

HELYUM VE HAVANIN İŞ GAZI OLARAK KULLANILDIĞI BETA TİPİ BİR STIRLING MOTORUNUN PERFORMANSININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Yaşar Önder ÖZGÖREN ve Selim ÇETİNKAYA *

Otomotiv Anabilim Dalı, Makine Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Ahmet Necdet Sezer Kampusu, Afyonkarahisar

*Otomotiv Anabilim Dalı, Makine Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Gazi Üniversitesi, 06500,
Beşevler, Ankara

vasarozgoren@aku.edu.tr, selimc@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 27.05.2008 ; Kabul/Accepted: 13.01.2009)

ÖZET

Bu çalışmada, beta tipi bir Stirling motorunun performans karakteristikleri iş gazı olan hava ve helyum gazları kullanılarak belirlenmiş, sonuçlar grafikler halinde sunulularak karşılaştırılmıştır. Performans testleri 800, 900 ve 1000°C ısıtıcı sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir. Şarj basıncı her bir test aşamasında 1,0 bar'dan 4,0 bar'a kadar 0,5 bar aralıklarla değiştirilmiştir. Test motorunda maksimum güç, helyum gazının kullanıldığı 3,5 bar şarj basıncı ve 800 1/min motor devrinde 58,05 W olarak ölçülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Beta tipi Stirling motoru, çalışma akışkanları, helyum, performans testleri.

EXPERIMENTAL STUDY ON THE PERFORMANCE OF A BETA TYPE STIRLING ENGINE USING HELIUM AND AIR AS WORKING GAS

ABSTRACT

In this study, using air and helium as working gas, performance characteristics of a beta type Stirling engine were determined, plotted graphically and discussed. Performance tests were realized at 800, 900 and 1000°C heater temperatures. During the tests charge pressure was varied from 1,0 bar to 4,0 bar with 0,5 bar increments. Maximum output of the test engine was obtained as 58,05 W with helium at 3,5 bar pressure and 800 1/min engine speed.

Keywords: Beta type Stirling engine, working fluids, helium, performance tests.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sıcak hava motorları 19. yüzyılın sonlarına kadar değişik tiplerde imal edilerek mekanik güç elde etmede kullanılmıştır. Stirling motorları, sıcak hava motoru veya sıcak gaz motoru olarak ya da tasarlayanların isimleri ile adlandırılmıştır [1].

İlk defa 1816 yılında Robert Stirling tarafından yapılmış ve sıcak hava motoru olarak adlandırılmış olan Stirling motorları, 19. yüzyılın sonlarından itibaren çok değişik tiplerde üretilmiş ve değişik alanlarda kullanılmıştır. Ancak, yüksek hızlı içten yanmalı motorların geliştirilmesi ve bunlarla daha yüksek özgül güçlerin elde edilmesi, Stirling

motorlarının otomotiv alanında geri planda kalmasına sebep olmuştur [2].

Robert Stirling'in kardeşi James Stirling'in çalıştığı Dundee Foundry Company adlı şirket tarafından 19. yüzyılda yapılan Stirling motorlarından iyi sonuçlar alınmıştır. İki ısıtıcı ve yer değiştirme pistonuna sahip çok büyük boyutlarda yapılan bu motorlar dökümhanelerde kullanılmıştır [3].

Stirling motorlarında "rhombic-drive" olarak adlandırılan mekanizma ilk kez 1953 yılında R. J. Meijer tarafından kullanılmıştır. Bu sistemde piston üzerine net bir yatay kuvvet gelmediğinden, piston sürtünmesi ve aşınma çok azdır. Meijer yine aynı yılda iş gazı

olarak hidrojen, helyum ve havayı kullanmış, en iyi performans değerini hidrojen ile elde etmiştir [4].

Stirling motorlarında değişik çalışma maddeleri 19. Yüzyılın sonlarından itibaren kullanılmaya başlanmıştır. Ancak, havanın maliyetinin düşük olması ve tamamen kapalı sistem yapma zorunluluğunun olmaması avantajdı. Motorlar büyük yapılmaktaydı, düşük devirliydi ve çoğunun ısıl verimleri çok düşüktü [5].

Soğutucu olarak hava motorlarıyla yapılan uygulamalarda, Philips iş gazı olarak hava, hidrojen ve helyum gazını kullanmıştır. Hava ile çalışan soğutma makinesinde soğuk silindir tarafında havayı soğutmak için ısı iletimi etkin bir şekilde sağlanmıştır. Daha sonra, iş gazı olarak hidrojen ve helyum kullanılmıştır [6].

Değişik çalışma maddelerinin kullanılmaya başlandığı ilk dönemlerde helyum çok pahalıydı ve zor bulunuyordu. Diğer ağır gazlar Stirling motorlarında iş gazı olarak kullanılabilirdi. Ancak, hafif gazlara göre istenilen sonuca daha zor ulaşılabileceği sonucuna varıldı. Örneğin, Philips tarafından yapay kalp sisteminde yer alan minyatür bir Stirling motorunda argon gazı kullanılmıştır [6].

Bean J.R., tarafından Cummins Güç Üretim Şirketi ve Sandia Ulusal Laboratuvarları tarafından yürütülen projede, su pompalarının çalıştırılması ve binaların elektrik ihtiyacının karşılanması amacıyla güneş enerjisi ile çalışan ve 5 kW güç üreten Stirling motorlu güç üretim sistemi kurulmuştur. İş gazı olarak hidrojen kullanılmıştır [7].

Richard K., NASA-Lewis Araştırma merkezinde, Stirling enerji dönüşüm sistemleri üzerine çalışmalar yapmıştır. NASA-Lewis uzay uygulamaları için dinamik güç kaynağı olarak hidrojen gazının iş gazı olarak yer aldığı serbest pistonlu Stirling enerji dönüştürücülerini kullanmıştır. Uzay çalışmalarında, güvenilirliği yüksek, uzun ömürlü, sistem verimliliği yüksek ve bununla birlikte düşük titreşimde çalışma özelliği olan Stirling motorları tercih edilmektedir. Serbest pistonlu Stirling motoru, hem güneş enerjisi hem de nükleer uzay güç üretme sistemlerinde kullanılmaktadır. Uzay ve yerküreye ait çalışma şartları oldukça farklı olmasına rağmen uzayda verimli bir şekilde çalışabilmektedir [8].

Koca A., güneş enerjisi ile çalışan "V" tipi küçük bir Stirling motoru tasarlamıştır. İş gazı olarak havanın kullanıldığı motorda en yüksek güç 2,5 bar şarj basıncında ve 900 °C ısıtıcı sıcaklığında 30,5 W olarak ölçülmüştür [9].

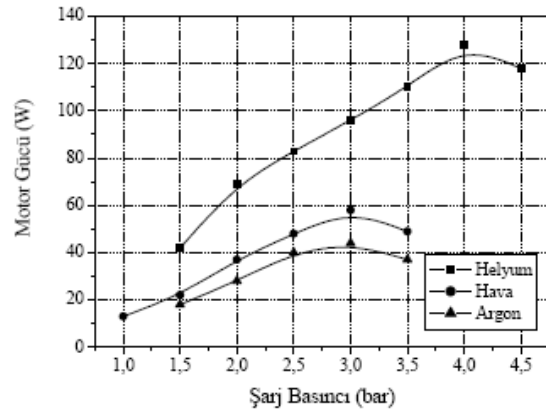
Üstün S., hava ile çalışan çift yer değiştirme pistonlu bir Stirling motoru geliştirmiştir. Yapılan testlerde en yüksek gücün 1,5 bar şarj basıncında ve 1000 °C

ısıtıcı sıcaklığında 65 W olarak ölçüldüğü belirtilmiştir [10].

Demiralp M., yapmış olduğu çalışmada, iş gazı olarak havanın kullanıldığı küçük hacimli bir Stirling motoru tasarlamış ve değişik ısıtıcı sıcaklığı ile değişik şarj basınçlarında yapmış olduğu denemelerde en yüksek gücü 2 bar şarj basıncında 1000 °C ısıtıcı sıcaklığında 21,46 W olarak ölçmüştür [11].

Stirling Enerji Sistemleri Kuruluşu (SES), 2002 yılında güneş enerjisi ile çalışan Stirling motoru sistemleri üzerinde çalışmalar yapmış ve iş gazı olarak hidrojen gazını kullanmıştır. Amerika'nın Arizona, Kaliforniya, Pensilvanya, Nevada ve Teksas eyaletlerinde araştırma ve pazarlama çalışmaları yapmıştır [12].

Çınar C., gama tipi bir Stirling motorunda hava, argon ve helyum kullanarak motor performans testleri yapmıştır. Motorun 700-1000 °C ısıtıcı sıcaklıkları arasında ve 1 bar'dan 4,5 bar'a kadar olan şarj basınçlarında çalıştırılmasıyla değişik çalışma akışkanlarının motor gücüne etkileri araştırılmıştır. Şekil 1'de değişik şarj basınçlarında yapılan performans testleri sonunda elde edilen motor güç değerleri görülmektedir. Motorda maksimum çıkış gücü helyum gazının kullanıldığı 1000 °C ısıtıcı sıcaklığında ve 4 bar'lık şarj basıncında 128 W olarak ölçülmüştür [13].



Şekil 1. Gama tipi bir Stirling motorunda 1000 °C ısıtıcı sıcaklığında değişik şarj basınçlarına göre motor güç değerleri [13] (Maximum engine power versus to charge pressure at 1000 °C heater temperature on Gama type Stirling engine)

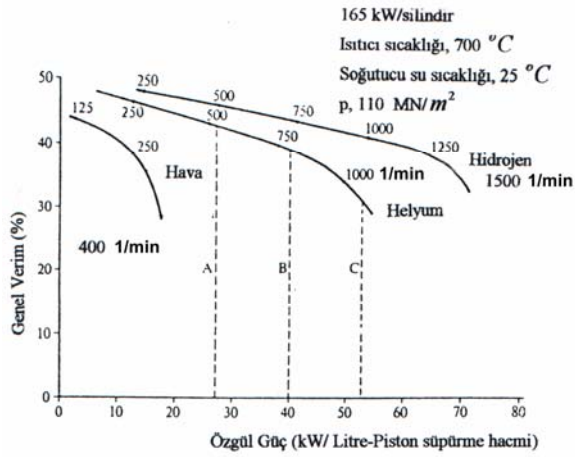
2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Teorik Karşılaştırmalar (Theoretical Comparisons)

Farklı çalışma akışkanlarının ilk sayısal karşılaştırmaları Şekil 2'de Meijer (1970) tarafından verilmiştir. Philips tarafından Stirling motor simülasyon bilgisayar programı kullanılarak oluşturulan bu eğriler, geniş bir bilgisayar optimizasyonu çalışmasının özeti. Sonuçların tamamı silindir başına 700 °C'lik bir ısıtıcıya sahip 165 kW gücündeki bir Stirling

motoruna aittir. Soğutucu sıcaklığı $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve maksimum basınç 110 MN/m^2 dir [6].

Motorun genel verimi (η_{tot}) litre başına kW olarak alınan özgül çıkış gücünün bir fonksiyonu olarak verilmiştir. Şekil 2'deki eğrilerde soldan sağa gidildiğinde motor hızlarının artmasına karşın toplam verimlerin azaldığı görülmektedir. Motor hızı eğrilerindeki her bir nokta maksimum verim ve motor çıkış gücü ile anılır.



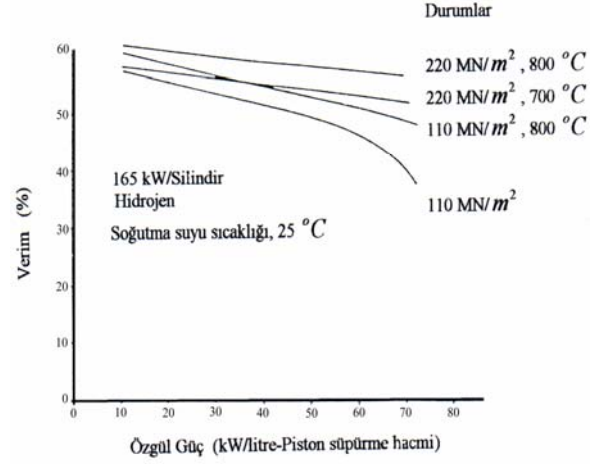
Şekil 2. Farklı iş gazları ile çalıştırılan Stirling motorunun performans değerlerinin karşılaştırılması [6] (Comparison of the performance values of a Stirling engine worked with different working gas)

Şekildeki hava eğrisinde çok fazla değişim vardır. 250 1/min 'lik dönüş hızında iş gazı hava olan motorun % 38'lik verimi, helyum için yaklaşık % 47 ve hidrojen için % 49'luk değerlerle karşılaştırıldığında çok düşüktür. Buna rağmen, güç yoğunluğunda önemli bir fark yoktur ve $8,9\text{ W/cm}^3$ civarındadır. Bu durum, güç artışı sağlamak için helyum veya hidrojen kullanmanın düşük ve sabit devirde çok az avantajlı olduğunu veya hiç avantajlı olmadığını göstermektedir. Bu nedenle hava halen yaygın olarak kullanılmaktadır. Düşük kompresyon uygulamasıyla hava sisteme basitçe yerleştirilebilir. Sade ve basit tasarımların oluşumu ile sabit elektrik jeneratörlerinde havanın hidrojen veya helyum kadar etkin kullanılabilmesi mümkündür.

Şekil 2'deki eğrilerde sağa doğru gidildiğinde (yüksek devirlerde) hava motorunun özgül çıkış gücünün motorun iş gazı hidrojen ve helyum olanlara oranla düşük olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca, yüksek hız ve güç seviyelerinde hidrojenin helyuma göre belirgin üstün özelliklere sahip olduğu da görülmektedir. Böylece, güç yoğunluğunun hayati önem taşıdığı otomotiv alanındaki uygulamalarda, iş gazı olarak hidrojenin önerileceği muhtemeldir. Önemli kazanç artışı, hidrojenin belirgin orandaki yüksek ısıl verimliliğinin sonucudur [6].

Helyum, gemicilikte, su altı güç sistemlerinde, büyük enerji bölgelerinde, ısı pompalarında veya binaların

enerji istasyonlarında güvenlik ön plana çıktığında kullanılmaktadır. Hidrojen'in son derece yüksek yanıcılık özelliğine karşın, helyum duranıdır. İş gazı olarak hidrojen kullanıldığında, maksimum basınç ve maksimum ısıtıcı sıcaklığının etkilerini göstermek için Şekil 3'deki eğriler kullanılmıştır [6].



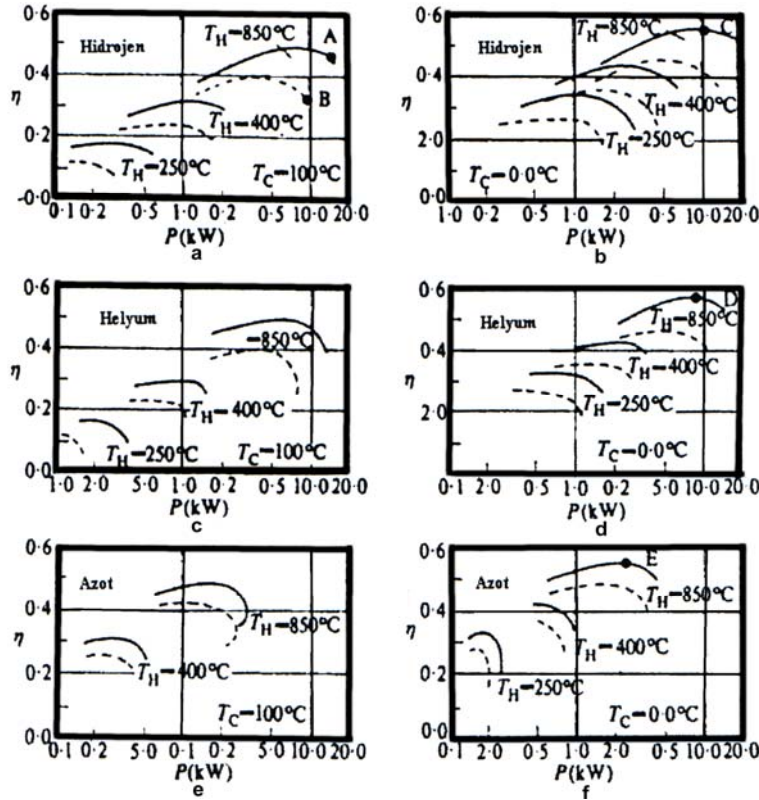
Şekil 3. İş gazı olarak hidrojen kullanılan motorda maksimum basınç ve sıcaklık değerlerinin verimliliğe etkileri [6] (The effect of maximum pressures and temperatures on the engine efficiency which used helium as working gas)

Şekilde, motor verimi piston süpürme hacminin birim litresi başına fren çıkış gücünün fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Motorun silindir başına 165 kW 'lık çıkış gücüyle maksimum verim şartlarında optimizasyonu yapılmıştır. 110 MN/m^2 'lik ve 220 MN/m^2 'lik maksimum basınçta 700 ve $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lik iki ısıtıcı sıcaklığında olmak üzere toplam 4 eğri gösterilmiştir [6]. Eğriler, kullanılan çelik malzemelerinin dayanımlarındaki artışla motorun daha yüksek maksimum basınç ve sıcaklıkta çalıştırılabileceğini ve ısı yalıtımı uygulamaları sayesinde daha yüksek çıkış güçleri elde edilebileceğini göstermektedir [6].

Michels (1976), farklı çalışma maddeleriyle ısıtıcı ve soğutucu sıcaklıklarının etkileri üzerine bir rapor yayımlamıştır. Michels, elde edilebilen optimum verim hesaplamasında Philips Stirling çevrim simülasyonu bilgisayar programını kullanmıştır. Simülasyon aşağıda belirtilen değişik çalışma şartlarında gerçekleştirilmiştir [6]:

- İki farklı soğutma sıcaklığı, $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $0\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Üç farklı ısıtma tüpü sıcaklığı, $850\text{ }^{\circ}\text{C}$, $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $250\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Üç farklı iş gazı, hidrojen, helyum ve azot.

Michels, hesaplamalarında süpürme hacmi 98 cm^3 ve iş gazı hidrojen olan tek silindri bir Philips motorunu esas almıştır. Motorun maksimum basıncı 220 MN/m^2 'dir ve 3000 1/min 'de 15 kW güç verebilecek kapasitededir. Elde edilen değerler Şekil 4'de gösterilmiştir. Motordaki mekanik kayıplardan kaynaklanan verim düşüklüğü kesik çizgilerle gösterilmiştir.



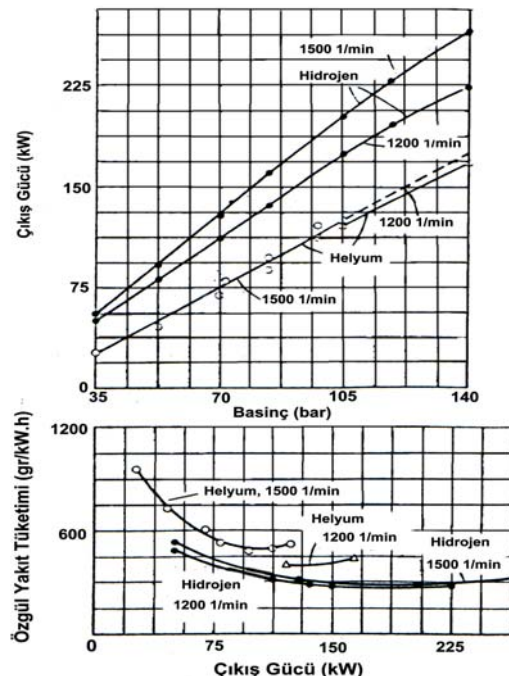
Şekil 4. Farklı çalışma maddeleri ile farklı ısıtıcı ve soğutucu sıcaklıklarında, çıkış gücüne karşılık hesaplanan verim eğrileri [6] (Calculated efficiency curves versus engine output with different working fluids and heater temperatures)

Michels'in elde ettiği sonuçların en önemli özelliği; ısıtıcı ve soğutucu için verilen sıcaklık rejimleri için fren veriminin yaklaşık olarak iş gazından bağımsız olduğudur. Örneğin, ısıtıcı sıcaklığı 850 °C ve soğutucu sıcaklığı 0 °C olduğunda hidrojen için en yüksek nokta C noktasıdır (Şekil 4 b). C noktasında 12 kW'lık çıkış gücünde maksimum verim % 56'dır. Helyum için, D noktasında (Şekil 4 d) en yüksek verim 9 kW'lık çıkış gücünde % 56'dır. Azot için, E noktasında (Şekil 4 f) en yüksek verim 2,5 kW'lık çıkış gücüne karşılık % 55'dir. Maksimum verimlerdeki yakın değerlere rağmen, farklı ısıtıcı ve soğutucu sıcaklıklarında güçte belirgin farklılıklar görülmektedir. Atmosferik hava, hacimsel olarak yaklaşık % 79 azot ve % 21 oksijenden oluştuğundan, Michels'in azot için bulduğu sonuçlar ciddi bir problem olmaksızın hava için de kullanılabilir [6].

2.2. Deneysel Karşılaştırmalar (Experimental Comparisons)

Loftus (1964) tarafından iş gazı olarak hidrojen ve helyum kullanılan 4 silindri, 265 kW gücündeki bir Stirling motorunun performans karakteristikleri Şekil 5'de değerlendirilmiştir. Loftus, iş gazı hidrojen olan motoru çalıştırmış hidrojen ve helyumun kullandığı deney sonuçlarını karşılaştırmıştır. Motor devri 1500 1/min olduğunda helyum gazının kullanıldığı motorda, motor çıkış gücünün 165 HP (121,44 kW) olduğu görülmektedir. Aynı motor devrinde hidrojen ile çalışan motor ise 275 HP (202 kW) güç vermektedir. Diyagramda, 1200 ve 1500 1/min'lik

motor devirlerinde çıkış gücüne bağımlı özgül yakıt tüketimi eğrileri görülmektedir. Diyagrama bakıldığında, her iki motor devrinde de özgül yakıt tüketimi değerlerinin helyum gazı kullanıldığında daha yüksek olduğu görülmektedir [6].



Şekil 5. Loftus'un 4 silindri Stirling motorunun performans karakteristikleri [6] (Performance Characteristic of Loftus' 4 cylinder Stirling engine)

2.3. Uygun İş Gazının Seçilmesi (Selection of Proper Working Fluid)

İş gazının seçilebilmesi için bir gazın diğer gazlara oranla üstünlüklerinin bilinmesi gerekir. Bu sorunun yanıtı gazın ısı iletimi ve mekanik kayıplarla ilgili fiziksel özelliklerinin bilinmesiyle verilebilir. Bu özellikler; akışkanın viskozitesi, ısı iletimi, özgül ısı ve yoğunluk değerleridir. Çizelge 1’de bu özellikler hidrojen, helyum, hava, su buharı ve karbondioksit için verilmiştir. Yoğunluk ve viskozite, akışkan sürtünme kayıpları için önemlidir. Isıtıcı ve soğutucudan arzu edilen ısı transferini gerçekleştirmek için motor akışkanını hareket ettirmede gerekli pompa gücünün belirlenmesini sağlar. Akış kayıpları direkt olarak ($\rho u^2/2$) ile orantılıdır. Burada, ρ gaz yoğunluğu, u ise gaz hızıdır. En iyi iş gazı pompalama kaybı en düşük olan (düşük ρu^2) veya düşük sürtünme özelliği ve yüksek ısı transfer katsayısına sahip olan akışkandır.

Çizelge 1. Hava, hidrojen, helyum, karbondioksit ve su buharı için termofiziksel özellikler [6] (Thermophysical characteristics of air, hydrogen, helium, carbondioxide and water vapour)

Akışkan	Özellikler	Sıcaklık (K)		
		250	500	1000
Hava 1 atm M=28.9	C_p (kJ / kgK)	1,003	1,029	1,141
	ρ (kg / m ³)	1,412	0,706	0,353
	$\mu \times 10^{-6}$ (kg / ms)	15,99	26,70	41,53
	$k \times 10^{-6}$ (kW / mK)	22,27	40,41	67,54
Hidrojen 1 atm M=2	C_p (kJ / kgK)	14,05	14,51	14,98
	ρ (kg / m ³)	0,098	0,049	0,024
	$\mu \times 10^{-6}$ (kg / ms)	7,92	12,64	20,13
	$k \times 10^{-6}$ (kW / mK)	156,1	271,8	452,2
Helyum 1 atm M=4	C_p (kJ / kgK)	5,19	5,19	5,19
	ρ (kg / m ³)	0,195	0,097	0,048
	$\mu \times 10^{-6}$ (kg / ms)	18,40	29,30	46,70
	$k \times 10^{-6}$ (kW / mK)	134,0	202,6	---
Karbon Dioksit 1 atm M=44	C_p (kJ / kgK)	0,791	1,014	1,234
	ρ (kg / m ³)	2,145	1,073	0,536
	$\mu \times 10^{-6}$ (kg / ms)	12,60	23,67	39,51
	$k \times 10^{-6}$ (kW / mK)	12,90	32,74	67,52
Su buharı Düşük basınç M=18	C_p (kJ / kgK)	1,855	1,954	2,288
	$\mu \times 10^{-6}$ (kg / ms)	9,42	17,3	37,6
	$k \times 10^{-6}$ (kW / mK)	18,8	35,7	97,9

Çizelge 1’de verilen beş akışkandan hidrojen, ısı transfer akışkanı olarak helyum ve su buharına oranla tercih edilir. İkinci seçenek ise helyum veya karbondioksit olmaktadır [6].

Genel olarak, nakledilme şartlarında en iyi özelliklere sahip akışkan hidrojendir. Verilen basınç ve sıcaklık değerlerinde ısı transferi özelliği bakımından en az

sürtünmeye sahip olan gaz yine hidrojendir. Hidrojenden sonra helyum gazı gelmektedir. Hidrojenle çalışan bir Stirling motorunda akış kayıpları daha azdır [6].

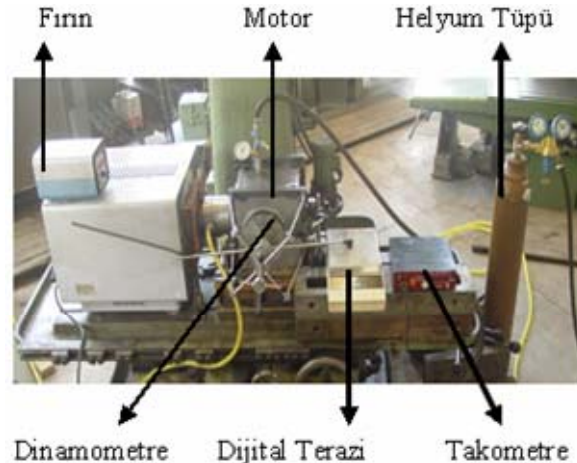
Stirling motorlarında en iyi iş gazı olan hidrojen birçok cazibesine rağmen, hava ile karışımının % 5 ve % 75 oranları arasında yanıcılık özelliğinin son derece yüksek olması nedeniyle tercih edilmemektedir [6]. Yukarıdaki değerlendirmeler ışığında güvenlik ön plana çıktığı için bu çalışmada iş gazı olarak helyum gazı tercih edilmiştir. Denemeler hava ve helyum gazı için ayrı ayrı gerçekleştirilerek karşılaştırma yapılmıştır.

2.4. Performans Testleri (Performance Tests)

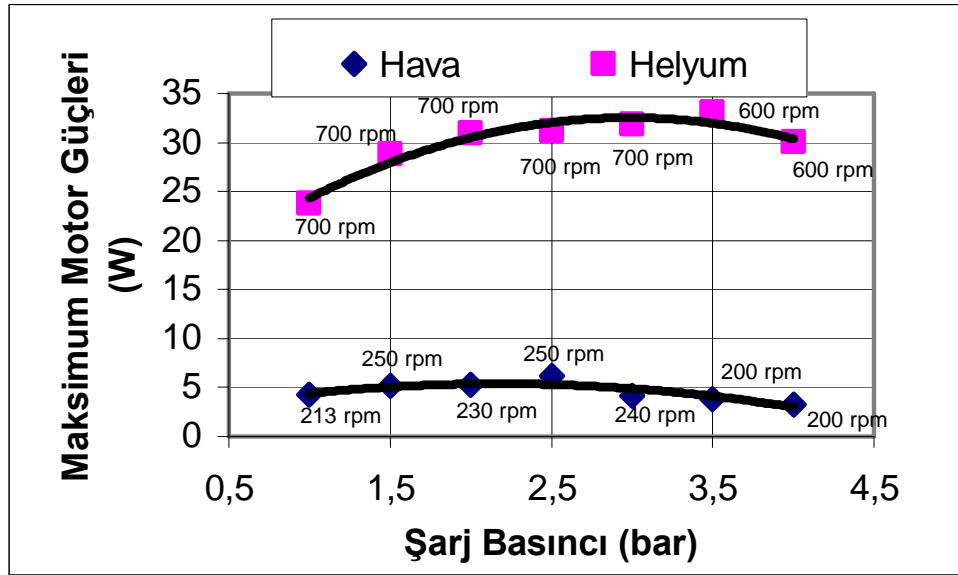
Şekil 6’da görülen deney düzeneğinin fotoğrafında ısıtıcı olarak ± 5 °C sıcaklık toleransına sahip 1200 °C sıcaklığa kadar ısıtma yapabilen dijital kontrollü fırın kullanılmıştır. Motor torkunu ölçmek için sürtünmeli dinamometre ile birlikte dijital terazi kullanılmıştır. Motor devri ise dijital takometre ile ölçülmüştür. Şarj basıncının kontrolü manometre ve manometre üzerinde bulunan bir valf ile sağlanmıştır.

3. TEST SONUÇLARI (TEST RESULTS)

Motor performans testleri, Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi Otomotiv Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Hava ve helyum gazının motor performansına olan etkilerini araştırmak için, üretimi gerçekleştirilen motorla değişik ısıtıcı sıcaklıklarında ve değişik şarj basınçlarında testler yapılmıştır. Ölçümlerden önce motorun istenilen test şartlarında kararlı çalışması sağlanmıştır. Değişik motor devirlerinde ve değişik şarj basınçlarına motor torkları ölçülmüş, bu değerlere bağlı motor güçleri hesaplanarak grafikleri çizilmiş ve incelenmiştir. Şekil 7, 8 ve 9’da, 800, 900 ve 1000 °C ısıtıcı sıcaklıkları ve değişik şarj basınçlarında hava ve helyum gazı için elde edilen motor gücü eğrileri görülmektedir. Şekil 7, 8 ve 9’daki motor gücü eğrileri incelendiğinde helyum



Şekil 6. Deney düzeneğinin fotoğrafı (Photo of test mechanism)



Şekil 7. 800 °C sıcaklıkta, şarj basıncı değişimine göre maksimum motor gücü değişimleri (Maximum engine power versus to charge pressure at 800 °C heater temperature)

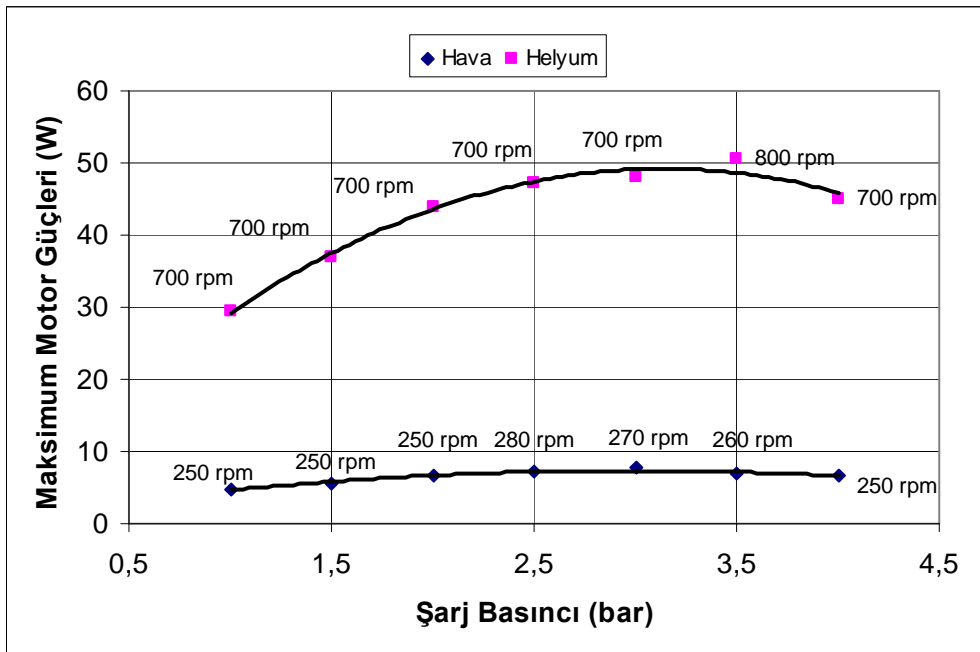
gazının kullanıldığı testlerdeki motor güçlerinin havanın kullanıldığı testlere göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Havanın kullanıldığı testlerdeki maksimum güç 1000 °C ısıtıcı sıcaklığında, 3,0 bar şarj basıncında ve 360 1/min motor devrinde 17,26 W olarak belirlenmiştir. Helyum gazının kullanıldığı testlerde ise maksimum güç 1000 °C ısıtıcı sıcaklığında, 3,5 bar şarj basıncında ve 800 1/min motor devrinde 58,05 W olarak belirlenmiştir.

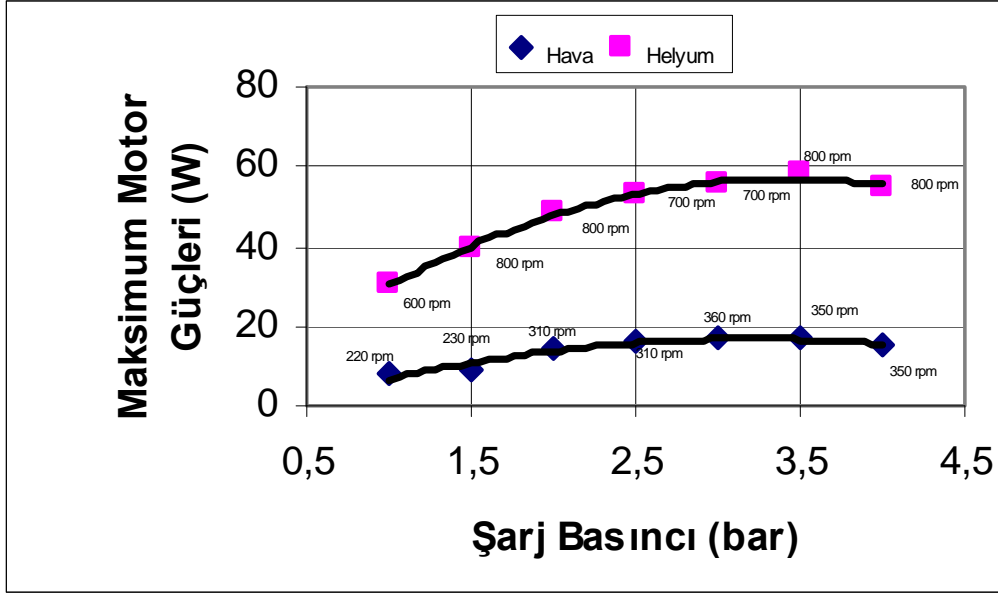
Çınar'ın yapmış olduğu testlerde en yüksek motor

gücü helyum gazının kullanıldığı 1000 °C ısıtıcı sıcaklığında ve 4 bar'lık şarj basıncında 128 W olarak ölçülmüştür [13]. Şekil 1'de Çınar'ın yapmış olduğu testlerde elde edilen değerlerle çizilen güç eğrileri incelendiğinde ve karşılaştırma yapıldığında hava ve helyum'a ait güç değerleri değişiminin birbirine benzediği görülmektedir. Motor tipleri ve ölçülerinin birbirinden farklı olması nedeniyle güç değerleri farklı olsa da her iki çalışmada helyum ile yapılan testlerde güç değerleri yüksek çıkmıştır.

Koca ve Üstün'ün çalışmalarında, hava ile motor testleri yapılmıştır. Elde edilen motor güçleri sırası ile



Şekil 8. 900 °C sıcaklıkta, şarj basıncı değişimine göre maksimum motor gücü değişimleri (Maximum engine power versus to charge pressure at 900 °C heater temperature)



Şekil 9. 1000 °C sıcaklıkta, şarj basıncı değişimine göre maksimum motor gücü değişimleri (Maximum engine power versus to charge pressure at 1000 °C heater temperature)

2,5 bar şarj basıncında 30,5 W ve 1,5 bar şarj basıncında 65 W olarak ölçülmüştür [9], [10]. Bu çalışmada hava ile yapılan testlerde maksimum motor gücü değerleri 2,5 ile 3,5 bar'lık şarj basınçlarında ölçülmüştür.

Loftus'un 265 kW gücünde ve 4 silindirli bir Stirling motoru ile yapmış olduğu testlerle ilgili olarak şekil 5 yeniden incelendiğinde, şarj basıncının 35 bar ile 140 bar arasında değiştiği görülür. Helyum ve hidrojen ile yapılan deneylerde şarj basıncının artan değerlerine bağlı olarak çıkış gücü değerlerinin de arttığı görülmektedir [6]. Beta tipi Stirling motoru ile yapılan bu deneylerde ise, bütün test aşamalarında 3,0-3,5 bar'lık şarj basıncına kadar maksimum motor gücü değerlerinde artış, özellikle 3,5 bar şarj basıncından sonra helyum ve hava ile çalışma durumunda maksimum motor gücü değerlerinde azalma görülmüştür.

4. TARTIŞMA (DISCUSSION)

Değişen şarj basıncına bağlı olarak maksimum güçler değerlendirildiğinde; düşük şarj basıncında sistemde yeterince iş gazının olamaması nedeni ile maksimum basınca ulaşamadığı görülmektedir. Bu motorda 3,5 bar basınçtaki akışkan en iyi çalışma şartlarının gerçekleşmesini sağlamıştır. Motorun çalışması için gerekli şarj basıncı motor karterinden sağlandığı için güç pistonunun altında motor gücünü azaltıcı bir karşı basınç oluşturmaktadır. Şarj basıncı 4,0 bar olduğunda, karşı basıncın etkisi ile motor gücü azalmıştır. Ayrıca yüksek devirlerde artan mekanik sürtünmeler ve titreşimler de motor gücünün azalmasına neden olmuştur.

Helyum gazı ve hava testleri karşılaştırıldığında helyum gazının kullanıldığı testlerde havaya göre güç

değerlerinin yüksek çıktığı görülmektedir. Helyum gazının sabit basınçtaki özgül ısısı 1,0 bar basınç ve 1000 K'de 5,19 kJ/kgK, aynı şartlardaki havanın sabit basınçtaki özgül ısınma ısısı 1,141 kJ/kgK'dir. Bunun sonucunda her iki gaz akışkana aynı basınç ve aynı sıcaklıkta ısı verildiğinde helyum gazının basınç artma oranı daha yüksek olacaktır. Ayrıca, helyum gazının yoğunluğu 1,0 bar basınç ve 1000 K'de 0,048 kg/m³, havanın yoğunluğu ise 0,353 kg/m³'tür. Helyum gazının yoğunluğunun daha az olması nedeniyle, cidarlara olan viskoz sürtünmeler de havaya göre daha az olmaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (RESULTS AND SUGGESTIONS)

Hava ve helyum'un iş gazı olarak kullanıldığı her iki denemede de motor devri ve gücü ısıtıcı sıcaklığına bağlı olarak artmıştır. Isıtıcı sıcaklığı motorun sıcak bölgesinde kullanılan malzemenin dayanım sınırına yakın değer olan 1000 °C sıcaklığına kadar yükseltilmiş ve bu sıcaklıktaki denemelerde en yüksek motor tork ve güç değerleri elde edilmiştir.

En yüksek güç değerleri, iş gazı olarak helyum gazının kullanıldığı denemelerde elde edilmiştir. En yüksek motor gücü, helyum gazının kullanıldığı 1000 °C ısıtıcı sıcaklığı, 3,5 bar şarj basıncı ve 800 1/min çalışma koşullarında 58,05 W olarak ölçülmüştür. Havanın kullanıldığı testlerdeki 17,26 W maksimum güç değeriyle karşılaştırıldığında bu 3,36 katlık bir artış demektir.

Motora şarj basıncı karterden uygulanmıştır. Daha etkili sızdırmazlık elemanlarının kullanılması ile güç pistonunun üst ve alt bölümleri tam anlamıyla birbirinden ayrıldığında ve şarj basıncı güç pistonunun

üzerindeki hacme uygulandığında motorun güç ve verimi artabilir.

Ancak, hidrojenin özgül ısınma ısısının yüksekliği nedeniyle, motor üzerinde dış ortamdan hiçbir şekilde hava almayan bir sızdırmazlık ortamı sağlanarak, hidrojen gazının yüksek basınç ve sıcaklıkta hava ile yanmadan çalışabileceği şartlar sağlandığı takdirde hidrojen gazı kullanımıyla motor gücü ve veriminin daha da artabileceği kuşkusuzdur.

Simgeler ve Kısaltmalar (Symbols and Abbreviation)

Simgeler (Symbols)	Açıklama (Definition)
C	Özgül ısınma ısısı, kJ/kgK
k	Isıl iletkenlik katsayısı, kW/mK
M	Mol kütlesi
μ	Dinamik viskozite, kg/ms
η	Verim
P	Güç, kW
R	Gaz sabiti, kJ/kgK
ρ	Yoğunluk, kg/m ³
T	Sıcaklık, °C, K
u	Hız, m/s
İndisler (Subscripts)	
c	Soğuk
H	Sıcak
p	Sabit basınçta
tot.	Toplam

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Finkelstein T. **Air engines**, The Engineer; 492-497, 1959.
- Dros A. "An industrial gas refrigerating machine with hydraulic piston drive", **Philips Tech. Rev.**, 297-308, 1965.
- Diel (Pty) Ltd. "Origins of the Stirling heat engine", <http://www.Stirlinghotairengine.com/history.htm>, 2001.
- Karabulut H, Yücesu S, Koca A. "Manufacturing and testing of a V-type Stirling engine", **Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences**, 24(2), 71-76, 2000.
- Hoehn F, McDaugal A. "Design of a prototype Stirling laboratory research engine", **13th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference**, San Diego, 1-2, 1978.
- Walker G., **Stirling Engines**, Oxford: Clarendon Pres, 1980.
- Bean, J. R., Diver, R. B., "The CPG 5 kW dish-Stirling development program", **27th. Intersociety Energy Conversion Engineering Conference Proceedings**, San Diego, 5.221, 1992.
- Richard, K., "Update on the advanced Stirling conversion system project for 25 kW dish Stirling application", **27th. Intersociety Energy Conversion Engineering Conference Proceedings**, San Diego, 5.229-5.235, 1992.
- Koco A., **V-Tipi Bir Stirling Motorunun Tasarım ve İmalatı**, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 1997.
- Üstün S., **Çift Yer Değiştirme Pistonlu V Tipi Küçük Güçlü Bir Stirling Motorunun Tasarım ve İmalatı**, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2000.
- Demiralp M., **Gama Tipi Bir Stirling Motorunun Tasarım ve İmalatı**, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2000.
- [12] Stirling Energy System Inc. Solar energy <http://www.Stirlingenergy.com/solar.projects.htm>, 2003.
- Çınar C., Koca A., Karabulut H., "4 Farklı Çalışma Gazlarının Stirling Motorunun Performansına Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi", **Gazi Üniversitesi, Müh. Mim. Fakültesi Dergisi**, Cilt:20, No:2, 247-250, 2005.