

STIRLING ÇEVİRİMİ İLE ÇALIŞAN BETA TİPİ BİR MOTORUN İMALİ VE PERFORMANS TESTLERİ

Can ÇINAR, Tolga TOPGÜL ve H. Serdar YÜCESU

Makine Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Gazi Üniversitesi, 06500, Teknikokullar, Ankara
cancinar@gazi.edu.tr, topgul@gazi.edu.tr, yucesu@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 01.05.2006; Kabul/Accepted: 17.10.2006)

ÖZET

Bu çalışmada, tek silindirli, 192 cm³ süpürme hacmine sahip, beta tipi bir Stirling motorunun imalatı ve performans testleri yapılmıştır. Deneyler 800, 900 ve 1000°C ısıtıcı sıcaklıklarında, 1, 1,5, 2, 2,5 ve 3 bar şarj basınçlarında yapılmıştır. Çalışma gazı olarak hava kullanılan deneylerde, motor devri, ısıtıcı sıcaklığı ve şarj basıncına bağlı olarak moment ve güç değişimleri elde edilmiştir. Deneylerde 1000°C ısıtıcı sıcaklığında 2,5 bar şarj basıncında 344 d/d motor devrinde, maksimum 14 W güç elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Beta tipi motor, şarj basıncı, ısıtıcı sıcaklığı, performans.

MANUFACTURING AND TESTING OF A β -TYPE STIRLING CYCLE ENGINE

ABSTRACT

In this study, a single cylinder β -type Stirling engine with the swept volume of 192 cc was manufactured and performance tests were conducted. Experiments were performed at 800, 900 and 1000°C heater temperatures and 1, 1.5, 2, 2.5 and 3 bar charge pressures. Air was used as the working fluid. Torque and power variations were obtained for different engine speeds, heater temperatures and charge pressures. Maximum output-power was obtained as 14 W at 344 rpm engine speed, at the heater temperature of 1000°C and 2.5 bar charge pressure.

Keywords: β -type engine, charge pressure, heater temperature, performance.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Artan dünya nüfusu ve gelişen teknoloji bir yandan enerji açığının sürekli artmasına, diğer yandan da giderek artan çevre problemlerine neden olmaktadır. Dıştan ısıtma prensibine göre çalışan Stirling motorları teknolojik gelişmeleri seri üretim yapılacak seviyeye geldiği takdirde dünyada giderek artan enerji ve çevre problemlerine çözüm olabilecektir [1-3].

Stirling motorlarında ısının dış bir kaynaktan sağlanması sebebiyle, fosil kökenli yakıtlardan güneş enerjisine kadar birçok yakıtı ve alternatif enerji kaynağını kullanabilir. İçten yanmalı motorlarla karşılaştırıldığında, gürültü ve titreşim seviyesi daha düşüktür. Teorik ısı verimi yüksektir ve daha az bakım gerektirir [3-6].

Stirling motorlarında çalışma gazı olarak farklı gazlar kullanılabilir. Özellikle hidrojen ve helyum gibi

yüksek ısı iletim katsayısına sahip gazlarla optimum şarj basınçlarında yüksek ısı verim ve yüksek çıkış gücü elde edilebilmektedir. Çalışma gazı olarak hava kullanılan motorlar düşük özgül çıkış gücü ile düşük ısı verime sahiptirler. Ancak çalışma akışkanının kolaylıkla sağlanması sızdırmazlık ve malzeme problemlerini ortadan kaldırmakta ve maliyeti düşürmektedir. Düşük güçlü ancak yüksek güvenilirliği olan bu motorlar fosil veya radyoizotop yakıtlar kullanılarak çalıştırılabilmektedir [7-9].

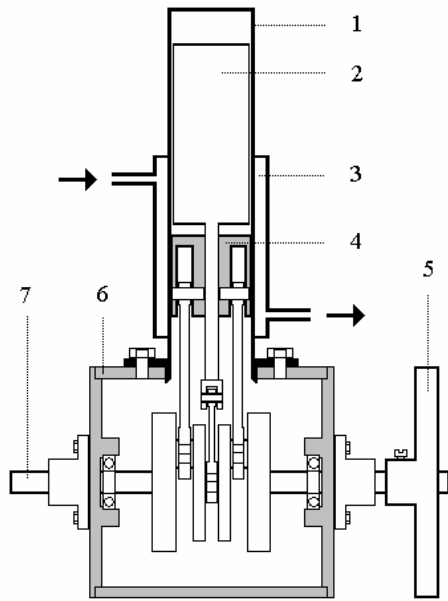
Stirling motorları hareket mekanizmalarına göre kinematik ve serbest pistonlu olarak iki sınıfa ayrılır. Kinematik motorlarda hareket, krank-biyel veya rhombic drive (altı kenar hareket mekanizması) gibi mekanizmalar aracılığı ile volana iletilir. Serbest pistonlu Stirling motorlarında, çalışma akışkanının oluşturduğu basınç değişimleri ile sağlanan hareket piston tarafından lineer alternatöre iletilir, hareketli

elemanlar arasında mekanik bir bağlantı yoktur [5,7,10,11].

Bu çalışmada, tek silindirli, kinematik beta tipi bir Stirling motoru imal edilerek farklı ısıtıcı sıcaklığı ve şarj basınçlarında performans testleri yapılmıştır.

2. DENEY MOTORU (TEST ENGINE)

İmalatı yapılan 192 cm³ süpürme hacmine sahip, beta tipi Stirling motorunun şematik resmi Şekil 1'de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi çevrim, aynı silindir içerisinde çalışan piston ve yer değiştirme pistonu tarafından gerçekleştirilmektedir. Yer değiştirme pistonunun merkezleme mili pistonun ortasından geçmektedir. Piston ile yer değiştirme pistonu arasında kalan bölge soğuk hacmi, yer değiştirme pistonunun üst tarafında kalan bölge ise sıcak hacmi oluşturmaktadır. Yer değiştirme pistonu ile silindir arasında kalan boşluk rejeneratör görevi de yapmaktadır. Piston ve yer değiştirme pistonu aralarında 90° faz açısı olacak şekilde biyelerle krank miline bağlanmıştır.



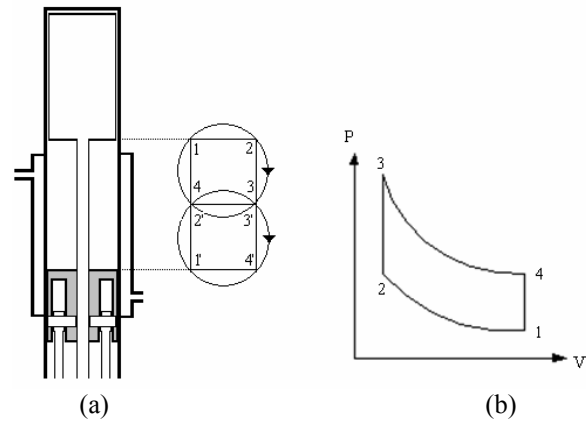
- | | |
|----------------|---------------------------|
| 1. Silindir | 2. Yer değiştirme pistonu |
| 3. Su ceketi | 4. Piston |
| 6. Motor bloğu | 7. Krank mili |
| | 5. Volan |

Şekil 1. Deney motorunun şematik görünümü (Schematic illustration of the test engine)

Piston, yüksek grafitli dökme demirden imal edilmiştir. Sürekli bir yağlama gerektirmemektedir ve sıcaklığa bağlı genleşme katsayısı düşüktür. Hassas olarak taşlanmış ve silindire 0,02 mm boşlukla alıştırmıştır. Pistonunun ortası yer değiştirme pistonunu yataklamak amacıyla tornalanmış ve hassas olarak honlanmış. Piston, iki adet biyel aracılığı ile krank miline bağlanmıştır. Yer değiştirme pistonu, sıcaklık ve korozyona dayanımını sağlamak amacıyla

krom-nikel paslanmaz çelik borudan imal edilmiştir. Bu borunun alt ve üst yüzeyleri kapatılmış ve alt kısmına merkezleme mili civatalı olarak birleştirilmiştir. Eksen kaçıklığını önlemek için merkezleme mili ve yer değiştirme pistonu yekpare olarak taşlanmıştır. Merkezleme mili, orta kısmı honlanmış olan pistona hassas olarak alıştırmıştır. Yer değiştirme silindiri sıcaklık ve korozyona dayanımını sağlamak amacıyla ASTM paslanmaz çelik borudan imal edilmiştir. Üst kısmı kaynaklı birleştirme ile kapatılmıştır. Çalışma maddesinin yer değiştirme pistonu ile silindiri arasında geçişini sağlamak amacıyla aralarında 0,6 mm boşluk bırakılmıştır. Yer değiştirme silindirinin alt kısmında çalışma maddesinin soğutulmasını sağlamak için dıştan bir su ceketi geçirilmiştir. Biyeler Ç1040 malzemeden yapılmış olup, biyel ayağı ve başına bronz burç çakılmış ve honlanarak muylu çapına alıştırmıştır. Krank mili Ç4260 malzemeden tek parça olarak imal edilmiştir. Muylu yüzeyleri sertleştirilmiş ve hassas olarak taşlanmıştır. Piston ve yer değiştirme pistonlarının bağlantılarının yapıldığı muylular arasında 90°'lik faz farkı bulunmaktadır.

İmalatı yapılan motorun çalışma prensibi ve çevrimin P-V diyagramı Şekil 2'de görülmektedir. Burada, 1-2 arası sabit sıcaklıkta sıkıştırma işlemi, 2-3 arası sabit hacimde sisteme ısı verme işlemidir. 3-4 arası sabit sıcaklıkta genişleme işlemidir ve dış kaynaktan sisteme ısı verilmeye devam edilmektedir. 4-1 arası ise sabit hacimde genişleme ve dış ortama ısı geçişidir.

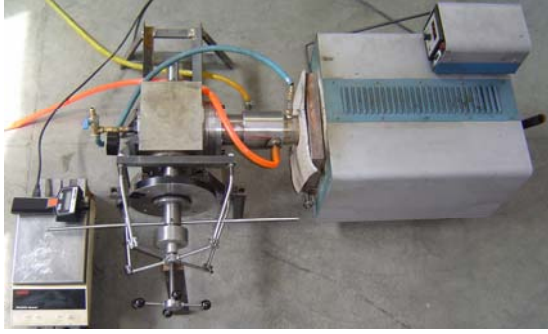


Şekil 2. Deney motorunun çalışma prensibi (a) ve çevrimin P-V diyagramı (b) (Operating principle of the test engine (a) and P-V diagram of the cycle (b))

3. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Deneylerde ısı kaynağı olarak 1°C hassasiyetinde ve 1200°C'ye kadar ısıtma yapabilen Nüve marka, elektrikli bir ısıtıcı kullanılmıştır. Soğutma, silindirin dışına yerleştirilen su ceketi ile sağlanmıştır (Şekil 1). Çıkış sıcaklığı 30°C olacak şekilde soğutma sisteminde su dolaştırılmıştır. Moment ölçümünde 2,5

Nm'ye kadar ölçüm yapabilen ve 0,003 Nm hassasiyetinde, prony tip bir ölçüm tertibatı kullanılmıştır. Motor devrinin ölçülmesinde, 0,1 d/d hassasiyetine sahip, DT-2234A model dijital takometre kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümünde 1°C hassasiyetinde ölçüm yapabilen 12 kanallı M3D12X marka sıcaklık ölçer kullanılmıştır. Bu cihaza bağlanan termokupllar NiCr-Ni termokupllardır ve 1200°C'ye kadar ölçüm yapılabilmektedir. Deney düzeneği Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Deney düzeneğinin görünümü (Illustration of the test equipments)

Motorda mekanik ve ısıl problemler giderildikten ve sürekli çalışma şartları sağlandıktan sonra, motorun çalışma karakteristiklerini belirlemek amacıyla deneyler yapılmıştır. Deneylerde, motor devri, ısıtıcı sıcaklığı ve şarj basıncına bağlı olarak moment ve güç değişimleri elde edilmiştir. Deneyler, 800, 900 ve 1000°C ısıtıcı sıcaklıklarında, 1, 1,5, 2, 2,5 ve 3 bar şarj basınçlarında yapılmıştır. Çalışma maddesi olarak hava kullanılmıştır. Başlangıçta ısıtıcı istenilen sıcaklık düzeyine getirilmiş, her bir ısıtıcı sıcaklığında şarj basıncı değiştirilerek, motor dinamometre ile yüklenmiş ve farklı motor devirlerinde moment ölçülmüştür.

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ (EVALUATION OF TEST RESULTS)

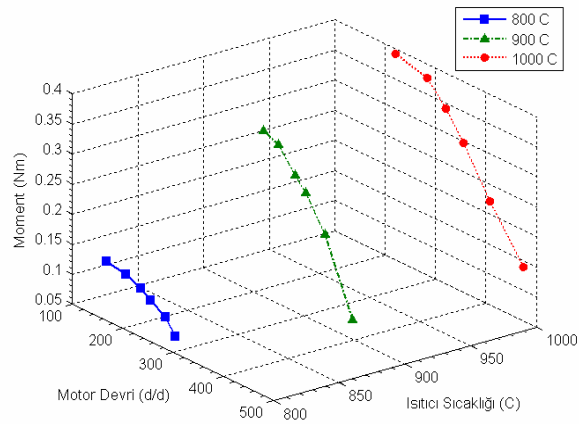
Şekil 4'de 2 bar şarj basıncında, motor devri ve ısıtıcı sıcaklığına bağlı olarak moment değişimleri görülmektedir. Motor devrine bağlı olarak moment değişimleri incelendiğinde, düşük devirlerde momentin yüksek olduğu ve devir artışına bağlı olarak momentin düştüğü görülmektedir.

Düşük motor devirlerinde ısıtıcıdan çalışma gazına olan ısı enerjisi akışı için yeterli zaman vardır. Devir artışına bağlı olarak çalışma maddesine ısı verme süresi kısaldığından yeterli oranda ısı aktarılamamakta ve moment düşmektedir. Ayrıca, motor devrindeki artışa bağlı olarak çalışma gazının cidarlarla olan hidrodinamik sürtünmesi artmaktadır. Yüksek motor devirlerinde yeterli çalışma gazı kütlesi sıcak bölge ile soğuk bölge arasında viskoz sürtünmeden dolayı yer değiştiremediğinden moment

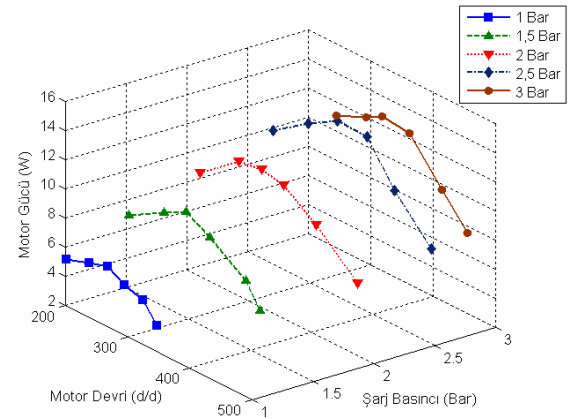
azalmaktadır. Ayrıca, ısıtıcı sıcaklığındaki artış ile çalışma gazına çevrim başına aktarılan ısı miktarının artmasına bağlı olarak moment artmaktadır.

Şekil 5'de 1000°C ısıtıcı sıcaklığında motor devri ve şarj basıncına bağlı olarak motor gücü değişimleri görülmektedir. Motor çıkış gücünü belirleyen parametreler, moment ve motor devridir. Momentteki azalmaya rağmen belli bir motor devrine kadar motor gücündeki artış devam etmektedir. Bu motor devrinin üzerinde, mekanik sürtünmeler ve titreşimlerdeki artış motor gücünün azalmasına sebep olmaktadır. Motor gücü şarj basıncına bağlı olarak bir maksimum değere yükselmekte, bu noktadan sonra azalmaktadır.

Şarj basıncındaki artış ile motor gücünün artması, çalışma gazı kütlesinin artmasındandır. Belli bir şarj



Şekil 4. Motor devri ve ısıtıcı sıcaklığına bağlı olarak moment değişimi (2 bar şarj basıncında) (Variation of torque with engine speed and heater temperature at 2 bar charge pressure)

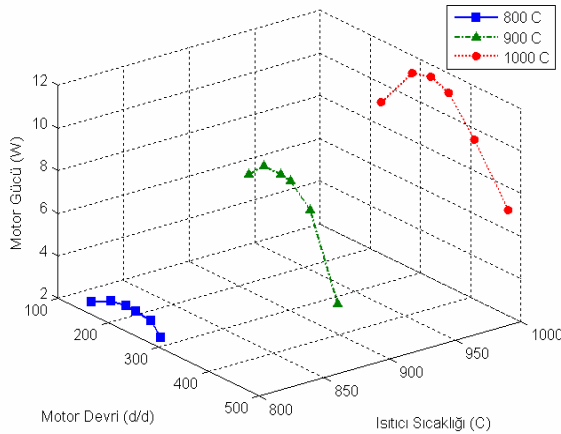


Şekil 5. Motor devri ve şarj basıncına bağlı olarak motor gücü değişimi (1000°C ısıtıcı sıcaklığı) (Variation of output-power with engine speed and charge pressure at 1000°C heater temperature)

basıncından sonra çalışma gazının yeteri kadar ısıtılmaması nedeniyle çevrim sıcaklığı düşmektedir. Buna bağlı olarak motor gücü de düşme eğilimi

göstermektedir. Ayrıca, ısıtıcı sıcaklığındaki artışa bağlı olarak maksimum gücün meydana geldiği şarj basıncı da artmaktadır. Maksimum motor gücü, 1000°C ısıtıcı sıcaklığında 2,5 bar şarj basıncında 344 d/d motor devrinde 14 W olarak elde edilmiştir.

Şekil 6'da 2 bar şarj basıncında motor devri ve ısıtıcı sıcaklığına bağlı olarak motor gücü değişimleri görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi motor gücü, ısıtıcı sıcaklığındaki artışa bağlı olarak artmaktadır. Bunun sebebi, çalışma gazına çevrim başına transfer edilen ısı miktarının artmasıdır. Ayrıca, soğutucu sıcaklığı sabit olduğuna göre, ısıtıcı sıcaklığının artması ile çevrimin üst ve alt sıcaklıkları arasındaki fark da artmaktadır. Malzemenin dayanım sınırı ve yüksek sıcaklıklarda malzemede meydana gelen genişleme gibi nedenlerle deneylerde ısıtıcı sıcaklığı maksimum 1000°C'ye kadar çıkarılmış ve en yüksek motor gücü ve devri bu sıcaklıkta elde edilmiştir. Isıtıcı sıcaklığının artırılması ile elde edilen bir başka önemli özellik de maksimum gücün meydana geldiği motor devrinin yükselmesidir. Şekilde görüldüğü gibi 2 bar şarj basıncında maksimum motor gücü 800°C ısıtıcı sıcaklığında 235 d/d motor devrinde 3,22 W iken, 1000°C ısıtıcı sıcaklığında 320 d/d motor devrinde 11,41 W olarak elde edilmiştir.

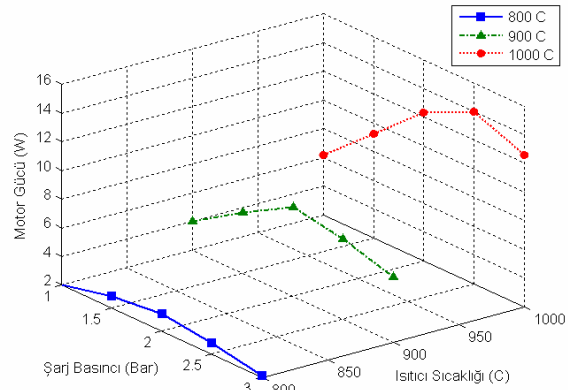


Şekil 6. Motor devri ve ısıtıcı sıcaklığına bağlı olarak motor gücü değişimi (2 bar şarj basıncında) (Variation of output-power with engine speed and heater temperature at 2 bar charge pressure)

Şekil 7'de şarj basıncı ve ısıtıcı sıcaklığına bağlı olarak motor gücü değişimleri görülmektedir. Grafikler oluşturulurken her ısıtıcı sıcaklığı ve şarj basıncı için en yüksek güç değeri alınmıştır. Şekilde görüldüğü gibi ısıtıcı sıcaklığındaki artışa bağlı olarak çevrim başına çalışma akışkanına transfer edilen ısı miktarının artması ile motor gücü artmaktadır. Isıtıcı sıcaklığının artırılması ile maksimum gücün meydana geldiği şarj basıncı da artmaktadır. 800°C ısıtıcı sıcaklığında maksimum motor gücü 2 bar şarj basıncında elde edilirken, 1000°C ısıtıcı sıcaklığında 2,5 bar şarj basıncında elde edilmiştir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, tek silindirli, beta tipi, prototip bir Stirling motoru imal edilmiş ve laboratuvar koşullarında performans testleri yapılmıştır. Deneylerde, motor devri, motor gücü ve moment ısıtıcı sıcaklığına bağlı olarak artmaktadır. Çünkü ısıtıcı sıcaklığındaki artış ile çevrim başına çalışma gazına transfer edilen ısı miktarı artmaktadır. Ayrıca, motor çıkış gücü 2-2,5 bar şarj basıncına kadar, çalışma gazı kütleindeki artışa bağlı olarak artmıştır. Bu şarj basınç değerlerinin üzerinde artan çalışma gazı miktarı ile ısıtıcının yetersiz kalması ve çevrim üst sıcaklığını düşmesi ile motor gücü düşmüştür. Motorda 1000°C ısıtıcı sıcaklığında, 2,5 bar şarj basıncında 344 d/d motor devrinde, 14 W güç elde edilmiştir. Güneş enerjisinin Stirling motorlarında kullanılması, ülkemizde ve dünyada giderek artan enerji ve çevre problemlerine çözüm olabilecektir.



Şekil 7. Şarj basıncı ve ısıtıcı sıcaklığına bağlı olarak motor gücü değişimi (Variation of output-power with charge pressure and heater temperature)

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Martini, W.R., "Stirling Engine Design Manual", US Department of Energy, NASA CR-13518; 1978.
2. Çınar, C. ve Karabulut, H., "Manufacturing and Testing of a Gamma Type Stirling Engine", **Renewable Energy**, Cilt 30, No 1, 57-66, 2005.
3. Kongtragool, B. ve Wongwises, S., "A Review of Solar-Powered Stirling Engines and Low Temperature Differential Stirling Engines", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Cilt 7, No 2, 131-154, 2003.
4. Onovwiona, H.I. ve Ugursal, V.I., "Residential Cogeneration Systems: Review of the Current Technology", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Cilt 10, No 5, 389-431, 2006.
5. Kong, X.Q., Wang, R.Z. ve Huang, X.H., "Energy Efficiency and Economic Feasibility of CCHP Driven by Stirling Engine", **Energy**

- Conversion and Management**, Cilt 45, No 9-10, 1433-1442, 2004.
6. Hsu, S.T., Lin, F.Y. ve Chiou, J.S., "Heat-Transfer Aspects of Stirling Power Generation Using Incinerator Waste Energy", **Renewable Energy**, Cilt 28, No 1, 59-69, 2003.
 7. Walker, G., **Stirling Engines**, Oxford University Press, A.B.D., 1980.
 8. Çınar, C., Koca, A. ve Karabulut, H., "Farklı Çalışma Gazlarının Stirling Motorunun Performansına Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi", **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, Cilt 20, No 2, 247-250, 2005.
 9. Michels, A.P.J., "The Philips Stirling Engine: A Study its Efficiency as a Function of Operating Temperatures and Working Fluids", **11th IECEC**, 769258, Sahara Tahoe Hotel, Statline, Nevada, September 12-17, 1976.
 10. Ulusoy, N., **Dynamic Analysis of Free Piston Stirling Engines**, PhD. Thesis, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Case Western Reserve University, 1-10, 1994.
 11. Rogdakis, E.D., Bormpilas, N.A. ve Koniakos, I.K., "A Thermodynamic Study for the Optimization of Free Piston Stirling Engines", **Energy Conversion and Management**, Cilt 45, No 4, 575-593, 2004.