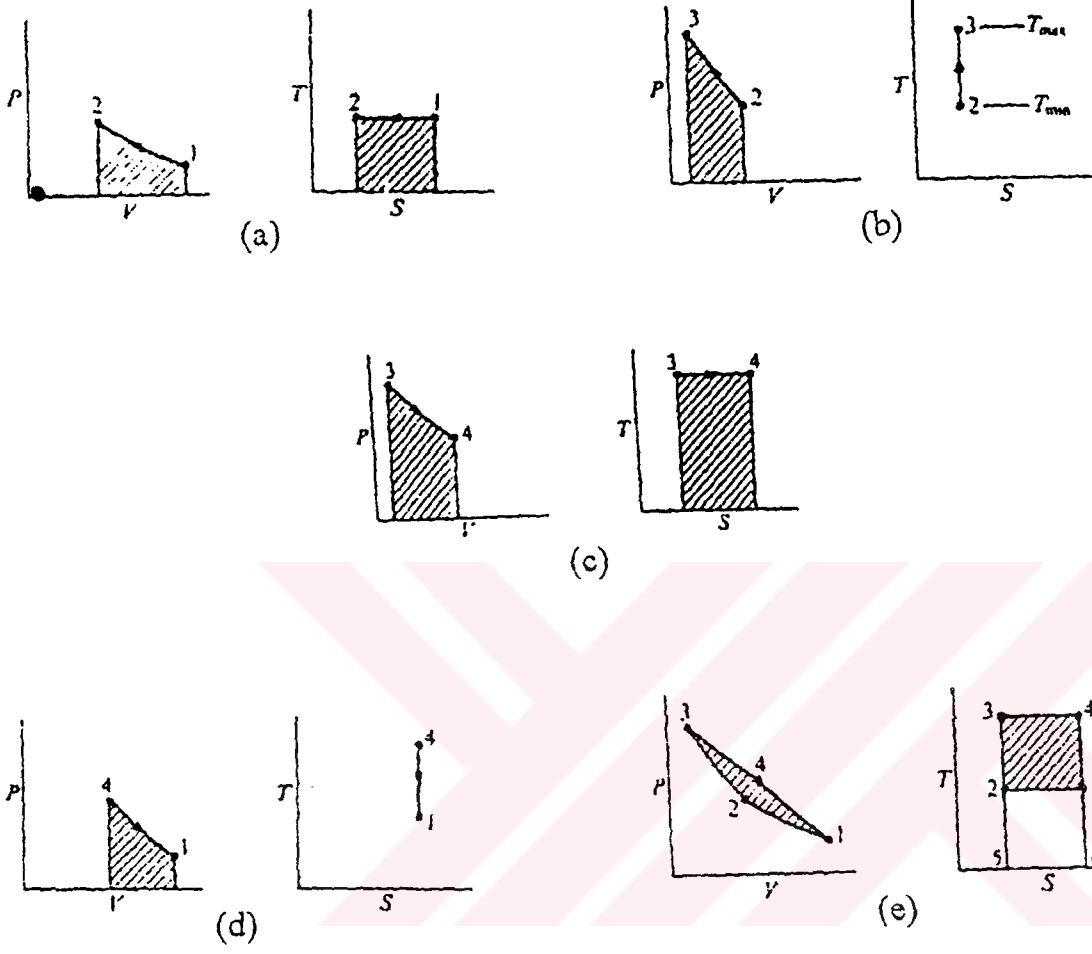
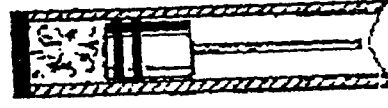
Şekil 3.1 P-V ve T-S diyagramlarının termodinamik prosesi

- a) Sabit Hacimde ısıtma
- b) Sabit Basınçta ısıtma
- c) Sabit sıcaklıkta ısıtma

P-V ve T-S diyagramları önemli olup P-V diyagramı üzerindeki alan yapılan işi T-S diyagramı üzerindeki alan ise iletilen ısıyı göstermektedir. Şekil 3.1. 'i göz önüne aldığımızda burada bir piston ve bir ucu kapalı silindir sistemi görülmektedir. Bir miktar gaz, piston ve silindir arasında kapalı kalmıştır. Bu hal belirtilen basınç hacim ve sıcaklık entalpi eksenlerinde bir A noktası olarak gösterilebilir. Şayet silindir duvarlarının dolayısıyla gazın, bir takım dış kaynaklar vasıtasıyla ısıtılması, farklı olayların meydana gelmesine yol açmaktadır. Şekil 3.1. (a) 'da görüldüğü gibi eğer piston hareketsiz ise hacim sabit kalacak ve gazın ısıtılmasıyla da basıncın ve sıcaklığın artması sağlanacaktır. Sağlanan ısı T-S diyagramında gösterilen taralı alan olmaktadır. Hacimde bir değişiklik olmadığından P-V diyagramında herhangi bir işin yapılmamış olduğu görülmektedir. Eğer onun yerine piston hareketi serbest bırakılır ve ek ısı işlemi düzenli hale sokulursa, bu şekilde basınç ve sıcaklığın sabit kalması sağlanır. P-V ve T-S diyagramları Şekil 3.1. (b) ve Şekil 3.1. (c) 'de gösterilmektedir. Her iki durumda da sisteme ısı eklenmesiyle gazın daha büyük hacime genişlemesi söz konusu olduğundan iş yapılmaktadır.

### 3.2 Carnot Çevrimi

Carnot çevrimi dört prosesten meydana gelen bir termodinamik çevrimdir. Şekil 3.2' de prosesi görülmektedir. İdeal Carnot çevrimini gerçekleştiren bir motorun çalışmasını göz önüne almak için Şekil 3.2' de gösterilen piston ve silindir çiftini ele almamız gereklidir. Silindirin tamamıyla yalıtıldığını, pistonun sürtünmesiz hareket ettiğini ve silindirden herhangi bir çalışma akışkanı sızıntısı olmadığını farz edelim. Silindir kafası bizim seçtiğimiz gibi tamamen iletken ve yalıtıcıdır. Çevrime başlamak için pistonun bir dış ölü noktasının olduğunu farz edeceğiz, böylece piston ve silindir arasında kalan kapalı hacim ( ölü hacim ) maksimum olacaktır. Çalışma akışkanının basınç ve sıcaklığı (  $T_{min}$  ) minimum değerlerinde kalacaktır. Şekil 3.2 ' de 1 noktasında gösterilmektedir. Pistonun silindir kafasına doğru hareketine müsaade ettiğimizde şekil 3.2 (a) 'da proses 1-2 görüldüğü gibi sıkıştırma oluşur. Bu işlem için silindir kafasının tamamıyla iletken olduğunu ve ısı iletim oranının sonsuz olduğunu farz edebiliriz, böylelikle işlem izotermal (sabit sıcaklık) bir şekilde gelişir. Gazın sıkıştırılmasıyla yapılan iş P - V diyagramında taralı alan olarak gösterilmektedir. Çalışma akışkanından çıkan ısı T-S diyagramında ki taralı alanıdır. Bu sebeple proses izotermal olduğundan iletilen ısı miktarı tamamen yapılan işe eşittir.



Şekil 3.2 .Carnot Çevrimi

- a) İzotermal Sıkıştırma
- b) İzentropik Sıkıştırma
- c) İzotermal genişleme
- d) İzentropik Genleşme
- e) Carnot çevrimi (diyagramlar birleştirilerek oluşturulmuştur.)

İkinci proses için izotropik sıkıştırma şekil 3.2 (b) ' de gösterilmektedir. Silindir kafası tamamıyla yalıtılmıştır. Piston silindir kafasına doğru hareketine devam ettiği zaman , ısı artık çalışma akışkanından dışarı çıkamayacaktır. Böylece ideal bir şekilde entropi sabit kalır. Bu işlem hacimdeki azalma ve hem basınç hem de sıcaklıktaki artma ile sonuçlanır. Gazda oluşan iş P-V diyagramında taralı alandan ibarettir, fakat herhangi bir ısı iletimi mevcut değildir. Kalan işlem ise, 3' ten 4' e olan izotermal genişleme ve 4 ' ten 1' e olan izentropik genişlemedir. Sırasıyla şekil 3.( c ) ve şekil 3.2 (d) 'de gösterilmektedir.

Bu dört diyagram birleştirildiği takdirde, meydana gelen P-V ve T-S diyagramları şekil 3.2 (e) ' gösterilmiştir. P-V diyagramında ki 1-2-3-4 ile sınırlanan kapalı taralı alan çevrim tarafından üretilen yararlı iştir. Benzer olarak T-S diyagramında ki 1-2-5-6 alanı çevrim için sağlanan ısıdır. 1-2-3-4 alanı işe dönüşen miktar olup 1-2-5-6 alanı ise çevrimin atık ısıdır. Diyagramdan Carnot çevriminin niçin mümkün olabilir, en yüksek ısıl verime sahip olduğu açıkça görülmektedir. Verilen sıcaklık limitlerinde ( $T_{max}$  ve  $T_{min}$ ) 1-2-3-4 ve 1-2-5-6 alanlarının daha geniş bir oranında sonuçlanabilen mümkün herhangi bir termodinamik işlem yoktur, bu şekilde verim  $\eta = W/Q = 1-2-3-4$  alanı /  $1-2-5-6$  alanıdır ve maksimum olmalıdır. Mutlak sıcaklıklar termodinamik analizlerde kullanılmalıdır. T-S diyagramında ki sıfır sıcaklığı  $-273^{\circ}C (= 0^{\circ}K)$  sıcaklığına veya  $-460^{\circ}F (0 = ^{\circ}R)$  sıcaklığına karşılık gelmektedir, böylece 'atık ısı' alanının 1-2-5-6 olduğu açıkça belli olmaktadır.

Açık bir şekilde görüldüğü gibi Carnot çevrim verimi (bu genellikle bütün motorlara uygulanır) (a) artan  $T_{max}$  sıcaklığı ve (b) azalan  $T_{min}$  sıcaklığı ile daha iyi bir düzeye gelebilir.  $T_{max}$  sıcaklığının en son maksimum değeri motorun motorun imalinde kullanılacak malzemelere bağlıdır. Bu da 'metalurjik limit' olarak isimlendirilektedir. Soğutma suyu veya havada mevcut mümkün olabilen en düşük sıcaklık değeri  $T_{min}$ , genellikle çevredeki atmosfer sıcaklığıdır.

Pratikte Carnot çevrimiyle çalışan motor yapmak mümkün değildir. Tamamen yalıtkan ve iletken olan bir malzeme yoktur ve bütün pistonların silindir içerisinde hareketleri sırasında sürtünme ve sızıntı kayıpları vardır. Bununla birlikte, gaz için en önemli ciddi güçlükte izotermal ve izotropik durumların sağlanmasıdır. P-V diyagramında karşılaştırıldığı zaman oldukça küçük eğimler oluşmaktadır. Şekil 3.2(e) de P-V diyagramında gösterilen alan ihmal edilebilir şekilde küçülür. Aynı durum son derece ağır motorlar için söylenemez. Bu motorlar kendi sürtünme kayıplarını karşılayacak

yeterli işi tam olarak üretemezler .Pratik olmamasına rağmen Carnot çevrimi bir motorun çalışmasında başlangıç teşkil ettiği için yararlıdır. Bundan aşka bir takım değişikliklerle ( Rankine çevrimine dönüştürülmesi )Carnot çevrimi sıvı buhar makinalarının çalışma modunu temsil etmektedir. Örnek olarak pistonlu buhar motorları, buhar türbinleri veya 'Freon ' soğutma makinaları.

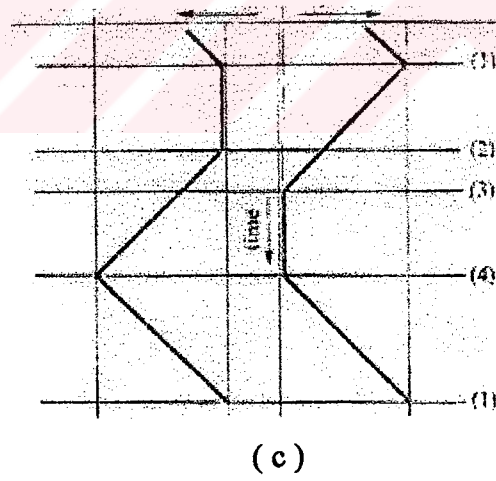
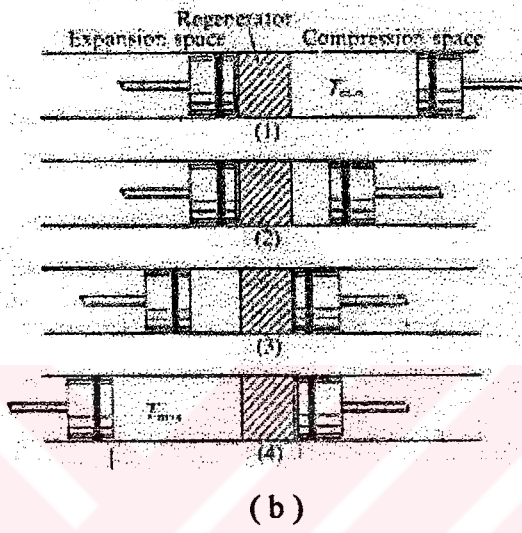
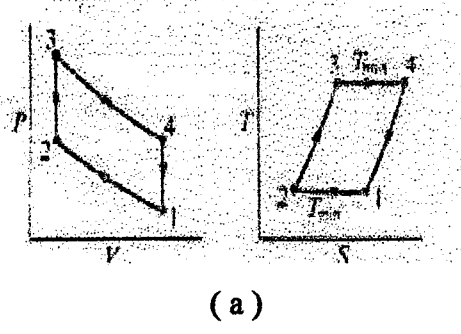
### 3.3 Stirling Çevrimi

Stirling çevrimi bazı durumlarda Carnot çevrimine benzemektedir. Şekil 3.3 'te bu çevrim gösterilmiştir. Karşılıklı iki piston arasında rejeneratörü olan bir silindir düşünülün. Rejeneratör bir termodinamik sünger olarak düşünülebilir. Alternatif olarak içi yumak şeklinde tel veya şeritten ibarettir. Rejeneratör ve pistonlar arasındaki iki hacimden biri genişleme bölgesi olarak adlandırılır ve  $T_{max}$  gibi yüksek bir sıcaklık değerindedir.

Diğer hacim, sıkıştırma bölgesi olarak adlandırılır ve düşük bir  $T_{min}$  sıcaklığındadır. Bu yüzden Rejeneratörün karşılıklı transfer yüzeyleri arasında bir sıcaklık gradyeni (  $T_{max}-T_{min}$ ) bulunur ve aksnel yönde herhangi bir ısı iletim olmadığı farz edilir. Carnot çevriminde olduğu gibi, pistonların bu kapalı sistemde sürtünme ve çalışma akışkanı kayıpları olmaksızın hareket ettiği farz edilir.

Çevrime geçmeden önce ,sıkıştırma bölgesindeki pistonun dış ölü noktada ve genişleme bölgesindeki pistonun da iç ölü noktada olup rejeneratörün yüzeyine yakın olduğu farz edilir. Bu halde bütün çalışma akışkanı, soğuk sıkıştırma bölgesindedir. Hacim maksimum olduğundan şekil 3-3 te gösterilen P-V ve T-S diyagramlarında bir numaralı bölgedeki basınç ve sıcaklık değerleri minimumdur.

Sıkıştırma süresince ( 1 - 2 işlemi ) sıkıştırma pistonu iç ölü noktaya doğru hareket eder ve genişleme bölgesi pistonu sabit kalır. Proseste kullanılan akışkan ortam (ki bu tez çalışmasında çalışma akışkanı olarak tanımlanmıştır) sıkıştırma bölgesinde sıkıştırılır ve basınç artar. Sıcaklık sabit kalır . Çünkü ısı (  $Q_c$  ) sıkıştırma bölgesi silindirinden çevreye verilir.



Şekil 3-3.1 Stirling Çevrimi

(a) P-V ve T-S diyagramları

(b) Çevrimdeki piston durumları

(c) Zaman- Yer değiştirme diyagramı

Transfer işleminde, ( 2-3 ), her iki piston da aynı zamanda hareket ederler. Sıkıştırma pistonu rejeneratöre doğru ( Genleşme pistonu rejeneratörden uzaklaşacak yönde 9 hareket ettiğinden aradaki hacim sabit kalır. Böylece çalışma akışkanı sıkıştırma bölgesinden genleşme bölgesine geçerken rejeneratörün gözenekli metalik yapısı içinden de geçer. Rejeneratörün içersinden geçişte çalışma akışkanı gözenekli yapının verdiği ısıyla  $T_{min}$ ' dan  $T_{mak}$  sıcaklığına gelir ve rejeneratörden genleşme bölgesine bu sıcaklıkta girer .Akışkanı sabit hacimde gözenekli yapının içersinden geçerken, sıcaklıktaki kademeli artış basıncın artmasına sebep olmaktadır .

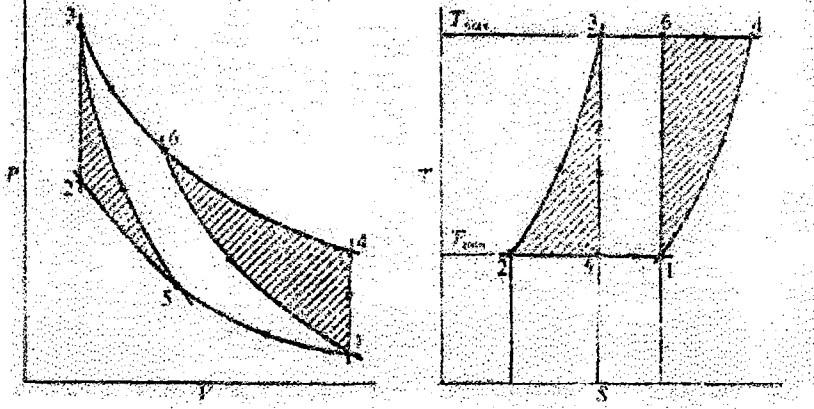
Genleşme işleminde ( 3-4 ) , genleşme pistonu dış ölü noktaya doğru rejeneratörden uzaklaşmaya devam eder. Sıkıştırma pistonu rejeneratöre yakın iç ölü noktada sabit kalır. Genleşmede hacim artarken basınç azalır. Bir dış kaynaktan sisteme ısı (  $Q_E$  ) verildiğinde sıcaklık sabit kalır.

Çevrimin son işlemi transfer ( 4 - 1 ) işlemidir. Her iki pistonun eş zamanlı hareketiyle çalışma akışkanı sabit hacimde , genleşme bölgesinden rejeneratör içerisine , oradan da sıkıştırma bölgesine transfer edilir. Rejeneratörden geçerken çalışma akışkanı ısını burada bırakır. Sıcaklıkta bir azalma meydana gelir ve  $T_{min}$  sıcaklığında sıkıştırma bölgesine geri döner. İşlemden iletilen ısı, çevrimin 2-3 işlemi sırasında kullanılmak üzere rejeneratöre depo edilmiştir. Dört ısı transferi işlemiyle çevrim tamamlanmıştır.

- İşlem 1-2-İzotermal sıkıştırma ;  $T_{min}$  sıcaklığında çalışma akışkanından dışarıya olan ısı iletimi .
- İşlem 2-3-Sabit hacim ; rejeneratörden çalışma akışkanına olan ısı iletimi .
- İşlem 3-4-İzotermal genleşme ;  $T_{max}$  sıcaklığında bir dış kaynaktan çalışma akışkanına olan ısı iletimi .
- İşlem 4-1-Sabit hacim ; çalışma akışkanından rejeneratöre olan ısı iletimi .

Şayet 2-3'te iletilen ısı 4-1'de iletilen ısıya eşitse , ozaman motor ve çevresi arasında şu ısı alışverişleri olmaktadır; ( a )  $T_{max}$  sıcaklığında ısı alma ve ( b )  $T_{min}$  sıcaklığında ısı atma . Bu sabit sıcaklıktaki ısı alma ve atma olayı termodinamiğin ikinci kanununa göre maksimum ısı verimi tanımlamaktadır ve böylece Stirling çevriminin verimi Carnot çevrimine eşit olur. Diğer bir deyişle verim  $\eta = ( T_{mak} - T_{min} ) / T_{mak}$  dır. Stirling çevriminin Carnot çevrimine göre avantajı iki izentropik işlem yerine iki sa-

bit hacim işlemi gelmiştir. Bu da P-V diyagramındaki alanı arttırır. Bu yüzden Stirling çevriminden uygun bir iş elde edebilmek için Carnot çevrimindeki gibi yüksek basınçları ve süpürme hacimlerine çıkmaya gerek yoktur.



Şekil 3.3.2 Stirling ve Carnot çevrimleri. P-V ' deki taralı alanlar Stirling çevriminin fazladan iş çıkışını göstermektedir. T-S' de taralı alanlar Stirling çevrimindeki artan ısı transferini göstermektedir.

Şekil 3.3.2'de verilen basınç, hacim ve sıcaklık değerleri arasında Carnot ve Stirling çevrimlerinin P-V diyagramlarının bir karşılaştırılması görülmektedir. 5-2-3 ve 1-6-4 taralı alanları sabit hacim yönteminin ( Stirling ) izentropik yöntem ( Carnot ) göre verdiği fazla işi göstermektedir . Carnot çevriminin izotermal işlemleri ( 1-5 ve 3-6 ) 1-2 ve 3-4 işlemlerinin genişletilerek Stirling çevriminden alınan ve atılan ısı miktarları arttırılmıştır. Sağlanan ısının bir bölümü işe çevrilmektedir ve her iki çevrimde de verim eşittir.

### 3.4 Rejeneratif Motor Çevriminin Pratik Olarak İncelenmesi

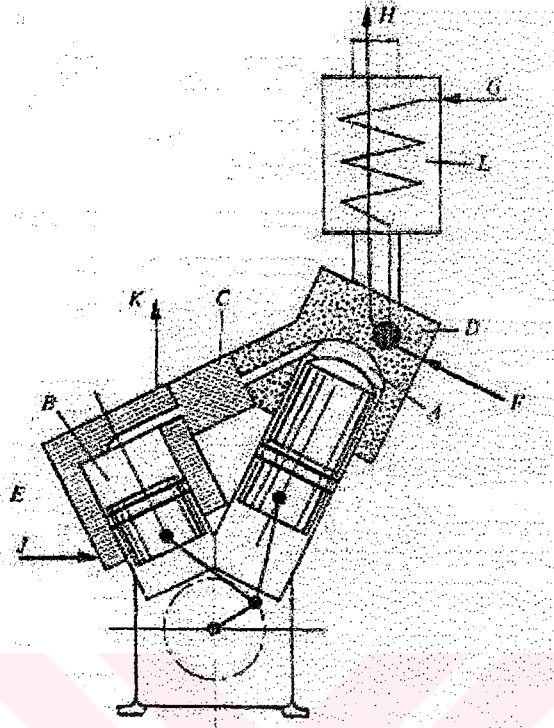
Bu işlem ideal ve pratik çevrim olarak ele alınmaktadır .

#### 3.4.1 İdeal Çevrim

Stirling çevrimi termodinamik çevrime oldukça yaklaştırılmıştır. İki izotermal ve sabit hacim işleminin dahil olduğu dört termodinamik işlemde oluşmaktadır. Daha önce çevrimin bütün işlemlerinin termodinamik olarak tersinir olduğu kabul edilmişti. Sıkıştırma ve genleşme işlemi de izotermaldir. O halde silindir cidarları ve çalışma akışkanı arasındaki ısı transferinin sonsuz oranlarından bahsedilebilmektedir. Daha ilerki konularda bütün akışkanın genleşme ve sıkıştırma işlemi süresince, genleşme veya sıkıştırma bölgesinde olduğu farzedilecektir. Bu şekilde gözenekli metaldeki herhangi bir boşluğun, tolerans bölgesinin veya silindirdeki bir oyukun etkileri ihmal edilmektedir. İki piston çalışma akışkanının dağılımından dolayı çeşitli süresiz hareketler yapmaya maruz kalmaktadır ve bütün mekanik ve aerodinamik sürtünme etkileri ihmal edilmektedir. Rejenerasyon ( yenilenme ) tam olduğu farzedilmektedir. Yani çalışma akışkanı ile rejeneratör arasında sonsuz bir ısı iletimi oranı olduğu ve gözenekli metalin sonsuz bir ısı kapasitesine sahip olduğu vurgulanmaktadır.

#### 3.4.2 Pratik Çevrim

Herhangi gerçek bir motorda bütün bu faktörler ve diğerleri ısı verimi, ideal çevrimdeki Carnot değerinin altına düşülmek amacıyla birleştirilir. Gerçek ısı verimi teorik Carnot veriminin bir kesri olarak ifade edebiliriz. Bu oran, izafi ( relative ) verim olarak adlandırılır ve  $\eta = \text{Gerçek ısı verim} / \text{Carnot ısı verimi}$  olarak ifade edilir . İyi dizayn edilmiş bir makinede izafi verim 0.4 civarındadır. İdeal çevrimli incelemek için, iki zıt pistonla arada bir rejeneratör olduğu farzedilmiştir. Pratikte uygulanan iki pistonlu bir versiyonu şekil 3.4.2.1' de gösterilmektedir .



Şekil 3.4.2.1 Zıt pistonlu Stirling motorunun şematik gösterimi

A-Genleşme bölgesi, B-Sıkıştırma bölgesi, C-Rejeneratör, D-Isıtıcı  
E- Soğutucu, F-Yakıt Girişi, G-Hava girişi, H-Egzos (yanma ürünleri  
çıkışı), J-Su girişi, K-Su çıkışı, M-Hava ön ısıtıcısı.

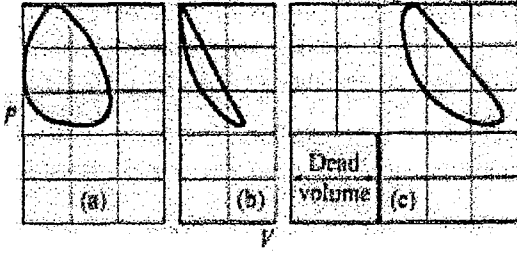
Ortak bir krank miline bağlı iki piston V şeklinde yerleştirilmişlerdir. Pistonlar üzerindeki boşluklar sıkıştırma ve genleşme hacimlerini oluşturmaktadır. Bunlar arada rejeneratör ve ek ısıtıcının bulunduğu bir kanalla birbirlerine bağlanırlar. Motorun çalışmasında pistonlar ideal halden oldukça farklı olarak sürekli hareket ederler. Bunun sonuçları şekil 3.4.2.2 de P-V diyagramında düzgün sürekli bir çevrim olarak gösterilmektedir. Genleşme ve sıkıştırma işlemleri tamamıyla bir veya diğer iki boşlukta meydana gelmez. Böylelikle üç P-V diyagramı çizilebilir. Bunlar sıkıştırma bölgesi, genleşme bölgesi ve toplam kapalı hacim (ölü bölge) için çizilebilecek diyagramlardır. Ölü bölge pistonlardan birinin süpürmediği çalışma boşluğunun bir kısmı olarak tanımlanmaktadır. Ölü hacim silindir tolerans boşlukları, rejeneratörün ve diğer ısı değiştiricilerin boş hacimleri ile birlikte kanallarla birleştirilmiş iç hacimlerini içermektedir. Genleşme bölgesi için

çizilen P - V diyagramı çevrimin pozitif işini göstermektedir . Sıkıştırma bölgesi için çizilen diyagram ise çevrimin sıkıştırma işini ( veya negatif işi ) gösterir. Bu alanlar arasındaki fark mekanik sürtünme kayıplarını karşılayan ve motor krank mili için gerekli gücü sağlayan net çevrim çıkışıdır.

Çevrimde sıkıştırma ve genleşme işlemleri izotermaldir ve sürtünme kayıpları yoktur.

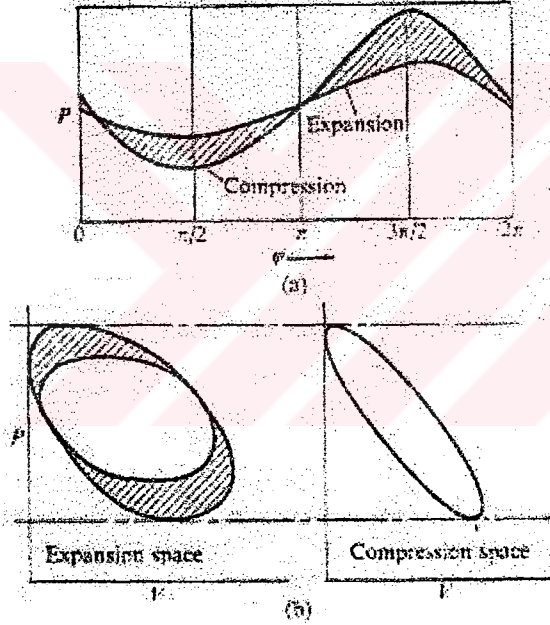
Genleşme ve sıkıştırma bölgesi diyagramlarının alanları arasındaki fark tamamen toplam iş bölgesi için çizilen P-V diyagramının alanına eşit olacaktır. Elbetteki gerçek bir motorda bu eşitlik saptanamaz , çünkü rejeneratör ve diğer ısı değiştiricilerindeki aerodinamik akış kayıpları, çalışma akışkanının sıkıştırma ve genleşme bölgelerinde farklı basınçlarda olmasını sağlar. Akış kayıpları Şekil 3.4.2.3 te P-V diyagramında gösterildiği gibi genleşme bölgesi alanında bir azalmaya yol açtığından önemlidir. Bunun sonucunda (a) net çevrim çıkışında bir azalma (bundan dolayı verim de azalır.) (b) bir soğutma makinasında soğutma kapasitesinin azalmasına sebep olur. Pistonun sinüsoidal hareketinden dolayı çalışma akışkanı değişik bölgelerde değişik sıcaklıklarda bulunmaktadır.

İdeal halden ayrılan diğer önemli bir özellikte sıkıştırma ve genleşme işlemlerinin izotermal olmamasıdır. Makul bir hızda çalışan bir motorda (örneğin 1000 dev/dak ) bu işlemler izotermalden çok ( sonsuz ısı transferi ) adyabatik hale (ısı transferi yok ) daha yakındır. Bu durumu daha iyi hale getirmek amacıyla özel ısı değiştiricilerine sık sık şekilde gösterildiği gibi çeşitli ısıtıcı veya soğutucular eklenir. Çalışma akışkanına ısı vermek amacıyla genleşme bölgesine bir ısıtıcı monte edilir, aynı şekilde çalışma akışkanından ısı alınması için de sıkıştırma bölgesine bir soğutucu eklenir. Isı değiştiricilerinin bu şekilde eklenmesinin ısı transferi avantajlarının yanısıra sakıncaları da vardır.Örneğin aerodinamik akış kayıpları güç kaybına sebep olmaktadır. Ölü hacim ısıtıcı ve soğutucunun boşluklarıyla artacak bu da rejeneratif motorların performansında kritik bir etki ortaya çıkacaktır. Çünkü çalışma akışkanı hem rejeneratörden genleşme bölgesine hem de genleşme bölgesinden rejeneratöre giderken ısıtılır. Benzer olarak sıkıştırma bölgesine giderken ve giderken de soğutulur. Tek yönlü sistemlerin yapılması mümkündür, fakat bu oldukça karmaşık bir makina olacaktır.



Şekil 3.4.2.2 Gerçek motor için basınç hacim diyagramları

- (a) Genleşme bölgesi diyagramı
- (b) Sıkıştırma bölgesi diyagramı
- (c) Toplam çalışma bölgesi



Şekil 3.4.2.3 Motorun çalışması sırasında aerodinamik akış kayıplarının etkisi

(a) Genleşme ve sıkıştırma bölgelerinde basınç değişimi için basınç - zaman diyagramı. Basınç fark rejeneratör ve ısı değiştiricilerindeki akış kayıplarıdır.

(b) Sıkıştırma ve genleşme bölgesi için basınç-hacim diyagramları. Genleşme bölgesi için diyagram üzerindeki taralı alan , rejeneratör ve diğer ısı değiştiricilerindeki akış kayıplarından meydana gelen etkin kayıp işi göstermektedir.

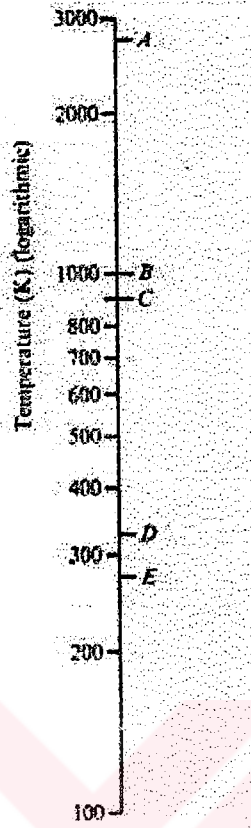
Artan akış kayıpları ve boş bölgeler (fiyat ,boyut ve ağırlık açısından ) düşünülürse optimum bir ısı değiştirici dizaynı yapılabilir Sonuç olarak ısıtma (yanma ürünleri ) ve soğutma (su veya hava) arasındaki sıcaklıklarda önemli farklar ortaya çıkacaktır.Bu şekil 3.4.2.4 te bir diyagram şeklinde gösterilmiştir.Fosil yakıtlı ,su soğutmalı , rejeneratif bir motordan alınan bu sıcaklıklar, karakteristik değerler olarak kabul edilebilir. Yanma ürünleri ve soğutma suyu sıcaklığı sırasıyla 2800 K ve 280 K dir. Genleşme silindiri ve ısıtıcı için kullanılan malzemenin metalurjik limiti 1000 K dir. Yanma ürünleri ve silindir duvarı arasında, 1000 K ile 2800 K sıcaklık gradyanlarında yüksek ısı transferi vardır. .Genleşme bölgesi ile çalışma akışkanı arasında 100 K ve sıkıştırma bölgesi ile çalışma akışkanı arasında 50 K sıcaklık farkı vardır. Buna göre çevrimdeki çalışma akışkanı sıcaklığı  $(280 + 50) = 330$  K 'den  $(1000 - 100) = 900$  K 'e kadar değişir . Buradan sistemin Carnot (veya 51) Stirling) çevrimi verimi şu şekilde hesaplanabilir ;

$\eta_c = (2800 - 280)/2800 = \%90$  daha gerçekçi değerler verilerek hesapladığımızda  $\eta_c = (900-330)/900 = \%63$  değerini elde ederiz.

Bu örnek Stirling motorunun ticari uygulamasındaki en büyük güçlüklerden biri olan malzeme problemini ortaya koymaktadır. Makinanın bazı parçaları (ısıtıcı ve genleşme bölgesi) sürekli olarak yüksek bir sıcaklığa maruzdur ve bu nedenle ısıtıcı ile genleşme silindiri malzemesinde ,sıcaklık limitleri problemi ortaya çıkmaktadır.

Bir Stirling motorunda izin verilebilen çalışma akışkanı sıcaklıkları, içten yanmalı Otto ve Diesel çevrimli bir motordaki mümkün olan sıcaklık limitleri kadardır. Bu motorlardaki maksimum çevrim sıcaklıklarına sadece anlık olarak ulaşılmaktadır. Bu şekilde verilen sıcaklık limitleri arasında,rejeneratif çevrimler termodinamik açıdan Otto veya Diesel çevrimlere göre daha verimlidir.

Yakıt ve havanın yanmasından elde edilen ısının hepsi çalışma akışkanına iletilmez. Çünkü yanma ürünleri tamamıyla kayıptır. Hiç bir şekilde motorda yararlı bir amaç için kullanılmayan bu atık enerji variller dolusu yakıt demektir. Önemli bir motor donanımı da diğer bir ısı değiştiricisidir .(egzos-hava ön ısıtıcılı sistemde) Egzostan atılan ısı gelen havayı ısıtmak için kullanılır. Bu ısı değiştiricisi reküperatif veya rejeneratif tipinde olabilir. Reküperatif tipte, iki akışkan ,egzos gazı ve gelen hava ayrı kanallar tarafından ayrılmaktadır.Rejeneratif tipte ise akışkanlar sıra ile akarlar ve genellikle aynı gözenekli malzeme içersinde ters bir akış halindedir.



Şekil 3.4.2.4 Fosil yakıtlı ,su soğutmalı Bir stirling motorunda karakteristik sıcaklıklar  
 A- Yanma ürünlerinin sıcaklığı B- Isıtıcı duvarın sıcaklığı C- Genleşme bölgesi ortalama sıcaklığı ,D- Sıkıştırma bölgesi ortalama sıcaklığı  
 E- Soğutma suyu ve soğutucu duvarlarının sıcaklığı

Karşılıklı elemanların sürekli hareketi, izotermal olmayan sıkıştırma ve genleşme işlemleri ,ısıtma ve soğutma makinalarında ki ısı transferi sınırlaması egzoz kayıpları , ölü bölgenin fazlalığı ve aerodinamik akış kayıpları gerçek Stirling motorunun başarısızlığının temel nedenlerini oluşturmaktadır. Diğer problemler ise rejeneratörün çalışmasındaki eksiklikler, yüksek mekanik sürtünme kayıpları, kütle temasından dolayı sıcaklığın eşitlenmesi ve yanlış dizayndan veya tam contalanmamanı meydana gelen sızıntı.

### 3.5 Stirling Çevriminin Teorik Analizinin Yapılması

#### 3.5.1 İdeal Stirling Çevrimi

Şekil 3.3.1 ve bu bölümde ideal çevrim için anlatılan konuların ışığı altında denklemler aşağıdaki gibi özetlenmektedir:

- 1) 1.haldeki bazı referans sıcaklık, basınç veya hacim koşulları
- 2) Sıcaklık oranı  $\tau = T_{\min} / T_{\max}$
- 3) Hacim oranı  $\kappa = V_{\max} / V_{\min}$

Çalışma akışkanının birim kütlesi için ideal gaz kabulüyle ideal gaz denkleminde  $V_1 = RT_1 / P_1$ , çevrimin dört kısmından herbiri için aşağıdaki bilgiler istenmektedir.



Şekil 3.3.1 (a)

- a) İzotermal sıkıştırma işlemi (1-2) : Bu işlemde ısı çalışma akışkanından alınarak maksimum çevrim sıcaklığında çevrimden atılır. Çalışma akışkanı üzerinde yapılan bu iş çevrimden atılan ısıya eşittir. İç enerjide hiç bir değişiklik olmamasına rağmen entropide bir azalma meydana gelir.  $p_2 = p_1 V_1 / V_2 = p_1 \kappa$  ;  $T_2 = T_1 = T_{\min}$ , ısı iletimi  $(Q) =$  yapılan iş  $(W) = P_1 V_1 \ln(1/\kappa) = RT_1 \ln(1/\kappa)$ , burdan entropideki değişim  $(S_2 - S_1) = R \ln(1/\kappa)$  olarak ifade edilir.
- b) Sabit hacimde rejeneratif transfer işlemi (2-3) : Bu işlemde ısı rejeneratörden çalışma akışkanına iletilerek sıcaklık  $T_{\min}$ 'den  $T_{\max}$  değerine artar. İş yapılmamaktadır. Çalışma akışkanının iç enerjisinde ve entropide bir artış olmaktadır.  $p_3 = p_2 T_3 / T_2 = p_2 / \tau$ ,  $V_3 = V_2$  ısı iletimi  $(Q) = C_v(T_3 - T_2)$  yapılan iş  $(W) = 0$  ve entropideki değişim  $(S_3 - S_2) = C_v \ln(1/\tau)$  olarak ifade edilir.

c) İzotermal genişleme işlemi (3-4) : Bu işlemde çalışma akışkanının genişmesi süresince çevrime yüksek bir sıcaklıkta ( $T_{max}$ ) ısı verilmektedir.  $p_4 V_3 \ln \kappa = R T_3 \ln \kappa$  ve entropideki değişim ( $S_4 - S_3$ ) =  $R \ln \kappa$  olarak ifade edilir.

d) Sabit hacimde rejeneratif transfer işlemi (4-1) : Bu işlemde çalışma akışkanından rejeneratöre bir ısı iletimi söz konusudur. Bu sırada çalışma akışkanının sıcaklığı  $T_{max}$ ' tan  $T_{min}$  değerine azalmaktadır. İş yapılmamaktadır. Çalışma akışkanının iç enerjisi ve entropide bir azalma olmaktadır.  $p_1 = p_4$ ,  $T_4 / T_1 = p_1 \tau$ ,  $V_1 = V_4$ , ısı iletimi ( $Q$ ) =  $C_v (T_1 - T_4)$  ve entropideki değişim ( $S_1 - S_4$ ) =  $C_v \ln \tau$  olarak ifade edilir.

İşlem 3.3.1 'de rejeneratörden çalışma akışkanına iletilen ısı, işlem 4-1' de çalışma akışkanından rejeneratöre iletilmiştir. Rejeneratöre veya çalışma akışkanından kaynaklanan net bir ısı kazancı veya kaybı yoktur. Bu yüzden  $T_{mak}$  sıcaklığında alınan toplam ısı =  $RT_3 \ln \kappa$ ,  $T_{min}$  sıcaklığında atılan ısı =  $R T_1 \ln(1/\kappa)$  ve ısıl (termik) verim = (alınan ısı - atılan ısı) / alınan ısı = yapılan iş / alınan ısı =  $(RT_3 \ln \kappa - RT_1 \ln \kappa) / R T_3 \ln \kappa = 1 - \tau$  olarak ifade edilir. Bu değer aynı sıcaklık limitleri arasındaki Carnot verimine tekabül etmektedir.

### 3.5.2 Schmidt Çevrimi

Stirling motorunun çalışmasının analizi 1861 yılında Schmidt tarafından yapılmıştır. Bu teoriye göre, karşılıklı çalışan parçaların harmonik hareketi, yapılan önemli kabuller doğrultusunda (izotermik sıkıştırma ve genişleme rejeneratörde sabit hacimde ısı alıp verme) sağlanmaktadır. Bu oldukça ideal bir durumdur, fakat ideal Stirling çevriminden daha gerçekçidir. Schmidt teorisinin sonuçları motor dizaynında kullanılabilir. Bu kabuller ile gerçeğe yaklaşma çalışmaları düşündürücü bir karmaşıklık ortaya koymuştur. Kapalı bir formda olmayan çözümler dijital veya analog bilgisayar simülasyonu çalışmalarını gerektirmiştir. Schmidt çevriminin kabulleri şu şekildedir :

1. Rejeneratif işlem idealdir.
2. Ani basınçlar sistemin her yerinde aynıdır.
3. Çalışma akışkanı ideal gaz denkleminde ( $P V = R T$ ) uymaktadır.
4. Sızıntı yoktur ve çalışma akışkanının kütlesi sabittir.



Genleşme bölgesindeki çalışma akışkanının kütlesi  $M_e = (p_e V_e)/(RT_e)$  sıkıştırma bölgesindeki çalışma akışkanının kütlesi  $M_c = (p_c V_c)/(RT_c)$  ve ölü bölgedeki çalışma akışkanının kütlesi  $M_d = (p_d V_d)/(RT_d)$  'dir. Bu denklemlerden çalışma akışkanının sabit kalan toplam kütlesi şu şekilde ifade edilir. ;

$$M_T = (p_e V_e)/(RT_e) + (p_c V_c)/(RT_c) + (p_d V_d)/(RT_d) = (KV_E) / (2RT_c) \quad (3.4)$$

Anlık basınç sistem içerisinde p'ye eşit ve aynı kalıyorsa ,ve ayrıca  $T_e$  ve  $T_c$  sıcaklıkları  $T_E$  ve  $T_C$  ' de sabit ise , o zaman hacim ifadelerini yerine koyup R' yi yok ederiz.Ortaya çıkan bağıntının düzenlenmesiyle şu denklem elde edilir ;

$$K/p = (T_C / T_E) (1 + \cos \phi) + \kappa [ 1 + \cos (\phi - \alpha) ] + (2V_D T_C)/(V_E T_D) \quad (3.5)$$

Ölü bölgedeki sıcaklık değişimi aksenal yönde lineer ise o zaman ortalama sıcaklık aşağıdaki şekilde ifade edilir :

$$T_D = T_C + \frac{1}{2} (T_E - T_C) = (1 + T_E / T_C)(T_C/2) \quad (3.6)$$

$T_C / T_E = \tau$  olduğundan (3.5) denkleminde

$$K/p = \tau (1 + \cos \phi) + \kappa [ 1 + \cos (\phi - \alpha) ] + 2S \quad (3.7)$$

elde edilir. Burada S (azaltılmış ölü hacim )  $2X\tau / (\tau + 1)$  ifadesine eşittir. (3.7) denklemini basitleştirmek için ilk olarak (3.8) denklemini ele alalım ,

$$y = x \cos \phi + z \sin \phi \quad (3.8)$$

O zaman  $y = \sqrt{r^2} \cos(\phi - \beta)$  ve burada  $\tan \beta = z/x$  ,  $z = r \sin \beta$  ve  $x = r \cos \beta$  'dir

Buradan

$$\sqrt{r^2} \cos(\phi - \beta) = \sqrt{r^2} (\cos \phi \cos \beta + \sin \phi \sin \beta)$$

$$\begin{aligned}
&= r \cos \phi \cos \beta + r \sin \phi \sin \beta \\
&= x \cos \phi + z \sin \phi \quad \text{ifadesinin,}
\end{aligned}$$

denklem(3.8)'e eşit olduğu görülmektedir. (3.8) eşitliği (3.7) eşitliğine benzer bir analogi ile ,

$$\begin{aligned}
K / p &= [(\tau + \kappa \cos \alpha)^2 + (\kappa \sin \alpha)^2]^{1/2} \cos(\phi - \theta) + \tau + \kappa + 2S \\
&= (\tau^2 + 2\tau \kappa \cos \alpha + \kappa^2)^{1/2} \cos(\phi - \theta) + \tau + \kappa + 2S \quad (3.9)
\end{aligned}$$

denklemini elde edilir. Burada  $\tan \theta = (\kappa \sin \alpha) / (\tau + \kappa \cos \alpha)$ ' dir.

$A = (\tau^2 + 2\tau \kappa \cos \alpha + \kappa^2)^{1/2}$  ,  $B = \tau + \kappa + 2S$  ve  $\delta = A / B$  olarak tanımlandığında

$K / p = A \cos(\phi - \theta) + B$  elde edilir ve buradan  $p$  şu şekilde olmaktadır ;

$$p = K / \{B[1 + \delta \cos(\phi - \theta)]\} \quad (3.10)$$

Anlık basınç  $p$ ,

(a) minimum ise  $\phi = \theta$  , diğer bir deyişle  $(\phi - \theta) = 0$ ' dir

(b) maksimum ise  $\phi = (\theta + \pi)$ , diğer bir deyişle  $(\phi - \theta) = \pi$  ' dir

Buradan ,  $p_{\min} = K / [B(1 + \delta)]$ , ve  $p_{\max} = K / [B(1 - \delta)]$  olmaktadır. Böylece anlık basınç,

$$p = p_{\max} (1 - \delta) / [1 + \delta \cos(\phi - \theta)] \quad (3.11)$$

ve  $p_{\min}$  basıncı cinsinden

$$p = p_{\min} (1 + \delta) / [1 + \delta \cos(\phi - \theta)] \quad (3.12)$$

olarak ifade edilir. Basınç oranı da şu şekildedir ;

$$p_r = p_{\max} / p_{\min} = (1 + \delta) / (1 - \delta) \quad (3.13)$$

Ortalama çevrim basıncı aşağıdaki gibi hesaplanır ;

$$p_{ort} = (1/2\pi) \int_0^{2\pi} p d(\phi - \theta)$$

$$p_{ort} = (1/2\pi) \int_0^{2\pi} \{p_{mak} (1 - \delta) / [1 + \delta \cos(\phi - \theta)]\} d(\phi - \theta) \quad (3.14)$$

denklem çözüldüğünde ortalama basınç bulunur ;

$$p_{ort} = p_{mak} [(1 - \delta) / (1 + \delta)]^{1/2} \quad (3.15)$$

İletilen ısı ve yapılan iş ,genişleme ve sıkıştırma işlemleri izotermik olduğundan birbirine eşittir. Bu yüzden  $Q = P = \int p dV$  eşitliğini yazabiliriz. Hacim ifadesini  $V = 1/2 V_E (1 + \cos\phi)$  şeklinde yazdığımızda ,

$$dV = -1/2 V_E \sin\phi d\phi \quad (3.16)$$

denklemini elde edilir, ve

$$p = p_{ort} [1 - \Delta \cos(\phi - \theta)] \quad (3.17)$$

ise ,yaklaşık olarak  $\Delta = 2\delta / [1 + (1 - \delta^2)^{1/2}]$  yazılabilir. O halde Q,

$$Q = -1/2 \int_0^{2\pi} \{p_{ort} V_E [1 - \Delta \cos(\phi - \theta)] \sin\phi\} d\phi$$

$$Q = -1/2 p_{ort} V_E \int_0^{2\pi} [\sin\phi - \Delta(\cos\phi \cos\theta \sin\phi + \sin\theta \sin^2\phi)] d\phi$$

$$Q = -1/2 p_{ort} V_E \left[ -\cos\phi - \Delta \left[ -\cos\theta \cdot 1/2 \cos 2\phi + \sin\theta (1/2 \phi - 1/4 \sin 2\phi) \right] \right]_0^{2\pi}$$

$$Q = -\frac{1}{2} p_{ort} V_E \left[ -\Delta \sin \theta (\phi/2) \right]_0^{2\pi}$$

$$Q = -\frac{1}{2} \pi p_{ort} V_E \Delta \sin \theta \quad (3.18)$$

Genişleme bölgesindeki hacim değişimleri (3.1) denklemleri ile verilmektedir. Denklem (3.16)'da yerine konulduğunda ,denklem (3.18)'den genişleme bölgesine iletilen ısı ,

$$Q = \pi p_{ort} V_E \delta \sin \theta / [1 + (1 - \delta^2)^{1/2}] \quad (3.19)$$

şeklinde hesaplanır.

Sıkıştırma bölgesindeki hacim değişimi (3.2) denklemi ile verilmektedir. Yukarıda anlatılana benzer bir işlem sırasıyla ,istenilen şekilde basınç ve hacim değişimi elde edilebilir. Sıkıştırma bölgesi için iletilen ısı şu şekilde olmaktadır;

$$Q_c = [\pi p_{ort} V_E \kappa \delta \sin(\phi - \alpha)] / [1 + (1 - \delta^2)^{1/2}] \quad (3.20)$$

Denklem (3.20)'i denklem (3.19)'a bölerek,

$$Q_c / Q = [\kappa \sin(\phi - \alpha)] / \sin \theta$$

$$Q_c / Q = [\kappa(\sin \theta \cos \alpha - \cos \theta \sin \alpha)] / \sin \theta$$

$$Q_c / Q = \kappa(\cos \alpha - \sin \alpha / \tan \theta) \quad (3.21)$$

denklemini elde edilir, fakat  $\tan \theta = \kappa \sin \alpha / (\tau + \kappa \cos \alpha)$  olduğundan  $Q_c / Q = -\tau$ 'dur.

Genişleme bölgesindeki iletilen ısı sıkıştırma bölgesinde iletilen ısının zıt işaretlisidir, ve sıcaklık oranı  $\tau$ 'dan nümerik olarak farklıdır. Benzeşim yardımıyla, her iki bölgede yapılan iş te aynı ilişki kurulabilir.  $P_C = -\tau P_E$ , ve net güç (iş)  $P = P_E + P_C = (1 - \tau)Q$ 'dur.

Motor şeklinde çalışmada  $T_E > T_C$ , veya  $\tau < 1$  ise ısıl (termik) verim  $\eta = (\text{verilen ısı} - \text{atılan ısı}) / (\text{verilen ısı})$ 'dır ve şu denklemle ifade edilir;

$$\eta = (Q - \tau Q) / Q = 1 - \tau = (T_E - T_C) / T_E \quad (3.22)$$

Bu Carnot verimine denk gelmektedir. Makine soğutucu olarak çalıştırılırsa  $T_C > T_E$

veya  $\tau > 1$  ise soğutma katsayısı = alınan ısı / yapılan iş'tir., veya

$$\begin{aligned} q^* &= Q / (Q - Q_C) = 1 / (1 - \tau) \\ q^* &= T_E / (T_E - T_C) \end{aligned} \quad (3.23)$$

denklemlerle ifade edilir. Bir ısı pompası olarak çalıştırılırsa  $T_C > T_E$ , veya  $\tau > 1$  ise ısıtma katsayısı = atılan ısı / yapılan iş'tir, veya

$$\begin{aligned} q &= Q_C / (Q - Q_C) = \tau / (1 - \tau) \\ q &= T_C / (T_E - T_C) \end{aligned} \quad (3.24)$$

denklemlerle ifade edilir. Ayrıca bu bağıntı ısı verimin tersidir.

Makinadaki kütle dağılımını ifade etmek için ideal gaz denklemi ( $M = pV/RT$ ) kullanılır, buradaki  $p$  aşağıdaki bağıntıyla verilir.

$$p = p_{ort} (1 - \delta^2)^{1/2} / [1 + \delta \cos(\phi - \theta)] \quad (3.25)$$

a) Genleşme bölgesindeki çalışma akışkanının anlık kütlesi ;

$$M_e = 1/2 V_E p_{ort} (1 - \delta^2)^{1/2} (1 + \cos\phi) / [RT_E (1 + \delta \cos(\phi - \theta))] \quad (3.26)$$

Bu bölgedeki çalışma akışkanının kütlesindeki değişim oranı ;

$$dM_e / d\phi = V_E p_{ort} (1 - \delta^2)^{1/2} \{ \delta [\sin(\phi - \theta) - \sin\theta] - \sin\phi \} / 2RT_E [1 + \delta \cos(\phi - \theta)]^2 \quad (3.27)$$

b) Sıkıştırma Bölgesindeki çalışma akışkanının anlık kütlesi ;

$$M_C = 1/2 [ \kappa V_E p_{ort} (1 - \delta^2)^{1/2} (1 + \cos(\phi - \alpha)) ] / 2RT_C [1 + \delta \cos(\phi - \theta)] \quad (3.28)$$

Bu bölgedeki çalışma akışkanının kütlesindeki değişim oranı ;

$$dM_C / d\phi = \kappa V_E p_{ort} (1 - \delta^2)^{1/2} \{ \delta [\sin(\phi - \theta) + \sin(\alpha - \theta) - \sin(\theta - \alpha)] \} / 2RT_C [1 + \delta \cos(\phi - \theta)]^2 \quad (3.29)$$

c) Ölü hacimdeki çalışma akışkanının anlık kütlesi ;

$$M_d = [XV_E p_{ort} (1 - \delta^2)^{1/2}] / RT_D [1 + \delta \cos(\phi - \theta)] \quad (3.30)$$

Bu bölgedeki çalışma akışkanının kütlesindeki değişim oranı ;

$$dM_d / d\phi = [XV_E p_{ort} (1 - \delta^2)^{1/2} \delta \sin(\phi - \theta)] / RT_D [1 + \delta \cos(\phi - \theta)]^2 \quad (3.31)$$

Kütle değişim oranları toplanırsa  $dM_e + dM_C + dM_d = 0$ 'dır, bu yüzden çalışma akışkanının toplam kütlesi ( $M_T$ ) sabit olur, ve şu şekildedir;

$$M_T = V_E p_{ort} (1 - \delta^2)^{1/2} \{ \tau(1 + \cos\phi) + \kappa[1 + \cos(\phi - \alpha)] + 2S \} / 2RT_C [1 + \delta \cos(\phi - \theta)] \quad (3.32)$$

$\phi = 0$  olduğu zaman  $M_T$ ,

$$M_T = V_E p_{ort} (1 - \delta^2)^{1/2} [ \tau + S + (\kappa/2)(1 + \cos\alpha) ] / RT_C (1 + \delta \cos\theta) \quad (3.33)$$

Boyutsuz birimlerde alınan ısı ve motor çıkış gücü ifadelerini aşağıdaki gibi belirtmek mümkündür.

a) Çalışma akışkanının birim kütlesi başına alınan ısı , denklem (3.19) ve (3.33) birleştirilerek elde edilmektedir;

$$Q_{küttele} = Q / RT_C = \pi \delta \sin\theta (1 + \cos\theta) / \{ (1 - \delta^2)^{1/2} [1 + (1 - \delta^2)^{1/2}] [ \tau + S + (\kappa/2)(1 + \cos\alpha) ] \} \quad (3.34)$$

Benzer olarak çalışma akışkanının birim kütlesi başına net motor çıkış gücü ;

$$P_{küttele} = P / RT_C = (\tau - 1) Q_{küttele} \quad (3.35)$$

b) Karakteristik basınç ve hacimleri kullanarak aşağıdaki boyutsuz ifadeler elde edilebilir.

Toplam süpürme hacmi ;

$$V_T = (V_E + V_C) = (1 + \kappa) V_E \quad (3.36)$$

Bu denklemin (3.2) ve (3.15) denklemleriyle birleştirilmesi sonucunda  $Q_{\max}$  ;

$$Q_{\max} = Q / (P_{\max} V_T) = [\pi(1 - \delta)^{1/2} \delta \sin\theta] / [(1 + \kappa)(1 + \delta)^{1/2} (1 + 1 - \delta^2)^{1/2}] \quad (3.37)$$

ve  $P_{\max}$  ;

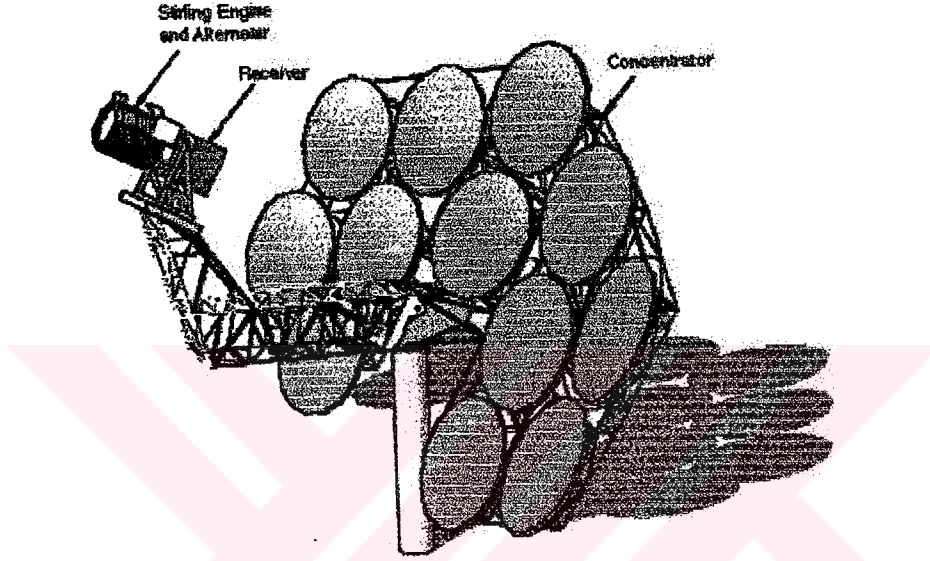
$$P_{\max} = (\tau - 1) Q_{\max} \quad (3.38)$$

elde edilir.



#### 4. STİRLİNG / GÜNEŞ MAKİNASIYLA ELEKTRİK ÜRETİMİ

Geçmiş bölümlerde anlatılan yüksek verimli stirling motoru yardımıyla güneş enerjisinden elektrik üretimi çok düşük işletme maliyeti ile mümkündür. 25 KWe'ye ulaşan modüler üretim kapasiteleri ile temiz enerji kaynaklarının önem kazandığı günümüzde hak ettiği yerini yavaş yavaş almaktadır.



Şekil 4.1 Parabolik odaklayıcılardan oluşmuş stirling güneş makinası

Parabolik odaklayıcılı stirling güneş makinası aşağıdaki elemanların bir arada kullanımı sonucunda oluşmuştur.

- 1) Odaklayıcı
- 2) Isı Alıcı
- 3) Makine (Elektrik jeneratörü veya alternatör ile birlikte)

Bu elemanların sistem içindeki görevleri kısaca şu şekildedir;

- 1) Odaklayıcı : İki farklı eksende hareket serbestliğine sahip olan güneş odaklayıcıları , güneş ışınlarını ısı alıcıya yansıtmak için gün boyu güneşin hareketini izler.
- 2) Isı Alıcılar : Odaklanan güneş enerjisini absorbe ederler ve burada termal enerji Stirling makinası içinde ki çalışan gazı ısıtır.
- 3) Makine : Stirling makinası içinde sıra ile ısıtılıp soğutulan bir çalışan gaz (Genellikle

Hidrojen veya Helyum ) mevcuttur. Sistemin içindeki gazın çalışması gazın denmesinin sebebi gazın herhangi bir şekilde tüketilmemesidir. Stirling makinası gazın soğutulması ile sıkışma ve gazın ısıtılması ile genişleme özelliğinden yola çıkarak çalışır. Sıkışma ve genişleme prosesi pistonlar üzerindeki basınçta iniş çıkışlar sebep olur. Bu basınç farklılıkları piston yardımıyla mekanik güce dönüşür. Bazı Stirling makineleri ile elektrik üretimi ayrı jeneratörlerin ya da alternatörlerin motora akuple edilmesi ile sağlanırken , diğerlerinde alternatör makinenin kendisine entegre edilir. Sonuçta ortaya çıkan Makine/Alternatör ikilisi , dönüştürücü veya güç dönüşüm ünitesi eklinde adlandırılır.

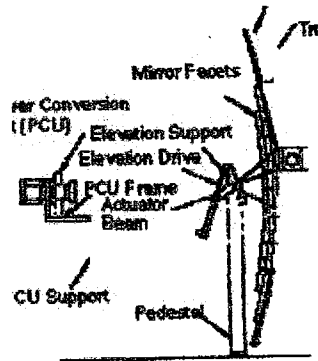
Stirling güneş makinasının işleyişine daha iyi vakıf olabilmemiz için elemanlarını daha iyi incelememiz gerekir.

#### 4.1 Odaklayıcılar

Stirling güneş makinasında kullanılan güneş odaklayıcıları genellikle noktasal odaklı parabolik odaklayıcılardır. Bu odaklayıcılar güneşi iki eksen boyunca takip ederler ve odak dediğimiz küçük bir bölgeye odaklarlar.

Güneş kolektörlerinin (birden fazla sayıda odaklayıcı ihtiva eden sistemler) boyutları istenen çıkış gücüne göre değişir. Güneş ışınlarının  $1000 \text{ w/m}^2$  etkin olduğu bir yerde 5KWe' lik bir Stirling güneş makinasının 5.5 metre çapında bir kolektöre sahip olması gerekmektedir. Aynı şekilde 25 KWe'lik bir sistem 10 metre çapında bir kolektöre ihtiyaç duyar.

Odaklayıcılar ,cam yüzeyine alüminyum veya gümüş çökeltilmiş yansıtıcılardan oluşur.



Şekil 4.1.1 Parabolik yansıtıcı

Bir güneş odaklayıcısının ideal şekli parabolik bir biçimdir. Bu şeklin ideal kabul edilmesinin sebebi güneş ışınlarını çok küçük bir yüzeye yansıtılma özelliğidir. Odaklayıcıların temel özelliği ,yalnızca yüzeylerine dik gelen ışını odaklamalarıdır.

Güneşi odaklamada , yansıtıcı yüzeyin tipi ve odaklayıcının şeklinin önemi kadar güneşi takip edebilmesi de güneş ışınından maksimum yararlanması açısından önemlidir. Bunun gerçekleşebilmesi için iki eksenden hareketli olması lazımdır. Bu hareketlilik iki yöntem ile sağlanır .Her iki yönteminde kendine göre avantajları vardır. Bu yöntemler ;

- 1) Azimuth - yükseliş izleme metodu : Birinci eksende ki hareket parabolik tabak odaklayıcının dünya eksenine paralel bir düzlemde döndürülmesiyle (Azimuth) elde edilir. İkinci eksendeki hareket ise dünya eksenine dik bir düzlemdeki yer değiştirme (yükseliş) ile sağlanır. Bu iki hareket sayesinde kollektörün sağa sola ve yukarı aşağı hareketi sağlanır.
- 2) Kutup izleme metodu : Kollektör dünyanın dönüş eksenine paralel bir eksende döndürülür. Yani kollektör dünyanın dönüş hızıyla aynı hız olan 1 5 derece/saat'lik sabit hızla döndürülür. Diğer önme eksenini , yani meyilin verildiği eksen kutup eksenine diktir ve 0.016 derece /saat'lik yavaş hızıyla kollektörün güneşi takip etmesini sağlar.

## 4.2 Isı Alıcılar

Isı alıcıların sistem içinde iki fonksiyonu vardır.

- 1) Odaklayıcılardan yansıyan güneş ışınlarını mümkün olduğunca absorbe etmek
- 2) Bu enerjiyi makinanın çalışan gazına transfer etmek

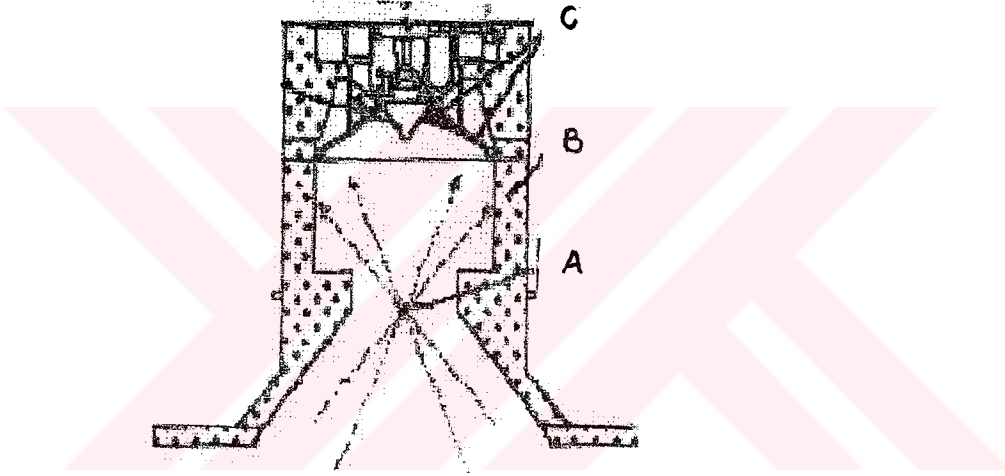
Her ne kadar kullanılan odaklayıcılar gelen ışınları bir noktaya paralel bir şekilde iletebilse de güneş noktasal bir kaynak olmadığı için güneş ışınları paralel bir şekilde iletilmez. Bununla birlikte odaklayıcılarındaki imatları teorik dizaynları kadar mükemmel olmadığı için odaklanan radyasyon ısı alıcı içinde küçük bir bölgeye yayılır.

Stirling güneş makinalarında kullanılan ısı alıcıların içinde bir boşluk ve bu boşluğa girişte küçük bir açıklık vardır.(Apartur) .Isıyı emen kısım güneş ışınlarını daha iyi absorbe edebilmesi için aparturun arka kısmına yerleştirilmiştir. Isı alıcısının içindeki boşluk

ısı kaybının minimum olması için izole edilmiştir. Isı alıcısının temel taşı olan apartur, güneş ışınlarının rahat girebileceği kadar büyük fakat giren ışınların yarattığı enerjinin dışarı kaçamayacağı kadar da küçük dizayn edilir.

Isı alıcılarında güneş ışınlarının gelen ısıyı makine içindeki çalışan gazı transfer etmek için iki yöntem kullanılır.

Birinci yöntemde çalışan gazın içine olduğu ince borular güneş ışınlarının odaklandığı ısı alıcısının içindeki boşluktan geçirilir. Bu sayede borular içinde dolaşan çalışma gazı ısı alıcı içinde oluşan yüksek ısı enerjisine maruz kalır ve çevrim için gerekli olan sıcaklığına ulaşır.

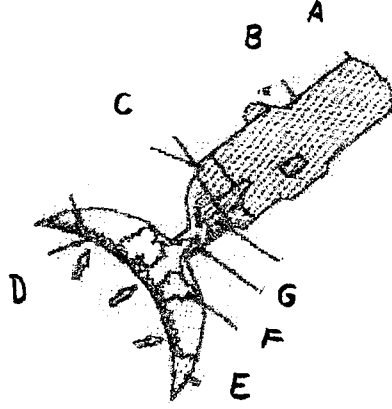


Şekil 4.2.1 ısı alıcı

- A) İdeal fokus noktası
- B) izole edilmiş boşluk cidarı
- C) Çalışma gazının dolaştığı tüpler.

İkinci yöntem ise ısı transferinin sıvı metal ile sağlandığı yöntemdir. Bu yöntemde metal (genellikle sıvı Na kullanılır) ısıyı emen yüzeyde buharlaştırılır. Buharlaşan metalin çalışan gazı taşıyan borularda kondens olması sağlanır. Isısını gaza veren metal tekrardan buharlaşmak üzere ısı emen yüzeye gönderilir. Kondens olan metalden ısı alan çalışma gazı ise motor içindeki çevrimine devam eder.

Aşağıdaki şekilde bu yöntemle çalışan bir Stirling makinası görülmektedir.



Şekil 4.2.2 Sıvı metal ile çalışan ısı alıcı

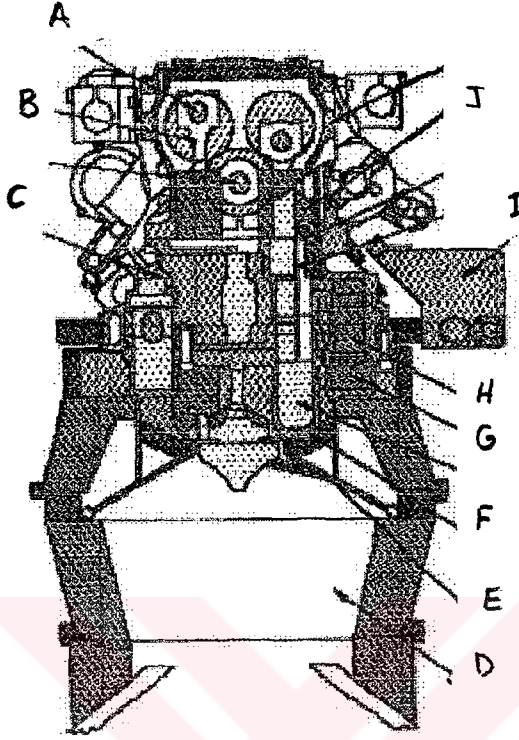
- A) Jeneratör
- B) Stirling Makinası
- C) Çalışma Gazı
- D) Isı Alıcı Yüzey
- E) Sıvı Sodyum
- F) Buharlaşan Sodyum
- G) Yoğuşma Dönüşü

### 4.3 Makine

Daha önceki kısımlardada anlatıldığı gibi Stirling makinası ısıyı mekanik işe dönüştürmedeki en verimli yöntemdir. Bununla birlikte yüksek ısı kaynaklarına ihtiyaç duyar Güneş kollektörleri , odaklayıcıları ile yüksek sıcaklıklara ulaştığı için Stirling makinalarının ihtiyaç duyduğu sıcaklıklar için çok iyi bir çözümdür.

Bu sistemde yüksek verimli makinaların kullanılması elektrik üretimindeki maliyetin düşmesinde büyük bir etkidir. Stirling güneş makinalarında yüksek sıcaklık çok önemli olduğu için makinalar yapıldıkları malzemelerin elverdiği en yüksek sıcaklıklarda çalıştırılırlar Güneş odaklayıcılarının istemi bu sıcaklıklara ulaştırması çok kolaydır. Bu sıcaklık 650 -800 °C arasında değişir. Bu sıcaklıklar sonucunda da motor verimleri %30 - 40 'lara kadar ulaşır. Şekil 4.3.1 'de stirling güneş makinası için dizayn edilmiş bir

Stirling makinası görülmektedir. Burada Stirling makinasının güç pistonu çıkış şaftına bağlanmıştır..



Şekil 4.3.1 Stirling Güneş Makinası

- A) Krank şaftı
- B) Krank Bağlantısı
- C) Silindir Bloğu
- D) Boşluk
- E) Isıtıcı Borular
- F) Silindir Kafası
- G) Rejeneratör
- H) Soğutucu
- I) Yağ Tankı
- J) Krank Muhafazası

### 4.3.1 Çalışma gazı

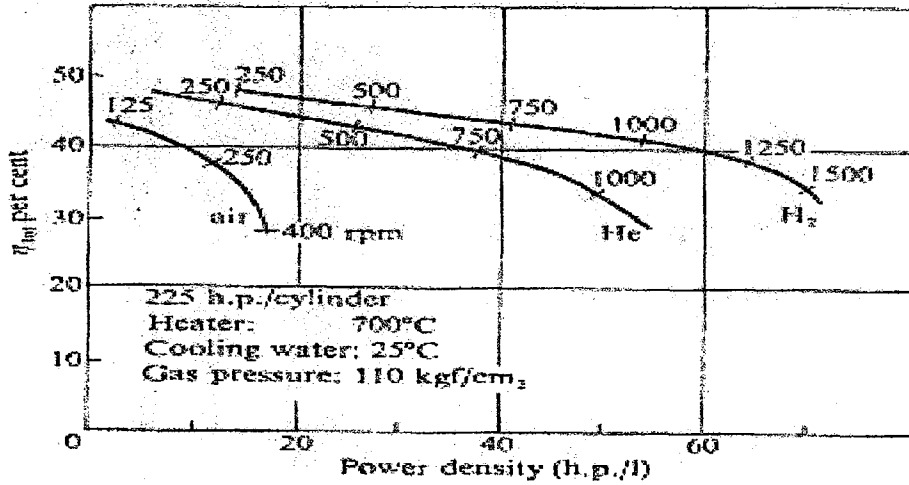
Stirling Makinasında çalışma gazı olarak üç tip gaz ele alınır. Bunlar ; hava ,Helyum ve Hidrojendir.

Hava kolay bulunabilir ve bedava olması sebebiyle üzerinde en çok çalışılan gaz tipidir. Hidrojen ve Helyumda yüksek ısı transfer kapasitelerinden dolayı en çok tercih edilen çalışma gazlarıdır. Hidrojen ile helyumu kıyasladığımızda hidrojenin hem daha ucuz hemde daha verimli olduğunu görürüz. Fakat hidrojenin helyuma göre bir dezavantajı oksijen veya hava ile temasında patlayıcı bir özellik almasıdır.

Özel yüksek güç çıkışları için dizayn edilen makineler,yüksek termal verime ihtiyaç duyarlar.Ancak bu sayede yüksek ısı transferlerine ulaşabilirler.

Hidrojen ve Helyum kullanan makinaların hava kullanan makinalara göre bir dezavantajı vardır.Bu da kullanılan gazların dış ortaman izolasyonudur.Ayrıca bu gazların kullanıldığı makinalarda gazların davranışlarını kontrol etmek için çeşitli basınç düşürücü valfler ve kontrol sistemleri kullanılması gerekmektedir. Bu da çalışma gazı olarak havanın kullanıldığı sistemlere göre daha fazla bir maliyet getirecektir.

Havanın kullanıldığı sistemlerde ise , havanın ısı transfer oranının düşük olması sebebiyle dizayn edilen makinaların boyutları büyümektedir. Buna rağmen verimler çok düşük olur. Aşağıdaki tabloda Hidrojen ,helyum ve havanın karşılaştırılması görülmektedir



Şekil 4.3.2 Hidrojen ,Helyum ve Havanın mukayesesi(Walker 1973)

Şekil 4.3.2 'deki karşılaştırma ,225 HP'lik bir Stirling makinasının çalıştırılması sonucunda oluşturulmuştur. Yukarıdaki şekilde termal verimin güç yoğunluğu ile değişimi gözükmektedir. (1 litre süpürme hacmi başına üretilen güç) Yüksek güç yoğunluğunda ve hızlarda Hidrojenin üstünlüğü ortaya çıkmaktadır. Fakat düşük güç yoğunluklarında ve hızlarda üç tip gazında birbirinden pek farklı olmadığı görülmektedir. Bu yüzden dizayn aşamasında ne kadarlık bir güç üretimi gerekiyorsa çalışma gazının seçiminin ona göre yapılmasının büyük bir önemi vardır. (Walker 1973)

#### 4.4 Sistem Maliyetinin İncelenmesi

Stirling güneş makinasının ilk uygulamaları teknolojinin yetersizliği nedeniyle maliyetleri yüksek sistemlerdi .Bu yüzden güneş enerjisinden elektrik üretimi uygulamalarında en son tercih sebebi olmuştur. Fakat daha sonraları gerek çalışma gazının izolasyonu probleminin çözülmesi gerekse de odaklayıcı sistemlerin çok verimli hale gelip sistemi yüksek sıcaklıklara çıkartması sonucu sistem maliyeti düşmüştür.

Genel olarak ele alınırsa Amerikada yapılan incelemeler sonucu ilk yatırım maliyeti \$3000/KWe olduğu görülmüştür. Sistemin yalnız güneş enerjisi kullanımı sonucunda ,yani herhangi bir hibrid uygulama (diesel + güneş) işletme maliyetinin 5.5 U.S. cents/kwh olduğu saptanmıştır.

İLK YATIRIM MALİYETİ

İŞLETME MALİYETİ

3000 \$/KWe

5.5 CENTS/KWh

(<http://www.greentie.org/class/ixb0903.htm>)

## 5.RÜZGAR ENERJİSİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİ

Yeryüzünün üniform olmayan ısınması ve soğuması sonucu ortaya çıkan kuvvetlerin etkisi ile oluşan yatay hava hareketlerine rüzgar denir.

Rüzgar esmesi ile ortaya çıkan hızın ,V,belirli hava kütesini ,m,hareket etmesi sonucunda ortaya çıkan kinetik enerjinin genel ifadesi fizik prensiplerine tanımına göre basitçe aşağıdaki şekildedir.

$$E = \frac{1}{2} m V^2 \quad (5.1)$$

Burada kütle  $m = \rho H$  şeklinde tanımlanabilir ki H hacmi ifade eder.Rüzgarın düşey bileşeni yatay bileşeninin yanında çok küçük olduğu için ihmal edilir ve bu nedenle rüzgar esme yönüne dik alanı A ile ,rüzgar yönündeki uzunluğu da U ile gösterirsek bu takdirde hacim  $H = AU$  olarak ifade edilir. Ayrıca rüzgar hızı t süresince kat edileceği düşünülen bu mesafeye  $U = Vt$  şeklinde bağlıdır.Denklem (5.1) 'de m'nin yerine konularak yukarıdaki ifadelerinde göz önünde tutulması ile yapılan basit cebirsel işlemlerden sonra

$$E = \frac{1}{2} \rho A t V^3 \quad (5.2)$$

bulunur. Pratik uygulamalarda birim zamanda birim alandan üretilebilecek rüzgar enerjisinin  $E_U$ , bilinmesi mühendislik faaliyetleri açısından önem kazanır.Bunun için denklem (5.2) 'nin her iki tarafının alan ve zamana bölünmesi sonucu

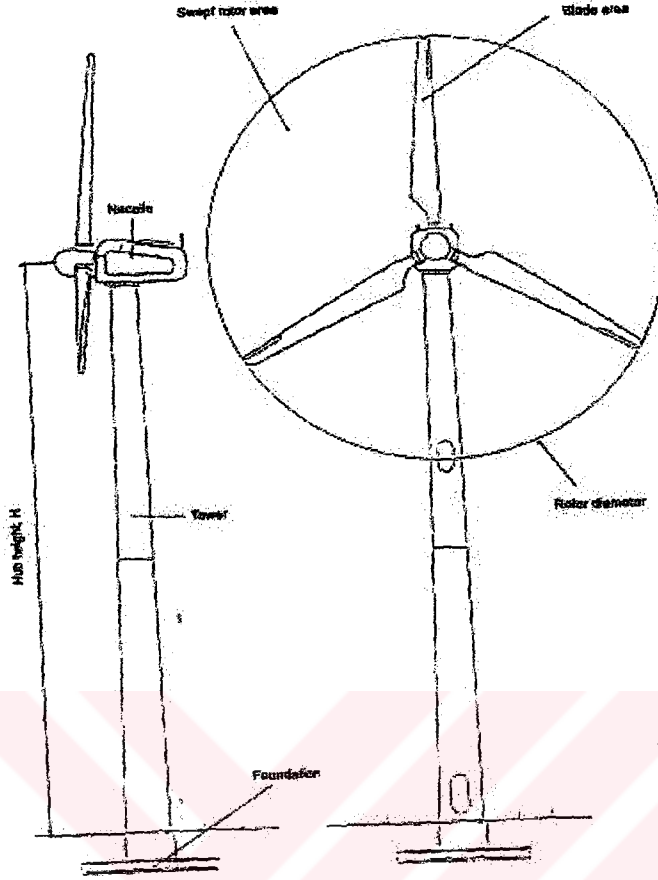
$$E_U = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (5.3)$$

olarak bulunur.

Genel olarak mutlak sıcaklık T, basınç , p, ve havanın yoğunluğunun birbirlerine gazların hal denklemi aracılığı ile bağlı oldukları bilinmektedir. Bu ideal gaz denklemi olarakta bilinir ve açık ifadesi  $p = R \rho T$  şeklindedir. Bunun denklem (5.2) 'de yerine konulması ile

$$E_U = \alpha (P/T) V^3 \quad (5.4)$$

elde edilir ki burada  $\alpha = 0.5/R$  olarak tanımlanmıştır.Klasik kitaplarda  $R = 29.27 \text{kJ}/(\text{kg.K})$  olarak verilmiştir.Bu denklemin sağındaki bütün meteorolojik değişkenler istasyonlardaki aletler vasıtasıyla ölçülür ve sol taraf kolaylıkla hesap edilir. Denklem (5.3) 'teki bu ifade rüzgar enerjisinin detaylı olarak ve incelikle hesabı için bir esas teşkil eder .



Şekil 5.1 Rüzgar türbini

Rüzgar enerjisinin fayda ve dezavantajlarının her ikisi rüzgar kaynağı kullanım stratejisini belirler.

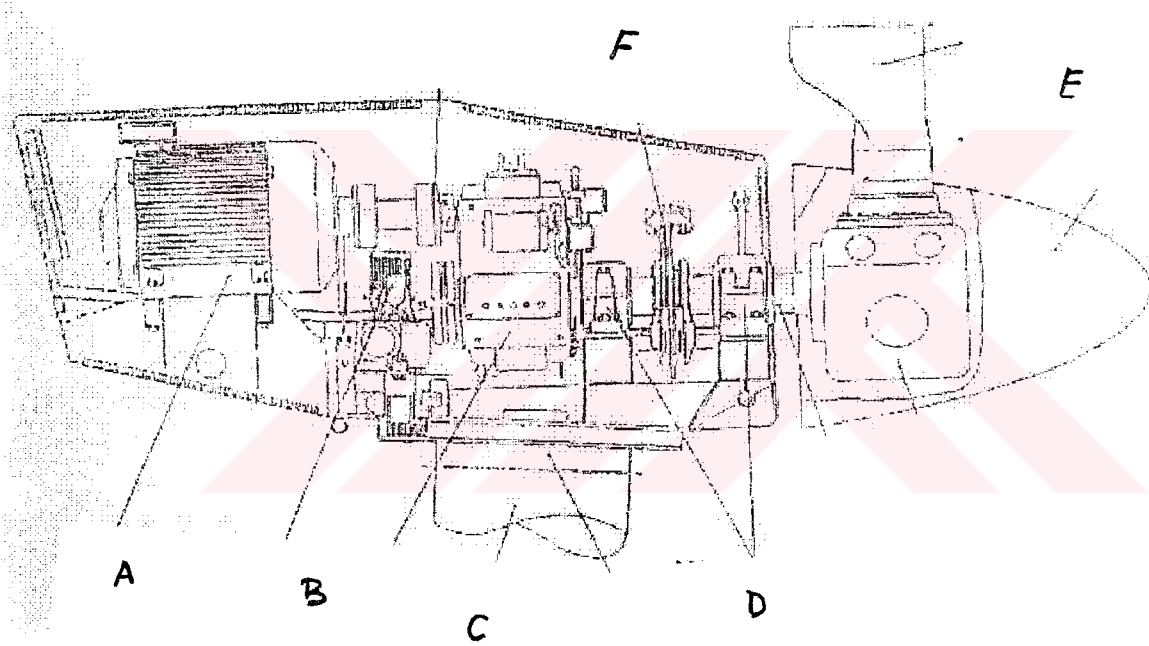
Rüzgar enerjisinin temiz ve iyi bir güç kaynağı olduğu muhakkaktır. Ancak rüzgar türbinlerinin de bazı dezavantajları vardır Bunlar;

- 1) Gürültüsü
- 2) TV görüntülerine ve telekomünikasyon hassasiyetine etkisi
- 3) Kuşların yaralanması ve ölmelerine sebep olması
- 4) Ancak belirli bir rüzgar hızından sonrasının kullanılabilmesi

### 5.1 Rüzgar Enerjisi için Şartlar

10 m yükseklikte ölçülen ortalama rüzgar hızı 5 m/s den fazla olan yerlerde mevcut rüzgarın %30 unun kullanımının mümkün olduğu ve gerekli türbin kurma işlemlerinin gerçekleştirilmesi istenir.

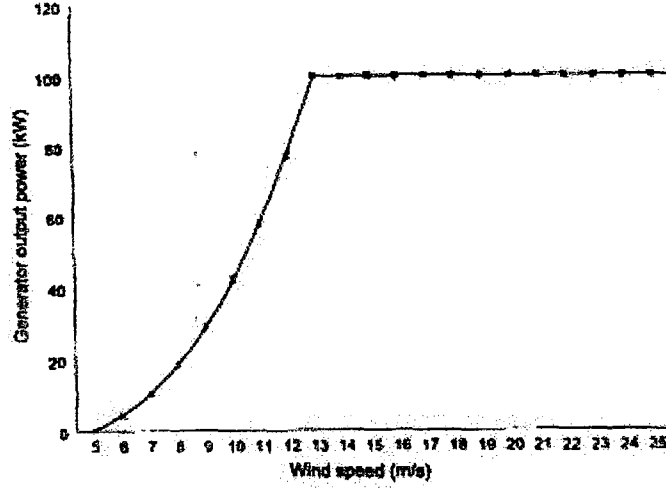
Rüzgar enerjisine uygun olduğu belirlenen bir yöreye rüzgar türbini kurularak enerji üretilebilir. Türbin kurma bir yıldan kısa sürede mümkündür. Rüzgar türbinlerinin ömrü 20 yıl sürer Bir rüzgar türbini vasıtasıyla üretilen enerji ,yöredeki rüzgar hızına ve güç toplayan kanatlara bağlıdır.



Şekil 5.2 Rüzgar türbininin elemanları

- A) Jeneratör
- B) Şanzıman
- C) Kule Bağlantısı
- D) Ana şaft
- E) Pervane
- F) Fren

100 KW'lık bir rüzgar türbininin hava hızına bağlı güç eğrisi aşağıdaki gibi gerçekleşir.



Şekil 5.3 Hava hızına bağlı rüzgar türbini güç eğrisi (Walker, Jenkins 1997)

Şekilden de görüleceği gibi rüzgar türbininden güç çıkışı ancak 5 m/s den sonra gerçekleşmeye başlamaktadır. Eğer illerimizdeki ortalama rüzgar hızlarını öğrenmek istersek ortaya şöyle bir tablo ortaya çıkar;

ÖLÇÜM YAPILAN İSTASYON	ORTALAMA HAVA HIZI (M/S)
ADANA	1.4
ADAPAZARI	1.7
AKCAKOCA	2.6
ALANYA	1.9
ANAMUR	3.1
ANTALYA	2.7
BANDIRMA	5.7
BOZCAADA	6.2
ÇORLU	3.8
EDREMİT	2.5
DİKİLİ	2.6

GÖKÇEADA	3.5
GÖZTEPE	2.2
İNEBOLU	3.7
MERSİN	2.0
SAMSUN	2.7
SARIYER	2.9
SİLİFKE	2.9
SİNOP	3.6

Tablo 5.1 Türkiyenin çeşitli blgelerindeki ortalama hava hızı (Akgün,Öz ,1991)

Tablodan da görüleceği gibi rüzgar türbini uygulaması yalnızca Bandırma ve Bozcaada da mümkündür.( Ölçüm yapılan istasyonlar arasında)Fakat genel olarak bakılırsa Türkiye açısından bu uygulamanın pek fazla yaygın olamayacağı açıktır.

### 5.3 Rüzgar Türbinlerinin Maliyeti

Rüzgar Türbinlerinin ilk yatırım ve işletme maliyetleri aşağıdaki gibidir;

İLK YATIRIM MALİYETİ

İŞLETME MALİYETİ

4000 \$/KW

7 CENTS/KW h

(Walker,Jenkins 1997)

(<http://solstice.crest.org/renewables/SJ/wind/423.html>)

## 6.GÜNEŞ PİLLERİ YARDIMIYLA ELEKTRİK ÜRETİMİ

Güneş enerjisinden elektrik üretmenin bir başka yolu da fotovoltaik teknolojisi ile elektrik üretimidir.

Fotovoltaik etki kısaca photovoltaic hücrelerin güneş ışığını elektriğe çevirme işlemidir. Proses şu şekilde gelişir; Güneş ışığı fotonlardan veya güneş enerjisi parçalarından oluşmuştur. Bu fotonlar solar spektrumun dalga boylarına bağlı olarak değişik miktarda enerji muhteva eder .Bir foton ,fotovoltaic hücreye çarptığı zaman ya yansır ,ya absorbe edilir ya da direk içinden geçer.Yalnızca absorbe edilen foton elektrik üretir.Absorbe olayı gerçekleştiği zaman hücre atomunun (genellikle yarı iletkenler.)içindeki elektrona fotonun enerjisi transfer olur.Eski pozisyonundan değişik bir hal alan elektron bulunduğu yerden kaçabilir bir hal alır.Buradan kaçan elektron gerisinde bir boşluk bırakır.Fotovoltaic hücrelerin yapısı itibariyle oluşan bu boşluk yardımıyla elektrik üretimi başlar.

Fotovoltaic sistemlerin veriminden bahsedilirken güneş ışığı enerjisinden elektrik enerjisine dönüştürme oranı esas alınır.Günümüzde Bu oran % 7 ila %17 arasındadır.Güneş pillerinin ömrü 20 yılı geçmez.

### 6.1 Güneş Pillerinin Maliyetinin İncelenmesi

İLK YATIRIM MALİYETİ

İŞLETME MALİYETİ

7000 \$/KW e

2 - 30 CENTS/KWh

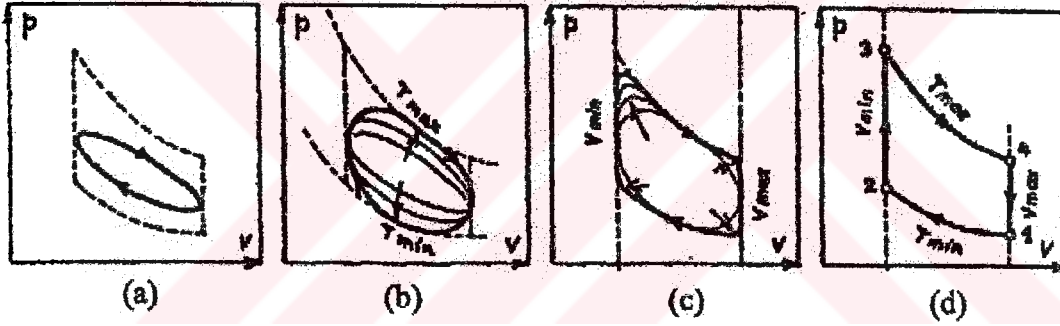
(<http://www.pvpower.com/pvfaq.html>) (<http://solstice.crest.org/renewables/sj/pv/319.html>.)

## 7. DÜZ PLAKALI STİRLİNG MOTORU

Kolin'nin düz plakalı Stirling motoru uygulaması Stirling güneş makinasına çok iyi bir örnektir.  $16^{\circ}\text{C}$  sıcaklık farkıyla çalışabilen bu makine bulutlu havalarda bile güneş enerjisinden elektrik üretimini mümkün kılmaktadır.

### 7.1 Sürekli ve Süreksiz Çalışan Yerdeğiştirme mekanizmaları

Sürekli çalışan yerdeğiştirme mekanizmalarında sinüs şeklinde bir hareket söz konusudur. Böyle bir sistemin avantajı, kolay gerçekleştirilebilmesi, sessiz ve daha uzun ömürlü olmasıdır. Şekil 7-1. (a)'da böyle bir sistemin  $P-V$  grafiği görülmektedir. Ölü hacim ve sinüsoidal hareketten dolayı gerçek çevrim teorik çevrime göre daha küçüktür. Gerçek çevrimin köşeleri yuvarlanmış ve oval bir hal almıştır. Gerçek çevrim pratikte teorik çevrimden beş kat daha küçük olabilmektedir.



Şekil 7-1. Stirling Motoru çevrimleri

- Sürekli çalışma (normal pistonlu)
- Düz plakalı çalışma
- Süreksiz hareket
- Teorik çevrim

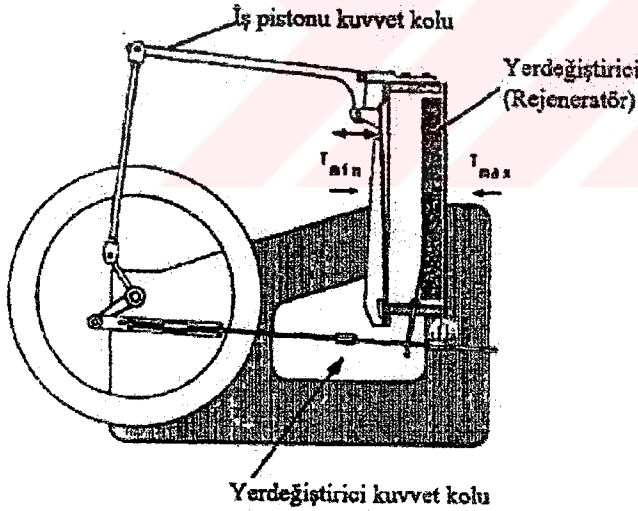
Süreksiz çalışan yerdeğiştirme mekanizmaları konusunda Stenberg'in 100 yıldan daha önce çalışmaları olmuştur. Fakat sürtünme konusunda bir çok problemler meydana gelmiştir. Süreksiz yerdeğiştirici tahriki, darbeleri salınımlı bir harekete sahip olmakta, bu da ideal çevrimin köşelerine yaklaşmasını sağlamaktadır. Böylelikle toplam verim yükselmektedir.

Şekil 7-1. (b)'de düz plakalı bir Stirling motorunun çalışması  $P-V$  grafiğinde görülmektedir. Burada eğer yerdeğiştirici plaka hafifçe sıcak veya soğuk metal plakaya bastırılırsa iki bölge arasındaki ölü hacim sadece temas yüzeyinden ibaret olacaktır. Böylelikle eğrilerle sınırlanmış kapalı alan büyütülmüş olmaktadır. Çünkü her iki izoterm durum arasındaki mesafe büyümektedir.

Süresiz harekette şekil 7-1 (c)' de görüleceği gibi güç, elde edilen kol yerdeğiştirme plakasının süresiz hareket yapmasını sağlamaktadır. Bu sayede soğuk ve sıcak hava birbirine karışmamaktadır. İzotermik sıkıştırmada hava, sabit soğuk sıcaklıkta ve izotermik genişlemede ise sabit sıcaklıkta kalmaktadır. Çevrim sağa ve sola doğru sabit hacim eğrilerine yaklaşmaktadır. Şekil 7-1. (d)' deki teorik stirling çevrimi görülmektedir. Eğer düz plakalı yerdeğiştirici ve süresiz çalışma birlikte kullanılırsa ideal stirling çevrimi hemen hemen gerçekleşmiş olmaktadır.

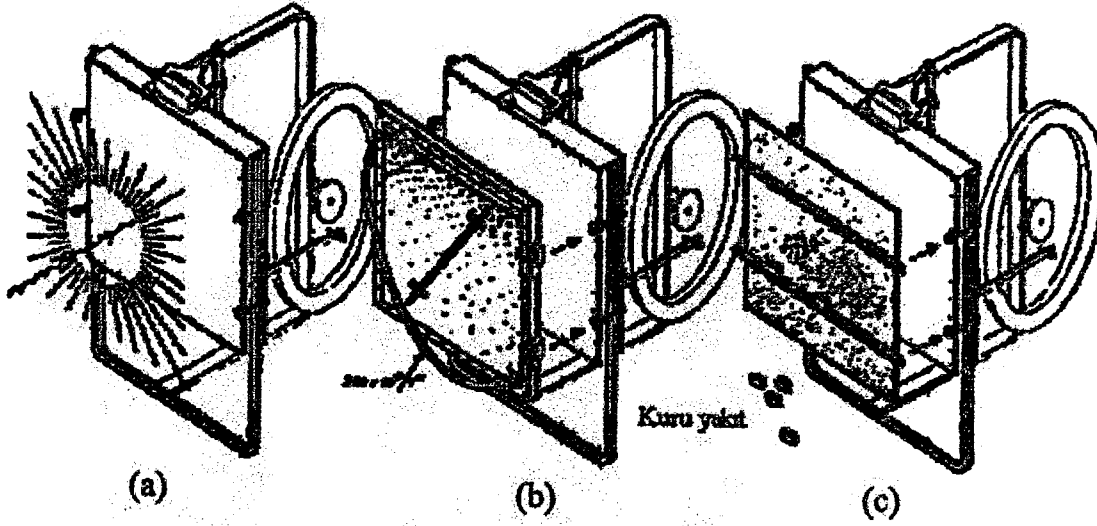
## 7.2 Prof. I. Kolin'in Düz Plakalı Stirling Motor

Yaklaşık 1972 yılından beri Prof. Ivo Kolin Zagreb Üniversitesi'nin Termodinamik ve Makine enstitülerinde bu konuda çalışmaktadır. Kolin süresizlik olayını yeniden gündeme getirip şekil 7-2 'de görülen makinayı tasarlamıştır



Şekil 7-2 Düz Plakalı Stirling motoru

Kolin'in geliştirdiği düz plakalı Stirling motorunun en büyük özelliği düşük sıcaklık farklarında çalışabilmesiydi. Sistem ilk olarak güneş enerjisi ile çalışacak şekilde tasarlanmış, fakat şekil 7-3'de görüleceği gibi sıcak suyla ve kuru yakıtla da çalışabildiği görülmüştür.



Şekil 7-3. Düz plakalı Stirling motorunun çeşitli ısı kaynaklarıyla çalıştırılması

- (a) Güneş enerjisi ile çalıştırılması
- (b) Sıcak su ile çalıştırılması
- (c) Kuru yakıtla çalıştırılması

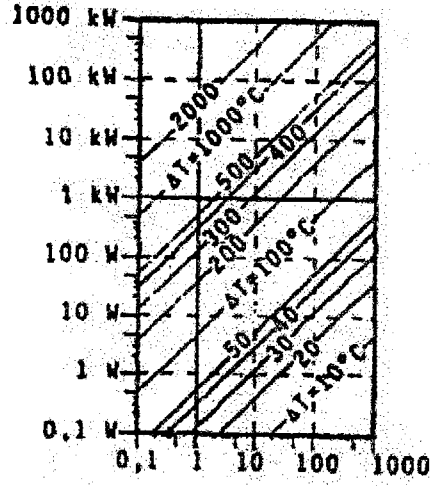
Bu makine mil, sinüs hareketini yerdeğiştiriciye iki darbeli hareket şeklinde bölerek düşük sıcaklıklarda çalışabilme imkanı sağlamaktadır. Sıcaklık farkı 16°C iken bile çalışabilmesi dikkat çekicidir. Amortisörden ölü nokta ayarı yapılarak ideal çevrimdeki gibi köşelere yaklaşım sağlanmaktadır

Makine tasarımında ölü noktanın ayarı farklı mekanizmalarda da mümkündür. Örneğin üzerinde belli bir profil olan volan, toparlak ve kol üçlüsü ile yerdeğiştiricinin darbeli hareketi sağlanabilir. Fakat bunun kötü yanı, vuruntu sesleri ve özellikle yüksek devir sayılarında toparlağın yüzeyden ayrılmasının mümkün olmasıdır. Aynı şekilde toparlağın eksantrik plaka üzerinde de dönmesi mümkündür. Kufner süreksiz hareket yapan bu tip konstrüksiyonlar üzerinde çalışmalar yapılmaktadır.

Membrandan oluşan ön duvar, iş pistonu ve görevi yapmaktadır. Rejeneratör görevi yapan yerdeğiştirici alüminyum köpükten veya strafordan yapılmaktadır.

Şekil 7-4'deki diyagramda mümkün olabilen güç aralığı, iş hacmine ve sıcaklığına bağlı olarak gösterilmektedir. İlk yaklaşım için bu diyagramda verilen ampirik formül şu şekildedir;

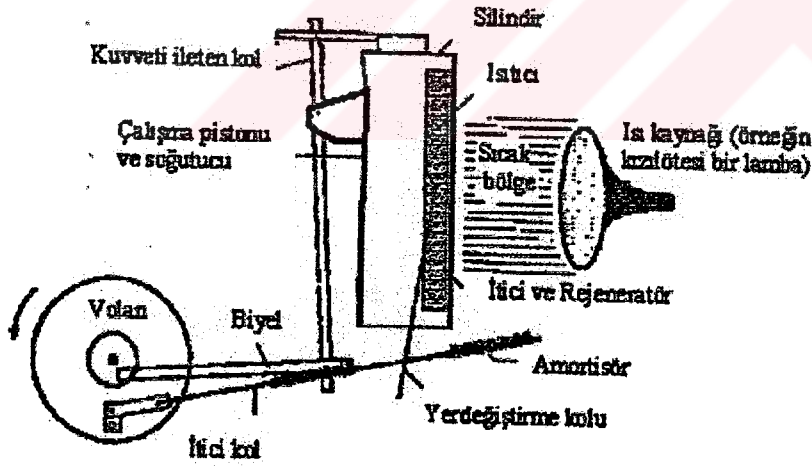
$$P = V \Delta T^3 / 2 \times 10^8 \text{ (KW)} \quad V = \text{Hacim (litre)}, \Delta T = \text{soğuk ve sıcak bölgedeki çalışma gazının sıcaklık farkı (Kelvin)}$$



Şekil 7-4. Düz plakalı Stirling motorunun mümkün olabilen teoriksel güç aralıkları

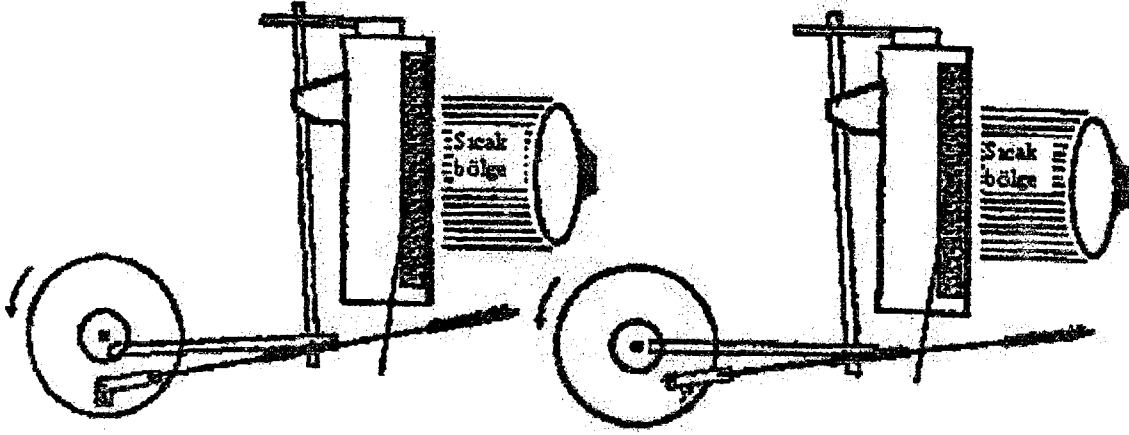
### 7.2.1 Düz Plakalı Stirling Motorunun Çalışma Prensibi

Düz plakalı Stirling motorunun çalışma prensibini anlamak için şekil 7-5'teki Kolin'in yaptığı Stirling motorunu ve çalışmasını incelememiz gerekmektedir. Motorun çalışmasını sağlayan parçaların isimleri şekilde görülmektedir:



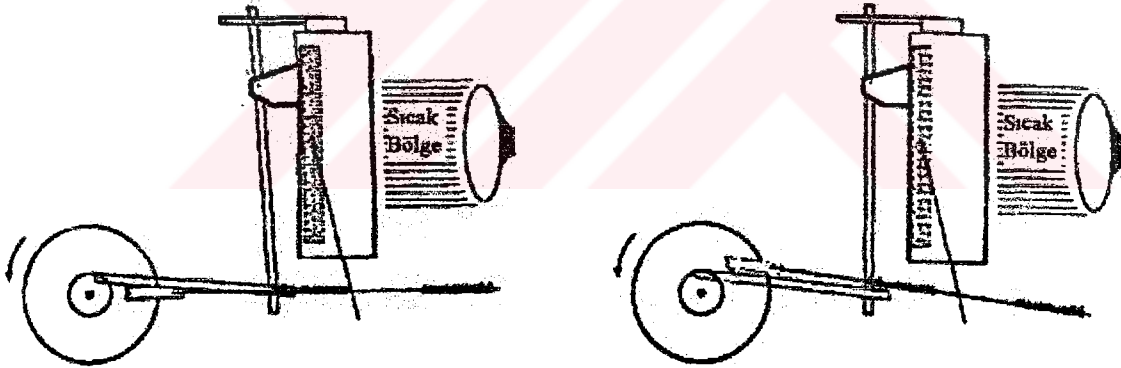
Şekil 7-5. Kolin'in düz plakalı Stirling motoru

Şekil 7-6'da 1⇒2 işleminde çalışma ortamındaki gaz (hava, helyum, hidrojen v.b.) soğuk taraftaki pistonun baskısıyla sıkıştırılır. İtici (yer değiştirici) sıcak ön yüze zorlanarak dayanmaya çalışır. Soğuk yüz aynı zamanda çalışma kısmıdır.



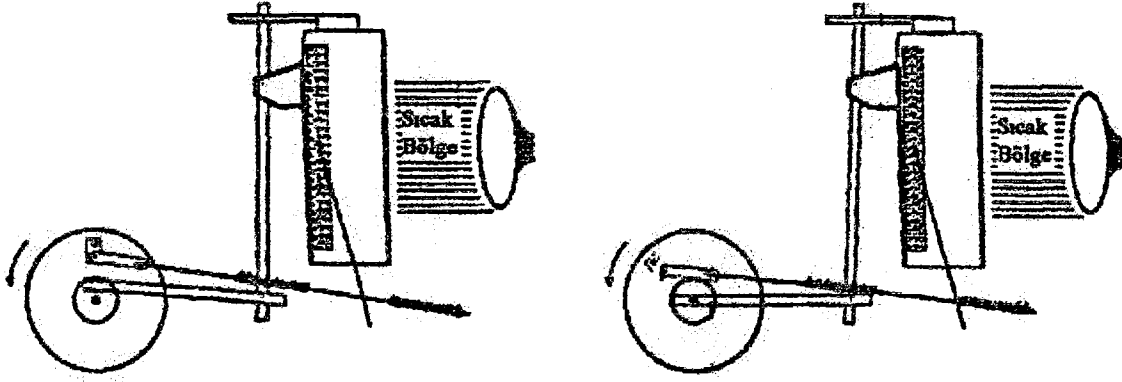
Şekil 7-6. Düz plakalı Stirling motoru çalışmasının 1⇒2 fazı

Şekil 7-7'deki 2⇒3 işleminde soğuk gaz hacminin en küçük değerini aldığı anda yer değiştirici sıcak yüzden soğuk yüze doğru hareket eder ve soğuk yüze dayanır. Bu hareket sırasında hava rejeneratör görevi de yapan delikli yerdeğiştirici içinden geçer ve aynı anda rejeneratörün ısını da almaktadır.



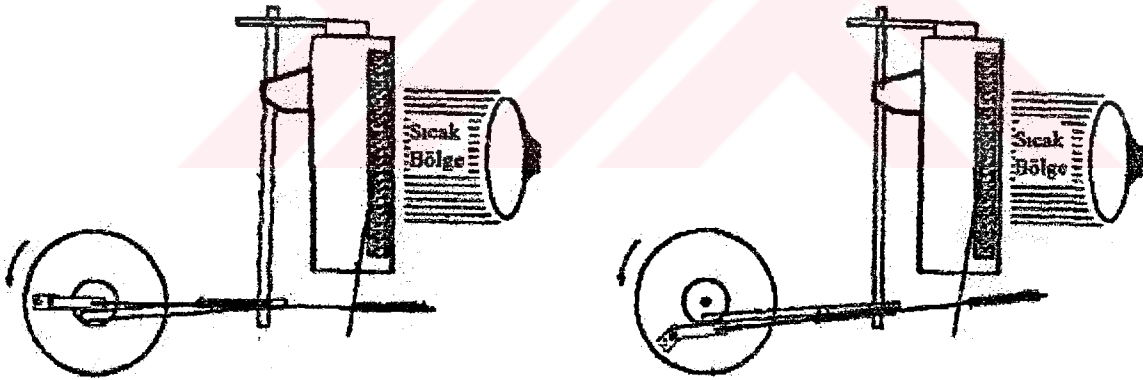
Şekil 7-7. Düz plakalı Stirling motoru çalışmasının 2⇒3 fazı

Şekil 7-8'deki 3⇒4 işleminde ısınmış hava yayılır ve çalışma (iş) pistonuna baskı yapar. Bu baskı sonucunda iş pistonunda meydana gelen küçük yerdeğiştirme, hareketi volana iletir. Hava, yalnız sıcak çalışma ortamında maksimum oranda yayılım gösterir.



Şekil 7-8. Düz Plakalı Stirling motoru çalışmasının 3⇒4 fazı

Şekil 7-9'da 4⇒1 işleminde yerdeğiştirici en büyük (sıcak) gaz hacminde soğuktan sıcak kısma doğru hareket eder. Hava rejeneratör görevi yapan delikli yerdeğiştiricinin içersinden geçerken bu sırada ısısını rejeneratöre bırakır ve soğuk bölgeye geçer.



Şekil 7-9. Düz Plakalı Stirling motoru çalışmasının 4⇒1 fazı

### 7.2.2Düz Plakalı Stirling motoru sistemi

Kolin'in geliştirdiği Düz Plakalı Stirling motoru sisteminin güneş enerjisinden yararlanılarak çalıştırılmasıyla elde edilecek mekanik enerjinin, elektrik elde edilmesi ve su pompalarının çalıştırılmasında kullanılması mümkündür. Sistemin sıcak su veya kuru yakıt gibi ısı kaynakları ile çalıştırılması farklı enerji kaynakları kullanarak ta çalıştırılabileceğini göstermektedir. Örneğin atık ıslardan yararlanılarak Stirling motorunun çalıştırılması mümkün olacaktır. Süreksiz hareket yapan böyle bir sistemle çok düşük sıcaklık farklarında güç eldesi söz konusu olduğundan kullanım yerleri oldukça artmaktadır. Stirling motorunda çalışma akışkanı olarak hava yerine düşük sıcaklık farklarında genleşmesi oldukça fazla olan heyum veya hidrojen kullanılması verimin yüksek olmasını sağlamaktadır. Fakat sızdırmazlık problemleri sistemin hem maliyetini hem de imalat süresini uzatmaktadır. Bu motor tipi yalnız hava ile çalışacak şekilde dizayn edilmiştir.



## 8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Geniş kapsamlı uygulama alanlarına sahip olan Stirling motorları bir çok alternatif enerji kaynağı kullanılarak çalıştırılabilme özelliklerinin yanı sıra çevreci olmaları nedeniyle geleceğin motorları olarak görülmektedir. Günümüzde yapılan bir çok araştırma ve dizayn çalışmalarının doğrultusu, Stirling motorlarının her türlü alana adaptasyonunu sağlayacak yöndedir.

Enerji üretimi ve tasarrufu diğer ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de günümüzün önemli sorunlarından biridir. Petrol türevlerinin belli bir ömrünün kaldığı düşünülürse, araştırmacıların petrol ürünleriyle çalışan araçlar yerine, her türlü enerji kaynağı ile çalışan araçlar için deneysel çalışmalara girdikleri görülmektedir. Stirling motoru da böyle bir motorun özelliklerini taşıdığı için ciddi olarak ele alınması gereken bir konudur.

Yedinci bölümde yer alan Prof.I.Kolin'in yaptığı ve güneş enerjisi dışında sıcak su ve kuru yakıt gibi enerji kaynakları ile de çalışabilecek böyle bir sistemin ileride çok geniş uygulama alanları bulabileceği düşünülmelidir.

Stirling motorlarının çalışma prensibi sürekli yanma, daima sinüsoidal olan bir basınç eğrisiyle çalışan kapalı bir çevrim ve sübapların olmayışı, sesi, titreşimi ve çalışma sırasında motorun iç kayıplarını azaltmaktadır. Bunun yanında yakıt tüketimi düşük ve yağlayıcımadde tüketmediğinden geleceğin motorunun gerektirdiği bütün karakteristik özelliklere sahip olmaktadır. Temiz enerji kaynakları olarak bilinen güneş enerjisi ve rüzgar enerjisinden elektrik üretimi, gerek çevresel değerlerin gittikçe önem kazanması gerekse fosil yakıtlarının bir gün biteceği gerçeği karşısında günümüzde çok önem kazanmıştır. Burada esas tartışılması gereken kendi ülkemiz için hangi kaynağın daha ekonomik ve verimli olacaktır.

Bu kararın sağlıklı olarak verilebilmesi için bölüm 4,5,6 'da tartışılan bu sistemlerin birbirleriyle karşılaştırmalarının yapılması gerekmektedir.

Tablo 8.1 Elektrik Üretim Sistemlerinin Karşılaştırması

SİSTEM	İLK YATIRIM MALİYETİ	İŞLETME MALİYETİ
Rüzgar Enerjisi	4000 \$/KW	7 cents /KWh
Fotovoltaik tekn.	7000 \$/KWe	2 - 30 CENTS/KWh
Stirling/Güneş Mak.	3000 \$/KWe	5.5 cents/KWh

Tablo 8.1 'de görüldüğü gibi Stirling / Güneş makinasının diğer sistemlere göre açık bir üstünlüğü vardır. Özellikle birbirlerine ilk yatırım ve işletme maliyeti açısından yakın olan Rüzgar enerjisi ve Stirling /Güneş makinası kıyaslandığı zaman aralarında pek fazla fark olmadığı görülmektedir .Burada sistem seçiminde esas olan kullandıkları doğal kaynakların bulunabilirliğidir.

Stirling/Güneş makinasının çalışabilmesi için gerekli olan  $1000 \text{ W/m}^2$  sınırı giriş bölümünde gösterildiği gibi hemen hemen her bölgemizde rahatlıkla geçilmiştir.Fakat Bölüm5 'te ortalama değerleri verilen Türkiye rüzgar potansiyeli çok sınırlı sayıdaki bölgemizde  $5 \text{ m/s}$  sınırını geçmektedir.Ülkemiz açısından bakılacak olursa bu sistemin en iyi kullanılabileceği alan ziraat endüstrisidir.Bu gün tarla sulamada kullanılan pompalar için metrelerce kablo çekilmektedir.Kilit noktalarda oluşturulacak sistemler bu sorunu büyük ölçüde yok edecektir.

Verilen bu değerler doğal kaynak potansiyeli açısından da Stirling/Güneş makinasını avantajlı duruma getirmektedir. Bütün bu veriler ışığında şunu söyleyebiliriz ki yakın gelecekte stirling teknolojisiyle elektrik üretimi insanoğlunun temiz enerji adına başvuracağı en önemli sistemlerden biri olacaktır.

**KAYNAKLAR**

Akgün, N ve Öz, Ş., (1993)Türkiye Rüzgar Analizi ve Rüzgar Atlası Çıkarılması,1. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu

Backus, C.E.,(1976) Solar Cells ,Iiee Press ,New York.

Çengel, Y.A ve Boles ,M.A.,(1996), Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik ,Papirus Basım,İstanbul.

Şen, Zekai., (1993) Rüzgar Enerjisi Risk Ve Güvenilirlik Analizi , 1. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu

Walker,J.F. ve Jenkins,N.,(1997)Wind Energy Tehnology,John Wiley & Sons ,England

Walker,G.,(1973) Stirling-cycle machines ,Clarendon Press ,Oxford

www.SAIC.com

<http://solstice.crest.org/renewables/sj/wind/423.html>.

<http://solstice.crest.org/renewables/sj/pv/319.html>.

<http://www.pvpower.com/pvfaq.html>.

<http://www.greentie.org/class/ixb0903.html>.

**ÖZGEÇMİŞ**

<b>Doğum tarihi</b>	01.03.1974	
<b>Doğum yeri</b>	İstanbul	
<b>Lise</b>	1985 - 1992	Özel Fazilet Erkek Lisesi
<b>Lisans</b>	1992 - 1996	Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fak. Makine Mühendisliği Bölümü
<b>Çalıştığı Kurumlar</b>		
	1996 - 1997	Akdağ Makine A.Ş.
	1998-Devam ediyor	Sönmez Metal A.Ş

