

RHOMBİC HAREKET MEKANİZMALI BİR STİRLİNG MOTORUNUN TASARIMI, İMALATI VE PERFORMANS TESTLERİ

Can ÇINAR*, Fatih AKSOY, Melih OKUR***

*Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, ANKARA

**Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, AFYON

cancinar@gazi.edu.tr, faksoy@aku.edu.tr, mokur@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 02.07.2012; Kabul/Accepted: 05.09.2013)

ÖZET

Bu çalışmada, rhombic hareket mekanizmalı beta tipi bir Stirling motorunun tasarımı, imalatı ve performans testleri yapılmıştır. Piston yan sürtünme kuvvetlerini azaltmak, daha sessiz ve düşük titreşimli bir çalışma sağlamak amacıyla beta tipi olarak tasarlanan motorda rhombic hareket mekanizması kullanılmıştır. Motor, LPG (sıvılaştırılmış petrol gazı) yakıtlı bir ısıtıcı kullanılarak farklı şarj basınçlarında hava ve helyum gazı ile test edilmiştir. Yer değiştirme silindirin 350 °C ve 450 °C sıcak uç sıcaklıklarında yapılan deneylerde motor hızına bağlı olarak moment ve güç değişimleri incelenmiştir. Motorun maksimum gücü 450 °C sıcak uç sıcaklığı, 2 bar şarj basıncı ve çalışma maddesi olarak helyum ile 575 dev/min motor devrinde 95,77 W ve maksimum moment 410 dev/min motor devrinde 1,98 Nm olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Stirling motoru, rhombic hareket mekanizması, beta tipi motor

DESIGN, MANUFACTURING AND PERFORMANCE TESTS OF A STIRLING ENGINE WITH RHOMBIC DRIVE MECHANISM

ABSTRACT

In this study, a beta type Stirling engine having rhombic drive mechanism was designed, manufactured and tested. Due to the lower side thrust and vibration and more silent operation, rhombic drive mechanism was preferred and the engine was designed as beta type. The tests were conducted at different air and helium charge pressures using a LPG (liquefied petroleum gas) burner. The tests of the engine were conducted at 350 °C and 450 °C hot end temperatures of the displacer cylinder. Speed-torque and speed-power characteristics of the engine were investigated. The maximum power and torque obtained were 95.77 W at 575 rpm speed and 1.98 Nm at 410 rpm speed, respectively, at 450 °C hot-end temperature, 2 bar charge pressure and helium as working fluid.

Key Words: Stirling engine, rhombic drive mechanism, beta type engine

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler için önemli bir gerekliliktir [1,2]. Ülkelerin enerji ihtiyacının sürekli artması ve mevcut kaynakların kısıtlı olması, alternatif enerji kaynaklarını ön plana çıkarmıştır. Bunun yanı sıra, ulusal ve uluslararası hukuki düzenlemeler, enerji üretim, iletim ve tüketiminden kaynaklanan çevresel etkiler enerji kaynağı seçiminde ön plana çıkmaktadır. Bu sebeple, özellikle son yıllarda çevre kirliliğine sebep olan fosil yakıt

kaynaklı enerji üretim sistemleri yerine hem çevresel etkileri daha az hem de yenilenebilirliği sağlanan enerji kaynakları üzerine çalışmalar hız kazanmıştır [2,3].

Güneş, rüzgar, jeotermal, biokütle ve gelgit enerjileri yenilenebilir enerji kaynaklarını oluşturmaktadır. Bu enerji kaynakları arasında güneş enerjisi en önemli potansiyele sahiptir. Türkiye 36° ve 42° enlemleri arasında kuzey yarımkürede yer aldığı için güneş enerji potansiyeli oldukça yüksektir. Türkiye'nin

yıllık güneş enerji potansiyeli 1,3 milyar ton petrole eşittir. Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat, ortalama toplam ışınım şiddeti günlük toplam 3,6 kWh/m²gün olduğu tespit edilmiştir [4].

Dıştan ısı verme ile çalışan, katı, sıvı, gaz her türlü yakıtı, güneş enerjisi ve diğer alternatif enerji kaynaklarını kullanabilen Stirling motorları, işletme masrafları çok düşük ve çevreyi kirletmeyen alternatif bir enerji dönüşüm sistemidir. Özellikle güneş enerjisinden faydalanılarak elektrik üretimine, tarım arazilerinin sulanmasından uzay teknolojisine kadar çok çeşitli alanlarda kullanılabilen Stirling motorları, dışarıdan tahrik edilmek suretiyle soğutma makinesi veya ısı pompası olarak da kullanılabilir. Güneş enerjisi dönüşümünde kullanılan parabolik ayna/Stirling motoru sistemlerinde, helyum ve hidrojen gibi yüksek ısı kapasitesine sahip gazlarla yüksek şarj basınçlarında güneş enerjisinden elektrik enerjisi dönüşüm verimi %30'lara kadar çıkmaktadır [5-8].

Teorik Stirling çevrimi iki sabit hacim ve iki sabit sıcaklık işleminden meydana gelmektedir. Stirling çevrimi kapalı bir çevrimdir ve çevrime ısı harici bir kaynaktan sağlanmaktadır. Teorik Stirling çevriminin verimi Carnot çevrim verimine eşittir [9,10].

İlk olarak 1816 yılında İskoç rahip Robert Stirling tarafından imal edilen Stirling motorları üzerinde günümüze kadar geçen iki yüzyıl içerisinde başta General Motors ve Philips olmak üzere Siemens, Cummins, MAN-MWM gibi firmalar ile NASA, Amerikan Enerji Departmanı ve üniversitelerde birçok araştırmalar yapılmıştır [11-13]. Güçleri birkaç watttan yüzlerce kilowatta kadar değişen yüzlerce farklı modeli imal edilmiştir. Ancak, hali hazırda ısıtıcı, sızdırmazlık ve güç kontrolü gibi problemlere kesin çözüm bulunup seri imal edilecek hale getirilememiştir. Yapılan çalışmalar araştırma seviyesinde kalmış veya sınırlı sayıda üretimden ileriye gidememiştir [5].

Bu çalışmada, rhombic hareket mekanizmalı beta tipi bir Stirling motorunun tasarımı, imalatı ve performans testleri yapılmıştır. LPG yakıtlı bir ısıtıcı kullanılarak yapılan testlerde motor hızı, şarj basıncı, çalışma maddesi ve sıcak uç sıcaklığına bağlı olarak moment ve güç değişimleri elde edilmiştir.

2. DENEY MOTORU (TEST ENGINE)

İmalatı yapılan motor, beta tipi ve rhombic hareket mekanizmalı olarak tasarlanmıştır. Motor boyutlarını küçültmek, sürtünme ve mekanik kayıplardan doğan verim kaybını azaltmak amacıyla motorda krank mili yerine rhombic hareket mekanizması kullanılmıştır.

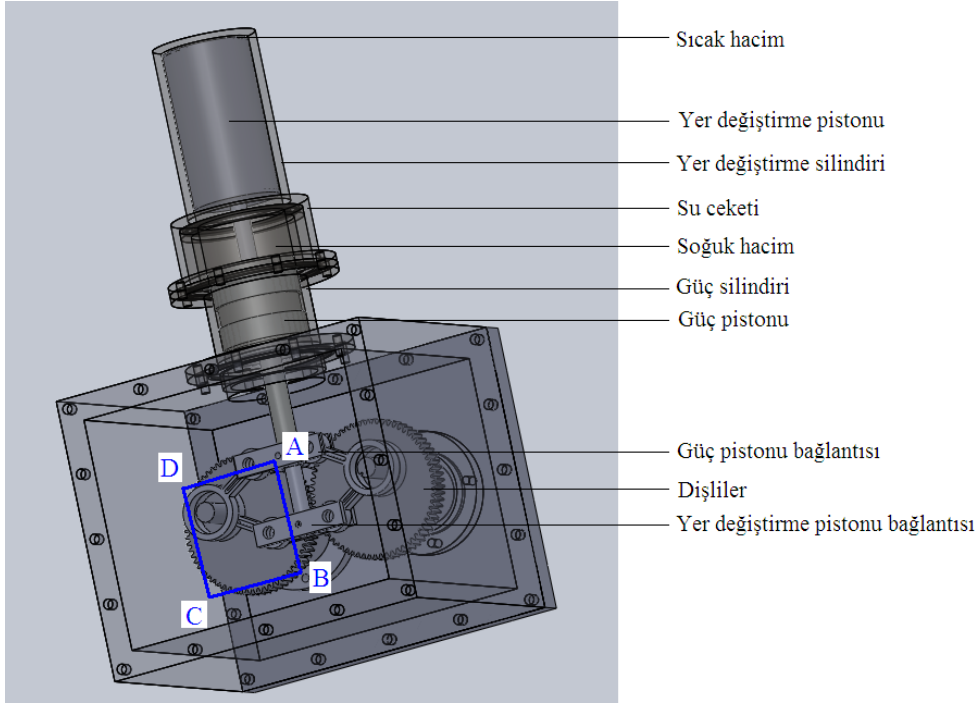
Rhombic hareket mekanizmasında yanal kuvvetler karşılıklı olarak dengelenmekte piston-silindir

arasında ve yer değiştirme pistonu ile güç pistonu rodu arasında yanal sürtünme direnci çok azaldığından sürtünme kuvvetleri ve aşınma en aza indirilmektedir [9,14]. Tek silindri veya çift silindri karşıt pistonlu beta tipi motorlarda kullanılan rhombic hareket mekanizması sessiz çalışması ve motor performansı yönünden krank-biyel hareket mekanizmasından daha iyidir [15].

İmalatı yapılan motorda çevrim, aynı silindir içerisinde çalışan bir piston ve bir yer değiştirme pistonu tarafından gerçekleştirilmektedir. Yer değiştirme pistonunun rodu güç pistonunun ortasından geçmektedir. Soğuk hacim güç pistonu ile yer değiştirme pistonu arasında, sıcak hacim ise yer değiştirme pistonunun üst tarafında bulunmaktadır. Yer değiştirme pistonu ile silindiri arasında kalan boşluk regeneratör görevini de yapmaktadır. Motorda harici bir rejeneratör kullanılmamıştır. İmalatı yapılan motorun şematik resmi ve teknik özellikleri, Şekil 1 ve Tablo 1'de verilmiştir.

Şekil 1'de AB arası, sabit sıcaklıkta genişleme işlemidir. AB arasında yer değiştirme ve güç pistonları beraberce ÜÖN'dan AÖN'ya hareket ederek iş zamanını meydana getirmektedir. Bu süreçte sisteme dışarıdan ısı verilmektedir. AB arasında soğuk hacim minimum değerde kalmaktadır. BC arasında dış ortama ısı geçişi olmakta ve sabit hacimde çalışma maddesinin soğutulması gerçekleştirilmektedir. CD arası, sabit sıcaklıkta sıkıştırma işlemidir. Bu süreçte çalışma maddesinin tamamının soğuk hacimde sıkışması sağlanır ve çalışma maddesinden dışarıya ısı verilir. DA arasında, sabit hacimde sisteme ısı verilmektedir.

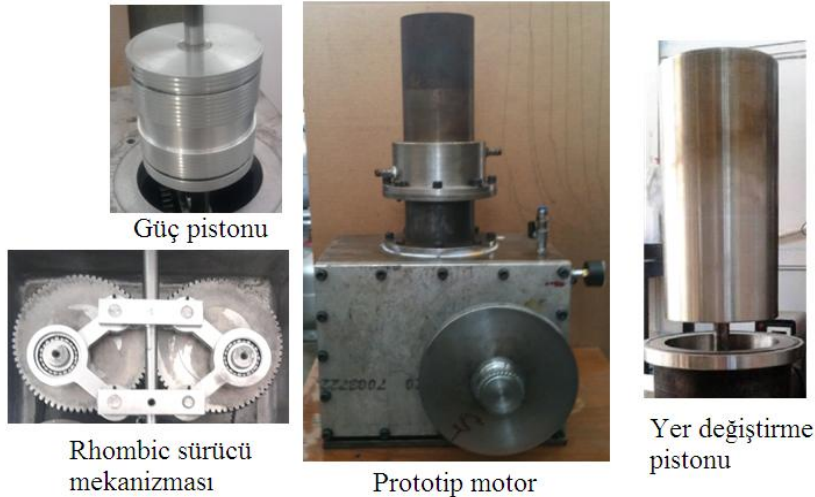
Yer değiştirme silindiri, sıcaklık ve korozyona dayanıklı paslanmaz ASTM 304 çelikten imal edilmiştir. Yer değiştirme silindirinin alt kısmı soğuk bölge, üst kısmı sıcak bölge olup, soğuk bölge bir su ceketini ile soğutulmaktadır. Yer değiştirme silindiri güç silindirinin üzerine geçmektedir ve güç silindiri ile arasında sızdırmazlık için o-ring kullanılmıştır. Yer değiştirme pistonu, ASTM 304 paslanmaz çelik borudan imal edilmiştir. Yer değiştirme pistonu ile silindiri arasında 0,7 mm çalışma boşluğu bırakılmıştır. Güç silindiri yağ çeliğinden imal edilmiş olup, sertleştirilmiş ve pistonun çalıştığı iç yüzeyi hassas olarak honlanmıştır. Güç silindirinin üst kısmına çalışma maddesinin soğutulmasını sağlamak amacıyla yer değiştirme silindirinin su ceketini oturmaktadır. Sızdırmazlık sağlamak amacıyla güç silindirinin üst ve alt uçlarına o-ring kanalı açılmıştır. Güç pistonu alüminyum alaşımından imal edilmiştir. Dış yüzeyi hassas olarak tornalanmış ve güç silindirine 0,03 mm boşlukla alıştırılmıştır. Güç pistonu rhombic hareket mekanizmasına bağlanan rodu ile yekpare olarak imal edilmiştir. Yer değiştirme pistonunun rodu güç pistonunun ortasından geçmektedir. Şekil 2'de imalatı yapılan motor ve parçaları görülmektedir.



Şekil 1. Rhombic hareket mekanizmalı Stirling motoru (Rhombic drive Stirling engine)

Tablo 1. Deney motorunun teknik özellikleri (Technical specifications of the test engine)

Motor Tipi	β
Hareket mekanizması	Rhombic
Yer değiştirme silindir çapı (mm)	86
Yer değiştirme piston çapı (mm)	84,5
Yer değiştirme piston uzunluğu (mm)	155
Güç silindir çapı (mm)	86
Güç pistonu uzunluğu (mm)	90
Krank eksenine ile yer değiştirme silindiri tepesi arası (mm)	453
Rhombic kol uzunluğu (lrh) (mm)	66
Krank yarıçapı	$lrh/2,6666$
Yer değiştirme piston rod çapı (mm)	16
Çalışma maddesi	Hava ve helyum
Rejeneratör hacmi (cm^3)	30
Rejeneratör alanı (cm^2)	480
Soğutma sistemi	Su soğutmalı
Isıtma sistemi	LPG yakıclı ısıtıcı



Şekil 2. Prototip motor ve parçaları (Prototype engine and parts)

3. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Motorda mekanik ve termal problemler çözüldükten sonra farklı şarj basınçlarında hava ve helyum gazı ile test edilmiştir. Deney düzeneği Şekil 3'de görülmektedir. Deney düzeneğinde görüldüğü gibi motorun momenti prony tip sürtünmeli bir frenleme mekanizması kullanılarak ölçülmüştür. Dinamometre tertibatında, üzerinde frenleme diski bulunan bir mil, fren diskini sıkıştırarak yüklemeyi sağlayan bir hidrolik frenleme tertibatı, bir load cell (yük hücresi) ve frenleme kuvvetini yük hücresine ileten bir moment kolundan oluşmaktadır. Dinamometre ana mili iki uca çelik konsol üzerinde rulmanlarla yataklanmıştır. Kullanılan yük hücresi, ESIT BB20 marka olup 1 gr ölçüm hassasiyetine sahiptir. Motor devrini ölçmek için manyetik pulls ile çalışan ESIT marka elektronik bir takometre kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümü için DT-8859 marka infrared bir sıcaklık ölçer kullanılmıştır. DT-8859 marka sıcaklık ölçer ile -50 den 1600 °C'ye kadar ± 2 °C hassasiyetinde ölçüm yapılabilmektedir.

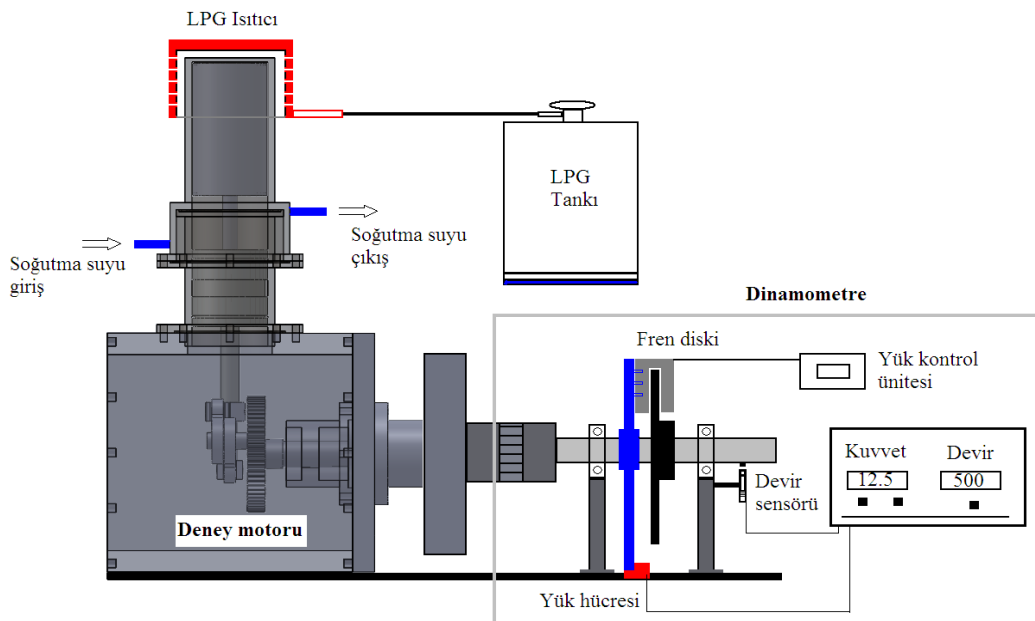
Deneyler, yer değiştirme silindirinin 350 °C ve 450 °C sıcak uç sıcaklıklarında, farklı şarj basınçlarında hava ve helyum gazı ile yapılmıştır. Motora ısı LPG yakıtlı bir ısıtıcı ile verilmiştir. Farklı şarj basınçlarında motor devrine bağlı olarak moment ve güç değişimleri incelenmiştir.

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ (EVALUATION OF EXPERIMENTAL RESULTS)

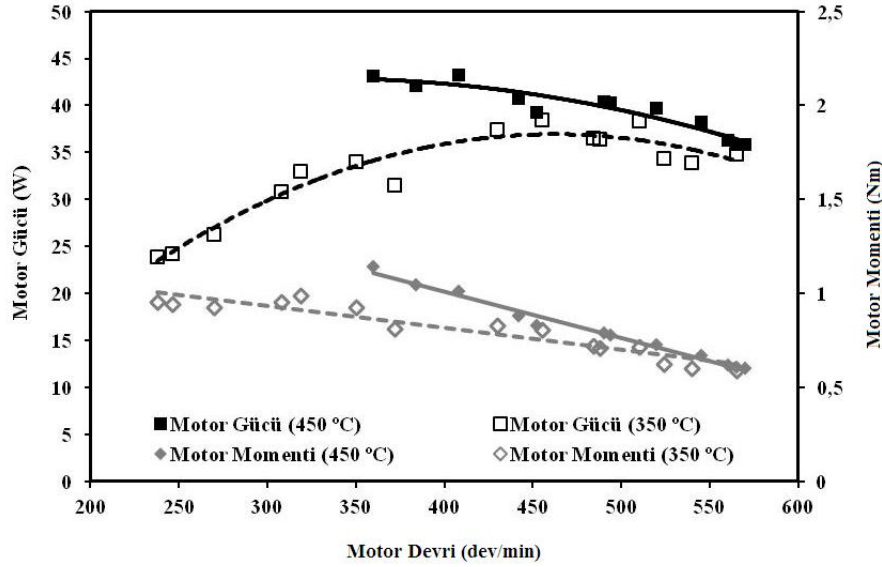
Motor LPG yakıtlı bir ısıtıcı ile çalışma maddesi olarak hava ve helyum kullanılarak test edilmiştir.

Hava kullanılarak yapılan deneyler yer değiştirme silindirinin 350 °C ve 450 ± 5 °C sıcak uç sıcaklıklarında yapılmıştır. Helyum ile yapılan deneyler ise 450 ± 5 °C sıcak uç sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Soğutma suyu çıkış sıcaklığı 25 ± 5 °C olacak şekilde suyun debisi kontrol edilmiştir. Motorda devre bağlı olarak moment ve güç değişimleri elde edilmiştir.

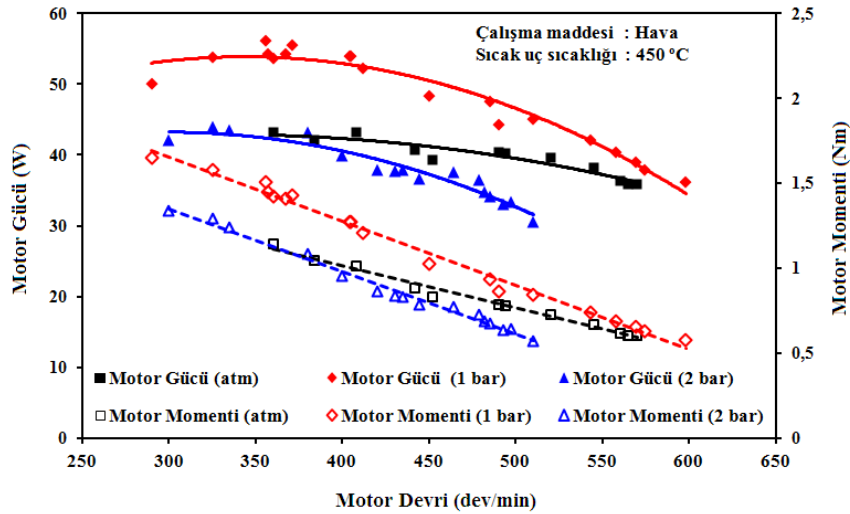
Şekil 4'de atmosferik basınçta ve iki farklı sıcak uç sıcaklığında motor devrine bağlı olarak moment ve güç değişimleri görülmektedir. Atmosferik şartlarda, maksimum motor gücü 450 °C sıcak uç sıcaklığında, 408 dev/min motor devrinde 43,18 W ve maksimum moment 360 dev/min motor devrinde 1,14 Nm olarak elde edilmiştir. Sıcak uç sıcaklığındaki yükselme ile motor gücü ve momentte sağlanan artış, ısıtıcı ve soğutucu sıcaklıkları arasındaki farktan ve çevrim başına çalışma maddesine transfer edilen ısı miktarının artmasından kaynaklanmaktadır. Isıtıcı sıcaklığının artırılması ile elde edilen bir başka önemli özellik de maksimum momentin meydana geldiği motor devrinin yükselmesidir. Sripakagorn ve Srikam tarafından yapılan çalışmada Scotch-yoke hareket mekanizmalı bir Stirling motoru 350 ve 500°C sıcak uç sıcaklıklarında test edilmiş, atmosferik koşullarda ve 350 °C sıcak uç sıcaklığında maksimum motor gücü 205 dev/min motor devrinde 3,8 W olarak elde edilmiştir. Isıtıcı sıcaklığı ve şarj basıncının artması ile motor gücünde artış elde edilmiştir. 7 bar şarj basıncı ve 500 °C sıcak uç sıcaklığında maksimum motor gücü 360 dev/min motor devrinde 95,4 W olarak elde edilmiştir [16]. Karabulut ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada beta tipi bir Stirling motorunda atmosferik koşullarda ve 260 °C sıcak uç sıcaklığında 14,72 W motor gücü elde edilmiştir [17].



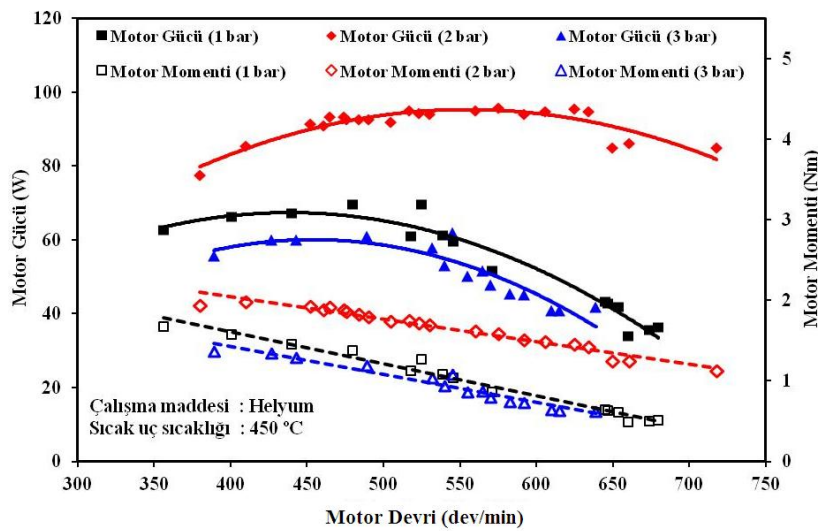
Şekil 3. Deney düzeneği (Experimental setup)



Şekil 4. Atmosferik basınçta motor devrine bağlı olarak motor gücü ve momentinin değişimi (Variation of torque and output power with engine speed at atmospheric pressure)



Şekil 5. Çalışma maddesi olarak hava kullanımı ile motor devrine bağlı olarak motor gücü ve momentinin değişimi (Variation of output power and torque with engine speed by using air as the working fluid)



Şekil 6. Çalışma maddesi olarak helyum kullanımı ile motor devrine bağlı olarak motor gücü ve momentinin değişimi (Variation of output power and torque with engine speed by using helium as the working fluid)

Şekil 5 ve Şekil 6'da 450 °C sıcak uç sıcaklığında çalışma maddesi olarak hava ve helyum kullanılarak yapılan deneylerde farklı şarj basınçları için motor devrine bağlı olarak moment ve güç değişimleri görülmektedir. Çalışma maddesi olarak hava kullanılarak yapılan deneylerde motorun maksimum gücü 1 bar şarj basıncında, 356 dev/min motor devrinde 56,19 W ve maksimum moment 290 dev/min motor devrinde 1,65 Nm olarak elde edilmiştir. Çalışma maddesi olarak helyum kullanılarak yapılan deneylerde ise motorun maksimum gücü 2 bar şarj basıncında, 575 dev/min motor devrinde 95,77 W ve maksimum motor momenti 410 dev/min motor devrinde 1,98 Nm olarak elde edilmiştir. Sabit şarj basıncında yapılan deneylerde, motor gücü, devir ve momentin bir fonksiyonu olduğu için motor devri ve momente bağlı olarak artmaktadır. Güçteki bu artış bir maksimuma kadar olmakta bu noktadan sonra azalmaktadır. Güçteki azalmanın sebebi artan motor hızına bağlı olarak ısı transferinin yetersiz kalmasıdır. Karabulut ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada 200 °C sıcak uç sıcaklığı ve 1,4, 2,8, 3,5 ve 4,6 bar şarj basınçlarında beta tipi manivela hareket mekanizmalı motor test edilmiştir. Maksimum motor gücü ve motor momenti 2,8 bar şarj basıncında elde edilmiştir. Maksimum motor gücü 453 dev/min motor devrinde 51,93 W olarak elde edilmiştir. 2,8 bar şarj basıncının üzerinde motor gücünde ve momentinde belirgin azalmalar gözlenmiştir [18]. Kongtragool ve Wongwises iki güç pistonlu ve dört güç pistonlu gama tipi Stirling motorlarını atmosferik koşullarda test etmiştir. İki güç pistonlu gama tipi Stirling motorunda 589 K ısıtıcı sıcaklığında 11,8 W ve dört güç pistonlu gama tipi Stirling motorunda ise 32,7 W maksimum motor gücü elde edilmiştir [19].

Şekil 5 ve Şekil 6 karşılaştırıldığında helyum ile yapılan deneylerde, havaya oranla hem motor gücünde, hem de maksimum gücün elde edildiği motor devrinde iki kata yakın bir artış sağlanmıştır. Hava ile yapılan deneylerde 1 bar şarj basıncının üzerinde motor gücünün düşmesine rağmen, helyum gazı ile elde edilen motor gücü 2 bar şarj basıncına kadar artmıştır. Stirling motorlarında kullanılan çalışma maddeleri, ısı transferi ve sürtünme kayıpları bakımından önem taşımaktadır. Helyum gazı, hava ile karşılaştırıldığında hem sürtünme kayıpları daha az, hem de ısı kapasitesi daha yüksektir. Sonuç olarak motor daha yüksek hızlara çıkabilmekte ve daha yüksek çıkış gücü vermektedir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, beta tipi, rhombic hareket mekanizmalı bir Stirling motorunun tasarımı, imalatı ve performans testleri yapılmıştır. Motor boyutlarını küçültmek, mekanik bağlantıları azaltmak, dolayısıyla sürtünme ve mekanik kayıplardan doğan verim kaybını azaltmak amacıyla rhombic hareket mekanizması

kullanılmıştır. Mekanizma, karşıt yönlerde dönen iki senkronize dişli ve bağlantı mekanizmasından oluşmaktadır. Yer değiştirme pistonu ve güç pistonunu bağlantı parçaları birbirine 90° faz farkı ile çalışacak şekilde bağlanmıştır. Güç piston biyeli bağlantı mekanizmasının üst parçasına, yer değiştirme piston roduna ise alt parçasına bağlanmıştır.

Motor LPG yakıtlı bir ısıtıcı kullanılarak, hava ve helyum gazı ile farklı sıcak uç sıcaklıklarında ve şarj basınçlarında test edilmiştir. Motor hızına bağlı olarak moment ve güç değişimleri incelenmiştir. Maksimum motor gücü helyum gazı kullanılarak 2 bar şarj basıncında, 575 dev/min motor devrinde 95,77 W olarak elde edilmiştir. Yapılan çalışmada rhombic hareket mekanizmasının kullanımı ile özellikle motor titreşimlerin azaldığı görülmüştür. Şarj basıncının artması ile motor gücündeki azalma çalışma maddesine yeteri kadar ısı verilemediğini göstermektedir. Yapılacak çalışmalarda, rhombic hareket mekanizmasının iyileştirilmesi, helisel diş ve farklı dişli malzemeleri ile gürültü ve sürtünme kayıplarının azaltılması sağlanabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışma Gazi Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 07/2009-28 kodlu proje kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar Gazi Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Kaygusuz, K., Sarı, A., "Renewable energy potential and utilization in Turkey", **Energy Conversion and Management**, 44 (3), 459-478, 2003.
2. Aksoy, F., Karabulut, H., Çınar, C., "The investigation of performance characteristics of a Stirling engine using solar simulator", **5th International Ege Energy Symposium and Exhibition, IESE5**, 236, June 27-30, Denizli, Turkey, 2010.
3. Yılmaz R., "Parabolik yansıtıcı güneş kolektörleri imal ve testi", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1989.
4. Karabulut H. , Aksoy F., "Güneş Enerjisi ile Çalışan Bir Stirling Motorunun Performans Testleri", **Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi**, 8(2), 55-62, 2011.
5. Çınar, C., "Gama tipi bir Stirling motorunun tasarımı, imali ve performans analizi", Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 2001.
6. Aksoy, F., "Bir Stirling motoruna güneş enerjisi uygulanması", Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 2011.

7. Özgören, Y.Ö., Çetinkaya, S., “Helyum ve havanın iş gazı olarak kullanıldığı beta tipi bir Stirling motorunun performansının deneysel olarak incelenmesi”, **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, 24(2), 221-228, 2009.
8. Çınar, C., Topgül, T., Yücesu, H.S., “Stirling çevrimi ile çalışan beta tipi bir motorun imali ve performans testleri”, **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, 22(2), 411-415, 2007.
9. Walker, G., “Stirling Engines”, **United States by Oxford University Press**, 1980.
10. Çınar, C., “V tipi bir Stirling motorunun imali ve performans testleri”, **Teknoloji Dergisi**, 8(3), 245-252, 2005.
11. Thombare, D.G., Verma, S.K., “Technological development in the Stirling cycle engines”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 12(1), 1-38, 2008.
12. Çınar, C., Karabulut, H., “Manufacturing and testing of a gamma type Stirling engine”, **Renewable Energy**, 30, 57-66, 2005.
13. Martini, W. R., “Stirling Engine Design Manual”, U.S. Department of Energy, **DOE/NASA/3152-78/1**, NASA CR-13518, 1978.
14. Meijer, R.J., “The philips stirling thermal engine”, Thesis, **Technische Hogeschool Delft**, 99-103, 1960.
15. Shendage, D.J., Kedare, S.B., Bapat, S.L., “An analysis of beta type Stirling engine with rhombic drive mechanism”, **Renewable Energy**, 36(1), 289-297, 2011.
16. Sripakagorn, A., Srikam, C., “Design and performance of a moderate temperature difference Stirling engine”, **Renewable Energy**, 36(6), 1728-1733, 2011.
17. Karabulut, H., Aksoy, F., Öztürk, E., “Thermodynamic analysis of a β type Stirling engine with a displacer driving mechanism by means of a lever”, **Renewable Energy**, 34(1), 202-208, 2009.
18. Karabulut, H., Yücesu, H.S., Çınar, C., Aksoy, F., “An experimental study on the development of a β -type Stirling engine for low and moderate temperature heat sources”, **Applied Energy**, 86(1), 68-73, 2009.
19. Kongtragool, B., Wongwises, S., “Performance of low-temperature differential Stirling engines”, **Renewable Energy**, 32(4), 547-566, 2007.

