

HAVA ŞARJLI KÜÇÜK GÜÇLÜ BİR STİRLİNG MOTORUNUN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Can ÇINAR

Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Bölümü, 06500-Beşevler/Ankara

Geliş Tarihi : 09.01.2002

ÖZET

Bu çalışmada, imal edilen hava şarjlı, küçük güçlü γ tipi bir Stirling motoru deneysel olarak incelenmiştir. Motor 800, 900 ve 1000 °C olmak üzere 3 farklı sıcak kaynak sıcaklığında, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 ve 3.5 bar şarj basınçlarında test edilmiştir. Deneylerde motor gücünün, motor devri, şarj basıncı ve sıcak kaynak sıcaklığı ile değişimi iki farklı ısı transferi yüzey alanı için incelenmiştir. Maksimum çıkış gücü 1000 °C sıcak kaynak sıcaklığında, 3 bar şarj basıncında 441 dev./dak ve 58 W olarak elde edilmiştir. Yüksüz motor devri 846 1/min olarak ölçülmüştür.

Anahtar Kelimeler : Stirling motoru, Dıştan ısı vermeli motor, Performans

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF AN AIR CHARGED LOW POWERED STIRLING ENGINE

ABSTRACT

In this study, an air charged, low powered manufactured γ type Stirling engine was investigated experimentally. Tests were conducted at 800, 900 and 1000 °C hot source temperatures, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5 bars air charge pressure. The variation of engine power depending on the charge pressure and hot source temperature for two different heat transfer area was investigated experimentally. Maximum output power was obtained at 1000 °C and 3 bars charge pressure as 58 W at 441 rpm. Engine speed was reached at 846 rpm without load.

Key Words : Stirling engine, Externally heated engine, Performance

1. GİRİŞ

Sıcak hava motoru olarak da bilinen Stirling motorlarının ilk prototipi 1816 yılında Robert Stirling tarafından tasarlanmış ve imal edilmiştir. Robert Stirling 1850'li yıllara kadar yer değiştirme pistonlu tipte iki ve üç silindri motorlar yapmıştır. 1860'lı yıllarda Almanya'da Lehman tek silindri, yer değiştirme pistonlu bir motor yapmış ve rejeneratör kullanmamasına rağmen çok iyi sonuçlar elde etmiştir. 19. yüzyılın sonlarında içten yanmalı motorların icadı ile Stirling motorları üzerinde çalışmalar kesintiye uğramış ancak 1920'lerden sonra tarım alanlarında su pompalamak ve küçük amaçlı elektrik üretimi amacıyla kullanılmaya

başlanmıştır (Finkelstein, 1959a; Finkelstein, 1959b; Walker, 1980; Sier, 1995).

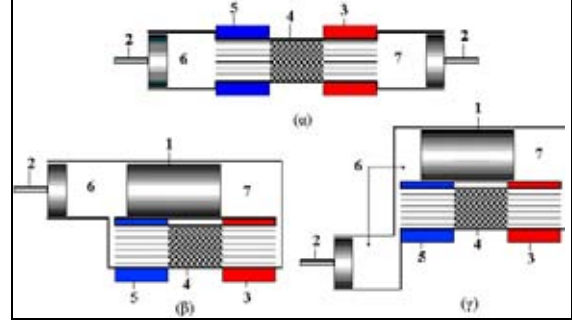
Stirling motorları üzerinde araştırmalar Philips laboratuvarlarında 1930'larda başlamış, radyolar için küçük ve sessiz elektrik jeneratörlerinde kullanılmıştır (Finkelstein, 1959b). 1953 yılında altı kenar hareket mekanizması (rhombic-drive mechanism) R. J. Meijer tarafından Stirling motorlarında uygulanmıştır. Bu sistemde piston üzerine net bir yatay kuvvet gelmediğinden piston sürtünmesi ve aşınması çok az olmaktadır (Meijer, 1960). 1958 yılında General Motors ve Philips firması lisans antlaşması ile 1970'lere kadar uzay araçlarından, taşıtlara, denizaltılara ve sabit güç

kaynaklarına kadar çok değişik amaçlar için Stirling motorları üzerinde çalışmışlardır (Percival, 1974). 1970 yılında William Beale tarafından serbest pistonlu Stirling motorlarının icadı ile önemli bir aşama kaydedilmiş, özellikle güneş enerjisi uygulamalarında başarılı çalışmalar yapılmıştır (Bean and Diver, 1993). 1977 yılında U. S. Enerji Bölümü'nde Dıştan Yanmalı Motorlar projesi ile güçleri 370 kW'tan 1480 kW'a kadar değişen ve alternatif yakıtların kullanıldığı Stirling motorları üretilmiştir. Japonya'da 1976-1988 yılları arasında Ulusal Taşımacılık, Mitsubishi, Daihatsu, Gemi İmalatı Araştırma Kurumu ve Yeni Enerji Geliştirme Kurumu'nun istekleri ile 3-30 kW'lık ısı pompaları ve jeneratör setleri için Stirling motorları imal edilmiştir (Bekkoame, 2000). 1984 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde güneş enerjisinden elektrik üretmek amacıyla Arizona'da Stirling Enerji Sistemleri Şirketi (Stirling Energy Systems Incorporation.) kurulmuştur. Arizona ve Nevada'da güneş enerjisi test alanlarında odaklı kollektörlü Stirling sistemleri ile 118 000 kWh'tan fazla elektrik üretilmektedir (Anon., 2000.).

Stirling motorları genel olarak, tek etkili ve çift etkili motorlar olarak iki ana grupta sınıflandırılırlar. Tek etkili Stirling motorları aynı veya farklı silindirlere olmak üzere, genişleme ve sıkıştırma bölmeleri ile bunları birleştiren bir ısı değiştirgecinden meydana gelir. Tek etkili Stirling motorlarında çalışan elemanların her ikisi de piston (α tipi) olabileceği gibi, biri piston, diğeri yer değiştirme pistonu (β veya γ tipi) olabilir. Şekil 1'de tek etkili α , β ve γ tipi Stirling motorları görülmektedir. Piston-yer değiştirme pistonlu tip Stirling motorlarında güç pistonunun üst ve alt yüzleri arasında büyük basınç farkı vardır. Yer değiştirme pistonunun ise üst ve alt yüzleri arasında aerodinamik akış kayıplarından başka basınç farkı yoktur. Çift etkili Stirling motorları, bir silindirin genişleme bölgesi ile diğer bir silindirin sıkıştırma bölgesi arasında ısı değiştirgeçleri yerleştirmek yolu ile düzenlenmiştir (Urielli, 2000; Çınar, 2001).

Stirling motorları dıştan ısı vermeli motorlar olduğundan, içten yanmalı motorlara ve diğer ısı motorlarına göre bir çok üstünlükleri vardır. Her türlü yakıtı ve ısı kaynağını kullanabilmektedirler. Özellikle güneş enerjisi uygulamalarında elde edilen başarılı sonuçlarla giderek artan enerji ve çevre sorunlarına karşı alternatif bir enerji dönüştürücü olarak kullanılmaya başlanmışlardır. Stirling motorları gürültüsüz ve titreşimsiz çalışmaları, yüksek termik verimleri ve çevreci motor olmaları nedenleriyle, sulama alanlarından uzay teknolojisine, elektrik üretiminden iklimlendirme uygulamalarına kadar bir çok alanda

kullanılmaktadır (Walker, 1980; Anon., 1993; Çetinkaya, 1995; Rizzo, 1997).

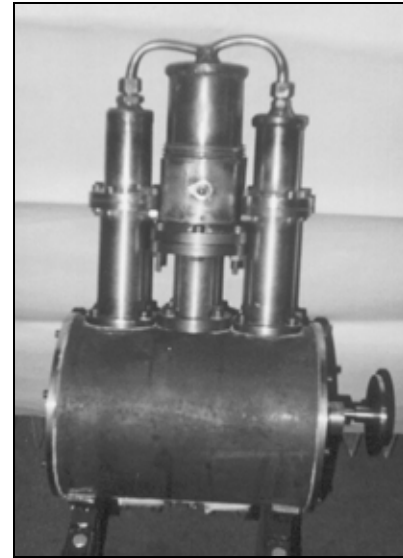


1. Yer değiştirme pistonu, 2. Güç pistonu, 3. Isıtıcı, 4. Rejeneratör, 5. Soğutucu, 6. Sıkıştırma bölgesi, 7. Genişleme bölgesi

Şekil 1. Tek etkili Stirling motorları

2. MOTORUN İMALATI

İmalatı yapılan test motoru Şekil 2'de görülmektedir. Motorun süpürme hacmi 276 cm³ olup, sıkıştırma oranı 1.82/1'dir. Motorunda iki adet güç pistonu ve bir adet yer değiştirme pistonu paralel olarak yerleştirilmiştir. Motora ilişkin teknik özellikler Tablo 1'de verilmiştir.



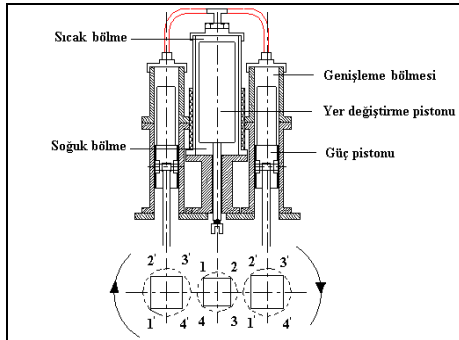
Şekil 2. İmalatı yapılan gama tipi motor

Tablo 1. Motorun Teknik Özellikleri

Motor Tipi	γ
Süpürme Hacmi	276 cm ³
Faz Açısı	90°
Çalışma Maddesi	Hava
Sıkıştırma Oranı	1.82
Maksimum Motor Devri	846 dev./dak
Maksimum Motor Gücü	58 W (441 dev./dak'da)

Motorda, yer değiştirme pistonu ve silindiri, yüksek sıcaklık ve korozyona dayanımını sağlamak amacıyla 3 mm et kalınlığında ASTM paslanmaz çelik borudan imal edilmiştir. Yer değiştirme silindirinin iç yüzeyine ısı transferi yüzey alanını arttırmak amacıyla 1 mm aralıklarla, kenar uzunluğu 1 mm olan eşkenar üçgen şeklinde aksel kanallar açılmıştır. Çalışma maddesinin yer değiştirme pistonu ile silindiri arasından geçişini sağlamak amacıyla aralarında 1 mm boşluk bırakılmıştır. Yer değiştirme silindirinin alt kısmına, çalışma maddesinin soğutulmasını sağlamak amacıyla bir su ceketini geçirilmiştir. Güç pistonları yağlama özelliği olan grafitli dökme demirden imal edilmiş, sekman kullanılmamıştır. Piston ile silindir arasında 0.02 mm çalışma boşluğu bırakılmıştır. Krank mili, SAE 2080 yağ çeliğinden parçalı olarak imal edilmiş ve iki adet konik rulman ile motor bloğuna içten ayaklar aracılığı ile yataklanmıştır. Biyeller eylemsizlik kuvvetlerini azaltmak amacıyla, alüminyum alaşımlarından imal edilmiştir. Biyelin büyük ve küçük başına bronz burç çakılmış ve honlanarak muylu çapına alıştırmıştır.

İmalatı yapılan motorun çalışma ilkesi Şekil 3'de şematik olarak görülmektedir. Motorun çalışması 360 derece krank mili açısı 4 eşit parçaya ayrılarak açıklanmıştır.



Şekil 3. İmalatı yapılan motorun çalışma prensibi

- 1-2 işlemi : Sabit sıcaklıkta sıkıştırma, (sistemden dışarıya ısı verme işlemi)
- 2-3 işlemi : Sabit hacimde sisteme ısı verme işlemi,
- 3-4 işlemi : Sabit sıcaklıkta genişleme ve dış kaynaktan sisteme ısı verilmeye devam edilmesi,
- 4-1 işlemi : Sabit hacimde genişleme ve dış ortama ısı geçişi

3. MALZEME VE YÖNTEM

Isı kaynağı olarak 1 °C duyarlılığında, 1200 °C'ye kadar ısıtma yapabilen elektrikli bir ısıtıcı

kullanılmıştır. Motor devrinin ölçülmesinde, 5-100000 dev./dak aralığında ölçüm yapabilen, 0.1 dev./dak kararlılığına sahip, dijital takometre kullanılmıştır. Motorda moment ölçümü özel olarak imal edilmiş prony tip dinamometre ile yapılmıştır. Dinamometre sürtünme yüzeyleri balatalı olarak yapılmış ve yükleme yapılan yerde oynak başlı rulman kullanılmıştır.

İmalatı yapılan motorda sürekli çalışma şartları sağlandıktan sonra sıcak kaynak sıcaklığı, şarj basıncı ve ısı transferi yüzey alanının performans etkilerini görmek amacıyla deneyler yapılmıştır. Deneysel veri elde etmek amacıyla motor 800, 900 ve 1000 °C sıcak kaynak sıcaklıklarında, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 ve 3.5 bar şarj basınçlarında çalıştırılmış ve farklı miktarlarda yüklenerek devir ve moment ölçümü yapılmıştır. Her bir şarj basıncı ve sıcaklık için sabit motor devrinde prony tip dinamometre ile elde edilen kuvvet değeri, dinamometre moment kolu uzunluğu 0.31 m ile çarpılarak motor momenti bulunmuştur (formül 1).

$$M = F.l \quad (1)$$

Burada ;

M : Motor moment (Nm)

F: Kuvvet (N)

L : Moment kolu uzunluğu (m)'dur.

Motor gücü ise, hesaplanan moment değeri formül 2'de yerine konularak bulunmuştur.

$$P = \frac{2\pi nM}{60000} \quad (2)$$

Burada;

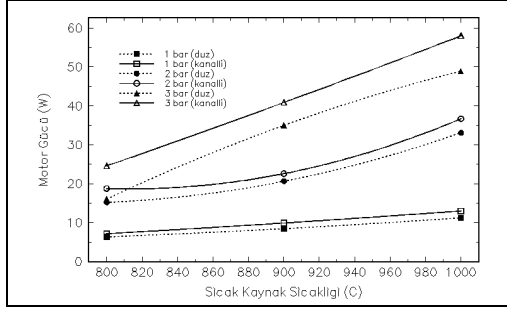
P: Motor gücü (kw)

n: Motor devri (1/dak)'dir.

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Sıcak kaynak sıcaklığına bağlı olarak motor gücü değişimi 1, 2, ve 3 bar şarj basınçları için Şekil 4'de verilmiştir. Şekil, 800, 900 ve 1000 °C olmak üzere 3 farklı sıcak kaynak sıcaklığı için en yüksek güç değerleri alınarak oluşturulmuştur. Motor gücü sıcak kaynak sıcaklığına bağlı olarak, ısıtıcı ve soğutucu sıcaklıkları arasındaki farkın artması ile yükselmektedir. Sıcak kaynak sıcaklığındaki artış ile çalışma maddesine çevrim başına transfer edilen ısı miktarı artmaktadır. Malzemenin dayanım sınırı ve yüksek sıcaklıklarda malzemede meydana gelen genişleme gibi nedenlerle ısıtıcı sıcaklığı belirli bir

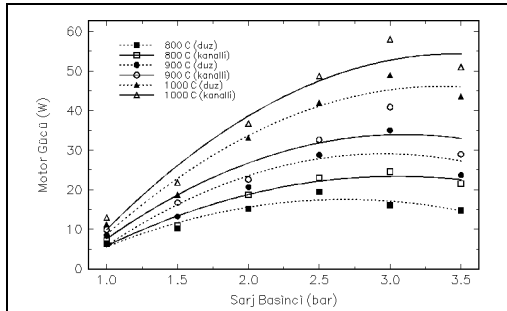
değerin üzerine çıkarılamamaktadır. Deneylerde sıcak kaynak sıcaklığı 1000 °C'ye kadar çıkarılmış, en yüksek motor gücü ve devri bu sıcaklıkta elde edilmiştir.



Şekil 4. Sıcak kaynak sıcaklığına bağlı olarak maksimum motor gücü değişimi

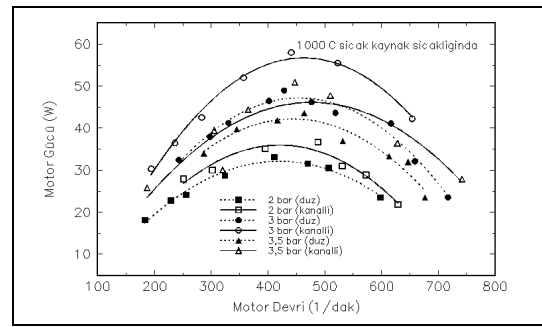
Motor gücünü arttıran diğer bir etken de ısı transferi yüzey alanıdır. Kanallı yer değiştirme silindiri ile ortalama % 20'lik bir güç artışı sağlanmıştır. Silindir içerisine kanal açarak ısı transferi yüzey alanının çok fazla artırılması ölü hacmi arttıracığından sıkıştırma oranını düşürür, bu ise motor gücünün düşmesine neden olur. Motorda maksimum güç kanallı yer değiştirme silindiri ile 1000 °C sıcak kaynak sıcaklığı ve 3 bar şarj basıncında 441 dev./dak motor devrinde 58 W olarak elde edilmiştir. Aynı sıcaklık ve basınç değerinde düz yer değiştirme silindiri ile elde edilen motor gücü ise 428 dev./dak motor devrinde 49 W olmuştur.

Şekil 5'de 800, 900 ve 1000 °C olmak üzere 3 farklı sıcak kaynak sıcaklığında şarj basıncına bağlı olarak motor gücü değişimi görülmektedir. Şarj basıncındaki artışa bağlı olarak, çalışma maddesi kütlelerinin artması ile motor gücü artmaktadır. Maksimum motor gücü 3 bar şarj basıncında meydana gelmektedir. Bu basınç değerinin üzerinde motor gücünde azalma görülmektedir. Şarj basıncına bağlı olarak artan çalışma maddesi miktarı ile ısıtıcı yetersiz kalmakta ve çevrim üst sıcaklığı düşmektedir. Ayrıca kartere olan kaçakların da artması negatif işin artmasına ve motor gücünde azalmaya neden olmaktadır.

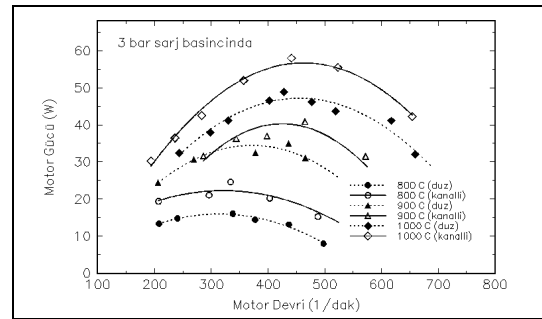


Şekil 5. Şarj basıncına bağlı olarak motor gücü değişimi

Şekil 6'da 1000 °C sıcak kaynak sıcaklığında 2, 3 ve 3.5 bar şarj basıncında motor devrine bağlı olarak güç değişimleri görülmektedir. Şekil 7'de ise 3 bar şarj basıncında, 800, 900 ve 1000 °C sıcak kaynak sıcaklıklarında devre bağlı güç değişimleri görülmektedir. Sabit şarj basıncı ve sıcak kaynak sıcaklıklarında yapılan deneylerde, motor devrine bağlı olarak elde edilen güç değişimleri içten yanmalı motorların güç eğrisi karakteristiği ile benzerlik göstermektedir. Motor gücü, devir ve momentin bir fonksiyonu olduğu için devir ve momente bağlı olarak artmaktadır. Güçteki bu artış bir maksimuma kadar olmakta, bu noktadan sonra azalmaktadır. Güçteki azalmanın nedeni artan devre bağlı olarak ısıtma ve soğutma periyotlarının kısalması ve ısı transferinin yetersiz kalmasıdır.

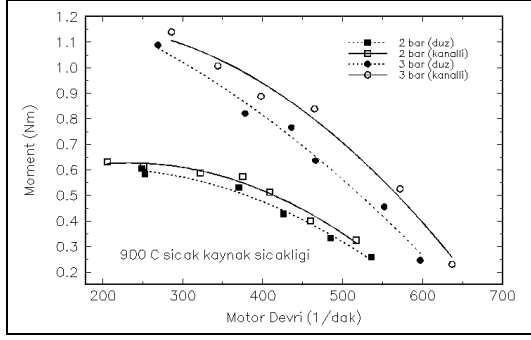


Şekil 6. Motor devrine bağlı olarak farklı şarj basınçlarında motor gücü değişimi



Şekil 7. Motor devrine bağlı olarak farklı sıcak kaynak sıcaklıklarında motor gücü değişimi

Şekil 8'de 900 °C sıcak kaynak sıcaklığında, 2 ve 3 bar şarj basınçlarında, kanallı ve düz olmak üzere iki farklı yer değiştirme silindiri ile elde edilen motor momenti değişimleri devre bağlı olarak görülmektedir. Motor devrindeki artış ile moment düşmektedir. Çünkü artan motor devri ile ısıtma ve soğutma periyotları kısalmakta ve çalışma maddesine olan ısı transferi azalmaktadır. Moment şarj basıncındaki artış ile artmaktadır. Ayrıca kanallı yer değiştirme silindiri ile artan ısı transferi yüzey alanına bağlı olarak motor momentinin daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 8. Motor devrine bağlı olarak moment değişimi

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, 276 cm³ süpürme hacmine sahip hava şarjlı γ tipi bir Stirling motoru deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler farklı şarj basıncı ve sıcak kaynak sıcaklıklarında, kanallı ve düz olmak üzere iki farklı yer değiştirme silindiri ile yapılmıştır. Belirli bir şarj basıncına kadar, çalışma maddesi kütleindeki artışa bağlı olarak çıkış gücü artmıştır. Maksimum motor gücü ve moment, 2.5-3 bar şarj basıncında elde edilmiştir. Şarj basıncının daha fazla artırılması olumsuz etki göstermiş, çıkış gücü ve momentte azalma başlamıştır. Çünkü, şarj basıncına bağlı olarak artan çalışma maddesi miktarı ile ısıtıcı yetersiz kalmakta, çalışma maddesine transfer edilen ısı miktarı azalmakta ve çevrim üst sıcaklığı düşmektedir. Motor devri, gücü ve moment sıcak kaynak sıcaklığına bağlı olarak artmaktadır. Sıcak kaynak sıcaklığındaki artış ile çevrim başına çalışma maddesine transfer edilen ısı miktarı ve çevrimin üst ve alt sıcaklıkları arasındaki fark artmaktadır. Motor gücü, devre bağlı olarak bir maksimum değere kadar yükselmekte bu noktadan sonra azalmaktadır. Güçteki bu azalmanın nedeni ısı transferinin yetersiz kalmasıdır. Yüksek sıcaklıklara dayanıklı malzemeler kullanarak sıcak kaynak sıcaklığı artırıldığında, motorun güç, devir ve momentini daha da artırılabilir. Deneylerde, kanallı ve düz yer değiştirme silindirleri ile elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında kanallı yer değiştirme silindiri ile motor gücünde yaklaşık % 20'lik artış sağlanmıştır. Sıkıştırma oranı ve ölü hacim sabit kalacak şekilde, yer değiştirme silindirinin içerisine kanal açarak ısı transferi yüzey alanı çok daha fazla artırılabilir. Stirling motorlarında borulu tip ısıtıcılar kullanılarak daha yüksek performans değerlerine ulaşılabilmektedir. Maksimum motor gücü 441 dev./dak motor devrinde 58 W olarak elde edilmiştir.

6. KAYNAKLAR

Anonymous, 2000. Stirling Energy Systems (SES) Incorporation, <http://www.stirlingenergy.com>.

Anonuyous, 1993. The SES Stirling Engine Programme, Sustainable Engine Systems (SES) Ltd., 51. Artesian Road, London, U. K.

Bean, J. R. and Diver, R. B. 1993. Performance of the 5 kW Dish Stirling System, "28th IECEC Conference", pp: 93054, pg:2627-2633, 8-13 August, Atalanta, Georgia.

Bekkoame, 2000. Stirling Engines, <http://www.bekkoame.or.jp>.

Çetinkaya, S. 1995. Gaz Türbinleri, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Ankara.

Çınar, C. 2001. Gama Tipi Bir Stirling Motorunun Tasarımı, İmali ve Performans Analizi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara.

Finkelstein, T. 1959a. Air Engines II, The Engineer, pg 522-527, April 3.

Finkelstein, T. 1959b. Air Engines III, The Engineer, pg 568-571, April 10.

Meijer, R. J. 1960. The Philips Stirling Thermal Engine, Thesis, Technische Hogeschool Delft, November.

Percival, W. H. 1974, Historical Review of Stirling Engine Development in the United States From 1960 to 1970, ERDA, No. NASA CR-121097.

Rizzo, J. 1997. To Develop, Educate and Promote Understanding of Stirling Cycle Engines, Information Leaflet, The Stirling Engine Society.

Sier, R. 1995. Some Pioneers in Air Engine Design, Chelmsford.

Urielli, I. 2000, Ohio University Department of Mechanical Engineering, Stirling Cycle Engines, <http://www.ent.ohio.edu/~urielli/stirling/engines>.

Walker, G. 1980, Stirling Engines, Oxford University Press, United States.