

**DEĞİŞKEN FAZ AÇILI ALFA TİPİ BİR STIRLING  
MOTORUNUN İMALATI VE TESTLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali BİNBİR

DANIŞMAN

Doç. Dr. Fatih AKSOY

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2017

Bu tez çalışması 14.FEN.BİL.38 numaralı proje ile AKUBAP tarafından desteklenmiştir.

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DEĞİŞKEN FAZ AÇILI ALFA TİPİ BİR STIRLING MOTORUNUN**  
**İMALATI VE TESTLERİ**

**Ali BİNBİR**

**DANIŞMAN**

**Doç. Dr. Fatih AKSOY**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Temmuz 2017**

## TEZ ONAY SAYFASI

Ali BİNBİR tarafından hazırlanan “Değişken Faz Açılı Alfa Tipi Bir Stirling Motorunun İmalatı ve Testleri” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 12/07/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünün **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Doç. Dr. Fatih AKSOY  
Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi

İmza

**Başkan** :Doç. Dr. Hamit SOLMAZ  
Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi

İmza

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. Şükrü Ayhan BAYDIR  
Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi

İmza

Afyon Kocatepe Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun  
...../...../..... tarih ve  
.....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....  
Prof. Dr. İbrahim Erol  
Enstitü Müdürü

## BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

12/07/2017



Ali BINBİR

**ÖZET**  
Yüksek Lisans Tezi

DEĞİŞKEN FAZ AÇILI ALFA TİPİ BİR STIRLING MOTORUNUN İMALATI VE  
TESTLERİ

Ali BİNBİR

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Doç. Dr. Fatih AKSOY

Bu çalışmada, değişken faz açılı bir alfa tipi bir Stirling motorunun tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Kinematik ilişkiler soğuk ve sıcak silindir hacimlerin hesaplanmasında kullanılmıştır. İzotermal analiz metodu kullanılarak 70°, 80°, ve 90° faz açıları için basınç, hacim değişimleri ile çevrimlik net iş hesaplanmıştır. 70°, 80°, ve 90° faz açılarında 1 bar şarj basıncı, 1000 K sıcak uç ve 300 K soğuk uç sıcaklıkları için çevrimlik işler sırası ile 10,247, 10,250 ve 10,199 J olarak elde edilmiştir. Alfa tipi Stirling motoru faz açısı 70°-100° arasında değiştirilebilecek şekilde imal edilmiştir.

**2017, x + 31 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Stirling, Faz, Termodinamik, İzotermal

**ABSTRACT**  
M.Sc. Thesis

MANUFACTURING AND TESTS OF STIRLING ENGINE WITH VARIABLE  
PHASE ANALOGUE TYPE

Ali BİNBİR

Afyon Kocatepe University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering  
**Supervisor:** Assoc. Prof. Fatih AKSOY

In this study, an alpha type Stirling engine with variable phase angle was designed and manufactured. Kinematic relations were used in order to calculate hot and cold volumes. By using isothermal analysis method, cyclic net work and changes of pressure and volume were calculated for phase angle of 70°, 80° and 90°. The cyclic net works were 10.247 J, 10.250 J and 10.199 J for phase angle of 70°, 80° and 90° at 1 bar pressure, hot end temperature of 1000 K and cold end temperature of 300 K, respectively. The engine was manufactured so that phase angle could be changed between 70°-100°.

**2017, x + 31 pages**

**Keywords:** Stirling, Phase, Thermodynamics, Isothermal

## TEŐEKKÖR

Bu araştırma sırasında sağladığı manevi desteklerden dolayı sayın Prof. Dr. Osman ISIKAN'a ve her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Bu çalışma 14.FEN.BİL.38 numaralı "Değişken Faz Açılı Alfa Tipi Bir Stirling Motorunun İmalatı ve Testleri" isimli proje ile AKUBAP tarafından desteklenmiştir. Katkılarından dolayı AKUBAP'a teşekkür ederim.

Ali BİNBİR

AFYONKARAHİSAR, 2017

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
RESİMLER DİZİNİ .....	x
1. GİRİŞ .....	1
2. STIRLING MOTORLARI.....	2
2.1 Stirling Motoru Tipleri.....	2
2.1.1 Tek Etkili Stirling Motorları.....	2
2.1.1.1 Alfa Tipi Stirling Motorları .....	3
2.1.1.2 Beta Tipi Stirling Motorları .....	4
2.1.1.3 Gama Tipi Stirling Motorları .....	5
2.2 Stirling Motorlarının Avantaj ve Dezavantajları .....	6
2.2.1 Stirling Motorlarının Avantajları.....	6
2.2.2 Stirling Motorlarının Dezavantajları .....	7
3. TERMODİNAMİK ANALİZ .....	9
3.1 İzotermal Analiz .....	9
3.2 Motorun Termodinamik Analizi .....	11
3.2.1 Motorun Kinematik İlişkileri.....	12
3.2.2 Motorun İzotermal Analizi .....	13
4. STIRLING MOTORU ve TEST DÜZENEGİ.....	16
4.1 Stirling Motoru .....	16
4.1.1 Motor Bloğu .....	16
4.1.2 Motor Yan Kapakları.....	17
4.1.3 Biyel Kolları .....	18
4.1.4 Krank Mili .....	18
4.1.5 Sıcak Piston .....	19
4.1.6 Soğuk Piston .....	20
4.1.7 Sıcak Silindir .....	20



4.1.8 Soğuk Silindir .....	21
4.1.9 Volan .....	22
4.1.10 Bağlantı Boruları .....	22
4.2 Test Düzenegi .....	23
4.2.1 Prony Tip Dinamometre .....	23
4.2.2 Encoder .....	24
4.2.3 Yük Hücresi .....	24
4.2.4 Sıcaklık Alıcıları .....	25
4.2.5 İnfrared Termometre .....	25
4.2.6 Dijital Basınç Göstergesi .....	26
5. SONUÇ .....	27
6. KAYNAKLAR .....	29
ÖZGEÇMİŞ .....	31

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

---

$^{\circ}\text{C}$	Sıcaklık birimi
$\pi$	Pi sayısı
$\Delta Q$	Toplam ısı
$\theta$	Krank açısı
$m_c$	Sıkıştırma bölgesi kütlesi
$m_e$	Genişleme bölgesindeki akışkanın kütlesi
$m_h$	Isıtıcı bölgesindeki akışkanın kütlesi
$m_k$	Soğutucu bölgesindeki akışkanın kütlesi
$m_r$	Rejeneratör bölgesindeki akışkanın kütlesi
$T_c$	Sıkıştırma bölgesi sıcaklığı
$T_h$	Sıcak kaynak sıcaklığı
$T_k$	Soğutucu bölgedeki sıcaklık
$T_r$	Rejeneratör sıcaklığı
$V_c$	Sıcak hacim
$V_h$	Soğuk hacim
$V_e$	Genişleme bölgesi hacmi
$V_h$	Isıtıcı bölgesindeki hacim
$V_k$	Soğutucu bölgedeki hacim
$V_r$	Rejeneratör bölgesindeki sıcaklık
$W$	Net iş
$W_e$	Genişleme bölgesindeki net iş
$\gamma$	Gama
$\alpha$	Alfa
$\beta$	Beta
$\beta_{cp}$	Soğuk piston da biyel kollarının düşey eksen ile yaptığı açı
$\beta_{hp}$	Sıcak piston da biyel kollarının düşey eksen ile yaptığı açı
$\eta$	Çevrimin verimi
$h_h$	Pistonun üst ölü nokta ile alt ölü nokta arasındaki mesafe
$h_{pt}$	Piston yarıçapı
$l_b$	Biyel kolu uzunluğu
$r_c$	Krank yarıçapı
$s_c$	Soğuk piston üst ölü noktası ile silindir arasındaki mesafe
$s_h$	Sıcak piston üst ölü noktası ile silindir arasındaki mesafe
$U_c$	Krank merkezi ile pistonların üst noktaları arasındaki mesafe
$U_h$	Krank merkez ile pistonların üst noktaları arasındaki mesafe
(c)	Sıkıştırma bölgesi
(e)	Genişleme bölgesi
(h)	Isıtıcı
(k)	Soğutucu
r	Rejeneratör
C	Hız
NO	Azot oksit
P	Basınç

---

**Simgeler(Devam)**

---

T	Sıcaklık
U	İç enerji
R	Gaz sabiti
V	Hacim

---

**Kısaltmalar**

---

cm <sup>3</sup>	Santimetre küp
mm	Milimetre
vb	ve benzeri

---

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Şekil 2.1</b> Beta, gama ve alfa tipi tek etkili Stirling motorları.....	3
<b>Şekil 2.2</b> Alfa tipi Stirling motorları. ....	4
<b>Şekil 2.3</b> Beta tipi Stirling motorları. ....	5
<b>Şekil 2.4</b> Gama tipi Stirling motorları. ....	6
<b>Şekil 3.1</b> Beş bölgeli model üzerinden Stirling motorunun izotermal analizi.....	9
<b>Şekil 3.2</b> Motor şematik görünümü.....	12
<b>Şekil 3.3</b> Farklı faz açıları için motorun P-V diyagramları.....	15
<b>Şekil 4.1</b> Alfa tipi Stirling motoru.....	16

## ÇİZELGELER DİZİNİ

**Sayfa**

<b>Çizelge 3.1</b> Motora ait değerler .....	14
--	----

## RESİMLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Resim 4.1</b> Motor bloğu. ....	17
<b>Resim 4.2</b> Motor bloğu yan kapakları. ....	17
<b>Resim 4.3</b> Biyel kolları. ....	18
<b>Resim 4.4</b> Krank mili. ....	19
<b>Resim 4.5</b> Sıcak piston. ....	19
<b>Resim 4.6</b> Soğuk piston. ....	20
<b>Resim 4.7</b> Sıcak silindir. ....	21
<b>Resim 4.8</b> Soğuk silindir. ....	21
<b>Resim 4.9</b> Volan. ....	22
<b>Resim 4.10</b> Güç pistonu. ....	22
<b>Resim 4.11</b> Prony tip dinamometre. ....	23
<b>Resim 4.12</b> Encoder. ....	24
<b>Resim 4.13</b> Yük hücresi. ....	24
<b>Resim 4.14</b> Sıcaklık algılayıcıları (Termocouple). ....	25
<b>Resim 4.15</b> İnfrared termometre. ....	25
<b>Resim 4.16</b> Dijital basınç göstergesi. ....	26

## 1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmelere bağlı olarak enerji ihtiyacı artmaktadır. Enerji ihtiyacının büyük bir bölümü fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Ancak fosil kökenli yakıtların rezervlerinin azalması nedeni ile 21. yüzyılın son çeyreğinde enerji darboğazına girilebileceği öngörülmektedir (Kurşuncu 2010).

Günümüzde fosil enerji kaynaklarının kullanımı ile küresel ısınma, atmosfer olayları, iklim bozuklukları, çevre ve hava kirliliği gibi problemler ortaya çıkmıştır (Arık 2016). Fosil enerji kaynaklarından kaynaklanan çevresel sorunları azaltmak için hidrolik, rüzgâr, güneş, biokütle, jeotermal, hidrojen vb. yenilenebilir ve alternatif enerji kaynakları üzerine çalışmalar hız kazanmıştır (Ayran 2015).

Yenilenebilir enerji kaynakların enerji üretiminde kullanımı ile çevre dengesi sağlanacaktır. Ayrıca bu kaynaklardan elde edilecek elektrik enerjisinin kullanımı hem ülkenin ekonomik büyümesine katkı sağlayacak hem de yaşadığımız çevreyi daha temiz bir hale getirecektir (Uçak 2010).

Alternatif enerji kaynaklarının yanında mevcut yanma teknolojilerinin geliştirilmesi ve alternatif motorlar ile daha verimli enerji dönüşüm sistemlerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. En önemli alternatif motorlardan biriside 1816 yılında İskoç rahip Robert Stirling tarafından icat edilen Stirling motorlarıdır (Akyel 2015). Dıştan ısı verme prensibine göre çalışan Stirling motorlarında farklı enerji kullanılabilir. Stirling motorları elektrik üretiminde, uzay teknolojilerinde, sulama alanlarında kullanılmaktadır. Ayrıca dışarıdan hareket alarak ısı pompası ya da soğutma makinesi olarak da kullanılabilir (Erol 2009).

Bu çalışmada, değişken faz açılı alfa tipi bir Stirling motorunun tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. İzotermal analiz metodu kullanılarak basınç ve hacim değişimleri ile çevrimlik işler 70°, 80°, ve 90° faz açıları için hesaplanmıştır. Motor 70-100° aralığında farklı faz açıları test edilebilecek şekilde tasarlanmış ve imal edilmiştir.

## **2. STIRLING MOTORLARI**

### **2.1 Stirling Motoru Tipleri**

Stirling motorlarının sınıflandırılmasında, çalışma akışkanının kontrol ediliş yöntemi önemli bir etkidir. Buna bağlı olarak valf ve hacim değişimi olmak üzere iki şekilde akış kontrolü sağlanmaktadır (Çınar 2001).

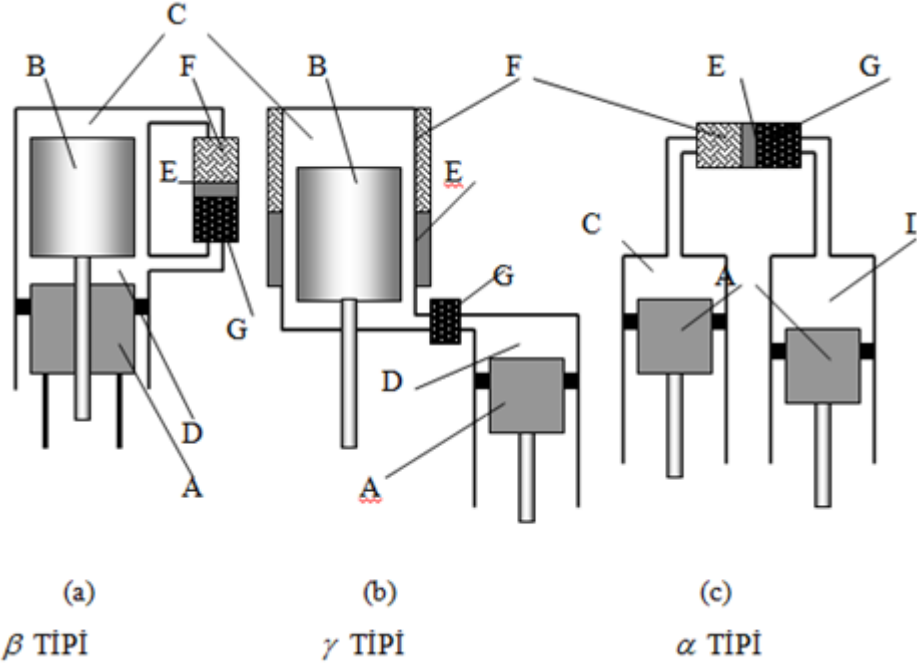
Stirling motorlarını tek etkili ve çift etkili motorlar olmak üzere iki temel gruba ayrılmaktadır (Çınar 2001).

#### **2.1.1 Tek Etkili Stirling Motorları**

Tarihte ilk Stirling motorunu 1815 yılında Robert Stirling kullanmıştır. Bu motorlarda çalışma akışkanı pistonun tek yüzeyine temas etmektedir. Çalışma akışkanı hem tek silindir içerisinde hem de aynı krank miline bağlı iki silindir içerisinde hareket ettirilebilmektedir. Ayrıca tek veya çok silindirli bu tip motorlarda güç-güç pistonu veya güç-yer değiştirme pistonu çiftleride kullanılabilir (Arslan 2016).

Tek etkili Stirling motorları, alfa tipi, beta tipi ve gama tipi motorlar olmak üzere üç gruptan oluşmaktadır (Arslan 2016).





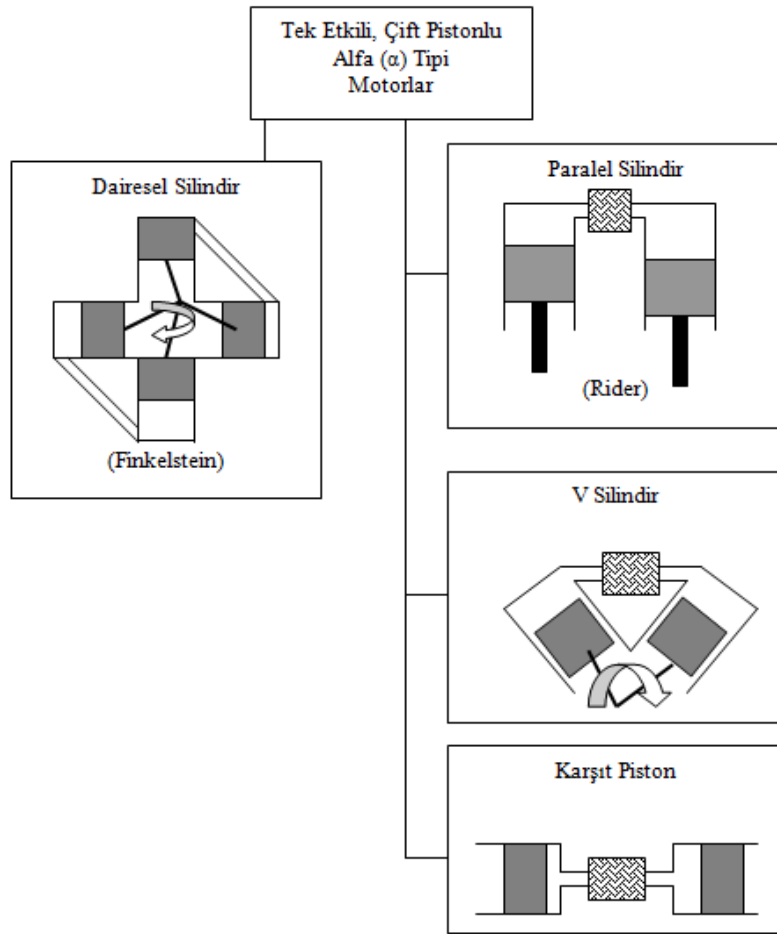
**şekil 2.1** Beta, gama ve alfa tipi tek etkili Stirling motorları (Walker 1980).  
A-Güç pistonu, B-Yer değiştirme pistonu (displacer), C-Genişleme bölgesi,  
D-Sıkıştırma bölgesi, E-Isı değiştiricisi (rejeneratör), F-Isıtıcı, G-Soğutucu

### 2.1.1.1 Alfa Tipi Stirling Motorları

şekil 2.4c'de görüldüğü gibi alfa tipi motorlarda birbirinden ayrılmış iki adet silindir soğutucu, ısıtıcı ve bunları birbirine bağlayan bir rejeneratör bulunmaktadır. Genellikle sıcak silindir genişleme hacmi olarak, soğuk silindir ise sıkıştırma hacmi olarak isimlendirilir. Bu kapalı hacimde sıkıştırma ve genişleme işinin oluşabilmesi için iki silindir arasında belirli bir faz açısına ihtiyaç vardır. Bu açı genellikle 90°'dir. Bu yüzden bu motorlar V tipi motorlar olarak da adlandırılır (Üştün 2000).

Küçük güçlü olan motorlarda, soğutma ve ısıtma işlemleri için bir ısı değiştiricisine gerek kalmadan silindir duvarları ile yapılabilir. Silindirler 75-100 derece arasında yerleştirilebildiği gibi krank kol muylularını da ayrı ayrı ve açılı bir şekilde birleştirerek de genişleme ve sıkıştırma işlemleri geręekleřtirilebilir. Krank milini iki uçtan yataklamak zorunluluğu yoktur. Soğuk ve sıcak silindirler birbirlerinden tamamen ayrı olmasından silindirler birbirlerinden tamamen ayrı olmasından silindirlerin arasında ısı etkileşim olmamaktadır. Bunun sonucu olarak ısı verme işlemi daha verimli halde yapılmaktadır (Özgören 2004).

Krank mekanizmasının karmaşık bir yapıda olması dairesel tipte olan Stirling motorunun karşılaştığı en büyük sorundur. Silindirlerin paralel olduğu Rieder tipi motorlar yaygın bir kullanımı olmadığı için sınırlı sayıda üretilmişlerdir. Alfa tipi motorların hareket mekanizmasındaki karmaşıklar, dengesizlik ve yağlama sorunları en sık karşılaşılan problemler arasındadır (Walker 1980). Farklı çeşitleri olan alfa tipi motorlar Şekil 2.2’de gösterilmiştir.

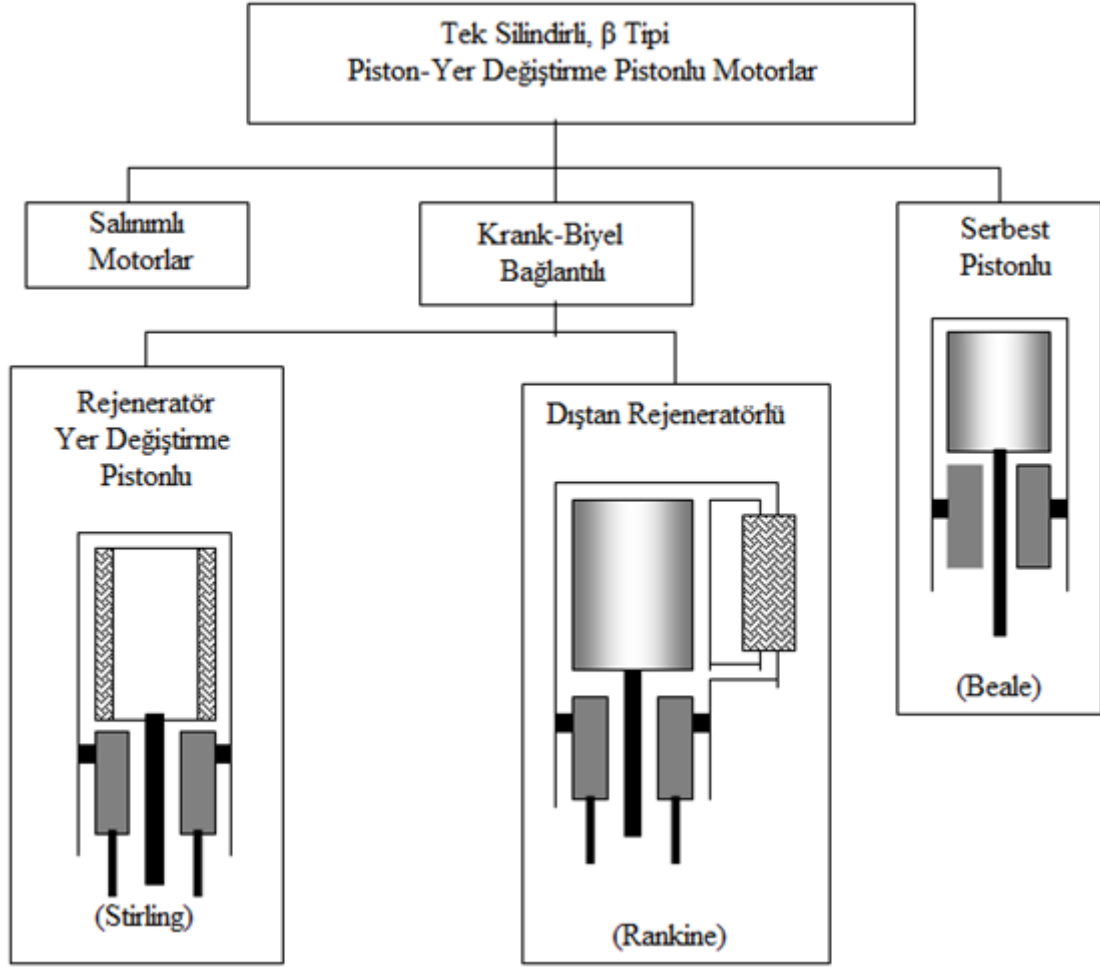


Şekil 2.2 Alfa tipi Stirling motorları (Walker 1980).

### 2.1.1.2 Beta Tipi Stirling Motorları

Bu tip Stirling motorları tek silindirli ve tek etkili bir yapıya sahiptir. Bu tip motorlar Şekil 2.3’de görülmektedir. Beta tipi tek etkili ve tek silindir içerisinde çevrim oluşumunu sağlayan elemanlar güç ve yer değiştirme pistonudur. Krank biyel mekanizması sayesinde güç iletimi sağlanmaktadır. Bu tip motorlar rejeneratörün

bulunduğu yere göre ikiye ayrılmaktadır. Bunlar rejeneratör yer değiştirme pistonlu beta tipi motorlar ve rejeneratör dıştan yer değiştirme pistonlu beta tipi motorlardır. Rejeneratör yer değiştirme pistonlu beta tipi motorlarda rejeneratör bölgesi yer değiştirme pistonu ile silindirinin arası iken; rejeneratör dıştan yer değiştirme pistonlu beta tipi motorlarda ölü hacmi artıran ayrı bir rejeneratör bulunmaktadır (Uğurlu 2014).

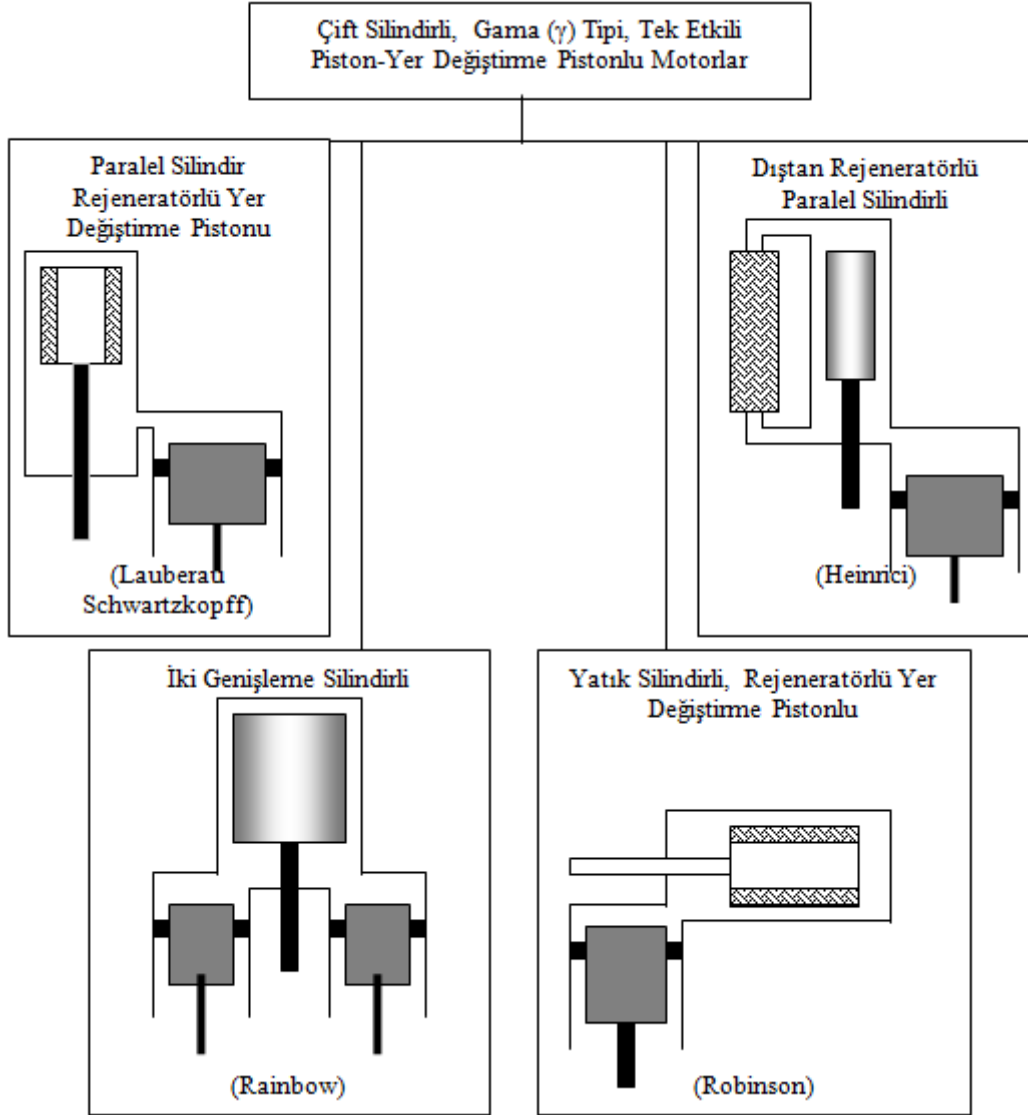


Şekil 2.3 Beta tipi Stirling motorları (Walker 1980).

### 2.1.1.3 Gama Tipi Stirling Motorları

Farklı tipleri bulunan gama tipi Stirling motorlarında çevrim, çalışma akışkanını genişleme ve sıkıştırma hacimleri arasında hareket ettiren yer değiştirme pistonu ve çalışma akışkanını sıkıştırıp genişleten farklı bir silindirdeki güç pistonu ile gerçekleştirilmektedir. Lauberau-schwartzkopff tipi olan gama tipi Stirling motorunda

rejeneratör, yer değiştirme pistonu üzerinde bulunmaktadır. Heinrichi tipinde ise soğuk ve sıcak hacimlerin dışında ekstra bir rejeneratör kullanılarak birbirine bağlanmıştır. Bu tip motorlarda yer değiştirme ve güç silindirleri birbirine paralel bağlıdır. Rainbow tipi olanlarda ise güç pistonu iki adet olup bir adet güç pistonu vardır (Walker 1980).



Şekil 2.4 Gama tipi Stirling motorları (Walker 1980).

## 2.2 Stirling Motorlarının Avantaj ve Dezavantajları

### 2.2.1 Stirling Motorlarının Avantajları

- Motoru çalıştırmadan önce içeriye ısı enerjisi verildiğinde ilk harekete geçmeleri

çok basittir.

- Güneş enerjisinden fosil yakıtlara, biyodizel yakıtlardan, nükleer enerji kaynaklarına kadar çok çeşitli enerji kaynakları ile çalışabilirler.
- İçten yanmalı çalışan motorlara oranla termik verimleri daha yüksektir.
- Isı enerjisinin dıştan verilebilmesi sayesinde gerçekleşen yanmadan dolayı motor parçaları kirlenmez. Bu özelliğinde dolayı içten yanmalı motorlardaki gibi yanmadan dolayı meydana gelen ani basınç yükselmeleri olmaz ve böylece hareketli motor parçalarında hasar ve zarar görülmediği gibi parçaların aşınması da azdır.
- Yardımcı sistemlerin az olması, içten yanmalı motora göre imalatını kolaylaştırmış ve daha ekonomik hale getirmiştir.
- Sisteme sürekli ısı sürülmesi, emme ve egzoz supaplarının gürültü ve titreşimi çok azdır.
- Yardımcı parça olarak enjeksiyon sistemi, ateşleme sistemi ve supapların bulunmaması motorun bakım ihtiyacını azalmaktadır.
- Sisteme sürekli ısı sürülmesi, emme ve egzoz supaplarının kullanılmaması ve basınç değişimleri sinüzoidal olması, gürültü ve titreşimi çok azaltmaktadır.
- İçten yanmalı motorlardaki gibi yağlama yağının soğutucu bir etkisi olmadığından ısı kaybı olmaz.
- Yanma işleminin dışardan ve kontrollü yapılmış olması ile NO, CO ve yanmamış hidrokarbon miktarları içten yanmalı motorlara göre daha azdır.
- Stirling motorları çok değişik mekanik düzenleme yapılarak, farklı ebatlarda ve farklı güçlerde üretilebilir (Yücesu 1996, Benvenuto 1992).

### 2.2.2 Stirling Motorlarının Dezavantajları

- Aynı güçteki içten yanmalı bir motora göre kıyaslandığında kütle ve boyutları daha fazladır.
- Silindir, piston gibi hareketli motor parçalarında sızdırmazlık sorunu vardır.
- Isıtıcı ve soğutucudaki termik ataletlerden dolayı yavaşlama ve hızlanma ivmeleri çok düşüktür.
- Çoğu bölümünde tasarım zorlukları vardır. Tasarımında deneysel bilgilere gerek

vardır.

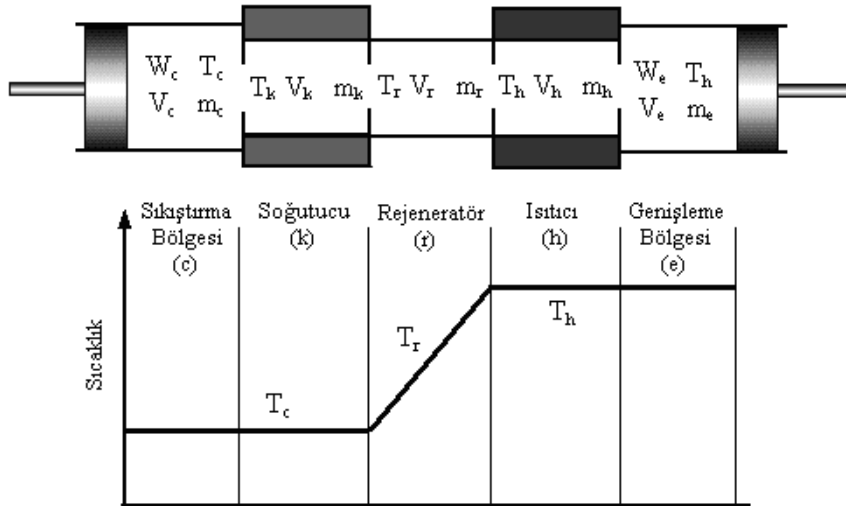
- Araştırma ve geliştirme çalışmaları devam ettiğinden seri üretimi yapılamamaktadır. İmalatı yapılan modeller ise çok maliyetlidir (etinkaya 1999, Yücesu 1996).

### 3. TERMODİNAMİK ANALİZ

#### 3.1 İzotermal Analiz

İzotermal analiz Gustav Schmidt tarafından geliştirilmiştir. Bu analiz metodunda sistemdeki tüm ısı kayıpları ihmal edilmiş, sıkıştırma ve genişleme işlemlerinin sabit sıcaklıkta olduğu kabul edilmiştir.

1978 yılında Martini tarafından beş hacimli ikinci mertbe analiz modeli geliştirilmiştir. Şekil 3.1’de beş bölgeyi ikinci mertbe model görülmektedir.



Şekil 3.1 Beş bölgeyi model üzerinden Stirling motorunun izotermal analizi.

Martini tarafından yapılan izotermal analizde aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

1. Sıkıştırma ve genişleme bölgesinde hacim değişimi esnasında çalışma maddesinin sıcaklığı üniformdur.
2. Akışkanın rejeneratörden geçişi esnasında oluşan viskoz kayıplar göz ardı edilir ve rejeneratörün sıcaklığı zamanla değişmez. Sıkıştırma bölgesinde  $T_c$  ve genişleme bölgesinde  $T_h$  sıcaklıkları mevcut olup rejeneratördeki sıcaklık değişimi lineer kabul edilir.
3. Akış sürtünmesizdir, geçiş sırasında akışkanın serbest ivmelenmesine yol açan basınç değişimi yoktur.

4. Akışkan kütlesi çevrim boyunca sabittir, kaçaklar yoktur.
5. Sıkıştırma ve genişleme hacimleri krank açısının fonksiyonu olarak tarif edilir.
6. Çalışma maddesi ideal gaz kabul edilmiştir (Çınar 2001).

İzotermal analizde basınç,

$$P = \frac{m_t R}{\frac{V_1}{T_1} + \frac{V_2}{T_2} + \frac{V_3}{T_3} + \dots + \frac{V_n}{T_n}} \quad (3.1)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanır. Çalışma maddesinin iç enerjisi,

$$U = C_v (P_1 V_1 + P_2 V_2 + \dots + P_n V_n) / R \quad (3.2)$$

ile hesaplanır.

İzotermal çevrim analizinde, krank açısı cinsinden  $2\pi$  olan çevrim süresi sonlu sayıda parçalara ayrılır. Krank milinin belirli bir pozisyonundan başlanılarak hacim, basınç ve iç enerji çevrim boyunca çevrimin her bir kademesi için hesaplanır. Elde edilen hacim, basınç ve iç enerji verileri kullanılarak motorun çevrimlik net işi, sıcak kaynak ve rejeneratörden aldığı toplam ısı ve soğuk kaynak ve rejeneratöre verdiği toplam ısı hesaplanabilir.

Net işi hesaplamak için,

$$W = \sum_{i=1}^{i=k} P_i (V_i - V_{i-1}) \quad (3.3)$$

eşitliği kullanılabilir. Sıcak kaynaktan alınan ve soğuk kaynağa verilen ısıları hesaplamak için Termodinamiğin Birinci Kanunu,

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W = (U_i - U_{i-1}) + P_i (V_i - V_{i-1}) \quad (3.4)$$



kullanılır. Bu eşitlik ile çevrimin kademelerindeki iç enerji değişimleri hesaplandığında  $\Delta Q$ 'nun bazı kademelerde pozitif, bazı kademelerde de negatif değerler aldığı görülür. Pozitif olanlar ısının sıcak kaynaktan çalışma maddesine, negatif olanlar ısının çalışma maddesinden soğuk kaynağa aktığı gösterir. Pozitif işareti olan  $\Delta Q$ 'lar kendi aralarında toplanarak çevrim boyunca çalışma maddesine verilen ısı hesaplanır. Yine negatif işaretli  $\Delta Q$ 'lar kendi aralarında toplanarak çevrim boyunca çalışma maddesinin attığı ısı hesaplanır. Çevrimin verimi,

$$\eta = \frac{W}{Q_h} \quad (3.5)$$

Eşitliği yardımı ile bulunur. Denklem sisteminin çözümü için, motorda kullanılan dönüştürme mekanizmasının tipine bağlı olarak,  $V_c$  ve  $V_e$  hacim değişimleri ve

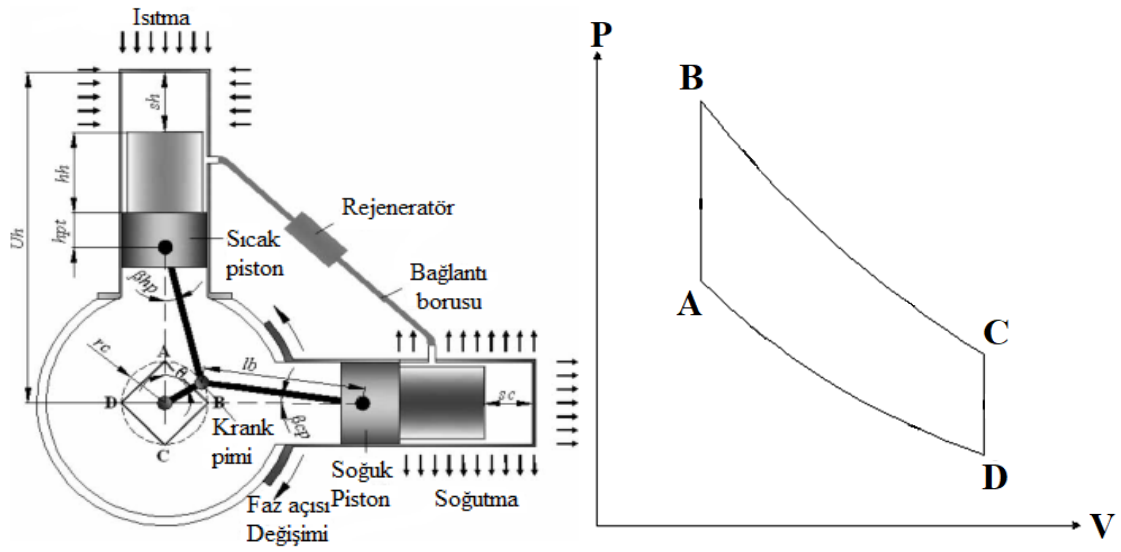
$$\frac{dV_c}{d\theta} \quad (3.6)$$

$$\frac{dV_e}{d\theta} \quad (3.7)$$

hacim türevlerinin bilinmesi gerekmektedir (Çınar 2001).

### 3.2 Motorun Termodinamik Analizi

Motorun şematik görüntüsü Şekil 3.2'de verilmiştir. Motor ayrı silindirlerde çalışan ve sıcak ve soğuk piston olarak isimlendirilen iki piston, bir krank mili, biyel kolları, volan ve bir rejeneratör olarak görev alan ısı değiştiricisinden oluşmaktadır. Sıcak ve soğuk pistonlar arasındaki faz açısı değişken olarak tasarlanmıştır. Piston merkezleri ve silindirler arasındaki akış boyunca sabit hacimde ısıtma ve soğutma işlemleri yapılır. Çizelge 3.1'de motorun teknik özellikleri gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Motorun şematik görünümü (Çınar 2001).

Şekil 3.2’de gösterildiği üzere krank pimi A noktasındayken, sıcak piston üst ölü noktada ve soğuk piston kendi strokunun ortalarında. Bu pozisyonda krank mili açısı  $\theta$  sıfır kabul edilir. Krank pimi A noktasından B noktasına hareket ederken, sıcak piston aşağı doğru, soğuk piston aşağıdan yukarı doğru hareket eder. Bu işlem sırasında çalışma akışkanı soğutucu, rejeneratör ve ısıtıcı boyunca soğuk hacimden sıcak hacme doğru yer değiştirir, böylece sabit hacimde ısıtma işlemi gerçekleşir. Krank pimi B noktasından C noktasına hareket ettiğinde sıcak ve soğuk pistonlar aşağı doğru hareket eder ve izotermal genişleme süreci gerçekleşir. Krank milinin C noktasından D noktasına hareketi ile soğuk piston aşağı doğru hareket etmeye devam eder, sıcak piston ise aşağıdan yukarı doğru hareket eder ve böylece sabit hacimde soğutma işlemi gerçekleşir. Krank pimi D noktasından A noktasına hareket ederken, sıcak ve soğuk pistonların her ikisi de aşağıdan yukarı doğru hareket eder. Bu sürecin sonunda sıcak piston, izotermal soğutma sürecini gerçekleştirerek kendi strokunun üst ölü noktasına ulaşır (Çınar 2001).

### 3.2.1 Motorun Kinematik İlişkileri

Şekil 3.2’de verilen şematik görünümünden yararlanarak kinematik ilişkiler elde edilmiştir. Kinematik ilişkilerin tanımlanmasında krank merkezi referans alınmıştır. Buna göre biyel kollarının düşey eksen ile yaptığı açının belirlenebilmesi için,

$$\beta_{hp} = \arcsin \left( \frac{r_c}{l_b} \sin \theta \right) \quad (3.8)$$

$$\beta_{cp} = \arcsin \left( \frac{r_c}{l_b} \sin(PA - \theta) \right) \quad (3.9)$$

eşitlikleri kullanılabilir. Burada  $\theta$  krank açısını,  $l_b$  biyel kolu uzunluğunu ve  $r_c$  krank yarıçapını ifade etmektedir. Krank merkezi referans noktası olarak kabul edilerek, iki pistonun konumları,

$$s_c = u_{c-} (r_c \sin \theta + l_b \cos \beta_{cp} + h_{pt} + h_c) \quad (3.10)$$

$$s_h = u_{h-} (r_c \cos \theta + l_b \cos \beta_{hp} + h_{pt} + h_h) \quad (3.11)$$

tanımlanabilir. Burada  $u_c$  ve  $u_h$  krank merkezi ile pistonların üst noktaları arasındaki mesafe olarak ifade edilmektedir. Bu mesafeler kullanılarak motorun sıcak ve soğuk hacimleri sırası ile,

$$V_c = A_c s_c \quad (3.12)$$

$$V_h = A_h s_h \quad (3.13)$$

hesaplanabilir. Burada  $u_{ht}$  ve  $u_{ct}$  sırasıyla krank merkezi ile sıcak silindir tepe noktası ve krank merkezi ile soğuk silindir tepe noktası arasında kalan mesafeleri tanımlamaktadır.

### 3.2.2 Motorun İzotermal Analizi

İzotermal analiz metodu kullanılarak Stirling motoru için hazırlanan FORTRAN programı ile her  $1^\circ$  lik krank mili dönüşüne karşılık bir çevrim boyunca çevrimlik net iş değişimleri hesaplanmıştır.

Hesaplamalarda imalatı yapılan motor için sıcak kaynak sıcaklığı 1000 K, soğuk kaynak sıcaklığı 300 K olarak alınmıştır. Motorun teknik özellikleri ve izotermal analizde

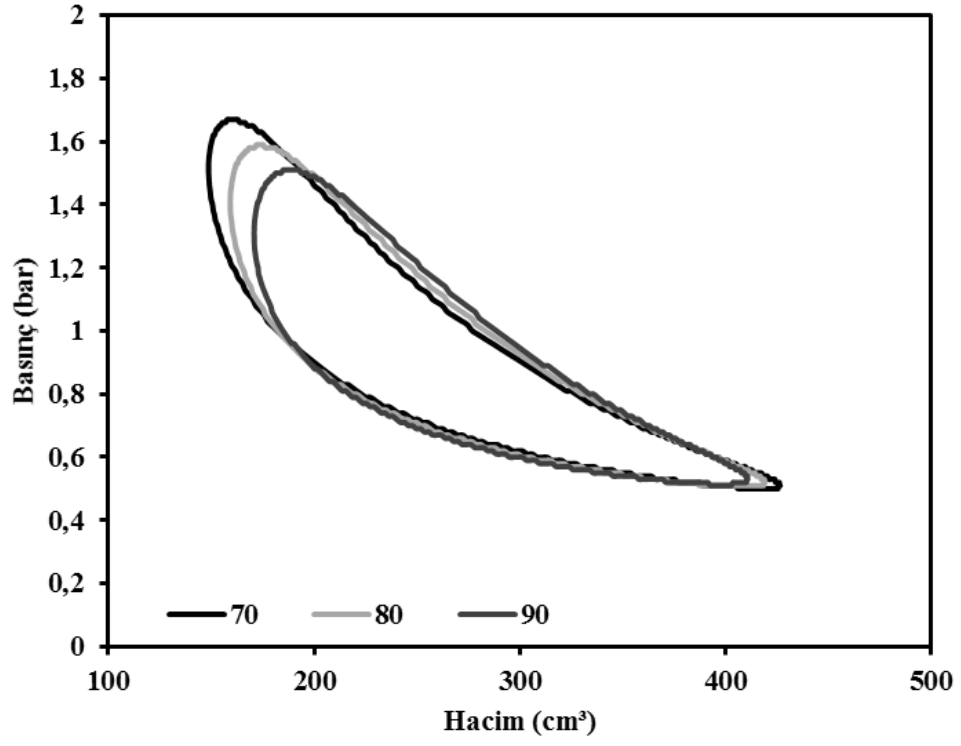
kullanılan diğer girdiler Çizelge 3.1’de verilmiştir.

**Çizelge 3.1** Motora ait değerler.

Parametre	Özellik
Motor tipi	$\alpha$ (V)
Faz açısı	Değişken
Silindir çapı	6 cm
Strok	6 cm
Piston Biyeli uzunluğu	14 cm
Sıcak kaynak sıcaklığı	1000 K
Soğuk kaynak sıcaklığı	300 K
Rejeneratör ısı transfer alanı	1000 cm <sup>2</sup>
Rejeneratör ölü hacmi	14 cm <sup>3</sup>
Soğuk bölge ölü hacmi	38 cm <sup>3</sup>
Sıcak bölge ölü hacmi	50 cm <sup>3</sup>

Krank milinin belirli bir pozisyonundan başlayarak hacim, basınç ve iç enerji değişimleri çevrim boyunca çevrimin her bir adımı için hesaplanmaktadır. İzotermal analizde krank açısı cinsinden  $2\pi$  radyan olan çevrim süresi sonlu parçalara ayrılır. Krank açısı cinsinden  $2\pi$  radyan olan çevrim süresi 360 parçaya ayrılmış ve her bir aralık için basınç, hacim, iş ve iç enerjinin diferansiyeli hesaplanmıştır.

Şekil 3.3’te  $70^\circ$ ,  $80^\circ$  ve  $90^\circ$  faz açılı motorun P-V diyagramı karşılaştırılmıştır.  $70^\circ$  faz açısında, toplam hacmin minimum değeri diğerlerinden daha düşüktür. Aynı faz açısı için toplam hacmin maksimum değeri diğerlerinden göre daha yüksektir. Sıkıştırma oranı diğer faz açılara göre daha yüksektir. Sıkıştırma oranları  $70^\circ$ ,  $80^\circ$  ve  $90^\circ$  faz açılı motorlar için sırası ile 2,87, 2,63 ve 2,40 olarak hesaplanmıştır.  $70^\circ$  faz açılı motorun P-V diyagramı sıkıştırma ve genişleme süreçlerinde yetersiz ısıtma ve soğutmadan dolayı daha ince olmaktadır. Faz açısının artması ile sıkıştırma oranı azalmakta, sıkıştırma ve genişleme performansları artmaktadır.  $70^\circ$ ,  $80^\circ$  ve  $90^\circ$  faz açılı motorlar için izotermal işler sırası ile 8,433 J, 8,495 J ve 8,295 J olarak belirlenmiştir. Maksimum çevrimlik iş  $80^\circ$  faz açılı motorda elde edilmiştir.

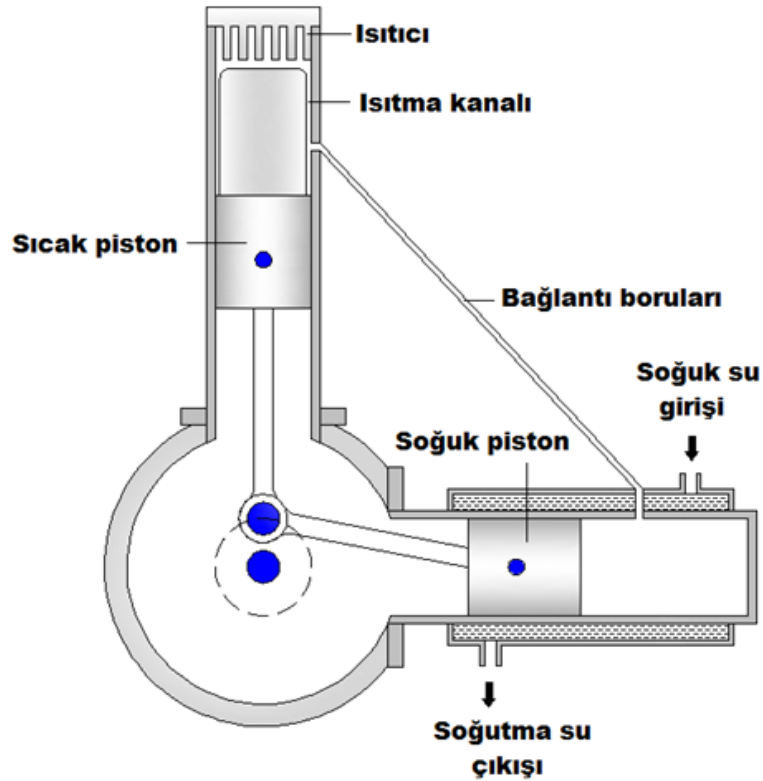


Şekil 3.3 Farklı faz açıları için motorun P-V diyagramları.

## 4. STIRLING MOTORU ve TEST DÜZENEGİ

### 4.1 Stirling Motoru

İmalatı yapılan krank hareket mekanizmalı alfa tipi Stirling motoru; motor bloğu, motor bloğu kapakları, krank mili, soğuk ve sıcak piston, soğuk ve sıcak silindir, biyel kolları ve volandan oluşmaktadır. Şekil 4.1’de motorun şematik görünümü görülmektedir.



Şekil 4.1 Alfa tipi Stirling motoru.

#### 4.1.1 Motor Bloğu

Motor bloğu Resim 4.1’de görülmektedir. Motor bloğu Ç1040 borudan imal edilmiştir. Motor bloğu üzerine soğuk ve sıcak silindir civataları ile bağlanmıştır. Motorda faz açısı değişiminin sağlanabilmesi için soğuk silindir motor bloğu üzerinde hareket edebilir şekilde tasarlanmıştır. Sıcak silindir ise motor bloğu üzerine sabit bir şekilde bağlanmaktadır.



**Resim 4.1** Motor bloğu.

#### 4.1.2 Motor Yan Kapakları

Motorun krank milinin yataklanmasını sağlayan silindir kapakları  $\text{Ç1040}$  malzemeden imal edilmiştir. Kapak yüzeyleri hassas bir şekilde işlenmiş ve çalışma maddesi kaçakları azaltmak amacı ile O-ring kanalı açılmıştır. Motor bloğu kapakları Resim 4.2’de görülmektedir.



**Resim 4.2** Motor bloğu yan kapakları.

### 4.1.3 Biyel Kolları

Sıcak ve soğuk pistonların krank milinden hareket almasını sağlayan biyel kolları alüminyum 7000 serisi malzemedен iki parçalı olarak imal edilmiştir. Biyel kollarının krank muylusuna bağlanan yüzeylerine sürtünme kayıplarını azaltmak amacı ile iki parçalı olarak bronz yataklar imal edilmiştir. Resim 4.3' te biyel kolları görülmektedir.



**Resim 4.3** Biyel kolları.

### 4.1.4 Krank Mili

Krank mili 4140 yağ çeliğinden tek parça olarak haşhaş bir şekilde imal edilmiştir. Krank mili ana ve kol muylu yüzeyleri hassas bir şekilde taşlanmış ve motor bloğu yan kapaklarına iki adet silindirik makaralı rulman ile yataklandırılmıştır. Krank mili Resim 4.4'te görülmektedir.





**Resim 4.4** Krank mili.

#### **4.1.5 Sıcak Piston**

Resim 4.5'te sıcak piston görülmektedir. Sıcak piston kubbe ve alt parça olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır. Kubbe 304 paslanmaz çelik silindirik dolu malzemenen 3 mm et kalınlığında imal edilmiştir. Alt parça sferro döküm malzemenen imal edilmiş ve hassas bir şekilde taşlanmıştır. Alt parça dışına ve kubbe içine diş açılarak birbirine bağlanmıştır.



**Resim 4.5** Sıcak piston.

#### 4.1.6 Soğuk Piston

Soğuk piston tek parça olarak sferro döküm malzemedan hassas bir şekilde imal edilmiştir. Piston yüzeyleri hassas bir şekilde taşlanmıştır. Resim 4.6'da soğuk piston görülmektedir.



**Resim 4.6** Soğuk piston.

#### 4.1.7 Sıcak Silindir

Sıcak silindir sıcaklık ve korozyona dayanıklı paslanmaz ASTM 304 çelikten hassas bir şekilde imal edilmiştir. Pistonun sıkışmasını engellemek amacı ile silindirin alt kısmına soğutucu ilave edilmiştir. Çalışma maddesinin sıcak ve soğuk silindir arasında geçişi için sıcak silindir tepesine 7 adet rekor yerleştirilmiştir. Resim 4.7'de sıcak silindir görülmektedir.



**Resim 4.7** Sıcak silindir.

#### **4.1.8 Soğuk Silindir**

Soğuk silindir 4140 yağ çeliğinden hassas bir şekilde imal edilmiştir. Çalışma maddesinin soğutulması için silindir dış yüzeyine su ceketini ilave edilmiştir. Faz açısının değiştirilebilmesi için silindirin alt tarafına flanş kaynak ile birleştirilmiştir. Resim 4.8’de soğuk silindir görülmektedir.



**Resim 4.8** Soğuk silindir.

#### 4.1.9 Volan

Resim 4.9’da volan görülmektedir. Volan Ç1040 malzemedan imal edilmiştir. Volanın yük ölçüm ünitesine bağlantısı sağlamak amacı ile volan üzerine bir flanş kaynakla birleştirilmiştir.



**Resim 4.9** Volan.

#### 4.1.10 Bağlantı Boruları

Çalışma maddesinin sıcak ve soğuk silindirler arasında geçişini sağlamak amacı ile 7 adet 10 mm çapında bakır boru kullanılmıştır. Resim 4.10’de bağlantı boruları görülmektedir.



**Resim 4.10** Güç pistonu.

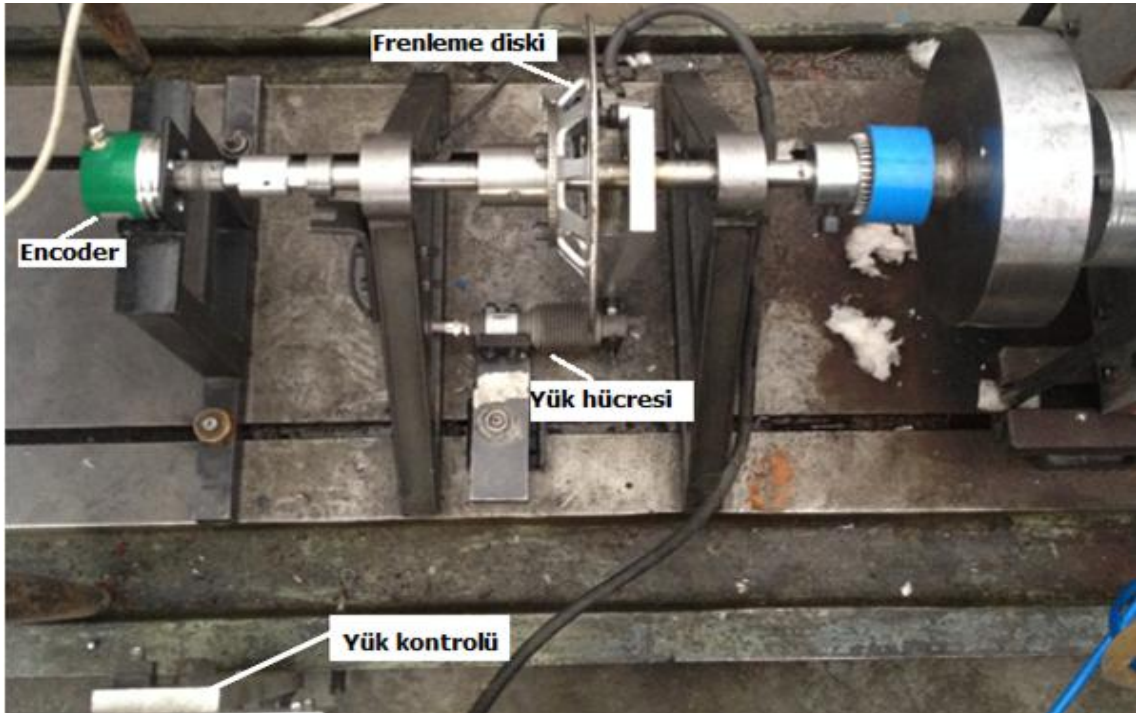
## 4.2 Test Düzenegi

İmalatı gerçekleştirilen motorun montaj işlemleri tamamlandıktan sonra çalışma maddesi olarak hava kullanılarak ön testleri gerçekleştirilmiştir. Ancak motor ön testlerde tepki vermemiştir.

Deneyle, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Stirling Motor Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Deneyle düzenegi prony tip dinamometre, yük hücresi, enkoder, infrared termometre ve veri kayıt yazılım programından oluşmaktadır.

### 4.2.1 Prony Tip Dinamometre

Prony tip sürtünmeli bir frenleme mekanizması yardımıyla motor momenti ölçülmüştür. Dinamometre tertibatı, bir yük hücresi, bir hidrolik fren ünitesi ve frenleme kuvvetini yük hücresine ileten bir moment kolundan oluşmaktadır. Resim 4.11'de Prony tip dinamometre görülmektedir.



Resim 4.11 Prony tip dinamometre.

#### 4.2.2 Encoder

Deneyleerde motor devri, yk ve sıcaklık verilerinin bilgisayar arayüzüne aktarımında LİKA marka encoder kullanılmıştır. Resim 4.12'te deney düzeneğinde kullanılan enkoder görülmektedir.



**Resim 4.12** Encoder.

#### 4.2.3 Yük Hücresi

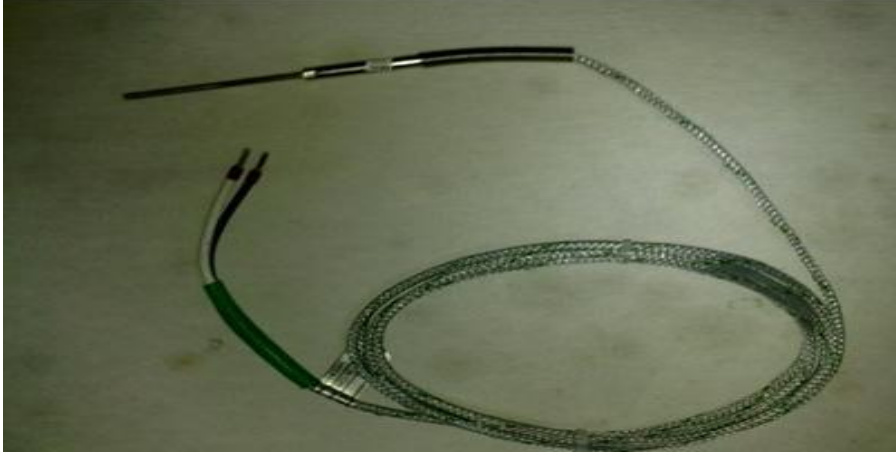
Yük ölümünde 0-20 kg aralığında ölüm yapabilen ESIT marka yk hücresi kullanılmıştır. Yük hücresi bir tarafı sabit diğer tarafı ise kuvvet kolunun baskı uygulamasını sağlayacak şekilde bağlanmıştır. Resim 4.13'te yk hücresi görülmektedir.



**Resim 4.13** Yük hücresi.

#### 4.2.4 Sıcaklık Alıcıları

Elimko marka 1000 °C'ye kadar ölçüm yapabilme yeteneğine sahip "K" tipi termokupl kullanılmıştır. Sıcak ve soğuk bölgelerde uygun yerlere temas ettirilmesi sağlanmıştır. Sıcaklık algılayıcıları Resim 4.14'de görülmektedir.



**Resim 4.14** Sıcaklık algılayıcıları (Termocouple).

#### 4.2.5 İnfrared Termometre

İnfrared termometre Resim 4.17'de görülmektedir. Deneyler sırasında farklı noktalardan sıcaklık ölçümünde termokuplara ilave olarak 50- 800 °C arasında  $\pm\%1$  hassasiyetinde ölçüm yapabilen DT-8863 marka bir infrared termometre kullanılmıştır.



**Resim 4.15** İnfrared termometre.

#### 4.2.6 Dijital Basınç Göstergesi

Stirling motorlarında şarj basıncı motor bloğuna uygulanmaktadır. Deney sırasında şarj basıncının bilgisayar arayüzünden bağımsız olarak görülmesi için dijital basınç göstergesi kullanılmıştır. Resim 4.18’de görülen dijital basınç göstergesi görülmektedir.



**Resim 4.16** Dijital basınç göstergesi.



## 5. SONUÇ

Günümüzde toplumların enerji ihtiyacının büyük bir bölümü fosil enerji kaynaklarından karşılanmamaktadır. Ancak fosil enerji kaynaklarının rezervlerinin azalması ve çevreye olan olumsuz etkileri sürdürülebilir, temiz ve ucuz alternatif enerji kaynaklarını ön plana çıkarmıştır. Biyokütle, rüzgâr, güneş, gel git, nükleer, jeotermal enerji kaynakları alternatif enerji kaynaklarını oluşturmaktadır.

Stirling motorları dıştan yanmalı motor olması sebebiyle farklı enerji kaynakları ile kullanılabilir. Stirling motorları Robert Stirling tarafından geliştirilmiş, düşük maliyetli, yüksek verimli, az parçası olan ve düşük gürültü seviyelerine sahip motorlardır. Stirling motorları genellikle alfa, beta ve gama tipi olmak üzere üç tipten oluşmaktadır. Sıcak ve soğuk uçları arasındaki sıcaklık farkıyla çalışan Stirling motorlarında ısıtma ve soğutmanın etkin bir şekilde yapılması performans için önemlidir. Motora verilen ısı enerjisinden daha fazla güç ve tork elde edebilmek için enerjinin çalışma akışkanına daha hızlı transfer edilebilmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında alfa tipi bir Stirling motorunun tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Stirling motoru izotermal analizi için kinematik ilişkiler soğuk ve sıcak silindir hacimlerin hesaplanmasında kullanılmıştır. İzotermal analizde 70°, 80°, ve 90° faz açılarındaki 1 bar şarj basıncı, 1000 K sıcak uç ve 300 K soğuk uç sıcaklıkları için basınç, hacim değişimleri ile çevrimlik net iş hesaplanmıştır. 70°, 80°, ve 90° faz açılarındaki çevrimlik işler sırası ile 10,247, 10,250 ve 10,199 J olarak elde edilmiştir.

Krank hareket mekanizmalı alfa tipi Stirling motoru; motor bloğu, motor bloğu kapakları, krank mili, soğuk ve sıcak piston, soğuk ve sıcak silindir, biyel kolları ve volandan oluşmaktadır. Alfa tipi Stirling motorunda sıcak silindir motor bloğuna civatalar ile bağlanmıştır. Soğuk silindir ise faz açısının 70°-100° arasında değiştirilebilmesi için özel tasarlanan bir flanş ile bağlanmıştır. Sıcak ve soğuk uçlar birbirine 10 mm çapında paslanmaz çelik boru ile bağlanmıştır.

Stirling motoru imal edildikten sonra Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü Stirling Laboratuvarı'nda ön testleri gerçekleştirilmiştir. Stirling motoruna ısı enerjisi LPG yakıtlı bir ısıtıcı tarafından sağlanmış ve çalışma maddesi olarak helyum kullanılmıştır. Sıcak ve soğuk uçların tek boru ile bağlandığı motorda yapılan deneylerde motordan tepki alınamamıştır. Deneylerde alüminyum malzemedan imal edilen sıcak silindir pistonu yüksek sıcaklık nedeni ile genişerek silindir içerisinde sıkışmıştır.

Motor performansının ölçülebilmesi için sıcak piston düşük genişleme katsayısına sahip sferro döküm malzemedan yeniden imal edilmiş ve sıcak silindirin alt ucuna soğutucu yerleştirilmiştir. Isı transfer yüzey alanını artırmak amacı ile sıcak ve soğuk silindir birbirine 10 mm çapında 7 boru ile birleştirilmiştir. Motor deney düzeneğine yeniden bağlanmıştır. Ancak farklı sıcaklıklarda yapılan çalışmalarda motordan tepki alınamamıştır.

## 6. KAYNAKLAR

- Akyel, E. (2015). Rhombic Hareket Mekanizmalı Bir Stirling Motorunun Tasarımı ve Performans Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Arık, A. (2016). Yenilenebilir Enerji Politikalarının Sürdürülebilirliği: AB Ülkeleri ve Türkiye Açısından Bir Değerlendirme. Yüksek Lisans Tezi, Ordu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ordu.
- Arslan, M. (2016). Rejeneratörlü Beta Tipi Rhombic Hareket Mekanizmalı Bir Stirling Motorunun Performans Testleri. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Ayran, K. (2015). Türkiye’de Alternatif Enerji Kaynaklarının Ekonomik Açından İrdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Çankırı.
- Benvenuto, G. and Filippo, D.M. (1992). An Adiabatic Approach for the Design and the Response-to-load Evaluation of Free Piston Stirling Engines. 27th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference Proceedings, San Diego, pp: 5.23-5.31.
- Çetinkaya, S. (1999). Termodinamik. Nobel Yayın Dağıtım Ltd. Şti., Ankara, pp: 136-138.
- Çınar, C. (2001). Gama Tipi bir Stirling Motorunun Tasarımı İmalî ve Performans Analizi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Erol, D., (2009). Düşük Sıcaklık Farkıyla Çalışan Bir Stirling Motorunun Tasarımı ve İmalatı. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kurşuncu, B. (2010). Sıvı Pistonlu Stirling Motoru İle Güneş Enerjili Su Pompası Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

- Özgören, Y.Ö. (2004). Stirling Motorlarında Isı Kayıplarının Azaltılması İçin Termal Bariyer Kullanımı. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Uçak, S. (2010). Sürdürülebilir Kalkınma Bağlamında Alternatif Enerji ve Enerji Üretimi- Büyüme İlişkisi: Panel Veri Analizi. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kocaeli.
- Uğurlu, Y. (2014). Stirling Motorunda Gaz Hareketlerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Üstün, S. (2000). Çift Yer Değiştirme Pistonlu V Tipi Küçük Güçlü Bir Stirling Motorunun Tasarım ve İmali. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-37.
- Walker, G. (1980). Stirling Engines. Clarendon Press, Oxford, 47-71, 73-103, 107- 121, 124-156, 160-199, 203-233, 254-287.
- Yücesu, H.S. (1996). Küçük Güçlü Güneş Enerjili Bir Stirling Motoru Tasarımı. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ali BİNİR  
Doğum Yeri ve Tarihi : Sandıklı / 26.02.1985  
Yabancı Dili : İngilizce  
İletişim (Telefon/e-posta) : a\_binbir@hotmail.com

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Sandıklı Teknik Lisesi (1998-2002)  
Lisans : Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Otomotiv Öğretmenliği (2003- 2007)  
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği (2014-2015)  
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği (2013-2017)