



**RHOMBIC HAREKET MEKANİZMALI
STİRLİNG MOTORUNUN HALOJEN
LAMBA İLE PERFORMANS TESTLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Halil İbrahim EROĞLU
DANIŞMAN

Doç. Dr. Fatih AKSOY
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Eylül 2018

Bu tez çalışması 113M192 numaralı proje ile TÜBİTAK ve 15.FEN.BİL.33 numaralı proje ile AKUBAP tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RHOMBIC HAREKET MEKANİZMALI STİRLİNG MOTORUNUN
HALOJEN LAMBA İLE PERFORMANS TESTLERİ

Halil İbrahim EROĞLU

DANIŞMAN

Doç. Dr. Fatih AKSOY

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Eylül 2018

TEZ ONAY SAYFASI

Halil İbrahim EROĞLU tarafından hazırlanan “Rhombic Hareket Mekanizmalı Stirling Motorunun Halojen Lamba İle Performans Testleri” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 28/09/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Fatih AKSOY

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

Üye : Doç. Dr. Fatih AKSOY
Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi,

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Yaşar Önder ÖZGÖREN
Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi,

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

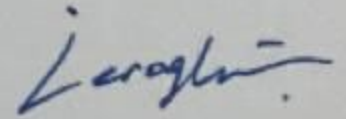
Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- 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 yararlanılması 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.

28/10/2018

Halil İbrahim EROĞLU



ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

**RHOMBİC HAREKET MEKANİZMALI STİRLİNG MOTORUNUN HALOJEN
LAMBA İLE PERFORMANS TESTLERİ**

Halil İbrahim EROĞLU
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Fatih AKSOY

Bu çalışmada, rhombic hareket mekanizmasına sahip bir beta tipi Stirling motorunun performans testleri 1000 W halojen lamba ve LPG yakıtlı ısıtıcı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Motorun sıcak ucuna ısı enerjisinin halojen lamba kullanılarak aktarılması için paslanmaz çelik malzemeden kaviti imal edilmiştir. Deneyler 1000 W halojen lamba ile 450 ± 10 °C sıcak uç sıcaklığında ve LPG yakıtlı ısıtıcı ile 600 ± 10 °C sıcak uç sıcaklığında çalışma maddesi helyum kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 1000 W halojen lamba ile maksimum motor gücü ve momenti 6 bar şarj basıncında ve 261 dev/dk motor hızında sırası ile 96,9 W ve 3,54 Nm olarak elde edilmiştir. LPG yakıtlı ısıtıcı ile maksimum motor gücü ve momenti 8 bar şarj basıncında 412 dev/dk motor hızında 358 W ve 399 dev/dk motor hızında 8,41 Nm olarak elde edilmiştir.

2018, x + 41 sayfa

Anahtar Kelimeler: Stirling motoru, rhombic, motor torku, motor gücü.

ABSTRACT
M.Sc. Thesis

**THE PERFORMANCE TESTS OF A BETA TYPE RHOMBIC DRIVE STIRLING
ENGINE WITH HALOGEN LAMP**

Halil İbrahim EROĞLU

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Fatih AKSOY

In this study, performance tests of a beta type Stirling engine that has rhombic drive mechanism were carried out using 1000 W halogen lamp and a LPG fuelled heater. In order to transfer heat to hot end of engine by using halogen lamp, the cavity was made of stainless steel. Experiments were carried out at 450 ± 10 °C hot end temperature by 1000 W halogen lamp and 600 ± 10 °C hot end temperature by LPG fuelled heater using helium. Maximum engine power and torque were obtained as 96.9 W and 3.54 Nm at 6 bar charge pressure and 261 rpm engine speed, respectively for 1000 W halogen lamp. The maximum engine power and torque were obtained as 358 W at 8 bar charge pressure and 412 rpm engine speed and 8.41 Nm at 8 bar charge pressure and 399 rpm engine speed, respectively for LPG fuelled heater.

2018, x + 41 pages

Keywords: Stirling engine, rhombic, engine torque, engine power.

TEŞEKKÜR

Yaptığım çalışmalarım boyunca tecrübesini, bilgisini ve samimiyetini eksik etmeyen değerli danışmanım Doç. Dr. Fatih AKSOY'a teşekkür ederim. Bilgilerinden faydalandığım ve birçok konuda yardımını esirgemeyen değerli hocam Nihat Erkan SAĞLAM'a, kardeşim Öğretim Görevlisi Muhammed ARSLAN'a, AKÜ Otomotiv Mühendisliği Bölümü Teknisyenleri Mehmet AKTÜRK ve Ünal TUNÇ abilerime, Prof. Dr. Abdurrahman KARABULUT'a ve bu tez çalışması boyunca maddi manevi hiçbir imkân ve yardımlarını eksik etmeyen, her daim yanımda olan merhum annem Hatice EROĞLU, babam Hamza EROĞLU, kardeşlerim Melek, Emre ve Merve EROĞLU eşim Semra EROĞLU ve biricik kızım Hatice Kübra EROĞLU ile çok sevdiğim merhum büyükbabam Ökkeş EROĞLU ve büyükannem Melek EROĞLU'na sonsuz saygı, sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma iki farklı proje ile desteklenmiştir.

Motorun tasarımı, imalatı ve deney düzeneğinin kurulumu “113M192” numaralı ve “Rejeneratörlü Beta Tipi Rhombic Hareket Mekanizmalı Bir Stirling Motorunun Performans Testleri” isimli TÜBİTAK projesi ile gerçekleştirilmiştir. Katkılarından dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Kavitinin tasarımı ve imalatı “15.FEN.BİL.33” numaralı ve “Rhombic Hareket Mekanizmalı Stirling Motorunun Halojen Lamba İle Performans Testleri” isimli proje Afyon Kocatepe Üniversitesi - Bap Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Katkılarından dolayı Afyon Kocatepe Üniversitesi - Bap Koordinasyon Birimine teşekkür ederim.

Halil İbrahim EROĞLU

AFYONKARAHİSAR, 2018

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
RESİMLER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. STİRLİNG MOTORLARI.....	3
2.1 Stirling Motorlarının Tarihçesi ve Literatür Bilgileri	3
2.2 Stirling Motorları	7
2.3 Stirling Motorları Çeşitleri.....	7
2.3.1 Tek Etkili Stirling Motorları.....	7
2.3.1.1 Alfa(α) Tipi Stirling Motorları.....	8
2.3.1.2 Beta (β) Tipi Stirling Motorları	9
2.3.1.3 Gama (γ) Tipi Stirling Motorları.....	10
2.3.2 Çift Etkili Stirling Motorları.....	11
2.3.3 Hareket İletim Mekanizmalarına Göre Stirling motorları	11
2.3.3.1 Rhombic (Altı Kenar) Hareket İletim Mekanizması	11
2.3.3.2 Krank-Biyel Hareket İletim Mekanizması.....	12
2.3.3.3 Sallanan Sürücü (Wobble Yoke) Hareket İletim Mekanizması.....	13
2.3.3.4 Eğik Plaka (Swash Plate) Hareket İletim Mekanizması	14
2.3.3.5 Scotch Yoke Hareket İletim Mekanizması	15
2.3.3.6 Ross Yoke Hareket İletim Mekanizması	17
2.4 Stirling Motorlarının Avantaj ve Dezavantajları	17
2.4.1 Stirling Motorlarının Avantajları.....	17
2.4.2 Stirling Motorlarının Dezavantajları	18
3. MATERYAL ve METOT	19
3.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan Motorun Temel Parçaları	19
3.1.1 Motor Bloğu	19
3.1.2 Krank Mili Ana Yatakları.....	21
3.1.3 Krank Milleri ve Dişliler	21

3.1.4 Rhombic Biyel Kolları ve Ara Bağlantı Elemanları.....	22
3.1.5 Yer Değiştirme Pistonu Rodu.....	22
3.1.6 Güç Silindiri ve Güç Silindiri Üst Parçası.....	23
3.1.7 Yer Değiştirme Alt Silindir	23
3.2 İmalatı Yapılan Motor Parçaları	24
3.2.1 Kaviti	25
3.2.2 Yer Değiştirme Pistonu	26
3.3 Test Düzenegi	26
3.3.1 Prony Tip Dinamometre	27
3.3.2 Enkoder.....	28
3.3.3 Yük Hücresi (Load-Cell)	28
3.3.4 Termokupl	28
3.3.5 Infrared Termometre.....	29
3.3.6 Dijital manometre	29
3.3.7 Veri Kayıt Yazılımı	30
4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	31
4.1 Halojen Lamba İle Yapılan Deneyler	31
4.2 LPG Yakıtlı Isıtıcı İle Yapılan Deneyler	32
5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA	34
6. KAYNAKLAR.....	36
6.1 İnternet Kaynakları	40
ÖZGEÇMİŞ.....	41

SİMGELER DİZİNİ

Simgeler

α	Alfa
β	Beta
cm ³	Santimetre küp
°C	Santigrad derece
dev/dk	Devir/dakika
K	Kelvin
kg	Kilogram
kW	Kilowatt
LPG	Sıvılaştırılmış petrol gazı
mm	Milimetre
Nm	Newton metre
vb.	Ve benzeri
vd.	Ve diğerleri
yy.	Yüzyıl
W	Watt
γ	Gama
°	Derece
±	Artı eksi
%	Yüzde

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Robert Stirling tarafından yapılan ilk Stirling motoru	3
Şekil 2.2 Çınar ve arkadaşlarının imal ettiği Stirling motorun şematik görünümü.....	5
Şekil 2.3 Alfa tipi Stirling motoru.....	8
Şekil 2.4 Gama tipi bir Stirling motoru.....	10
Şekil 2.5 Siemens'in çift etkili Stirling motoru.....	11
Şekil 2.6 Rhombic hareket mekanizmasının şematik gösterimi	12
Şekil 2.7 Krank-Biyel hareket mekanizmalı bir Stirling motorunun şematik olarak gösterimi.....	13
Şekil 2.8 Sallanan sürücü (Wobble Yoke) hareket mekanizmasının şematik olarak gösterimi	14
Şekil 2.9 Eğik Plakahareket mekanizmasının şematik olarak gösterimi.....	15
Şekil 2.10 ScotchYoke hareket iletim mekanizması.....	16
Şekil 2.11 RossYoke hareket iletim mekanizmalı motorun şematik resmi.....	17
Şekil 3.1 Stirling motorunun temel parçalarının şematik görünümü	19
Şekil 3.2 Krank milî ve helisel dişliler.....	22
Şekil 3.3 Yer değiştirme pistonu rodu.....	22
Şekil 3.4 Güç silindiri alt ve üst parçası.....	23
Şekil 3.5 Kavitinin şematik görünümü.....	25
Şekil 4.1 Motor hızına bağlı olarak motor momentinin değişimi	31
Şekil 4.2 Motor hızına bağlı olarak motor gücünün değişimi.....	32
Şekil 4.3 Motor hızına bağlı olarak motor momentinin değişimi	33

Şekil 4.4 Motor hızına bağlı olarak motor gücünün değişimi	33
---	----



RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2.1 Demiralp tarafından yapılan Stirling motoru ve parçaları	4
Resim 2.2 İmalatı yapılan beta tipi Stirling motoru.....	5
Resim 2.3 Karabulut ve arkadaşlarının imal ettiği beta tipi Stirling motoru	6
Resim 2.4 Beta tipi bir Stirling motoru.....	9
Resim 2.5 Sripakagorn ve Srikam tarafından tasarlanan Scotch Yoke hareket iletim mekanizmalı motor	16
Resim 3.1 Motor bloğu gövdesi.....	20
Resim 3.2 Motor bloğu kapakları.....	20
Resim 3.3 Krank mili ana yatakları.....	21
Resim 3.4 Rhombic biyel kolları ve ara bağlantı elemanları	22
Resim 3.5 Yer değiştirme alt silindiri	24
Resim 3.6 Stirling motoru	24
Resim 3.7 Kaviti	25
Resim 3.8 Yer değiştirme pistonu.....	26
Resim 3.9 Test düzeneği	27
Resim 3.10 Prony tip dinamometre.....	27
Resim 3.11 Enkoder	28
Resim 3.12 Yük hücresi	28
Resim 3.13 Termokupl.....	29
Resim 3.14 İnfrared termometre	29

Resim 3.15 Dijital manometre 30

Resim 3.16 Motor performans yazılımı arayüzü..... 30



1. GİRİŞ

İnsanoğlunun enerji ihtiyacı sürekli olarak gelişen teknoloji ile birlikte artmaktadır. Enerji ihtiyacının artışına bağlı olarak petrol kökenli yakıtların tüketimi artmakta ve gerekli önlemler alınmaz ise enerji krizinin ortaya çıkabileceği tahmin edilmektedir. Buna ilaveten petrol fiyatları da sürekli olarak artış göstermektedir (Kurşuncu 2010).

1970’lerde yaşanan petrol krizi ile enerji ihtiyaçlarını gidermek amacıyla birçok gelişmiş ülke alternatif enerji kaynaklarına yönelmiştir. Enerji ihtiyacını karşılayabilen ülkeler geliştirdikleri teknolojiler sayesinde refah ve çağdaş bir hayat seviyesine ulaşabilmiştir. Bu gelişime ayak uyduramayan ülkeler ise çeşitli sorunlarla yüz yüze gelmiştir (Demiralp 2000). Gelişmemiş ülkelerin bünyesindeki petrol yataklarından dolayı enerji kaynaklarına sahip ülkeler artan güçleriyle diğer ülkeler üzerinde bir egemenlik kurmaya çalışmış ve siyasi karmaşıklıklar ortaya çıkmıştır (Ayhan 2009). Ayrıca tüketilen enerji miktarı ile gayri safi milli hasıla arasında doğrudan bir ilişki olduğundan, ülkelerin kişi başına tükettikleri enerji miktarı ülkenin gelişmişlik seviyesini göstermektedir (Arı 2007).

Günümüzde yenilenemez enerji kaynaklarının insanoğlunun ihtiyaçlarını sonsuza dek karşılayamayacağı ve bir gün tükeneceği, ayrıca petrol kökenli yakıtların kullanılmaya devam edilmesi halinde küresel ısınma, atmosfer olayları, iklim bozuklukları, çevre ve hava kirliliği gibi istenmeyen sonuçların ortaya çıkacağı düşünülmektedir (Arık 2016). Bu noktada hidrolik, rüzgâr, güneş, biokütle, jeotermal, hidrojen vb. yenilenebilir ve alternatif enerji kaynakları dikkatleri üzerine çekmiş ve petrol kökenli yakıtlarla rekabete girmiştir (Ayran 2015). Bu kaynakların enerji üretiminde kullanımı ile ekolojik denge sağlanacak, bu kaynaklardan elde edilecek elektrik enerjisinin kullanımı hem ülkenin ekonomik büyümesine katkı sağlayacak hem de yaşadığımız çevre daha temiz bir hale gelecektir (Uçak 2010).

Alternatif enerji kaynaklarının yanında mevcut yanma teknolojilerinin geliştirilmesi ve alternatif motorlar ile daha verimli enerji dönüşüm sistemlerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Bahsedilen alternatif motorlardan biriside İskoç rahip Robert Stirling

tarafından 1816 yılında icat edilmiş olan Stirling motorlarıdır (Akyel 2015). Çevre dostu olan, birçok alternatif enerji kaynağıyla çalışabilen ve dıştan yanma ilkesine göre çalışan bu motorlar sulama alanlarında, uzay teknolojilerinde, elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Bununla birlikte dışarıdan hareket alarak ısıtma pompası ya da soğutma makinesi olarak da kullanılabilir (Erol 2009).

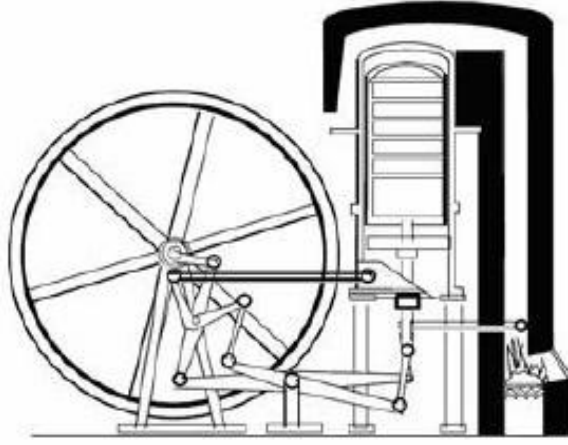
Stirling motorlarında performansın yüksek olması istendiğinden motor üzerinde araştırma ve geliştirme uygulamaları da yapılmaktadır. Maksimum verim ve güç için ideal Stirling çevrimindeki tüm çalışma akışkanının anlık hareket etmesi ve ısı giriş-çıkışının sabit sıcaklıkta gerçekleşmesi gerekmektedir. Benzer şekilde matrisin herhangi bir bölgesinde çalışma akışkanı ve rejeneratör arasında ki ısı transferi sabit bir sıcaklıkta gerçekleşmelidir. Ancak gerçek motorlarda bu koşulları sağlamak mümkün değildir. Çalışma akışkanını aynı sıcaklıkta herhangi bir boşlukta toplamak pratik olmayacaktır. Isı transfer elemanları ve bağlantı elemanları arasında boşluk olmayacağından ölü hacim oluşmayacaktır. Ayrıca maksimum güç ve verime sadece sonsuz ısı transfer hızına veya sıfır ısı kapasitesine sahip bir akışkan ile ulaşılabilir. Temel olarak bir Stirling motoru bir boru ile bağlı iki değişken hacimli ve sıcaklıklı boşluktan oluşmaktadır. Bu boşluklar çalışma akışkanı ile doldurulmaktadır ve boru bağlantısı ise ısıtıcı, soğutucu ve rejeneratör ile sağlanmaktadır (Walker 1980).

Bu çalışmada, rhombic hareket mekanizmasına sahip beta tipi bir Stirling motorunda ısı enerjisinin çalışma maddesine aktarılmasında kullanılabilecek bir kavitenin imalatı gerçekleştirilmiştir. Deneylerde ısı kaynağı olarak halojen lamba ve LPG yakıtlı ısıtıcı kullanılmıştır. Farklı şarj basınçlarında çalışma maddesi olarak helyum ile gerçekleştirilen deneylerde motor hızına bağlı olarak motor gücü ve motor momenti değişimleri incelenmiştir.

2. STİRLİNG MOTORLARI

2.1 Stirling Motorlarının Tarihçesi ve Literatür Bilgileri

Stirling motorları 1816 yılında Robert Stirling isimli İskoç rahip tarafından icat edilmiş dıştan yanmalı motorlardır. Kardeşi James'in yardımları ile çeşitli, yüksek basınçlı, güvenli ve yakıt tasarruflu Stirling motorları tasarlamış ve üretmişlerdir.



Şekil 2.1 Robert Stirling tarafından yapılan ilk Stirling motoru (Demiralp 1994).

Stirling motorları 19. yy'ın ortalarına kadar buhar makinelerinin gelişiminde önemli bir faktör olmuştur. Bu motorların belirli parçaları sürekli olarak yüksek sıcaklıkta çalıştığı için o zamanın malzeme teknolojisi yetersiz kalmıştır. Bu nedenle Stirling motorları güç üretim yarışında geri kalmıştır. 19. yy'ın tamamı ve 20. yy'ın başlarında Stirling motorları en yaygın “sıcak hava motorları” ismiyle sadece fan ve su pompalama gibi uygulamalarda kullanılmıştır.

1937 yılında Hollanda'daki N.V. Philips şirketinin mühendisleri tarafından elektrik üretimi olmayan uzak bölgelerdeki radyo alıcılarına 10-20 W güç üretmek için Stirling motorları kullanılmıştır (Ross 1993).

Meijer (1953), Stirling motorları için yeni bir hareket iletim mekanizması tasarlamış ve bunu “Rhombic drive” olarak adlandırmıştır. Rhombic mekanizmasında pistonu bir yatay kuvvet gelmediği için aşınma ve piston sürtünmesi azdır (Walker 1980).

Trukhov ve Tursunbaev (1987), Özbekistan Fizikoteknik Enstitüsü'nde çift silindirli bir Stirling motoru imal etmişlerdir. Stirling motoru ile yapılan deneylerde 873 K sıcaklık ve 1000 – 1200 dev/dk motor hızı aralığında 500 W güç elde etmişlerdir (Turukhov and Tursunbaev 1987).

Bean, Sandia Ulusal Laboratuvarı ve Cummins Güç Üretim Şirketi beraberliğinde yapıların elektrik ihtiyacını karşılamak ve su pompalarının çalıştırılması için güneş enerjisinden yararlanılarak çalışan 5 kW gücünde bir Stirling motoru imalatı gerçekleştirmişlerdir. Çalışma maddesi olarak hava yerine hidrojen kullanmışlardır (Bean and Diver 1992).

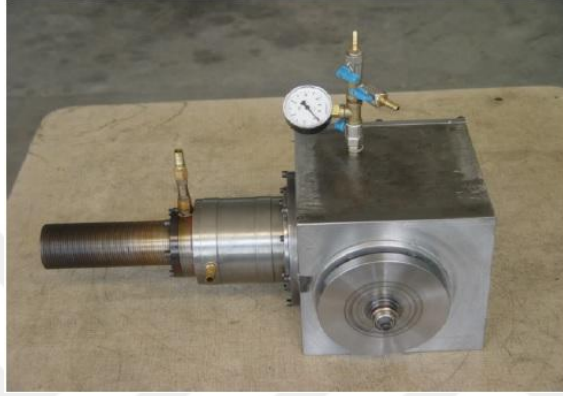
Demiralp (2000), küçük hacimli bir Stirling motoru tasarlayarak imalatını gerçekleştirmiştir. Motorda çalışma maddesi olarak hava kullanmıştır. Deneylerde maksimum motor gücünü 2 bar şarj basıncı ve 1000 °C sıcaklıkta 21,46 W olarak elde etmiştir. İmalatı gerçekleştirilen motor ve parçaları Resim 2.2'de görülmektedir (Demiralp 2000).



Resim 2.1 Demiralp tarafından yapılan Stirling motoru ve parçaları (Demiralp 2000).

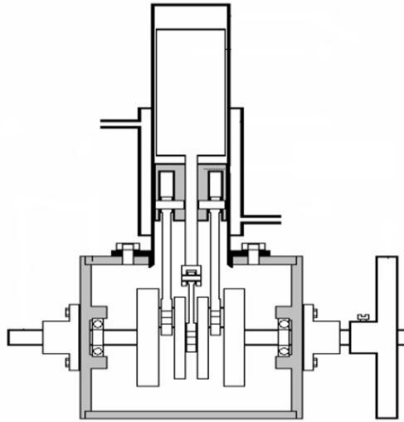
Üstün (2000), çift yer değiştirme pistonuna sahip çalışma maddesi olarak hava kullanılan bir Stirling motorunun tasarımını ve imalatını gerçekleştirmiştir. Deneylerde 1000 °C sıcaklık ve 1,5 bar şarj basıncında 65 W güç elde etmiştir (Üstün 2000).

Özgören (2005), beta tipi tek silindirli bir Stirling motorunu imal etmiştir. Bu motorun yer değiştirme pistonunun yüzeyini Zirkonyum Oksit malzemesi ile kaplamış ve 800, 900 ve 1000 °C ısıtıcı sıcaklıklarında motor deneylerini gerçekleştirmiştir. Kaplamalı yer değiştirme pistonu ile 1000 °C sıcaklık ve 3,5 bar şarj basıncında 83,12 W güç elde etmiştir. Resim 2.2’de imalatı gerçekleştirilen beta tipi Stirling motoru görülmektedir (Özgören 2005).



Resim 2.2 İmalatı yapılan beta tipi Stirling motoru (Özgören 2005).

Çınar vd. (2006), yılında 192 cm³ süpürme hacmine sahip, beta tipi bir Stirling motorunun imalatını gerçekleştirmişlerdir. Maksimum motor gücünü 1000 °C sıcaklık, 2,5 bar şarj basıncı ve 344 dev/dk motor hızında 14 W olarak elde etmişlerdir. İmalatı gerçekleştirilen motorun şematik görünümü Şekil 2.2’de görülmektedir (Çınar *et al.* 2006).

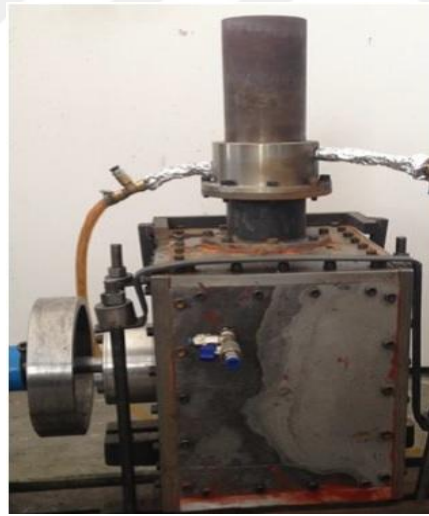


Şekil 2.2 Çınar ve arkadaşlarının imal ettiği Stirling motorun şematik görünümü (Çınar *et al.* 2006).

Sripakagorn ve Srikam (2011), beta tipi bir Stirling motorunun imalatını gerçekleştirmişlerdir. Maksimum motor gücünü 7 bar basınç, 500 °C sıcaklık ve 360 dev/dk motor hızında 95,4 W olarak elde etmişlerdir (Sripakagorn and Srikam 2011).

Çınar vd. (2013), beta tipi rhombic hareket mekanizmalı bir Stirling motorunun tasarımını ve imalatını gerçekleştirmişlerdir. Bu motoru 350 – 450 °C sıcaklık aralıkları ve farklı şarj basınçlarında test etmişlerdir. Maksimum motor gücünü 450 °C silindir sıcaklığı, 2 bar şarj basıncı ve 575 dev/dk motor hızında çalışma maddesi olarak helyum kullanarak 95,77 W olarak belirlemişlerdir (Çınar *et al.* 2013).

Karabulut vd. (2015), beta tipi rhombic hareket mekanizmalı bir Stirling motorunu LPG yakıtlı ısıtıcı ve 1-4 bar şarj basınçları aralığında çalışma akışkanı olarak hava ile test etmişlerdir. Motorun maksimum gücünü 3 bar şarj basıncı ve 507 dev/dk motor hızında 221,77 W olarak elde etmişlerdir. Test motoru Resim 2.3'te görülmektedir (Karabulut *et al.* 2015).



Resim 2.3 Karabulut ve arkadaşlarının imal ettiği beta tipi Stirling motoru (Karabulut *et al.* 2015).

Duan vd. (2015), laboratuvar koşullarında elektrikli bir ısıtma sistemi ile beta tipi bir Stirling motorunun performans testlerini gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde 15 bar basınç ve 600 °C sıcaklıkta 288 W güç elde etmişlerdir (Duan *et al.* 2015).

2.2 Stirling Motorları

Sıcak hava motoru olarak da bilinen Stirling motorları dıştan yanma prensibine göre çalışmaktadır. Temel çalışma prensibi, uygulanan sıcaklık değişimine bağlı olarak silindirler içerisindeki çalışma maddesinin ısınması ve soğuması ile genişerek basınç yaratmasıdır. Stirling motorları dıştan ısıtılmalı olduğu için diğer motor türlerine göre oldukça avantajlıdır. Her türlü ısı kaynağını ile çalışabilmektedirler (Çetin *et al.* 2012).

2.3 Stirling Motorları Çeşitleri

Stirling motorlarını;

- Tek etkili Stirling motorları
 - Alfa tipi
 - Beta tipi
 - Gama tipi
- Çift etkili Stirling motorları
- Hareket iletim mekanizmalarına göre
 - Rhombic (Altı Kenar) hareket iletim mekanizması
 - Krank-Biyel hareket iletim mekanizması
 - Sallanan sürücü (Wobble Yoke) tipi hareket iletim mekanizması
 - Eğik plaka (Swash Plate) tipi hareket iletim mekanizması
 - Stoch Yoke tipi hareket iletim mekanizması
 - Ross Yoke hareket tipi iletim mekanizması olarak üç ana başlıkta inceleyebiliriz (Thombare and Verma 2008).

2.3.1 Tek Etkili Stirling Motorları

Tek etkili Stirling motorlarında çalışma maddesi pistonun sadece bir tarafına etki etmektedir (Thombare and Verma 2008).

Tek etkili Stirling motorlarında motorun özelliği ve türüne bağlı olarak silindirin içinde çalışan elemanlar piston olacağı gibi, biri yer değiştirme (displacer) diğeri ise güç

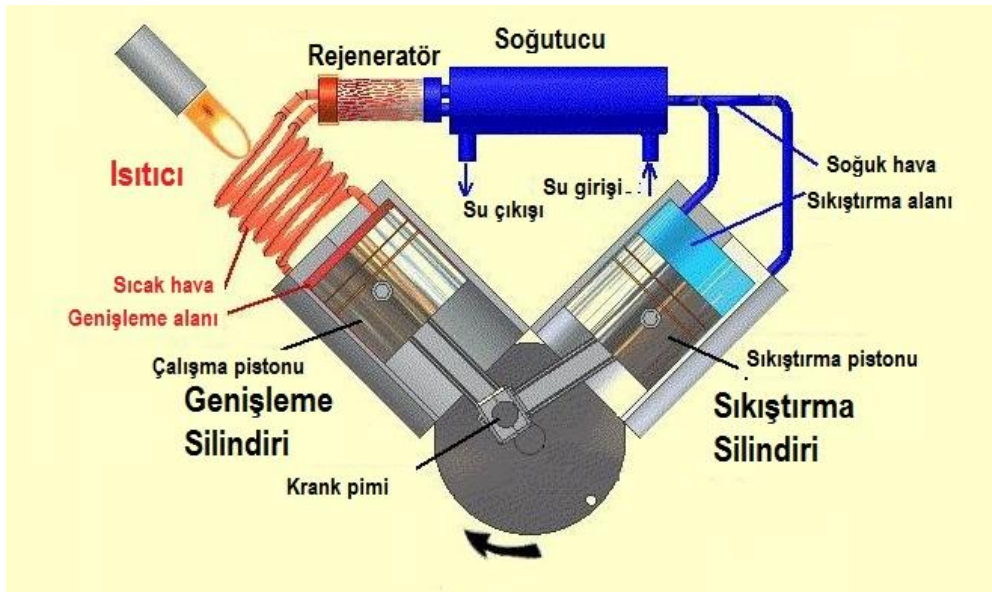
pistonu şeklinde de olabilir (Aksoy 2011). Tek etkili Stirling motorlarını alfa (α), beta (β) ve gama (γ) olarak 3 şekilde sınıflandırılabilir (Özgören 2004).

2.3.1.1 Alfa(α) Tipi Stirling Motorları

Bu tip Stirling motorları iki ayrı güç pistonuna sahiptir. Bu pistonlardan biri sıcak olan silindirde, diğer piston ise soğuk olan silindir içerisinde çalışmaktadır. Bu iki silindirin sisteme bağlantısı ise rejeneratör ile yapılmaktadır. Sıcak ve soğuk silindirler birbirinden ayrı olduğu için bu silindirlerin arasında kondüksiyonla ısı etkileşim de olmaz (Akhan 2007).

Alfa tipi motorlarda sıcak olan silindir genişleme hacmi, soğuk olan silindir ise sıkıştırma hacmi olarak adlandırılır. Bu tip motorlarda kapalı bir hacimde soğuk ve sıcak silindirlerde meydana gelen sıkıştırma ve genişleme olaylarının gerçekleşebilmesi için bu silindirler arasında bir faz açısı olmalıdır. Bu faz açısı da 90° olduğundan bu tip motorlar “V tipi Stirling motoru” olarak da adlandırılmaktadır (Özgören 2004).

Şekil 2.3'te Alfa tipi bir Stirling motoru sıcak - soğuk silindirleri ve alanları ile gösterilmektedir.



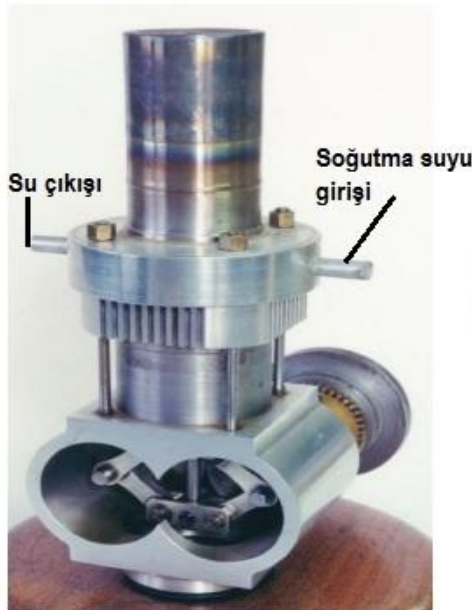
Şekil 2.3 Alfa tipi Stirling motoru (STIRLING-FETTE DE 2016).

2.3.1.2 Beta (β) Tipi Stirling Motorları

Beta tipi Stirling motorunda güç pistonu ve yer değiştirme pistonu tek bir silindir içerisinde hareket etmektedir. Bu silindirler birbirleri ile eş merkezli olarak hareket eder (Akhan 2007). Silindirin tepe noktası ısıtılırken alt kısmı ise soğutulur (Laka 2011). Beta tipi Stirling motorunda yer değiştirme pistonunun uzun olan rod kısmı güç pistonunun içinden geçmektedir (Aksoy 2011).

Beta tipi motorlarda yer değiştirme pistonunun üstündeki hacme sıcak hacim, güç pistonu ve yer değiştirme pistonu arasında kalan hacme ise soğuk hacim adı verilir (Erol 2009). Bu tip motorlarda, çalışma akışkanının soğuk ve sıcak hacimler arasındaki hareketi, yer değiştirme silindiri ile piston arasındaki çalışma boşluğundan sağlanmaktadır (Erol 2011).

Kullanılan çalışma maddesinin soğuk olduğu durumda silindir içerisindeki güç pistonu sıkıştırma işlemi gerçekleştirir ve bu piston ısınan çalışma maddesinin etkisiyle itilerek Stirling motorunun hareket etmesini sağlar, bu sayede ısı enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmüş olur (Walker 1973). Resim 2.4'de Beta tipi bir Stirling motor görülmektedir.



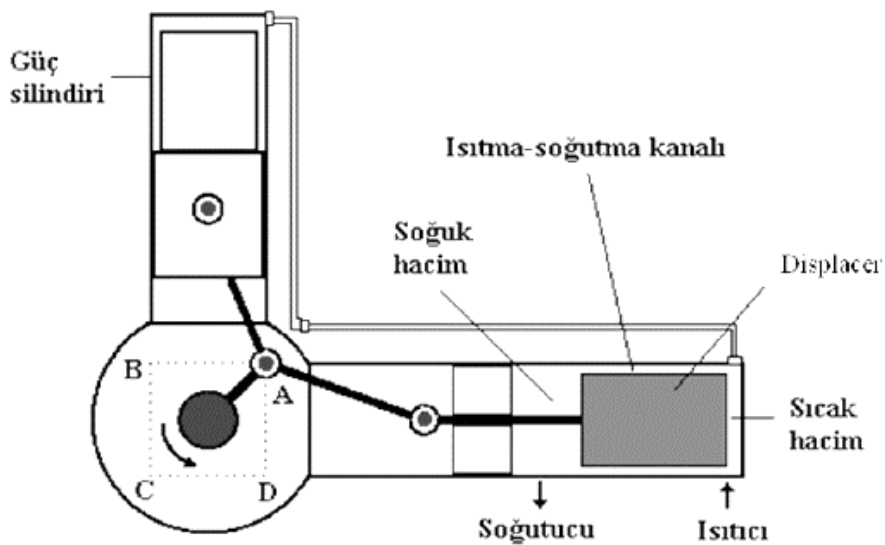
Resim 2.4 Beta tipi bir Stirling motoru (Erol 2011).

2.3.1.3 Gama (γ) Tipi Stirling Motorları

Gama tipi Stirling motorlarında, yer değiştirme ve güç pistonları ayrı silindirler içerisinde çalışmaktadırlar. Bu silindirler ise birbirine paralel olup, ölü hacmi en aza indirecek şekilde yerleştirilir (Akhan 2007).

Tek etkili gama tipi Stirling motorları tiplerine göre 4 şekilde incelenebilir. Bunlardan Rainbow tipi Stirling motorunda çift güç pistonu ve bir adet yer değiştirme (displacer) pistonu mevcuttur. Diğer bir gama tipi Stirling motoru ise Lauberau-Schwartzkopff'tur. Bu tip Stirling motorunda ise rejeneratör yer değiştirme pistonunun üst kısmında yer almaktadır. Robinson tipi Stirling motorunda ise güç silindirleri ve yer değiştirme silindirleri 90° faz açısı ile yerleştirilmiştir. Son olarakta Heinrichi tipi Stirling motorlarında sıcak ve soğuk olan hacimler dışarıdan harici bir rejeneratör ile birbirine bağlanmıştır. Yer değiştirme silindiri ile güç silindiri birbirine paralel bir şekilde yerleştirilmiştir (Aksoy 2011).

Silindirlerden birisi yer değiştirme pistonu vasıtasıyla çalışma maddesinin ısıtılıp soğutulması için kullanılırken diğeri bir piston aracılığı ile çalışma maddesinin genişleme ve sıkıştırma işlemini sağlar (Erol 2009). Şekil 2.4'te gama tipi bir Stirling motorunun şematik resmi görülmektedir.



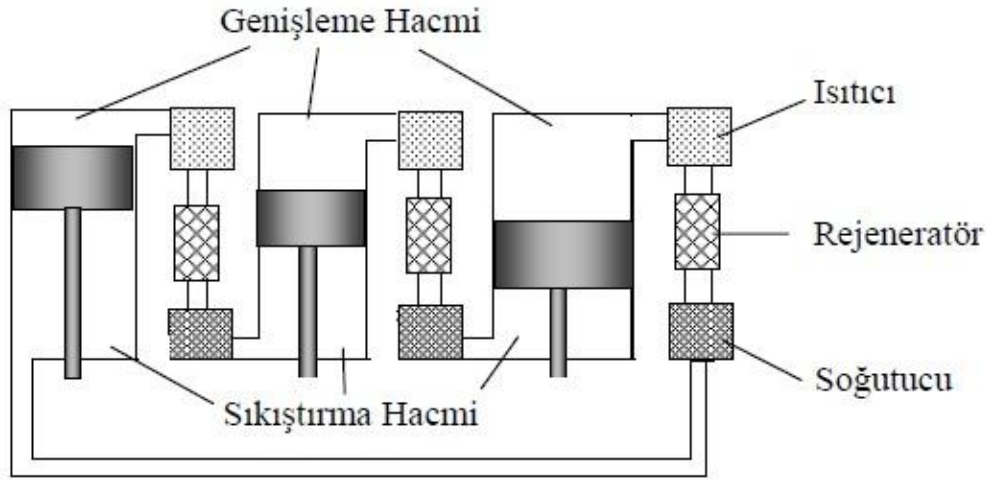
Şekil 2.4 Gama tipi bir Stirling motoru (Aksoy 2011).

2.3.2 Çift Etkili Stirling Motorları

Bu motor ilk olarak 1853 yılında Fransız Franchot tarafından keşfedilmiş olup 1885 yılında Babcock tarafından ilk çift etkili Stirling motoru yapılmıştır (Yücesu 1996).

Motor içindeki mevcut basıncın, pistonun her iki yönüne etki etmesi sonucunda bu tip motorlar çift etkili Stirling motoru olarak adlandırılmıştır (Akhan 2007). Bu tip motorların tek etkili Stirling motorlarına göre en büyük avantajı ise parça sayısının oldukça az olmasıdır. (Erol 2009). Bu nedenle hareket halinde olan elemanların kinematikini basitleştirerek üretim maliyetlerini de düşürmektedir (Walker 1980).

Siemens'in yapmış olduğu dört silindirli eğik düzlem plaka hareketli çift etkili Stirling motoru Philips ve Ford firmaları tarafından otomobil motoru olarak kullanılmıştır (Demiralp 2000). Şekil 2.5'te Siemens'in çift etkili Stirling motoru görülmektedir.



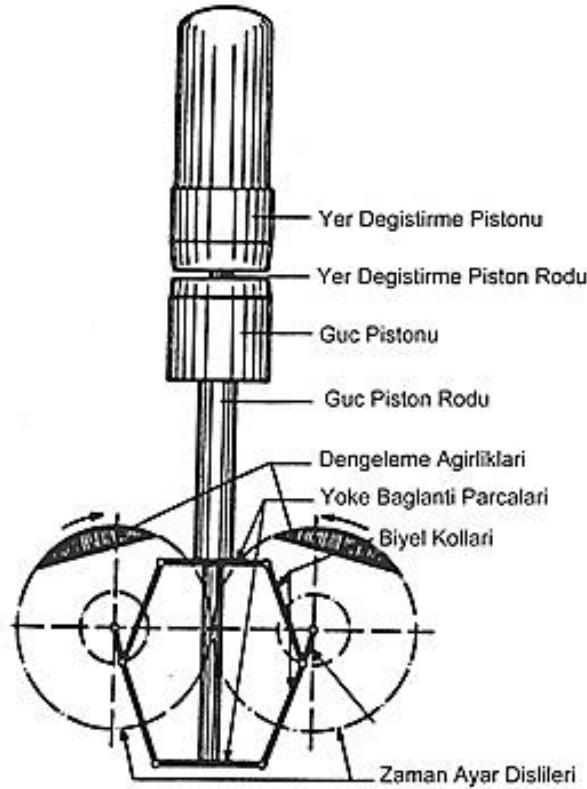
Şekil 2.5 Siemens'in çift etkili Stirling motoru (Akhan 2007).

2.3.3 Hareket İletim Mekanizmalarına Göre Stirling motorları

2.3.3.1 Rhombic (Altı Kenar) Hareket İletim Mekanizması

Rhombic hareket iletim mekanizması 1953 yılında Meijer tarafından icat edilerek Stirling motorlarında kullanılmaya başlanmıştır (Shendage *et al.* 2011).

Rhombic hareket mekanizması yer değıştirme pistonu, güç pistonu, bağlantı elemanları, yer değıştirme pistonuna ait rodu ve birbirleriyle ters yönde hareket eden dişlilerden oluşmaktadır (Aksoy 2011). Bu mekanizmada sisteme gelen yanal kuvvetler karşılıklı olarak dengelendiğı için güç pistonu ve yer değıştirme silindiri ile güç pistonu rodu arasında sürtünme direnci azdır. Bu sayede sistemdeki sürtünen parçalardaki aşınma miktarı da en aza inmektedir (Karabulut *et al.* 2000). Şekil 2.10’da Rhombic hareket mekanizmasının şematik resmi görölmektedir.

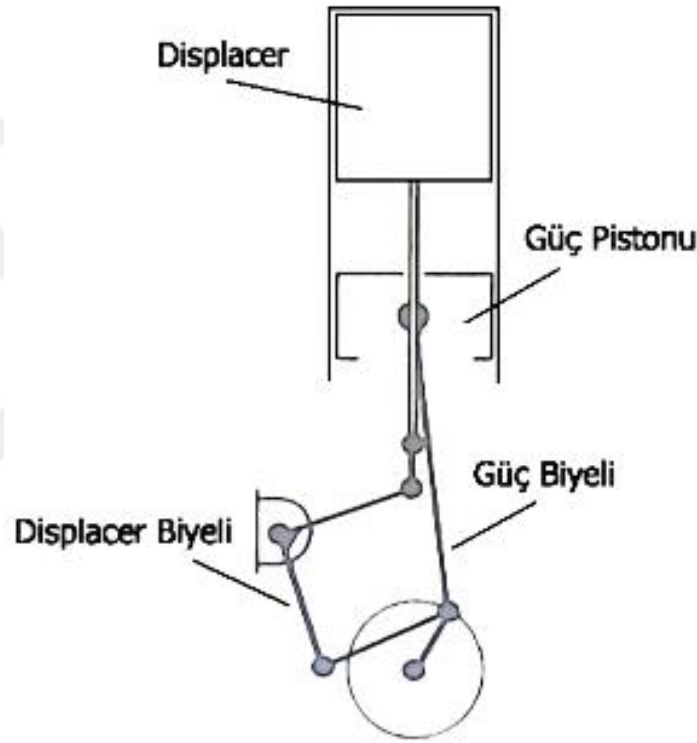


Şekil 2.6 Rhombic hareket mekanizmasının şematik gösterimi (Özgören 2004).

2.3.3.2 Krank-Biyel Hareket İletim Mekanizması

Krank-Biyel hareket iletim mekanizması yapımı oldukça basittir ve genellikle küçük boyutlardaki Stirling motorlarında tercih edilir. Motor boyutu büyüdükçe mekanizma da büyüyeceğı için ciddi bir ağırlık oluşturmaktadır. Bu yüzden de büyük ebatlı Stirling motorlarında kullanışlı değildir (Erol 2009).

Krank-Biyel mekanizmasında krank mili haznesi basıncının artması motordan elde edilecek çıkış gücünün azalmasına sebep olur. Bu yüzden krank mili haznesi içindeki basıncın minimum değerde olması gerekmektedir (Aksoy 2011). Bu mekanizmada güç pistonu, hareket aldığı salınım yapan bir biyel mekanizmasına bağlıdır. Bu da yanall yönde sürtünme kuvvetlerini artırmaktadır (Özgören 2004). Şekil 2.7’de Krank-Biyel hareket iletim mekanizmasına sahip bir Stirling motorunun şematik görünümü verilmiştir.

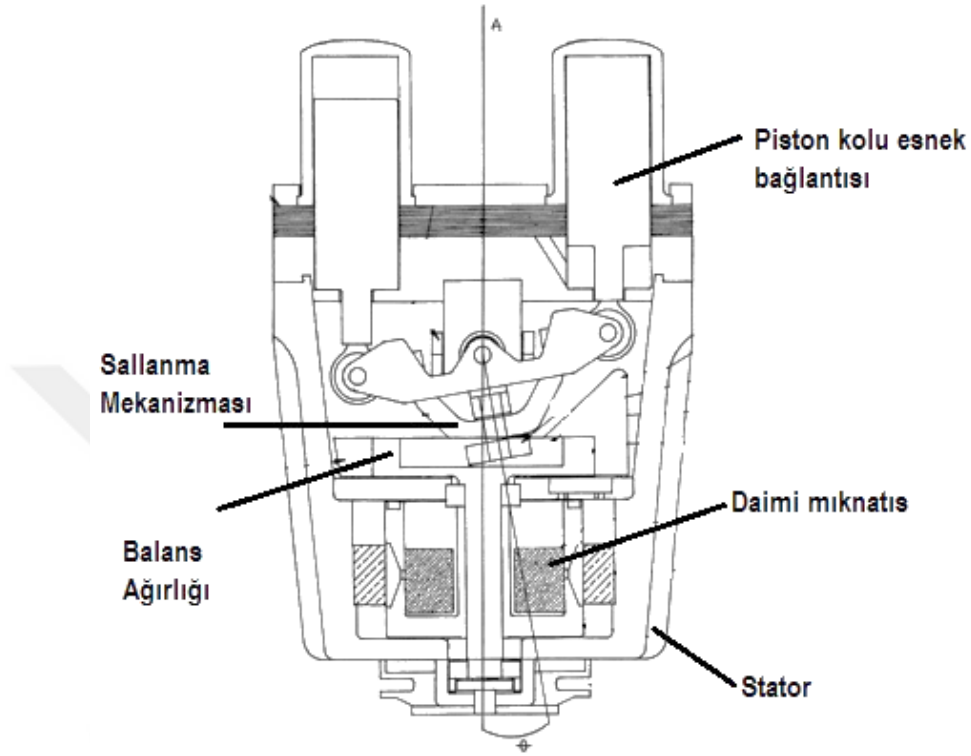


Şekil 2.7 Krank-Biyel hareket mekanizmalı bir Stirling motorunun şematik olarak gösterimi (Erol 2011).

2.3.3.3 Sallanan Sürücü (Wobble Yoke) Hareket İletim Mekanizması

Sallanan sürücülü (Wobble Yoke) hareket iletim mekanizmasında yanyana yerleştirilmiş iki piston, külbütör adı verilen bir mekanizma ile birbirine bağlanmıştır. Bu mekanizma genellikle içten yanmalı motorlar ve kompresörlerde kullanılır (Aksoy 2011).

Sallanan sürücü mekanizmasının en büyük avantajı üretim maliyetinin düşük olmasıdır (Erol 2011). Şekil 2.8’de Sallanan sürücü (Wobble Yoke) mekanizması görülmektedir.

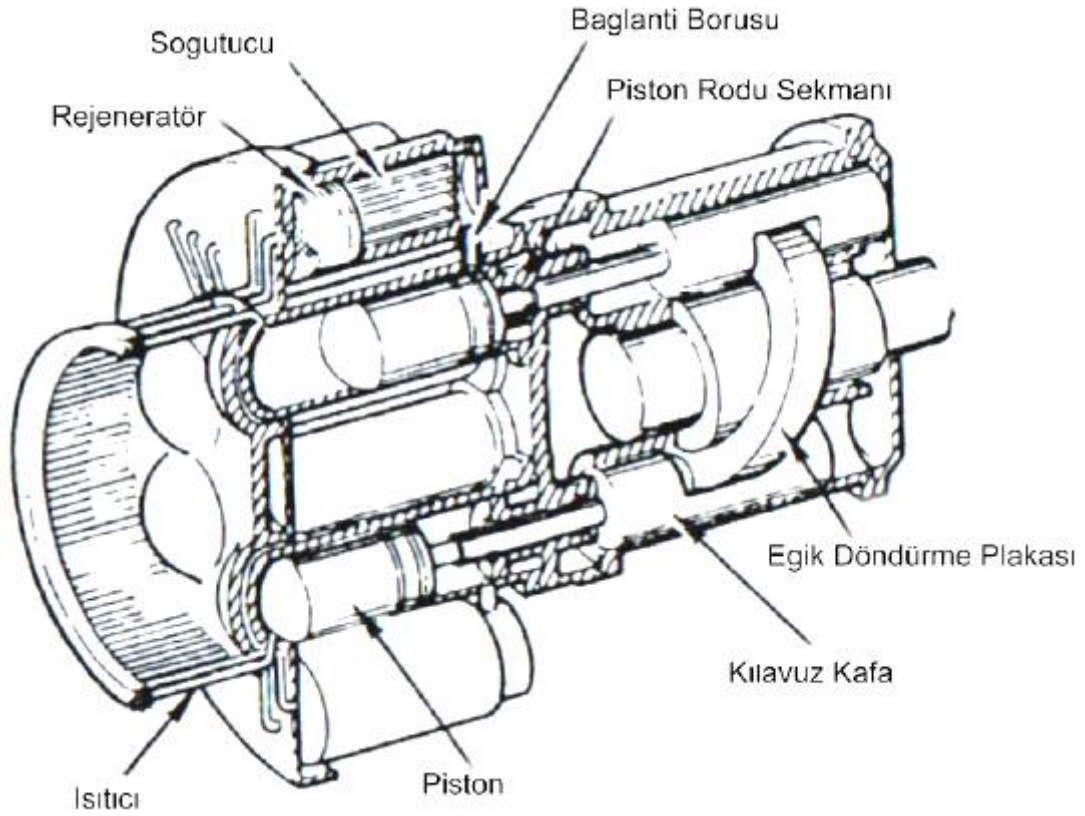


Şekil 2.8 Sallanan sürücü (Wobble Yoke) hareket mekanizmasının şematik olarak gösterimi (GOOGLE 1997).

2.3.3.4 Eğik Plaka (Swash Plate) Hareket İletim Mekanizması

Bu mekanizma türü çoğunlukla hidrolik pompa ve kompresörlerde kullanılmaktadır. Eğik plaka (Swash Plate) hareket iletim mekanizması çok silindirli motorlarda kullanılmaktadır. Ağırlığı ve mekanizma boyutları diğer motor türlerine göre azdır. Bu sayede yüksek yük istenilen motor türlerinde kullanılabilir (Erol 2011).

Motorun güç kontrolünü sağlamak için Meijer, eğik plaka açılarında değişiklikler yaparak bu konuda bazı çalışmalar yapmıştır (Aksoy 2011). Bu mekanizma 1970’li yıllarda Philips lisansı ile otomobillerde kullanmak amacıyla üretilmiştir (Özgören 2004). Şekil 2.13’de Eğik plaka (Swash Plate) hareket iletim mekanizmasının şematik bir resmi görülmektedir.

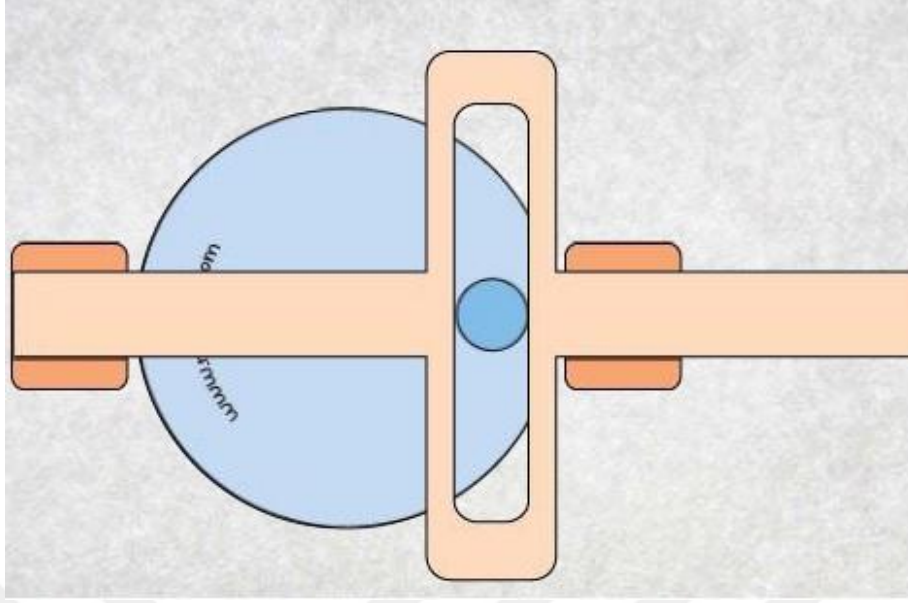


Şekil 2.9 Eğik Plakahareket mekanizmasının şematik olarak gösterimi (Aksoy 2011).

2.3.3.5 Scotch Yoke Hareket İletim Mekanizması

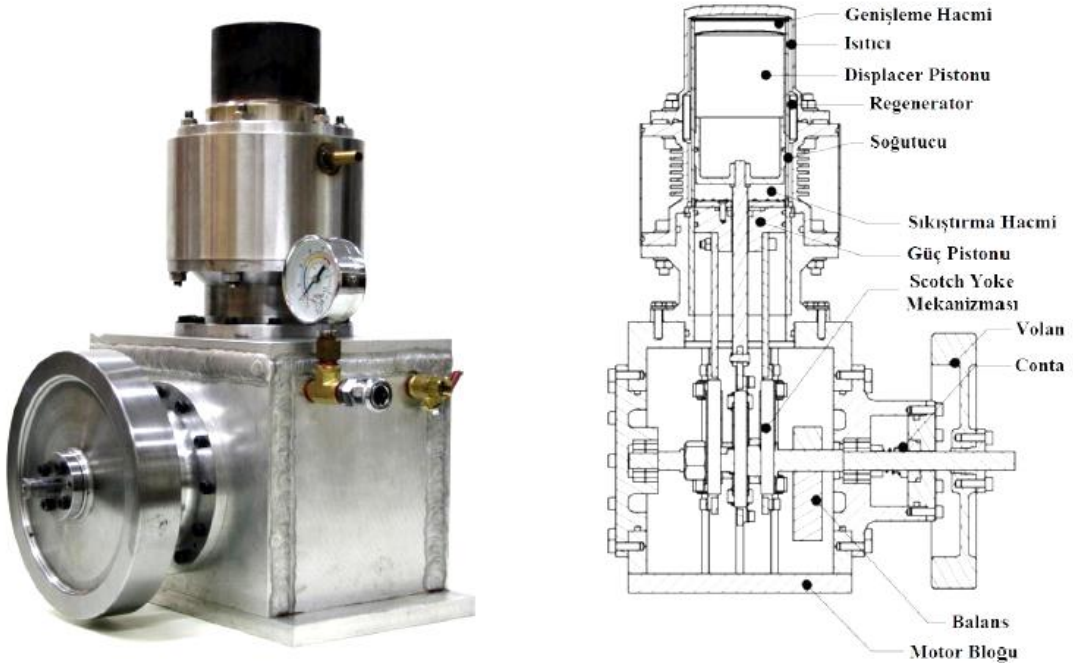
C, Algernon Parsons tarafından tasarlanan bu mekanizma, dönme hareketini doğrusal harekete çevirmektedir (Yanık 2011).

Bu mekanizma çoğunlukla yüksek basınçta çalışan petrol ve gaz boru hatlarının kontrolünde kullanılan supap mekanizmaları için tercih edilir (Erol 2011). Şekil 2.10'da Scotch Yoke hareket mekanizması gösterilmektedir.



Şekil 2.10 ScotchYoke hareket iletim mekanizması (ROBIVES 2016).

Sripakagorn ve Srikam (2011), Scotch Yoke hareket iletim mekanizmasına sahip bir Stirling motoru tasarlamıştır (Sripakagorn and Srikam 2011). Resim 2.5’te bu motorun imal edilmiş hali ve şematik resmi gösterilmektedir.



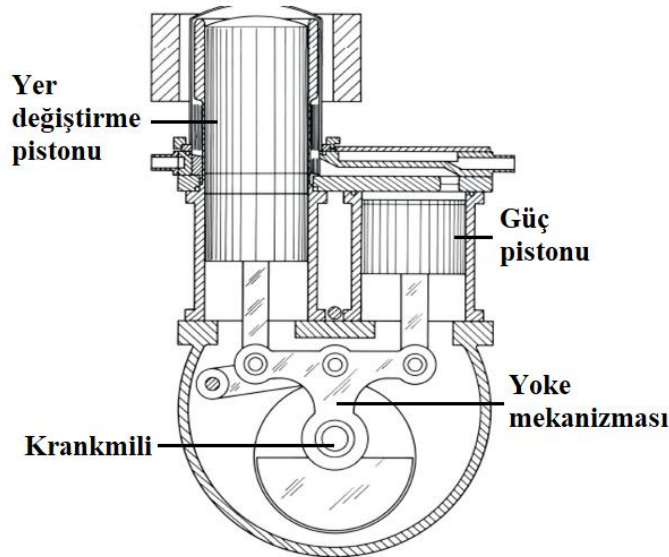
Resim 2.5 Sripakagorn ve Srikam tarafından tasarlanan Scotch Yoke hareket iletim mekanizmalı motor (Sripakagorn and Srikam 2011).

2.3.3.6 Ross Yoke Hareket İletim Mekanizması

Bu mekanizma soyadını da taşıdığı Andy Ross tarafından 1976 yılında tasarlanarak patenti alınmış bir hareket iletim mekanizması türüdür (Erol 2011).

Bu mekanizma türüne etkiyen yanal kuvvetler karşılıklı dengelendiği için piston ve silindir arasındaki yanal sürtünme de ortadan kalkmış olur. Bu sayede mekanizmadaki ve motordaki parçaların aşınması da azaltılmış olur (Ross 1993).

Şekil 2.11’de Ross Yoke tipi hareket iletim mekanizmalı bir Stirling motorunun şematik resmi gösterilmektedir.



Şekil 2.11 Ross Yoke hareket iletim mekanizmalı motorun şematik resmi (Ross 1993).

2.4 Stirling Motorlarının Avantaj ve Dezavantajları

2.4.1 Stirling Motorlarının Avantajları

- Stirling motorları güneş enerjisi, biyodizel, nükleer enerji ve termal enerji gibi her türlü ısı kaynağı ile rahatlıkla çalışabilirler.
- İçten yanmalı motorlara göre parça sayılarının az oluşundan dolayı imal edilebilirliği daha kolaydır.

- Termik verim bakımından da içten yanmalı motorlara göre daha iyidir. (Aksoy 2011).
- Stirling motorları dıştan ısı verme ile çalıştıkları için motor bloğu içerisindeki motor parçaları bu ısıdan etkilenmemektedir (Demiralp 2000).
- Yanma dışarıdan olduğu için atmosfere karbonmonoksit ve azotoksit gibi zararlı gaz salınımı da içten yanmalı motorlara göre oldukça azdır.
- Bu motorlar kullanım alanlarına göre istenilen büyüklükte ve küçüklükte imal edilebilirler (Özgören 2004).
- Stirling motoru her bir motor hızında bir çevrim tamamladığından dolayı düzgün bir tork çıkışı elde edilmektedir. Bu yüzden de motor daha az bir titreşimle çalışır (Laka 2011).
- Bu motorlarda ateşleme sistemi, supap ve enjeksiyon sistemi gibi bakım yapılması gereken yardımcı elemanlar olmadığı için hem ekonomik hem de daha az bakım gerektirmektedir (Uğurlu 2014).
- Yağlama yağı sistemde soğutucu bir etki yaratmadığından ısı kaybı yaşanmamaktadır. Ayrıca çok az yağ gereksinimi duyulmaktadır (Benvenuto and Filippo 1992).

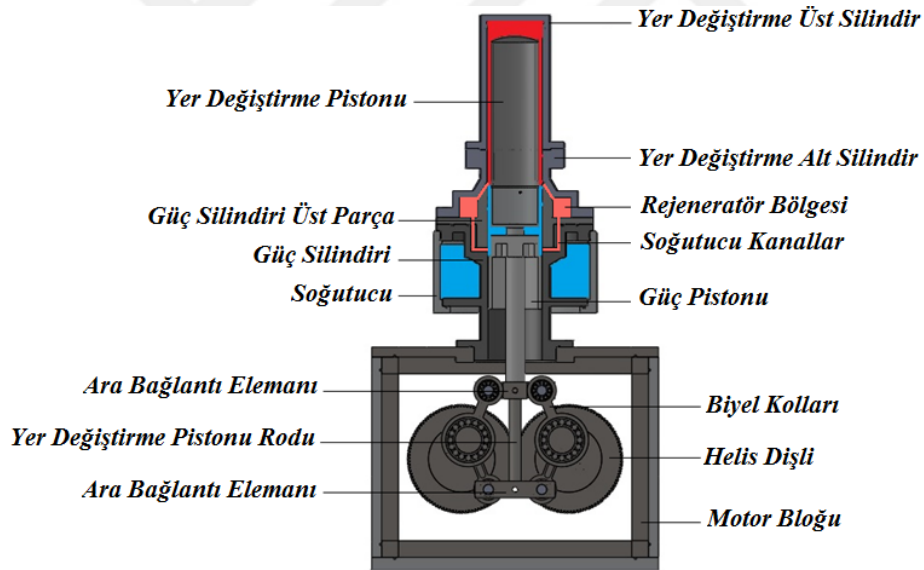
2.4.2 Stirling Motorlarının Dezavantajları

- Bu motorlar aynı güce sahip bir içten yanmalı motorla karşılaştırıldığında daha büyük bir boyutta ve kütlede olmak zorundadır (Yücesu 1996).
- Isıtma ve soğutmadaki termik ataletler nedeniyle motorun hızlanma ve yavaşlamasında gecikme meydana gelmektedir.
- Krank, silindir ve piston gibi hareketli parçalarında sızdırmazlık sorunu yaşanmaktadır (Uğurlu 2014).

3. MATERYAL ve METOT

3.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan Motorun Temel Parçaları

Rhombic hareket mekanizmalı Stirling motoru kaviti, yer değiştirme alt silindiri ve pistonu, güç silindiri ve pistonu, soğutucu, motor bloğu gövdesi, motor bloğu kapakları, krank mili yatakları, krank milleri, dişliler, biyel kolları, ara bağlantı elemanları, sızdırmazlık elemanı ve volandan oluşmaktadır. Deneylerde kullanılan motorun tasarımı, temel parçalarının ve deney düzeneğinin imalatı “113M192” numaralı ve “Rejeneratörlü Beta Tipi Rhombic Hareket Mekanizmalı Bir Stirling Motorunun Performans Testleri” isimli TÜBİTAK projesi ile gerçekleştirilmiştir. 113M192 numaralı TUBİTAK projesinden imal edilen motorun şematik resmi Şekil 3.1’de görülmektedir (Aksoy *et al.* 2016).



Şekil 3.1 Stirling motorunun temel parçalarının şematik görünümü (Aksoy *et al.* 2016).

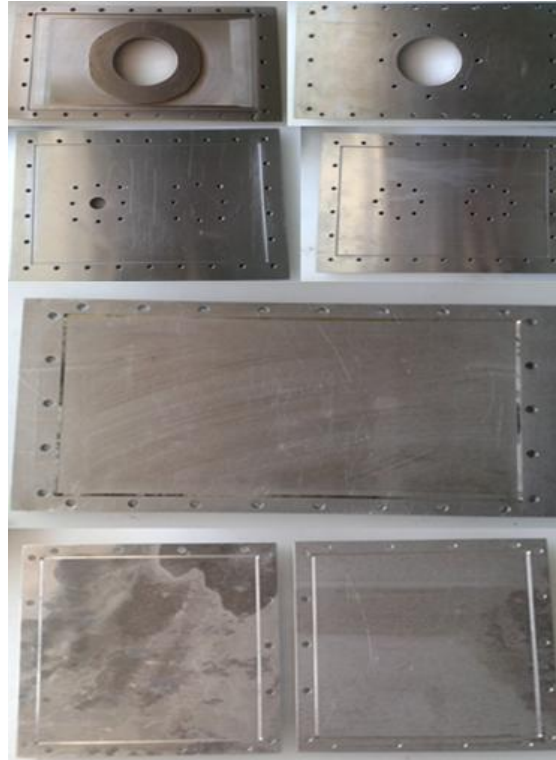
3.1.1 Motor Bloğu

Motor bloğu gövdesi Resim 3.1’de görülmektedir. Motor bloğu gövdesi ve yan kapaklardan oluşmaktadır. Motor bloğu ana gövdesi için 25x25 mm kalınlığındaki Ç1040 malzemeler kaynakla birleştirilmiş ve bağlantı yüzeyleri hassas bir şekilde taşlanmıştır (Aksoy *et al.* 2016).



Resim 3.1 Motor bloğu gövdesi (Aksoy *et al.* 2016).

Resim 3.2’de motor bloğu kapakları görülmektedir. Rhombic hareket mekanizmasını ve motorun üst parçalarının bağlantısının yapıldığı üst ve ana kapaklar Ç1040 malzemedan, yan ve alt kapaklar ise alüminyum 5050 malzemedan imal edilmiştir. Kapak yüzeyleri çalışma maddesi kaçaklarını engellemek amacı ile hassas bir şekilde işlenmiş ve motor bloğu ana gövdesine temas eden kapak yüzeylerine O-ring kanalı açılmıştır (Aksoy *et al.* 2016).



Resim 3.2 Motor bloğu kapakları (Aksoy *et al.* 2016).

3.1.2 Krank Mili Ana Yatakları

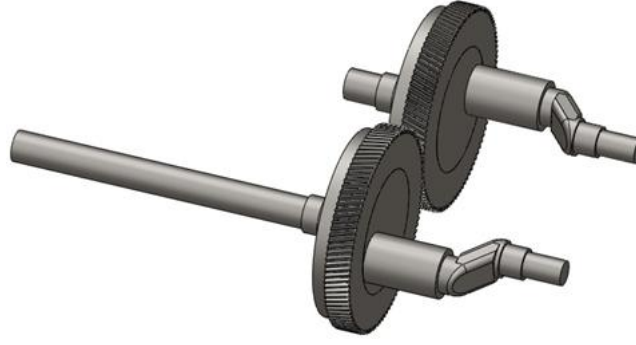
Resim 3.3'te krank mili ana yatakları görülmektedir. Krank milinin motor bloğu ana kapaklarına dört adet cıvata ile bağlantısını sağlayan krank mili ana yatakları, Ç1040 malzemeden hassas bir şekilde imal edilmiştir. Krank mili ana yatakları üzerine sızdırmazlığı sağlamak amacı ile O-ring kanalları açılmıştır (Aksoy *et al.* 2016).



Resim 3.3 Krank mili ana yatakları (Aksoy *et al.* 2016).

3.1.3 Krank Milleri ve Dişliler

Krank milleri ve helisel dişliler Şekil 3.2'de görülmektedir. Rhombic hareket mekanizmasında helisel dişliler, eksenel gezintiyi ve millerdeki eğilme momentlerini azaltmak için çift taraftan rulmanlar ile yataklanan krank milleri üzerine yerleştirilmiştir. Krank mili ve helisel dişliler sırası ile ıslah çeliği ve sementasyon çeliğinden hassas bir şekilde imal edilmiştir. Helisel dişliler 52 Rockwell C derecesinde sertleştirilmiş ve cıvata yardımıyla krank mili üzerine bağlanmıştır (Aksoy *et al.* 2016).



Şekil 3.2 Krank mili ve helisel dişliler (Aksoy *et al.* 2016).

3.1.4 Rhombic Biyel Kolları ve Ara Bağlantı Elemanları

Rhombic hareket iletim mekanizmasında iki adet ara bağlantı elemanları Ç1040 malzemeden, dört adet rhombic biyel kolları ise alüminyum 7000 serisi malzemeden imal edilmiştir. Rhombic biyel kolları krank mili ana muylularına rulmanlar ile yataklandırılmıştır (Aksoy *et al.* 2016).



Resim 3.4 Rhombic biyel kolları ve ara bağlantı elemanları (Aksoy *et al.* 2016).

3.1.5 Yer Değiştirme Pistonu Rodu

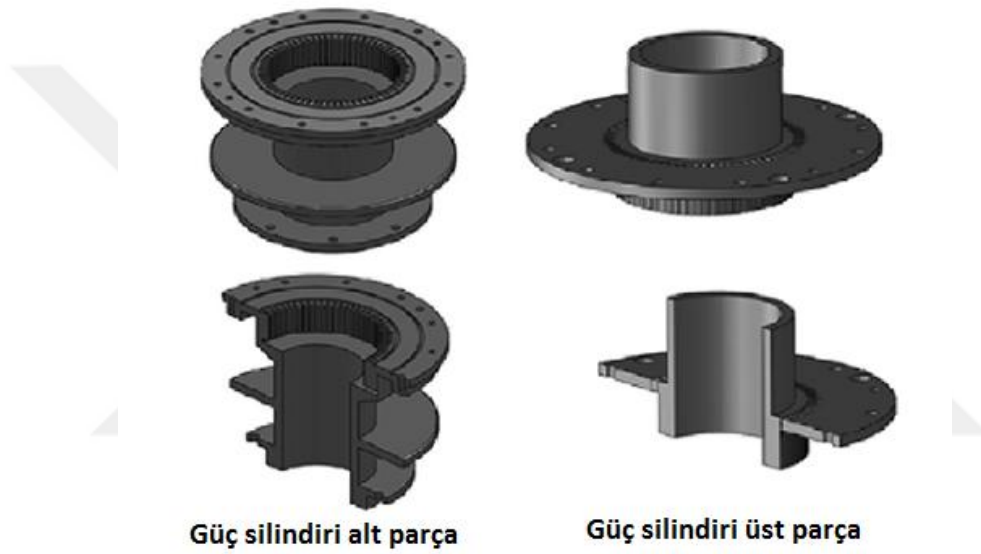
Yer değiştirme pistonu rodı Şekil 3.3’de görülmektedir. Rhombic ara bağlantı elemanı ile yer değiştirme pistonu arasında hareket iletimini sağlayan yer değiştirme pistonu rodı civa çeliğinden imal edilmiştir (Aksoy *et al.* 2016).



Şekil 3.3 Yer değiştirme pistonu rodı (Aksoy *et al.* 2016).

3.1.6 Güç Silindiri ve Güç Silindiri Üst Parçası

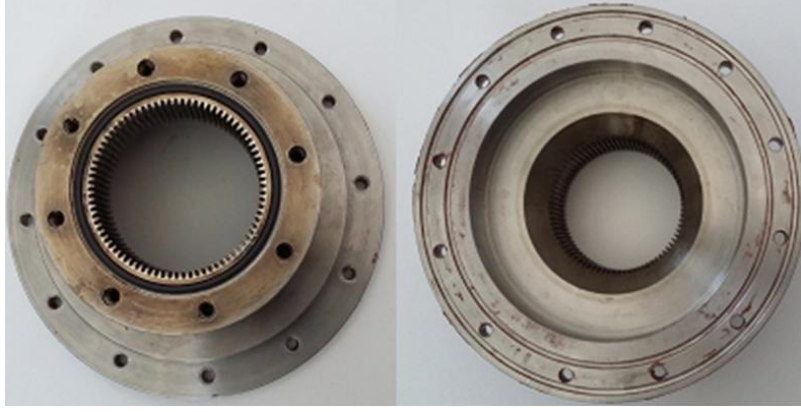
Güç silindiri alt ve üst kısım olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır. Güç silindiri alt ve üst parçaları 8620 sement çeliğinden imal edilmiş ve iç yüzeyleri krom ile kaplanmıştır. Güç silindiri alt ve üst parça içerisine 3 mm genişliğinde 8 mm boyunda ve 45 mm derinliğinde 70 adet soğutma kanalı açılmıştır. Soğutma performansını geliştirmek ve ölü hacmi azaltmak amacı ile kanallar içerisine bakır çubuk malzemeler yerleştirilmiştir (Aksoy *et al.* 2016).



Şekil 3.4 Güç silindiri alt ve üst parçası (Aksoy *et al.* 2016).

3.1.7 Yer Değiştirme Alt Silindir

Yer değiştirme alt silindir ASTM 304 çelik malzemeden hassas bir şekilde imal edilmiştir. Isı transfer yüzey alanını artırmak amacı ile yer değiştirme alt silindir içerisine 2 mm genişliğinde 3 mm derinliğinde 80 adet kanal açılmıştır. Yer değiştirme alt silindiri kavitiye 12 civata ile bağlanmıştır. Güç silindiri üst parça ve yer değiştirme alt silindiri arasına rejeneratör malzemesi yerleştirilebilmektedir (Aksoy *et al.* 2016).



Resim 3.5 Yer değiştirme alt silindiri (Aksoy *et al.* 2016).

3.2 İmalatı Yapılan Motor Parçaları

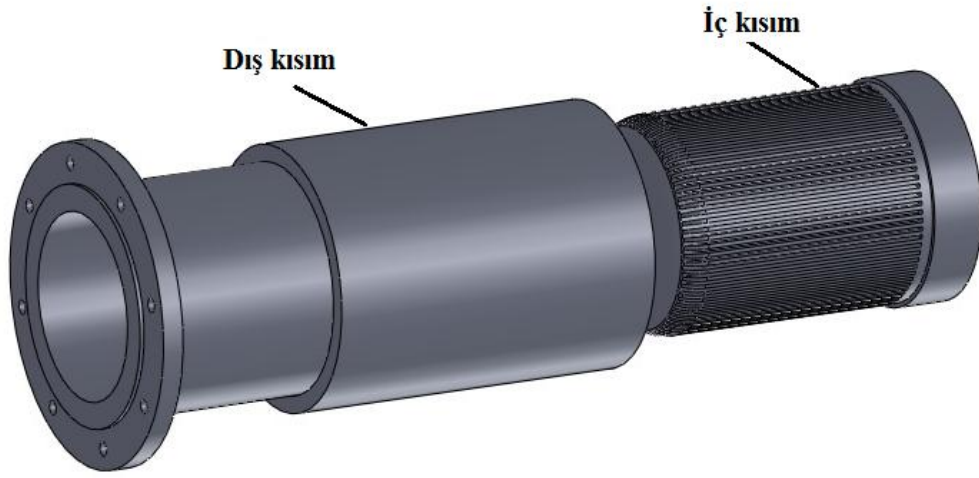
Beta tipi rhombic hareket mekanizmalı bir Stirling motorunda ısı kaynağı olarak halojen lamba kullanabilmek için kaviti ve yer değiştirme pistonu imalatı gerçekleştirilmiştir. Resim 3.6’da deneylerde kullanılan motor görülmektedir.



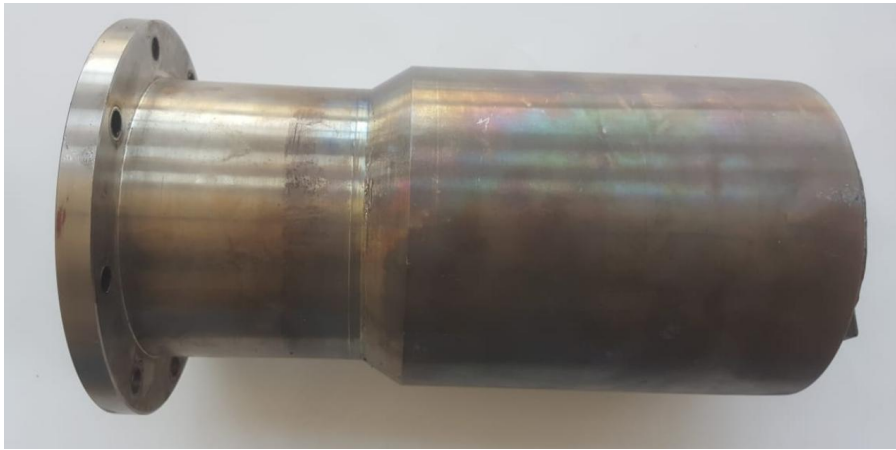
Resim 3.6 Stirling motoru.

3.2.1 Kaviti

Kaviti yer değiştirme alt silindirinun üst kısmına bağlanmaktadır. Kaviti iki parçalı olarak ASTM 304 çelik malzemedenden imal edilmiştir. Kavitinin iç kısmına halojen lamba yerleştirilmektedir. Kavitinin iç kısmından çalışma maddesine ısı geçişini artırmak amacı ile dış yüzeyine 2 mm genişliğinde ve 3,5 mm derinliğinde 80 adet kanallar açılmıştır. Kaviti iç kısmı ve dış kısmı birbirine kaynak ile birleştirilmiştir. Kavitinin şematik görünümü ve resmi sırası ile Şekil 3.5 ve Resim 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.5 Kavitinin şematik görünümü.

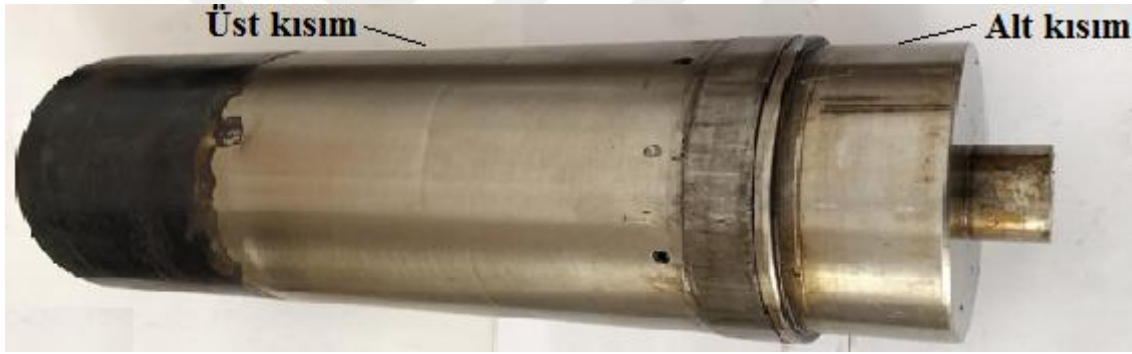


Resim 3.7 Kaviti.

3.2.2 Yer Değiştirme Pistonu

Yer değiştirme pistonu üst ve alt olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Yer değiştirme pistonu üst kısmı ASTM 304 malzemeden 1 mm et kalınlığında imal edilmiştir. Yer değiştirme pistonu ve silindiri arasında 0,7 mm çalışma boşluğu bırakılmıştır. Yer değiştirme pistonunun özellikle yüksek motor hızlarında yer değiştirme silindire sürtünmesini azaltmak için yer değiştirme pistonu üst kısmı kısaltılmıştır.

Yer değiştirme pistonu alt kısmı ise 7000 serisi alüminyum malzemeden imal edilmiş ve üzerine sızdırmazlığı sağlamak amacı ile sferro malzemeden segman yerleştirilmiştir. Yer değiştirme pistonu üst ve alt kısımları Resim 3.8’de görülmektedir.



Resim 3.8 Yer değiştirme pistonu.

3.3 Test Düzeneği

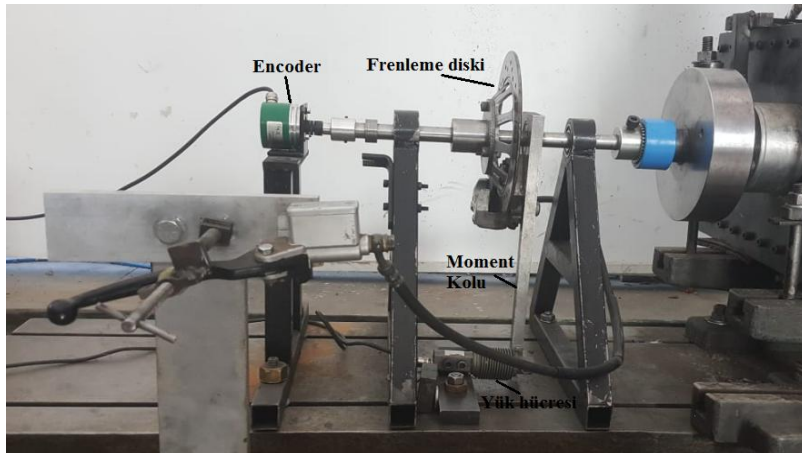
Kaviti ve yer değiştirme pistonu üst kısmının imalatı gerçekleştirildikten sonra montajı yapılmış ve mekanik problemler giderildikten sonra deneyler yapılmıştır. Deney düzeneği prony tip dinamometre, enkoder, yük hücresi, infrared termometre, termokupl ve veri kayıt yazılım programından oluşmaktadır. Deney düzeneği Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Stirling Motor Laboratuvarına kurulmuştur. Resim 3.9’da test düzeneği görülmektedir.



Resim 3.9 Test düzeneği.

3.3.1 Prony Tip Dinamometre

Resim 3.10’da görülen prony tip bir dinamometre kullanılarak motor momenti ölçülmüştür. Dinamometre frenleme diski, hidrolik frenleme tertibatı, yük hücresi ve moment kolundan oluşmaktadır (Aksoy *et al.* 2016).



Resim 3.10 Prony tip dinamometre (Aksoy *et al.* 2016).

3.3.2 Enkoder

Resim 3.11’de enkoder görülmektedir. Deney düzeneğinde 0-360 derece aralığında bilgisayara 5000 veri gönderebilen LİKA marka bir enkoder kullanılmıştır (Aksoy *et al.* 2016).



Resim 3.11 Enkoder (Aksoy *et al.* 2016).

3.3.3 Yük Hücresi (Load-Cell)

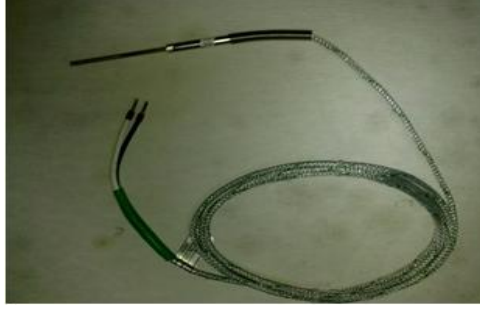
Resim 3.12’de 0-20 kg aralığında ölçüm yapabilen ESİT marka yük hücresi görülmektedir (Aksoy *et al.* 2016).



Resim 3.12 Yük hücresi (Aksoy *et al.* 2016).

3.3.4 Termokupl

Resim 3.13’de 1000 °C sıcaklığa kadar ölçüm yapabilen Elimko marka termokupl görülmektedir. Motorun sıcak ve soğuk bölgelerinin sıcaklıkların veri yazılım programına aktarılmasında kullanılmaktadır (Aksoy *et al.* 2016).



Resim 3.13 Termokupl (Aksoy *et al.* 2016).

3.3.5 Infrared Termometre

TFA ST-490 marka, 60-1000 °C arasında $\pm\%2$ hassasiyetinde ölçüm yapabilen bir infrared termometre kullanılmıştır. İnfrared termometre Resim 3.14’de görülmektedir (Aksoy *et al.* 2016).



Resim 3.14 İnfrared termometre (Aksoy *et al.* 2016).

3.3.6 Dijital manometre

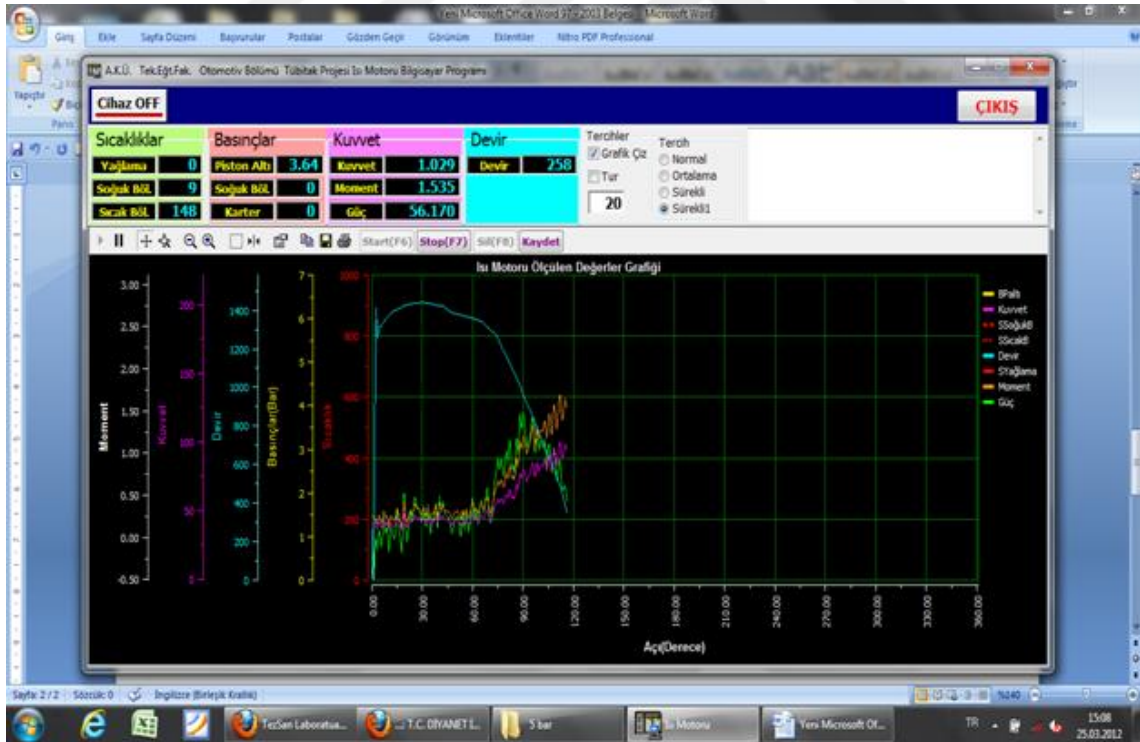
Resim 3.15’te motor bloğuna uygulanan şarj basıncını tespit edilmesinde kullanılan dijital basınç göstergesi görülmektedir (Aksoy *et al.* 2016).



Resim 3.15 Dijital manometre (Aksoy *et al.* 2016).

3.3.7 Veri Kayıt Yazılımı

Motor performans yazılımı ara yüzü Resim 3.16’da görülmektedir. Motor performans yazılımı ile motor hızına bağlı olarak motor gücü, motor momenti ve sıcaklık verileri bilgisayara aktarılmakta ve anlık olarak görülebilmektedir (Aksoy *et al.* 2016).

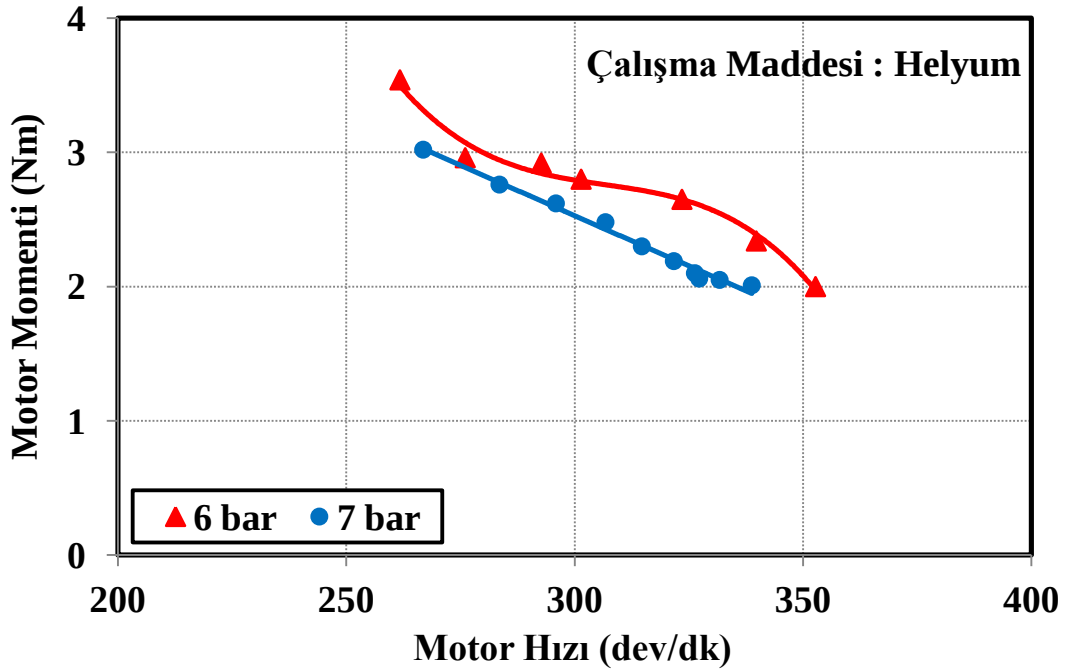


Resim 3.16 Motor performans yazılımı arayüzü (Aksoy *et al.* 2016).

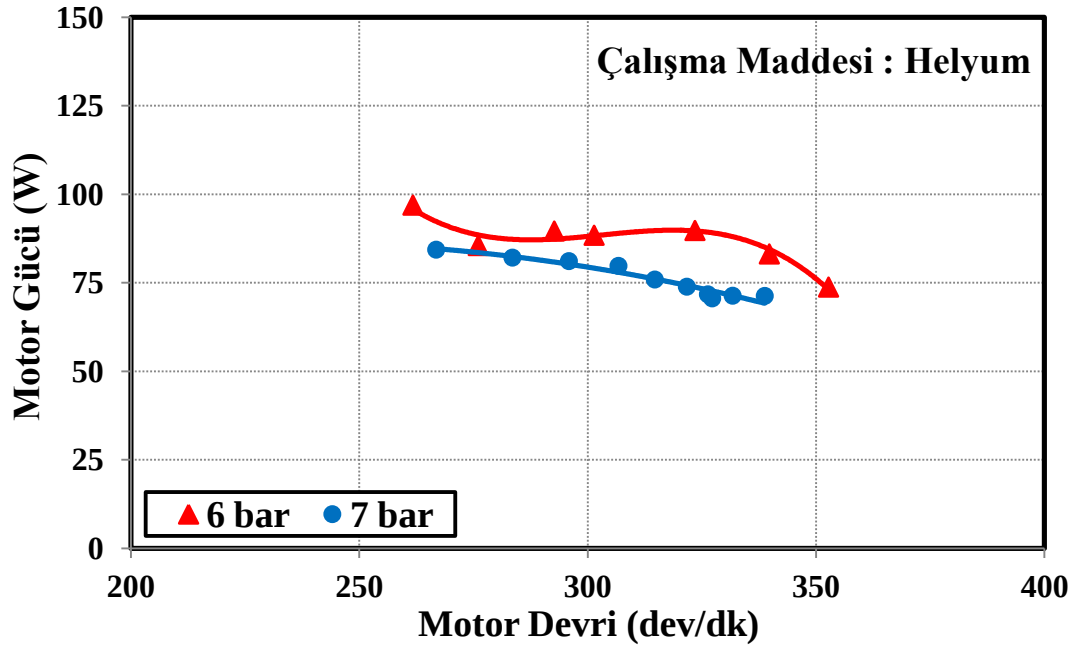
4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1 Halojen Lamba İle Yapılan Deneyler

İmalat ve montaj süreçlerinden sonra motorun ihtiyacı olan ısı enerjisi halojen lamba ile sağlanmıştır. Deneyler 27 ± 2 °C soğuk uç ve 450 ± 10 °C sıcak uç sıcaklığında çalışma maddesi olarak helyum gazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Maksimum motor momenti ve gücü 6 bar şarj basıncı ve 261 dev/dk motor hızında sırasıyla 3,54 Nm ve 96,9 W olarak elde edilmiştir. Motor hızına bağlı olarak sırasıyla motor momenti ve motor gücü değişimleri Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir. Motor momenti, uzun ısıtma ve soğutma zamanlarından dolayı düşük motor hızlarında yüksektir. Motor hızlandıkça ısıtma ve soğutma zamanları kısalır, dolayısıyla motor momenti azalır. Motor gücü ise, motor momenti ve motor hızına bağlı olarak değişmektedir. Artan motor hızına rağmen azalan motor momenti, belirli bir motor hızından sonra motor gücünün azalmasına sebep olur.



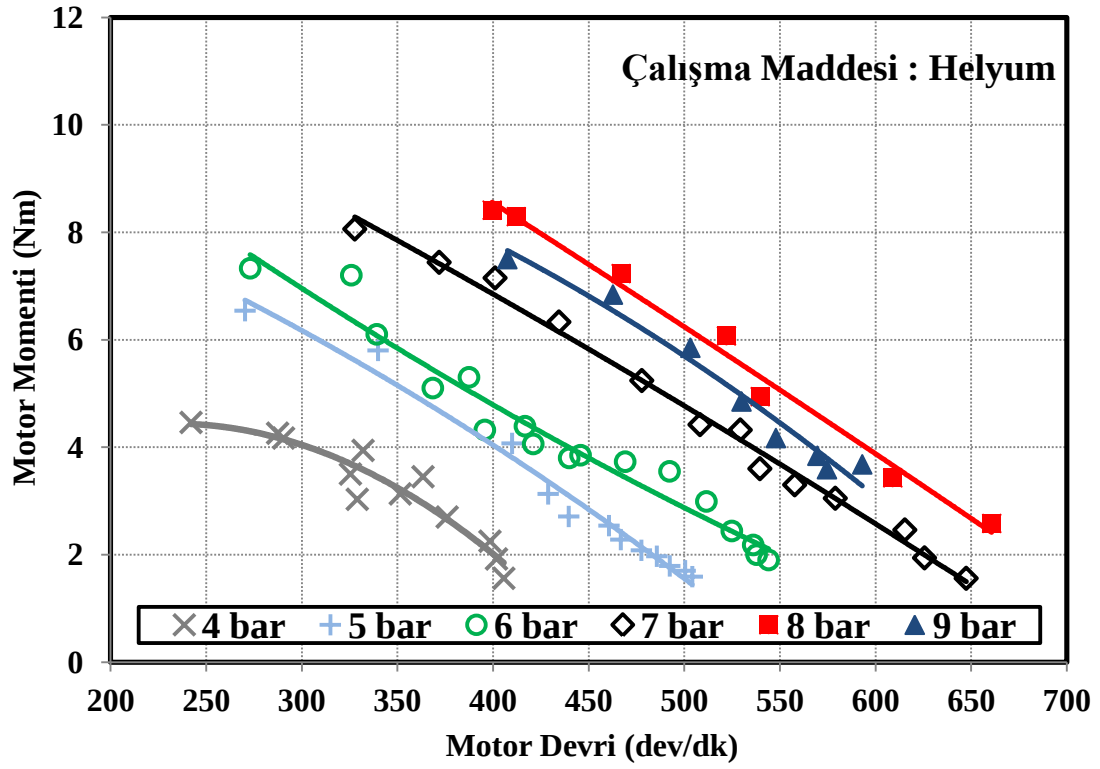
Şekil 4.1 Motor hızına bağlı olarak motor momentinin değişimi.



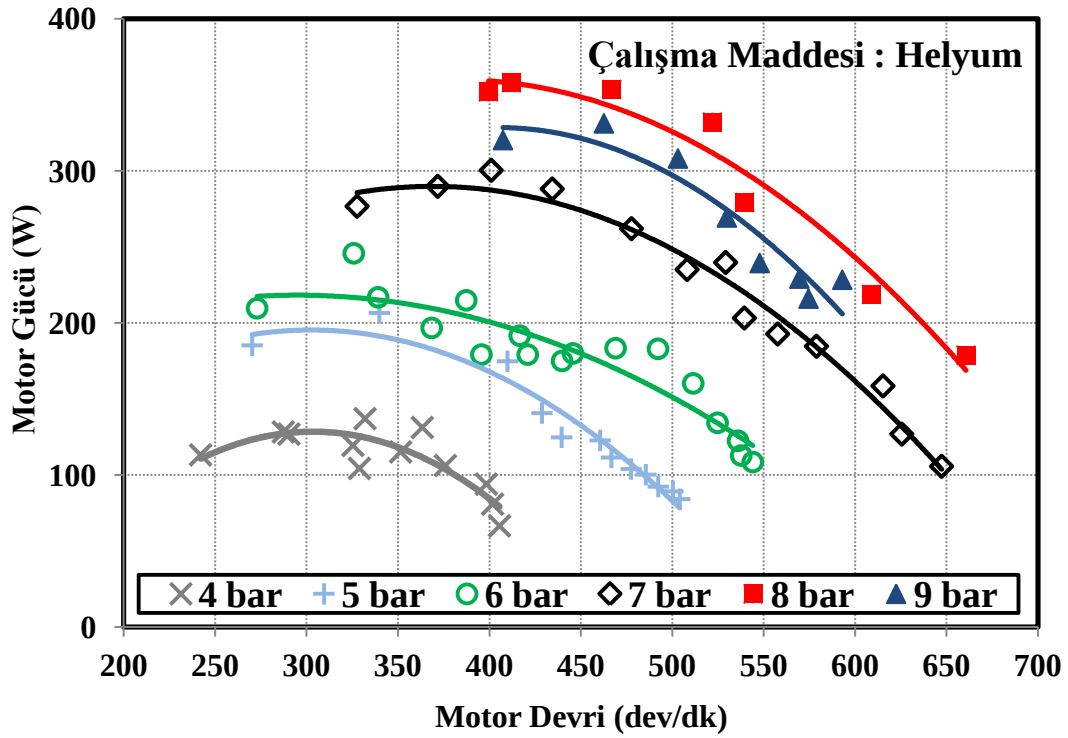
Şekil 4.2 Motor hızına bağlı olarak motor gücünün değişimi.

4.2 LPG Yakıtlı Isıtıcı İle Yapılan Deneyler

Deneyler, LPG yakıtlı bir ısıtıcı ile 27 ± 2 °C soğuk uç ve 600 ± 10 °C sıcak uç sıcaklığında çalışma maddesi olarak helyum gazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Maksimum motor performansı 8 bar şarj basıncında elde edilmiştir. Maksimum motor momenti ve gücü sırasıyla 399 dev/dk motor hızında 8,41 Nm ve 412 dev/dk motor hızında 357,98 W olarak ölçülmüştür. Motor hızına bağlı olarak sırasıyla motor momenti ve motor gücü değişimleri Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te verilmiştir. Motor momenti, düşük motor hızlarında ısıtma ve soğutmaya gerekli süre ayrılabilmesi nedeniyle daha yüksektir. Motor hızı arttıkça ısıtma ve soğutma süreleri kısalmış, dolayısıyla motor momenti azalır. Motor gücü ise, motor momenti ve motor hızına bağlı olarak değişmektedir. Artan motor hızına rağmen azalan motor momenti, belirli bir motor hızından sonra motor gücünün azalmasına sebep olur. 8 bar şarj basıncının üzerindeki basınçlarda artan çalışma akışkanı kütlesi ile ısı transferi yetersiz kalmaktadır. Bu yüzden daha yüksek şarj basınçlarında motor performans kötüleşmektedir.



Şekil 4.3 Motor hızına bağlı olarak motor momentinin değişimi.



Şekil 4.4 Motor hızına bağlı olarak motor gücünün değişimi.

5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Günümüzde fosil enerji kaynaklarının rezervlerinin azalması ve çevreye olumsuz etkileri alternatif enerji kaynakları ile çalışabilen enerji dönüşüm sistemlerine taleplerin artmasına yol açmaktadır. Bu enerji dönüşüm sistemlerinden biriside dıştan yanmalı bir ısı makinesi olan ve farklı enerji kaynakları ile çalışabilen Stirling motorlarıdır.

Stirling motorlarında hareket iletimde krank-biyel, sallanan sürücü mekanizması, eğik plaka, Scotch Yoke, Ross Yoke ve Rhombic hareket iletim mekanizması kullanılmaktadır. Genellikle Stirling motorlarında kullanılan Rhombic hareket mekanizması tek taraftan yataklanmakta ve mekanizmayı eğilmeye zorlayan momentler sürtünme dirençlerini artırmaktadır. Bu çalışmada rhombic hareket mekanizmasındaki dişlilerin her biri bir krank mili üzerine yerleştirilmiş ve krank milleri de her iki ucundan rulmanlar aracılığı ile yataklandırılmıştır. Çift yataklı rhombic hareket mekanizması kullanımı ile yataklar ve dişlilerde oluşabilecek sürtünme dirençleri azalmaktadır. Ayrıca yüksek şarj basınçları ve yüksek motor hızlarında yer değiştirme pistonu yan yüzeylerinin yer değiştirme silindiri iç yüzeylerine teması sonucunda oluşan performans kayıplarının azalmasına katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmada, rhombic hareket mekanizmasına sahip beta tipi bir Stirling motorunda ısı enerjisinin çalışma maddesine aktarılmasında kullanılabilecek bir kavitin imalatı gerçekleştirilmiştir. Stirling motorunda kavitin kullanımının motor performansına etkileri farklı şarj basınçlarında çalışma maddesi olarak helyum kullanılarak incelenmiştir. Deneyler iki farklı ısı kaynağı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen bulgular aşağıda belirtilmiştir.

- Deneylerin ilk aşamasında ısı kaynağı olarak 1000 W halojen lamba kullanılmıştır. Halojen lamba kaviti içerisine yerleştirilmiş ve kaviti dış yüzeyi yalıtım malzemesi ile kaplanarak ısı kayıplarının azalması sağlanmıştır. Deneylerin farklı şarj basınçlarında ve farklı sıcak uç sıcaklıklarında gerçekleştirilmesi planlanmıştır. 450 ± 10 °C sıcak uç sıcaklığında deneylere başlanarak, 6 ve 7 bar şarj basıncında motor performans değerleri ölçülmüştür.

Ancak deneyler sırasında kaviti iç yüzey sıcaklığının artması halojen lambanın patlamasına sebep olmuş ve deneylere devam edilememiştir. Bu koşullarda; maksimum motor gücü ve momenti 6 bar şarj basıncında ve 261 dev/dk motor hızında sırası ile 96,9 W ve 3,54 Nm olarak elde edilmiştir.

- Deneylerin ikinci aşamasında ısı kaynağı olarak LPG yakıtlı ısıtıcı kullanılmıştır. Deneyler 600 ± 10 °C sıcak uç sıcaklığında ve 4-9 bar şarj basıncı aralıklarında gerçekleştirilmiştir. Maksimum motor gücü ve momenti 8 bar şarj basıncında sırası ile 412 dev/dk motor hızında 358 W ve 399 dev/dk motor hızında 8,41 Nm olarak elde edilmiştir.

Rhombic hareket mekanizmalı Stirling motorunda halojen lamba ile elde edilen performans değerleri LPG yakıtlı ısıtıcı kullanılarak elde edilen performans değerlerine göre düşüktür. Buna kaviti iç yüzeyinden çalışma maddesine aktarılan enerjinin yetersiz kalmasının sebep olabileceği düşünülmektedir.

Stirling motorlarında farklı kaviti tasarımları ve yüksek ısı iletim katsayısına sahip malzemelerin kullanımı ile ilgili çalışmalar yapılabilir. Ayrıca kavitiden çalışma maddesine olan ısı transferinin artırılması, radyasyon ve taşınım ile olan ısı transferi kayıplarının azaltılması ile motor performansının geliştirilebileceği düşünülmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Akhan, H. (2007). Güneş Enerjili Bir Sıcak Hava Motoru Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Aksoy, F., Çınar, C., Özgören, Y.Ö., Karabulut, H., Bayrakçıken, H., Arslan, M., Eroğlu., H.İ. (2016). Rejeneratörlü Ve Rhombic Hareket Mekanizmalı Bir Stirling Motorunun Tasarımı ve Performans Analizi. Proje No: 113M192, Program Kodu:3501.
- Aksoy, F. (2011). Bir Stirling Motorunda Güneş Enerjisi Uygulaması. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Akyel, E. (2015). Rhombic Hareket Mekanizmalı Bir Stirling Motorunun Tasarımı ve Performans Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Arı, V. (2007). Türkiye Enerji Kaynakları, Enerji Planlaması ve Enerji Stratejileri. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Arık, A. (2016). Yenilenebilir Enerji Politikalarının Sürdürülebilirliği: AB Ülkeleri ve Türkiye Açısından Bir Değerlendirme. Yüksek Lisans Tezi, Ordu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ordu.
- Ayran, K. (2015). Türkiye’de Alternatif Enerji Kaynaklarının Ekonomik Açından İrdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Çankırı.
- Ayhan, E.A. (2009). Enerji Kaynakları, Dünya Enerji Güvenliği ve Orta Asya Jeopolitiği Çerçevesinde Türkiye’nin Enerji Politikaları ve Ekonomik Yansımaları. Yüksek Lisans Tezi, Kafkas Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kars.
- Bean, J.R., Diver, R.B., (1992). The CPG 5 kW Dish-Stirling Development Program. 27th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference Proceedings, 5.221, San Diego, ABD.

- Benvenuto, G., 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 1-9.
- Çetin, Ö., Eytürk, B., Karali, M., Pazarbaşı, M., Sarı, M., Yıldırım, H.O. (2012). Stirling Motor ve Çukur Ayna İle Güneş Takip Sistemi Kullanarak Güneş Enerjisini Mekanik Enerjisine Dönüştürmek. 3. Mekatronik Mühendisliği Öğrenci Kongresi (MeMÖK 2012), Ankara, 25-32.
- Çınar, C., Aksoy, F., Okur, M. (2013). Rhombic Hareket Mekanizmalı Bir Stirling Motorunun Tasarımı, İmalatı ve Performans Testleri. *Gazi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **28**: 795-801.
- Çınar, C., Topgül, T., Yücesu, H.S. (2006). Stirling Çevrimi ile Çalışan Beta Tipi Bir Motorun İmali ve Performans Testleri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **22**: 411-415.
- Demiralp, M. (2000). Gama Tipi Bir Stirling Motorunun Tasarım ve İmalatı. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Demiralp, M. (1994). Güneş Enerjisinin Tarımsal Sulama ve Elektrik Üretiminde Kullanılabilmesi İçin Tasarlanan Serbest Displacerli Bir Stirling Motorunun Çizim ve Prototip Hesapları. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Duan, C., Sun, C., Shu, S., Ding, G., Jing, C. Chang, J. (2015). Similarity Design And Experimental Investigation Of a Beta-Type Stirling Engine With a Rhombic Drive Mechanism. *International Journal of Energy Research*, **39**: 191-201.
- Erol, D. (2011). Stirling Motorlarında Kullanılan Hareket İletim Mekanizmaları. Taşıt Teknolojisi Elektronik Dergisi (TATED), **3**: 51-74.
- Erol, D. (2009). Düşük Sıcaklık Farkıyla Çalışan Bir Stirling Motorunun Tasarımı ve İmalatı. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Karabulut, H., Çınar, C., Aksoy, F., Solmaz, H., Özgören Y.Ö., Arslan, M., Aysal, F.E. (2015). Beta Tipi Rhombic Hareket Mekanizmalı Bir Stirling Motorunun İmalatı ve Testleri. International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES), 2129-2136.

- Karabulut, H., Yücesu, S., Koca, A. (2000). Manufacturing And Testing of a V-Type Stirling Engine. *Turkish Journal of Engineering and Enviromental Sciences*, **24**: 71-76.
- Kurşuncu, B. (2010). Sıvı Pistonlu Stirling Motoru İle Güneş Enerjili Su Pompası Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Laka, S. (2011). Çanaklı Güneş Yansıtıcılarıyla Çalışan Stirling Güç Üretme Sisteminin Termodinamik Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Özgören, Y.Ö. (2005). Stirling Motorunda Termal Bariyer Kaplamanın Motor Performansına Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. *Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-Online Dergisi*, **4**: 122-133.
- Özgören, Y.Ö. (2004). Stirling Motorlarında Isı Kayıplarının Azaltılması İçin Termal Bariyer Kullanımı. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Ross, A. (1993). Making Stirling Engines. Ross Experimental, 68s, England.
- Shendage, D.J., Kedare, S.B., Bapat, S.L. (2011). An Analysis Of Beta Type Stirling Engine With Rhombic Drive Mechanism. *Renewable Energy*, **36**: 289-297.
- Sripakagorn, A., Srikam, C. (2011). Design and Performance Of a Moderate Temperature Difference Stirling Engine. *Renewable Energy*, **36**: 1728-1733.
- Thombare, D.G., Verma, S.K. (2008). Technological development in the Stirling cycle engines. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **12**: 1-38.
- Trukhov, V., Tursunbaev, I.A. (1987). Development and Investigation of a Stirling Engine for an Autonomous Solar Energy units. *Applied Solar Energy*, **23**: 71-75.
- Uçak, S. (2010). Sürdürülebilir Kalkınma Bağlamında Alternatif Enerji ve Enerji Üretimi- Büyüme İlişkisi: Panel Veri Analizi. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kocaeli.

- Üstün, S. (2000). Çift Yer Değiştirme Pistonlu V Tipi Küçük Güçlü Bir Stirling Motorunun Tasarım ve İmalatı. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Uğurlu, Y. (2014). Stirling motorunda gaz hareketlerinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Yanık, Ö. (2011). Konvansiyonel Fırında Hareketli Raf Konstrüksiyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yücesu, H.S. (1996). Küçük Güçlü Güneş Enerjili Bir Stirling Motoru Tasarımı. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Walker, G. (1980). “Stirling Engines”. ClarendonPress, 532s, Oxford.
- Walker, G. (1973). Stirling-Cycle Machines. Clarendon Press, Oxford, University of Calgary.

6.1 İnternet Kaynakları

- 1- <http://www.stirling-fette.de/howdoes.htm> 17.12.2015
- 2- 1997. www.google.ch/patents/US5630351 23.03.2016.
- 3- 2016. http://www.robives.com/blog/scotch_yoke_mechaniism 24.03.2016.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Halil İbrahim EROĞLU
Doğum Yeri ve Tarihi : Kahramanmaraş 10.06.1991
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : 0 542 251 22 89/erogluhalilibrahim@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Seyyid Burhaneddin Anadolu Teknik Lisesi (2005-2009)
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi
Makine Resim ve Konstrüksiyonu Öğretmenliği (2009-2013)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı (2014-2018)
: Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü
İş Güvenliği Anabilim Dalı (2013-2014)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : KÇS Çimento Sanayi, Mekanik Bakım Şefi (2013),

113M192 No'lu TÜBİTAK projesinde bursiyerlik (2014-2016).

Emniyet Genel Müdürlüğü, Özel Harekat Şube Müdürlüğü (2016-)

Yayınları (SCI ve diğer) : Halit KARABULUT, Can ÇINAR, Fatih AKSOY, Hamit SOLMAZ, Yaşar Önder ÖZGÖREN, Muhammed ARSLAN ve Halil İbrahim EROĞLU, Hava Şarjlı Rhombic Hareket Mekanizmalı Bir Stirling Motorunun Performans Testleri, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 12(3), 27-35, 2015.