

BETA TİPİ RHOMBİC HAREKET MEKANİZMALI BİR STİRLİNG MOTORUN İMALATI VE TESTLERİ

¹Halit KARABULUT, ¹Can ÇINAR, *²Fatih AKSOY, ¹Hamit SOLMAZ,
²Yaşar Önder ÖZGÖREN, ²Muhammed ARSLAN, ²Faruk Emre AYSAL
¹ Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Teknikokullar ANKARA
*² Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, AFYON

Özet:

Bu çalışmada, beta tipi rhombic hareket mekanizmalı bir Stirling motorunun tasarımı ve testleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde ısı kaynağı olarak LPG yakıtlı bir ısıtıcı kullanılmıştır. Çalışma maddesi olarak hava kullanılan deneylerde, şarj basıncı 1-4 bar aralığında değiştirilerek performans üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneyler 873 ± 5 K sıcak kaynak ve 300 K soğuk kaynak sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Maksimum motor gücü 3 bar şarj basıncı ve 507 dev/dk motor devrinde 221,77 W olarak elde edilmiştir. Maksimum motor momentini ise 3 bar şarj basıncı ve 301 dev/dk motor devrinde 5,42 Nm olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Stirling motoru, rhombic hareket mekanizması, motor performansı

Abstract:

In this study, a beta type Stirling engine with rhombic drive mechanism was designed and tested. In the experiments, a heater that has LPG fuel was used as heat resource. Also air was used as working fluid and effect of charge pressure on the engine performance was estimated charge pressure by varying between 1-4 bar. The experiments were carried out at hot end temperature of 873 ± 5 K and cold end temperature of 300 K. Maximum engine power was obtained as 221,77 W at 3 bar charge pressure and 507 rpm. Maximum engine torque was obtained as 5,42 Nm at 3 bar charge pressure and 301 rpm.

Key words: Stirling engine, rhombic drive mechanism, engine performance

1. Giriş

Çevre, artan nüfusla birlikte ekonomik ve teknolojik gelişmelerden ciddi bir şekilde etkilenmektedir. Özellikle fosil kaynaklı yakıtlar gibi birçok enerji kaynağı enerji üretiminde kullanıldığında atmosfere yüksek miktarda sera gazı yayılmaktadır [1]. Çevreye olan bu zararın azaltılması için güneş, rüzgâr, biyokütle, gelgit, dalga, jeotermal, yağmur vb. birçok alternatif enerji kaynağına ucuz ve temiz olmasından dolayı ilgi artmıştır [1-3]. Stirling motorlarında ısı dış bir kaynaktan sağlandığı için alternatif enerji kaynakları ile çalışabilirler [1,4-6].

Stirling motoru birçok avantaja sahiptir [7]. Teorik olarak Stirling motorlarının verimleri Carnot verimine eşittir [8-10]. Gürültü ve titreşim seviyesi içten yanmalı motorlara göre daha düşüktür [11]. Stirling motorları parça sayısı az olduğundan daha basit bir yapıya sahiptir [12].

*Corresponding author: Address: Faculty of Technology, Department of Automotive Engineering Afyon Kocatepe University, 03200, Afyonkarahisar TURKEY. E-mail address: faksoy@aku.edu.tr, Phone: +902722281446 Fax: +902722281449

Stirling motorları farklı sıcaklık seviyelerinde çalışma maddesinin sıkıştırılması ve genişletilmesinden oluşan kapalı rejeneratif termodinamik bir çevrimle çalışan makinelerdir [13]. İdeal Stirling çevrimi iki izoterm ve iki izokor hal değişiminden oluşur [7,13]. Stirling motorları genellikle kinematik ve serbest pistonlu olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Kinematik Stirling motorları da alfa, beta ve gama tipi olmak üzere üç gruba ayrılır. Alfa tipi motorlarda aralarında 90° lik faz farkı bulunan sıcak ve soğuk pistonlar birbirine bağlanır. Beta tipi motorlarda çevrim tek silindirde bulunan güç ve yer değiştirme pistonuyla gerçekleşir [14]. Gama tipi motorlarda ise güç ve yer değiştirme pistonları ayrı ayrı iki silindire yerleştirilmektedir [15].

Stirling motorları üzerine icadından bugüne birçok araştırma yapılmıştır. Sripakagorn ve Srikam (2011) 100 W gücünde ve 165 cm³ süpürme hacminde beta tipi bir motor tasarlamış ve imal etmişlerdir. Stirling motoru 500 °C sıcaklık, 7 bar basınç ve 360 dev/dk motor devrinde 95,4 W güç üretmiştir [2]. Çınar ve ark. (2007) tek silindirli, 192 cm³ süpürme hacminde beta tipi bir Stirling motorunun imalatını ve performans testlerini yapmışlardır. Deneyleri 800, 900 ve 1000 °C ısıtıcı sıcaklıklarında 1, 1,5, 2, 2,5, ve 3 bar şarj basınçlarında yapmışlar ve 1000 °C ısıtıcı sıcaklığında 2,5 bar şarj basıncında 344 dev/dk motor devrinde 14 W güç elde etmişlerdir [5]. Çınar ve ark. (2013) rhombic hareket mekanizmalı beta tipi bir Stirling motorunun tasarımını, imalatını ve performans testlerini yapmışlardır. Deneyler 350-450 °C aralığında hava ve helyum için farklı şarj basınçlarında gerçekleştirilmiştir. Motorun maksimum gücü 450°C sıcak uç sıcaklığında ve 2 bar şarj basıncında çalışma akışkanı olarak helyum kullanılarak 575 dev/dk motor devrinde 95,77 W olarak elde edilmiştir. Maksimum moment devrinin 410 dev/dk olduğu ve maksimum momentin ise 1,98 Nm olduğu ölçülmüştür [16]. Duan ve ark. (2015) laboratuvar koşullarında elektrikli ısıtma sistemi kullanarak beta tipi bir Stirling motorunun testlerini yapmışlardır. 600°C sıcaklıkta ve 15 bar şarj basıncında 288 W güç elde etmişlerdir [3]. Cheng ve ark. (2013) 300 W gücünde beta tipi Stirling motorunun deneysel ve teorik verilerinin karşılaştırılmasını çalışma akışkanı olarak hava ve helyum kullanarak yapmışlardır. Deneylerde 1400 dev/dk motor devri ve 1,21 kW ısı transfer giriş hızında 390 W çıkış gücü elde etmişlerdir [17]. Karabulut ve arkadaşları (2010) çalışma akışkanı olarak helyumun kullanıldığı bir Stirling motorunun gücünü ve torkunu prony tipi bir dinamometre ile ölçmüşlerdir. Maksimum tork ve güç 4 bar şarj basıncında ve 260 °C sıcak uç sıcaklığında 3,99 Nm ve 183 W olarak ölçülmüştür [18].

Bu çalışmada, rhombic hareket mekanizmalı beta tipi bir Stirling motorunun tasarımı, imalatı ve performans testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma maddesi olarak hava ve ısı kaynağı olarak LPG yakıtlı bir ısıtıcı kullanılarak yapılan deneylerde farklı şarj basınçlarında motor performans karakteristikleri elde edilmiştir.

2. Deney Motorunun Teknik Özellikleri

Beta tipi rhombic hareket mekanizmalı motor; motor bloğu, motor bloğu kapakları, krank mili yatakları, krank milleri, dişliler, biyel kolları ve ara bağlantı elemanları, güç pistonu, yer değiştirme pistonu ve rodu, güç silindiri, yer değiştirme silindiri, sıcak silindir ve volandan oluşmaktadır. Motor bloğu ana gövde ve kapaklardan oluşmaktadır. Ana gövde 25x25 mm Ç1040 malzemeden imal edilmiştir. Ana gövde yüzeyleri hassas bir şekilde taşlanmıştır. Motorun krank milini ve silindirleri taşıyan kapaklar Ç1040 malzemeden imal edilmiştir. Diğer yan ve alt

kapaklar alüminyum 5050 malzemeden imal edilmiştir. Doğrusal hareketin dairesel harekete dönüşümünde helisel dişliler kullanılmıştır. Helisel dişliler 8620 sement çeliğinden imal edilmiş ve 52 Rockwell C derecesinde sertleştirilmiştir. Diğer Rhombic hareket mekanizmalarından farklı olarak bu motorda dişliler yaslama problemini azaltmak amacı ile krank milleri üzerine yerleştirilmiştir. Krank milleri 4140 ıslah çeliğinden imal edilmiş ve taşlanmıştır. Krank millerini motor bloğu kapağına bağlayan krank mili ana yatakları Ç1040 malzemeden imal edilmiştir. Krank milleri krank mili ana yataklarına rulmanlar yardımı ile yataklandırılmıştır.

Rhombic hareket mekanizmasında ara bağlantı elemanları Ç1040 malzemeden, biyel kolları ise alüminyum 7000 serisi malzemeden imal edilmiştir. Rhombic biyel kolları sürtünme kayıplarını azaltmak amacı ile muylulara rulmanlar vasıtası ile bağlanmıştır. Güç pistonu 7000 serisi alüminyum alaşımından imal edilmiştir. Dış yüzeyi hassas olarak tornalanmış ve güç silindirene 0,09 mm boşlukla alıştırılmıştır. Güç pistonu rhombic hareket mekanizmasına bağlanan rodu ile yekpare olarak imal edilmiştir. Güç silindiri yağ çeliğinden imal edilmiş ve iç yüzeyi hassas bir şekilde taşlanarak güç pistonu ile alıştırılmıştır. Yer değiştirme silindiri ASTM 304 çelik malzemeden ve yer değiştirme pistonu ise ASTM 304 çelik borudan imal edilmiştir. Yer değiştirme silindirinin alt kısmı soğuk bölgeyi üst kısmı ise sıcak bölgeyi oluşturmaktadır. Yer değiştirme silindirinin alt kısmı ile güç silindirinin üst kısmı arası su ceketini oluşturmaktadır. Yer değiştirme silindiri iç yüzeyine 3 mm derinliğinde ve 2 mm genişliğinde kanallar açılmış ve bu kanallar rejeneratör olarak kullanılmıştır. Şekil 1 ve Tablo 1 de sırasıyla test motorunun resmi ve motorun teknik özellikleri görülmektedir.



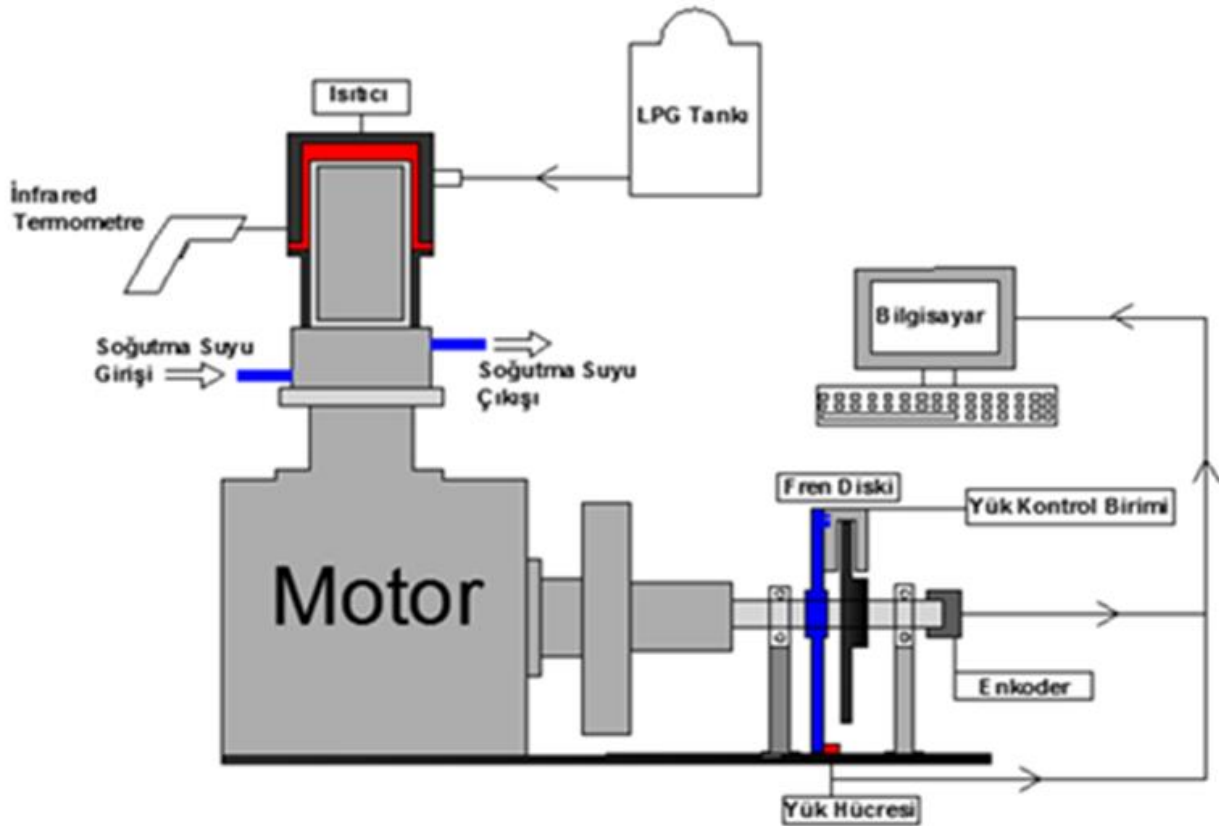
Şekil 1. Test motoru

Tablo 1. Test motorunun teknik özellikleri

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
Rhombic kol uzunluğu (lrh) (mm)	80
Çalışma maddesi	Hava
Soğutma sistemi	Su soğutmalı
Isıtma sistemi	LPG yakıcılı ısıtıcı (Pürmüz)

3. Deney Düzenegi

İmalatı gerçekleştirilen motorun montaj işlemi tamamlandıktan sonra, motor performans karakteristiklerinin belirlenebilmesi amacıyla deney düzeneğine bağlanmıştır. Deney düzeneği prony tip dinamometre, yük hücresi, enkoder, infrared termometre ve veri kayıt yazılım programından oluşmaktadır. Deney düzeneğinin şematik resmi ve prony tip dinamometre Şekil 2’de görülmektedir. Prony tip dinamometre üzerinde frenleme diski bulunan bir mil, fren diskini sıkıştırarak yüklemeyi sağlayan bir hidrolik frenleme tertibatı, bir yük hücresi ve frenleme kuvvetini yük hücresine ileten bir moment kolundan oluşmaktadır. Deney düzeneğinde ESIT BB20 marka 1 gr hassasiyete sahip yük hücresi kullanılmıştır. Yük hücresinden gelen verilerin eş zamanlı olarak bilgisayara aktarılmasında ve motor devrinin ölçülmesinde Lika marka 5000 pulse’lık bir enkoder kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümleri 50- 800 °C arasında $\pm\%1$ hassasiyetinde ölçüm yapabilen DT-8863 marka infrared termometre ile gerçekleştirilmiştir. Deneylerde çalışma maddesi olarak hava kullanılmış ve şarj basıncı motor bloğuna uygulanmıştır. Şarj basıncı 0-10 bar arasında ölçüm yapabilen dijital bir manometre ile $\pm 0,01$ bar hassasiyetinde ölçülmüştür. Deneyler, yer değiştirme silindirinin 873 ± 5 K sıcak uç ve 300 K soğuk uç sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir. Motora ısı enerjisi LPG yakıtlı ısıtıcı (pürmüz) kullanılarak verilmiştir.

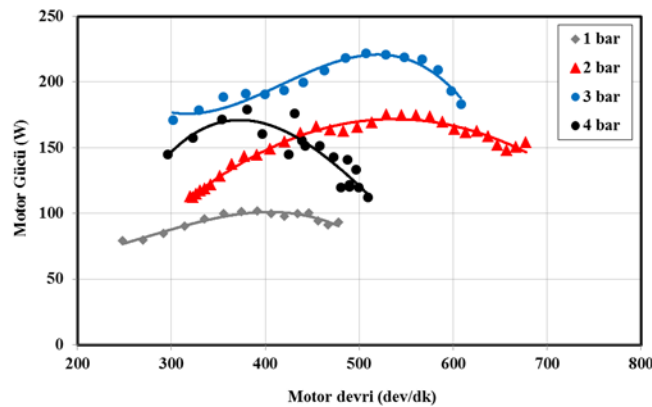


Şekil 2. Deney düzeneği

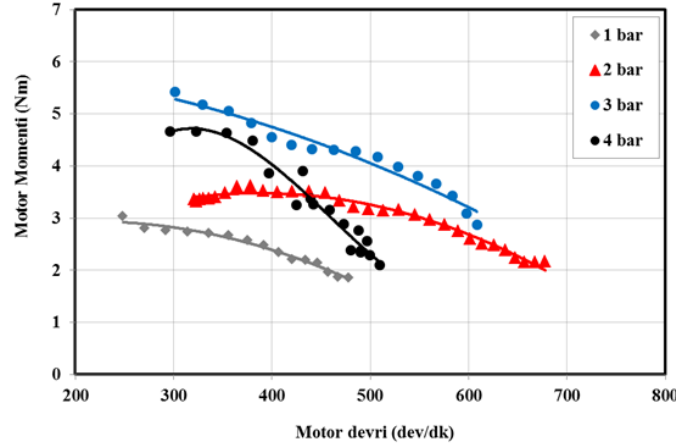
4. Bulgular ve Tartışma

Testler, mekanik ve termal problemler giderildikten sonra 873 ± 5 K sıcak uç ve 300 K soğuk uç sıcaklıklarında ve çalışma maddesi olarak hava ile yapılmıştır. Şekil 3 ve Şekil 4’de sırası ile motor devrine bağlı olarak motor gücü ve motor momentlerinin değişimi farklı şarj basınçları için verilmiştir. Maksimum motor momenti 3 bar şarj basıncı ve 301 dev/dk motor devrinde 5,42 Nm, maksimum motor gücü ise aynı şarj basıncında ve 507 dev/dk motor devrinde 221,77 W olarak elde edilmiştir. Motor devri düşük iken ısıtma-soğutma süresi uzundur. Bu nedenle motor momenti düşük motor devirlerinde yüksektir. Motor devrinin artması ile ısıtma-soğutma süresi kısalmakta ve motor momenti azalmaktadır.

Motor gücü, motor momenti ve motor devrinin bir fonksiyonudur. Motor devrindeki artışa bağlı olarak motor gücü belirli bir değere kadar artış göstermekte ve daha sonra ısı değişim süresinin kısalması nedeniyle azalmaktadır. Cheng ve ark. 300 W gücünde beta tipi rhombic hareket mekanizmalı bir motor geliştirmişlerdir. Çalışma maddesi olarak helyum kullanılarak yapılan deneylerde 8 bar şarj basıncı ve 850°C ısıtıcı sıcaklığında, 1400 dev/dk da 390 W motor gücü elde edilmiştir [17]. Çınar ve ark. beta tipi rhombic hareket mekanizmalı bir motor geliştirmişler ve farklı çalışma maddeleri ile test etmişlerdir. Hava ile yapılan deneylerde 450°C sıcak uç sıcaklığında maksimum motor gücü 1 bar şarj basıncında ve 356 dev/dk motor devrinde 56,19 W ve maksimum motor momenti 290 dev/dk motor devrinde 1,65 Nm olarak elde edilmiştir [16]. Sripakagorn ve Srikam beta tipi scotch-yoke mekanizmalı bir Stirling motoru tasarlamış ve imal etmişlerdir. 165 cm^3 süpürme hacmine sahip motoru çalışma maddesi olarak hava kullanarak 500°C sıcak uç sıcaklığında test etmişlerdir. Maksimum motor gücünün 7 bar şarj basıncında 360 dev/dk motor devrinde 95,4 W elde etmişlerdir. Maksimum motor momentini aynı şarj basıncında 2,94 Nm olarak elde etmişlerdir [2].



Şekil 3. Motor devrine bağlı olarak motor gücünün değişimi



Şekil 4. Motor devrine bağlı olarak motor momentinin değişimi

Sonuçlar

Bu çalışmada beta tipi rhombic hareket mekanizmalı bir Stirling motorunun tasarımı, imalatı ve çalışma maddesi olarak hava kullanılarak performans testleri gerçekleştirilmiştir. Tasarımı yapılan motorda geleneksel rhombic mekanizmasından farklı olarak helisel dişliler çift yönlü yataklanmış ve sürtünme kayıpları azaltılmıştır. Deneyler LPG yakıtlı ısıtıcı (pürmüz) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Motor momentini prony tip bir dinamometre kullanılarak ölçülmüştür. Şarj basıncı motor bloğuna 1, 2, 3 ve 4 bar şarj basınçlarında uygulanmıştır. Maksimum motor gücü 3 bar şarj basıncı ve 507 dev/dk motor devrinde 221,77 W ve maksimum motor momentini 3 bar şarj basıncı ve 301 dev/dk motor devrinde 5,42 Nm olarak elde edilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TUBİTAK) tarafından 113M192 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna (TUBİTAK) teşekkür eder.

Kaynaklar

- [1] Ahmadi P, Dincer I, Rosen MA. Development and assessment of an integrated biomass-based multi-generation energy system. *Energy* 2013;56:155-166.
- [2] Sripakagorn A, Srikam C. Design and performance of a moderate temperature difference Stirling engine. *Renewable Energy* 2011;36(6):1728-1733.
- [3] Duan C, Sun C, Shu S, Ding G, Jing C, Chang J. Similarity design and experimental investigation of a beta-type Stirling engine with a rhombic drive mechanism. *International Journal of Energy Research* 2015;39(2):191–201.
- [4] Ding ZM, Chen LG, Sun FR. Performance optimization of a linear phenomenological law system Stirling engine. *Journal of the Energy Institute* 2015;88(1):36-42.
- [5] Cinar C, Topgul T, Yucesu HS. Stirling Çevrimi ile Çalışan Beta Tipi Stirling Motorun

- İmalatı ve Performans Testleri. Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 2007; 22(2):411-415.
- [6] Cinar C, Experimental investigation of an air charged low powered stirling engine. Pamukkale Univ Muh Bilim Derg. 2004; 10(1): 51-55
- [7] Hosseinzade H, Sayyadi H. CAFS: The Combined Adiabatic–Finite Speed thermal model for simulation and optimization of Stirling engines. Energy Conversion and Management 2015; 91:32-53.
- [8] Cheng CH, Yang HS. Analytical model for predicting the effect of operating speed on shaft power output of Stirling engines. Energy 2011;36(10):5899-5908.
- [9] Hooshang M, Moghadam RA, Nia SA, Masouleh MT. Optimization of Stirling engine design parameters using neural Networks. Renewable Energy 2015;74:855-866.
- [10] Toghyani S, Kasaeian A, Ahmadi MH. Multi-objective optimization of Stirling engine using non-ideal adiabatic method. Energy Conversion and Management 2014;80:54-62.
- [11] Cinar C. Thermodynamic Analysis of an Alpha-Type Stirling Engine with Variable Phase Angle. Journal of Mechanical Engineering Science 2007;221:949-954.
- [12] Glushenkov M, Sprenkeler M, Kronberg A, Kirillov V. Single-piston alternative to Stirling engines. Applied Energy 2012;97:743-748.
- [13] Walker G. Stirling Engines. United States by Oxford University Press; 1980.
- [14] Thombare DG, Verma SK. Technological development in the Stirling cycle engines. Renewable and sustainable Energy Reviews 2008;12:1-38.
- [15] Kontragool B, Wongwises S. A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2003;7(2):131-154.
- [16] Cinar C, Aksoy F, Okur M. Rhombic Hareket Mekanizmalı Bir Stirling Motorunun Tasarımı, İmalatı Ve Performans Testleri. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, [S.1.] 2014;28(4):795-801.
- [17] Cheng CH, Yang HS, Keong L. Theoretical and experimental study of a 300-W beta-type Stirling engine. Energy 2013;59:590-599.
- [18] Karabulut H, Cinar C, Ozturk E, Yucesu HS. Torque and power characteristics of a helium charged Stirling engine with a lever controlled displacer driving mechanism. Renewable Energy 2010;35,(1):138-143.