Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

GU J Sci, Part C, 14(3): 1785-1795 (2026)

Gama Tipi Rombik Mekanizmalı Bir Stirling Motorunun Tasarımı ve Termodinamik Analizi

Begüm EROL[1*], Can ÇINAR[2], Melih OKUR[2], Volkan PARLAKTAŞ[3]

[1]*Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye*

[2]*Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye*

[3]*Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 07/08/2026
Düzeltme: 31/08/2026
Kabul: 03/09/2026

Anahtar Kelimeler

Gama Tipi Stirling Motoru
Rombik Mekanizma
Motor Tasarımı
Kinematik Analiz
Termodinamik Analiz

Article Info

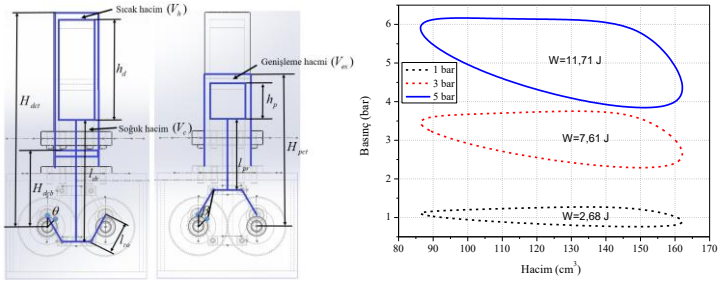
Research article
Received: 07/08/2026
Revision: 31/08/2026
Accepted: 03/09/2026

Keywords

Gamma Type Stirling Engine
Rhombic Mechanism
Engine Design
Kinematic Analysis
Thermodynamic Analysis

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada gama tipi ve rombik hareket mekanizmalı özgün bir Stirling motorunun tasarımı ve termodinamik analizleri yapılmıştır. Solidworks programında motorun 3 boyutlu modeli oluşturulmuştur. 800 K sıcak ve 300 K soğuk kaynak sıcaklıkları için izotermal yaklaşımı ve nodal analiz yöntemi ile 1, 3 ve 5 bar şarj basınçlarında motorun basınç-hacim, güç ve termik verim değişimleri elde edilmiştir. / In this study, design and thermodynamic analysis of a novel gamma type Stirling engine with rhombic drive mechanism were conducted. A 3D model of the engine was created in Solidworks software. Pressure-volume, power and thermal efficiency changes of the engine were obtained at 1, 3 and 5 bar charge pressures using the isothermal approximation and nodal analysis method for 800 K hot and 300 K cold source temperatures.



Şekil A: *Stirling motor modelinin oluşturulduğu hareket mekanizması ve basınç-hacim değişimleri (Nodal analiz) /* ***Figure A:*** *The motion mechanism used to build the Stirling engine model and pressure-volume variations (Nodal analysis)*

Önemli noktalar (Highlights)

- *Solidworks programında Stirling motorunun 3 boyutlu modeli oluşturulmuştur. / A 3D model of the Stirling engine was created in Solidworks software.*
- *Piston ve yer değiştirme pistonunun, yer değiştirme ve hacim değişimleri hesaplanmıştır. / The displacement and volume changes of the piston and the displacer were calculated.*
- *İzotermal ve nodal analiz yöntemleri ile farklı şarj basınçlarında motorun basınç-hacim, güç ve termik verim değişimleri elde edilmiştir. / Pressure-volume, power and thermal efficiency changes of the engine were obtained for different charge pressures using the isothermal and nodal analysis methods.*

Amaç (Aim): *Çalışmanın amacı, gama tipi ve rombik hareket mekanizmalı özgün bir Stirling motorunun tasarımı ve termodinamik olarak incelenmesidir. / The aim of the study is to design and thermodynamically investigate a novel gamma type Stirling engine with a rhombic drive mechanism.*

Özgünlük (Originality): *Gama tipi bir Stirling motoru çift taraftan yataklamalı rombik hareket mekanizmalı olarak tasarlanmış ve termodinamik olarak incelenmiştir. / A gamma type Stirling engine was designed and thermodynamically analyzed with a rhombic drive mechanism having bearings on both sides.*

Bulgular (Results): *500 rpm motor hızında ve 5 bar helyum şarj basıncında nodal analizde teorik olarak 97,61 W çıkış gücü ve %45,05 termik verim elde edilmiştir. / At 500 rpm engine speed and 5 bar helium charge pressure, 97.61 W theoretical output power and 45.05% thermal efficiency were obtained in nodal analysis.*

Sonuç (Conclusion): *Atık ısı veya güneş enerjisi ile çalışabilecek, teorik olarak 97,61 W çıkış gücüne sahip, özgün bir gama tipi ve rombik mekanizmalı Stirling motorunun tasarımı ve analizleri yapılmıştır. / The design and analysis of a novel gamma type Stirling engine with a rhombic mechanism and a theoretical output power of 97.61 W, capable of operating using waste heat or solar energy, were conducted.*

*Corresponding author, e-mail: begum.dizman@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.2013318

GU J Sci, Part C, 14(3): 1785-1795 (2026)

Gazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

Gazi University
Journal of Science
PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

http://dergipark.gov.tr/gujsc

Gama Tipi Rombik Mekanizmalı Bir Stirling Motorunun Tasarımı ve Termodinamik Analizi

Begüm EROL[1*], Can ÇINAR[2], Melih OKUR[2], Volkan PARLAKTAŞ[3]

[1]*Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye*

[2]*Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye*

[3]*Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye*

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 07/08/2026
Düzeltme: 31/08/2026
Kabul: 03/09/2026

Anahtar Kelimeler

Gama Tipi Stirling Motoru
Rombik Mekanizma
Motor Tasarımı
Kinematik Analiz
Termodinamik Analiz

Öz

Bu çalışmada yaklaşık 100 W çıkış gücüne sahip, gama tipi rombik hareket mekanizmalı özgün bir Stirling motorunun tasarımı, kinematik ve termodinamik analizleri yapılmıştır. Kinematik analizlerde rombik dişli dönüş açısına bağlı olarak piston ve yer değiştirme pistonunun, yer değiştirme ve hacim değişimleri hesaplanmıştır. Solidworks programında motorun 3 boyutlu modeli oluşturulmuştur. 800 K sıcak ve 300 K soğuk kaynak sıcaklıkları için izotermal yaklaşımı ve nodal analiz yöntemi ile 1, 3 ve 5 bar şarj basınçlarında motorun basınç-hacim değişimleri elde edilmiştir. Motordan 1, 3 ve 5 bar şarj basınçlarında izotermal yaklaşım ile 2,95 J, 8,81 J ve 14,52 J net iş elde edilmiştir. Nodal analiz metodu ile de 2,68 J, 7,61 J ve 11,71 J net iş elde edilmiştir. 5 bar şarj basıncında ve 500 rpm motor hızında teorik olarak 97,61 W çıkış gücü ve %45,05 termik verim elde edilmiştir. Literatürde beta tipi motorlarda yaygın olarak kullanılan rombik hareket mekanizması bu çalışmada özgün bir gama tipi Stirling motoruna uyarlanmıştır. Bu çalışmada tasarımı ve analizleri yapılan dıştan ısı vermeli Stirling motorunun güneş enerjisinden veya atık ısıdan faydalanarak elektrik üretimi ve küçük ölçekli sulama gibi amaçlarla kullanılması hedeflenmektedir.

Design and Thermodynamic Analysis of a Gamma Type Stirling Engine with Rhombic Drive Mechanism

Article Info

Research article
Received: 07/08/2026
Revision: 31/08/2026
Accepted: 03/09/2026

Keywords

Gamma Type Stirling Engine
Rhombic Mechanism
Engine Design
Kinematic Analysis
Thermodynamic Analysis

Abstract

In this study, design, kinematic and thermodynamic analyses of a novel gamma type Stirling engine with rhombic drive mechanism having an output power of approximately 100 W were conducted. In the kinematic analyses, the displacement and volume changes of the piston and the displacer were calculated as a function of the rhombic gear rotation angle. A 3D model of the engine was created in Solidworks software. Pressure-volume changes of the engine were obtained at 1, 3 and 5 bar charge pressures using the isothermal approximation and nodal analysis method for 800 K hot and 300 K cold source temperatures. 2.95 J, 8.81 J and 14.52 J net works were obtained from the engine at charge pressures of 1, 3 and 5 bar using the isothermal approach. Using the nodal analysis method, 2.68 J, 7.61 J and 11.71 J net works were obtained. 45.05% thermal efficiency and theoretically 97.61 W output power were obtained at 5 bar charge pressure and 500 rpm engine speed. In this study, the rhombic drive mechanism, commonly used in beta-type engines in the literature, has been adapted to a novel gamma type Stirling engine. The externally heated Stirling engine designed and analyzed in this study, could be used for electricity generation using solar energy or waste heat, and small-scale irrigation.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Artan dünya nüfusu ve teknolojik gelişmeler sebebiyle enerji ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Özellikle fosil kökenli yakıtların sınırlı ömrü ve çevreye verdiği zararlar araştırmaları yenilenebilir ve çevre dostu enerji kaynaklarına yöneltmiştir. Bu kaynakların başında güneş enerjisi gelmektedir [1]. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmede kullanılan, güvenli, yüksek verimli ve dıştan ısı vermeli Stirling motorları gelecek vaat eden alternatif enerji dönüşüm sistemlerinin başında gelmektedir. Güneş enerjisinden nükleer enerjiye kadar her türlü ısı kaynağını mekanik enerjiye

*Corresponding author, e-mail: begum.dizman@gazi.edu.tr
DOI: 10.29109/gujsc.2013318

dönüştürebilen Stirling motorları, Carnot çevrimi ile aynı termik verime sahip, kapalı rejeneratif termodinamik çevrime göre çalışan ısı motorlarıdır [2]. Stirling motorlarında temel olarak bir genişleme ve bir sıkıştırma hacmi, ısıtıcı, rejeneratör ve soğutucu ile birbirinden ayrılmaktadır. Genişleme ve sıkıştırma hacimlerinde çalışan pistonlar veya piston-yer değiştirme pistonu arasında yaklaşık 90° faz farklı bulunmaktadır. İdeal Stirling çevrimi, iki izotermal ve iki sabit hacim işleminden oluşmaktadır [3].

Stirling motorları dinamik ve kinematik motorlar olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Dinamik motorlarda krank-biyel gibi herhangi bir hareket mekanizması olmadan, piston ve yer değiştirme pistonu gaz basıncı ile silindir içinde hareket etmektedir. Dinamik Stirling motorları lineer bir alternatöre entegre edilerek güneş enerjisi, nükleer enerji ve biyokütle gibi enerji kaynaklarından elektrik üretimi için kullanılmaktadır. Kinematik motorlar ise temel olarak piston ve yer değiştirme pistonunun yerleştirme şekline göre alfa, beta ve gama olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır. Bu motorlarda piston ve yer değiştirme pistonunun hareketi krank-biyel, rombik, Ross-yoke ve wooble-yoke gibi mekanizmalar kullanılarak dairesel harekete dönüştürülmektedir [4-5]. Jeotermal enerji, atık ısı veya doğrudan güneş enerjisi kullanımı için gelecek vaat eden diğer bir Stirling motor tipi de düşük sıcaklık farklı (LTD) Stirling motorlarıdır. İlk defa Profesör Kolin tarafından 1983 yılında sadece 15 °C sıcaklık farkında çalışabilecek şekilde geliştirilen LTD motorlarda, yer değiştirme pistonunun süpürdüğü hacim güç pistonunun süpürdüğü hacme göre çok büyüktür [6,7].

Stirling motorları doğalgaz ve biyogazdan faydalanarak konutlarda kojenerasyon sistemlerine entegre edilebilmektedir [8-9]. Yoğunlaştırılmış güneş enerji sistemlerinde, Stirling motorları parabolik güneş çanağı ile elektrik enerjisi dönüşümü için kullanılmaktadır. Literatürde çanak-Stirling sistemleri için %29'u aşan toplam dönüşüm verimi rapor edilmiştir [8]. Daha düşük çalışma sıcaklıkları için tasarlanan, ucuz ve üretimi kolay güneş yoğunlaştırıcıları ve Stirling motorları küçük ölçekli sulama sistemleri için kullanılabilmektedir [10,11]. Özellikle son yıllarda yüksek enerji dönüşüm verimliliği ve serbest pistonlu motorlarda krank-biyel mekanizmasına ihtiyaç duymaması sebebiyle radyoizotop nükleer enerji ile çalışan Stirling motorları NASA tarafından derin uzay çalışmalarında da kullanılmaktadır. Radyoizotopların bozunmasıyla açığa çıkan ısı enerjisi Stirling motorunun sıcak ucuna aktarılmaktadır [12-14].

1816 yılında Robert Stirling tarafından ilk patentinin alınmasından günümüze kadar Stirling motorları üzerinde hem deneysel hem de teorik birçok akademik çalışma ve araştırma yapılmıştır [12]. De Moura ve arkadaşları [14] tarafından yapılan çalışmada uzay araştırmalarında kullanılmak üzere nükleer enerji ile çalışan serbest pistonlu bir Stirling motorunun sonlu zaman termodinamik modeli dinamik bir model ile birleştirilmiştir. Çalışmada frekans, sıkıştırma oranı, piston stroku ve yüzey alanı, rejeneratör verimi ve termal iletkenliğinin güç çıkışı ve sistem performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada rejeneratör veriminin motorun termik verimini önemli bir şekilde arttırdığı, bununla birlikte çok yüksek rejeneratör veriminin motor gücünü azalttığı görülmüştür. Elde edilen analiz sonuçları neticesinde en iyi parametreler seçilerek yapılan analizde 260,5 kW çıkış gücü ve 35,38 kg/kW güç yoğunluğu elde edilmiştir. Yang ve arkadaşları [15] tarafından yapılan çalışmada krank-biyel, rombik, Ross-yoke, Scotch-yoke ve bell-krank olmak üzere beş farklı hareket mekanizmasının beta tipi bir Stirling motorunun dinamik özellikleri ve performansına etkileri incelenmiştir. En yüksek çıkış gücü bell-krank mekanizması ile 550 rpm motor hızında 1533 W olarak elde edilmiştir. En yüksek indike iş (95,8 J) ve en düşük devir dalgalanması rombik mekanizması ile elde edilmiştir. Li ve arkadaşları [16] tarafından beta ve gama tipi Stirling motorlarının performansını tahmin etmek için yeni bir politropik model önerilmiştir. Modelde rejeneratör kayıpları, ısı iletim kayıpları, çalışma maddesinin ısı değiştiricisindeki viskozite kayıpları ve mekanik sürtünme kayıpları gibi çeşitli kayıplar dikkate alınmıştır. Çalışma maddesinin şarj basıncına bağlı olarak maksimum çıkış gücü için optimum bir yer değiştirme pistonu boşluk değeri belirlenmiştir. Alfarawi ve arkadaşları [17], ideal olmayan adyabatik analize dayalı bir termodinamik model geliştirmiş ve gama tipi bir Stirling motoruna uygulamışlardır. Çalışmada faz açısı, çalışma maddesi tipi ve ölü hacmin motor performansına etkileri incelenmiş, elde edilen sonuçlar STC05 CNC motorun deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Termodinamik model ve deney sonuçları arasında maksimum %15 sapma görülmüştür. 650 °C sıcak kaynak sıcaklığında soğutucu sıcaklığı 15 °C'den -50 °C'ye düşürüldüğünde motor çıkış gücü helyum için %49, azot için %35 artmıştır. Ntegmi ve arkadaşları [18] tarafından yapılan çalışmada, çeşitli tasarım ve çalışma parametrelerinin elektrik üretimi için kullanılan bir çanak/Stirling sisteminin enerji verimliliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada optimum motor frekansı 18 Hz ve

maksimum elektrik gücü 10,85 kW olarak elde edilmiştir.

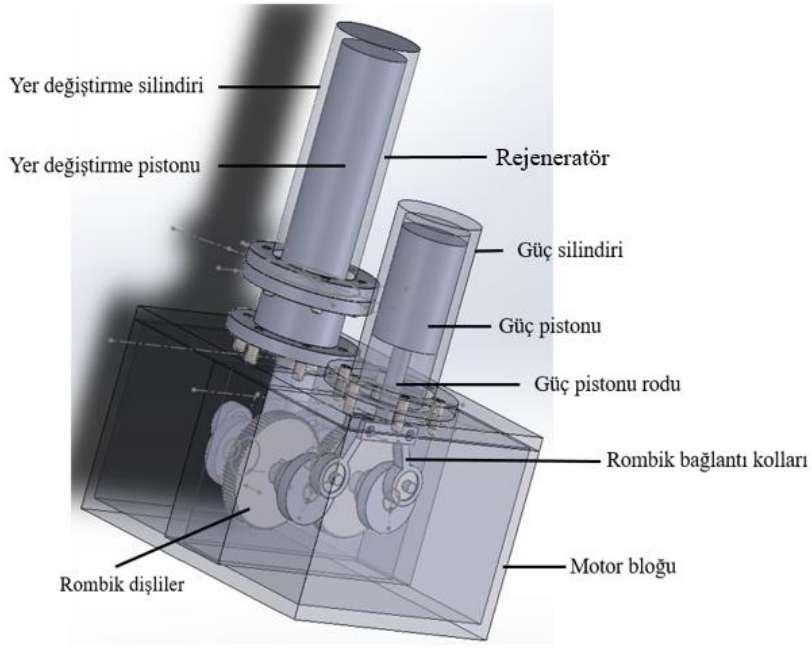
Ergin [19] tarafından yapılan deneysel çalışmada, helyum şarjlı gama tipi bir Stirling motorunda farklı şarj basınçlarında yer değiştirme pistonu ile silindiri arasındaki çalışma boşluğunun optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. 0,5, 0,7, 0,9 ve 1,1 mm olmak üzere 4 farklı çalışma boşluğunda motor hızına bağlı olarak tork ve güç değişimleri incelenmiştir. Çalışmada 0,9 mm optimum çalışma boşluğunda, 3 bar şarj basıncında 260 rpm hızda 45,06 W çıkış gücü ölçülmüştür. Cheng ve arkadaşları [20] tarafından yapılan çalışmada, 300 W güç üreten, rombik mekanizmasına sahip bir beta tipi Stirling motorunun geliştirilmesi, testleri ve ideal olmayan adyabatik analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada şarj basıncı, çalışma maddesi tipi, sıcak kaynak sıcaklığı ve rejeneratör tel örgü sayısının çıkış gücüne etkileri incelenmiştir. Motorda 8 bar helyum şarj basıncı, 850 °C ısıtıcı sıcaklığı, 120 tel örgü sayısı ve 1400 rpm hızda, 390 W çıkış gücü ve %32,2 termal verim elde edilmiştir. Topgül ve arkadaşları [21] tarafından gama tipi bir motorda yer değiştirme ve güç silindirleri arasında sıcak veya soğuk uçtan bağlantının performansa etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Bağlantı sıcak uçtan yapıldığında 200 °C sıcak yüzey sıcaklığında yapılan deneylerde 3,5 bar helyum şarj basıncında 411 rpm motor hızında 23,35 W çıkış gücü elde edilmiş olup, soğuk uçtan bağlantıya göre %84,7 artış görülmüştür. Karabulut ve arkadaşları [22] tarafından yapılan çalışmada, düşük ve orta sıcaklık farklarında çalışabilecek manivela hareket mekanizmalı beta tipi bir Stirling motorunun test sonuçları verilmiştir. Çalışma maddesi olarak hava kullanılan motorda 2,8 bar şarj basıncında 453 rpm motor hızında 51,93 W çıkış gücü elde edilmiştir. Topgül [23] tarafından yapılan çalışmada, bir hava kompresöründen dönüştürülen gama tipi bir Stirling motorunun imalatı, testleri ve termodinamik analizi verilmiştir. Analizlerde çalışma maddesi kütlesi, motor hızı ve yer değiştirme pistonu boyunun motor performansına etkileri incelenmiştir. Motorda maksimum termik verim %46,5 ve maksimum indike güç 1141,5 W olarak elde edilmiştir. Motordan deneysel olarak 4 bar helyum şarj basıncında, 260 rpm motor hızında ve 350 °C sıcak yüzey sıcaklığında 42,5 W çıkış gücü elde edilmiştir.

Bu çalışmada elektrik üretimi veya küçük ölçekli sulama amaçlı kullanılabilecek, yaklaşık 100 W çıkış gücüne sahip, rombik mekanizmalı gama tipi Stirling motorunun tasarımı, kinematik ve termodinamik analizleri yapılmıştır. Beta tipi Stirling motorlarında yaygın olarak kullanılan tek taraftan yataklamalı rombik mekanizmasında özellikle şarj basıncındaki artışa bağlı olarak sürtünme kayıpları artmaktadır [24]. Bu sebeple gama tipi ve özgün olarak tasarlanan motorda çift taraftan yataklamalı bir rombik mekanizması kullanılmıştır. Ayrıca gama tipi motorun piston-yer değiştirme pistonunun sıcak uçtan bağlantısı ile ısı transferi yüzey alanının da arttırılması hedeflenmiştir.

2. MOTOR TASARIMI VE ANALİZLERİ (ENGINE DESIGN AND ANALYSES)

Bu çalışmada Şekil 1'de görüldüğü gibi rombik dişlilerin her iki uçtan yataklandığı, piston ve yer değiştirme pistonu rodlarının rombik dişlilerin iki ucuna bağlandığı, gama tipi özgün bir Stirling motorunun tasarımı ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Rombik mekanizma birbirine ters yönlerde dönen eşit çaplı iki simetrik dişli, dişlilerin bağlandığı ana miller ve rombik bağlantı kollarından meydana gelmektedir.

Tasarımı yapılan motorda Şekil 1'de görüldüğü gibi motorun güç üreten kısmı yan yana yerleştirilmiş iki ayrı silindirde çalışan bir yer değiştirme ve bir güç pistonundan meydana gelmektedir. Yer değiştirme silindirinin üst kısmı sıcak hacmi, alt kısmı da soğuk hacmi oluşturmaktadır. Pistonun bulunduğu silindir ise genişleme hacmini oluşturmaktadır. Genişleme hacmi paslanmaz çelik bir boru ile yer değiştirme silindirinin sıcak hacmine bağlanmıştır. Çalışma maddesi helyum yer değiştirme silindirinin sıcak hacminden genişleme bölgesine bağlantı borusu ile geçmektedir. Ayrıca ısıtıcı ve ısı verme yüzeyi hem yer değiştirme silindirinin sıcak hacmini hem de genişleme hacmini kapsadığı için beta tipi motorlara göre daha büyük bir ısı transferi yüzey alanı sağlanabilmektedir. Motorda harici bir rejeneratör kullanılmamış olup, paslanmaz çelikten yapılan yer değiştirme silindiri ile pistonu arasındaki boşluk rejeneratör olarak görev yapmaktadır. Tasarımı yapılan motorun teknik özellikleri ve termodinamik analizde kullanılan girdiler Tablo 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Tasarımı yapılan rombik mekanizmalı gama tipi Stirling motoru (Designed gamma type Stirling engine with rhombic drive mechanism)

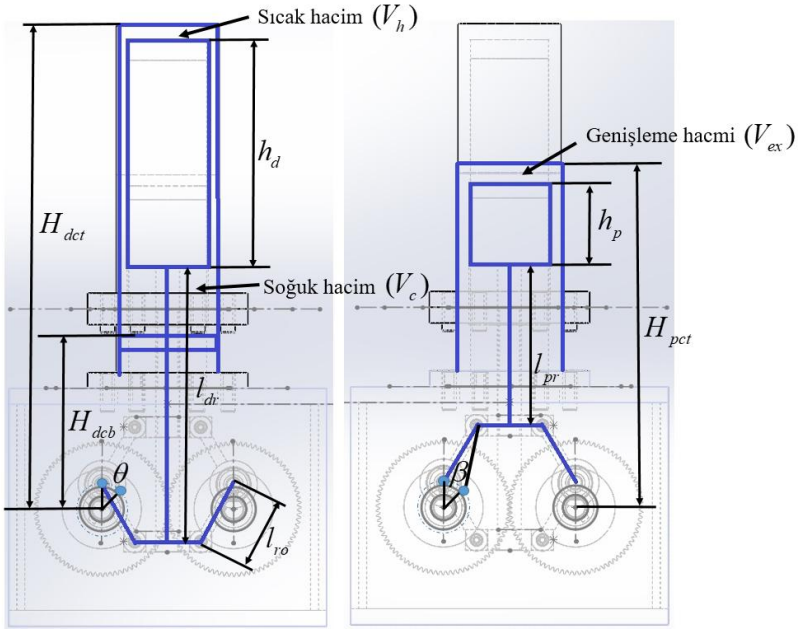
Tablo 1. Rombik mekanizmalı gama tipi Stirling motorunun teknik özellikleri (Technical specifications of the gamma type Stirling engine with rhombic drive mechanism)

Parametre	Sembol	Değer
Motor tipi	-	Gama
Hareket mekanizması	-	Rombik
Soğuk kaynak sıcaklığı $[K]$	T_c	300
Sıcak kaynak sıcaklığı $[K]$	T_h	800
Çalışma maddesi	-	Helyum
Çalışma maddesinin gaz sabiti $[J/kgK]$		2077
Yer değiştirme pistonu çapı $[mm]$	-	48,5
Yer değiştirme silindiri çapı $[mm]$	-	50
Yer değiştirme pistonu boyu $[mm]$	h_d	130
Piston çapı $[mm]$	-	50
Piston boyu $[mm]$	h_p	80
Rombik kol uzunluğu $[mm]$	l_{ro}	41,575
Rombik kol bağlantısıyla dişli ekseni arasındaki mesafe $[mm]$	R	$l_{ro}/2,666$
Rombik dişli ekseniyle yer değiştirme silindiri alt yüzeyi arasındaki mesafe $[mm]$	H_{dcb}	126,2
Rombik dişli ekseniyle yer değiştirme silindir tepesi arasındaki mesafe $[mm]$	H_{dct}	294,92
Rombik dişli ekseniyle piston silindir tepesi arasındaki mesafe $[mm]$	H_{pct}	203,75
Yer değiştirme pistonu rod çapı $[mm]$	-	14
Piston rod çapı $[mm]$	-	14
Yer değiştirme pistonu rod uzunluğu $[mm]$	l_{dr}	180
Piston rod uzunluğu $[mm]$	l_{pr}	70
Sıkıştırma oranı	-	1,87
Motor devri $[rpm]$	-	500

Isı taşınım katsayısı $\left[W/m^2K\right]$	-	600
Rejeneratör alanı $\left[cm^2\right]$	-	1200
Rejeneratör hacmi $\left[cm^3\right]$	-	15

2.1. Kinematik Analiz (Kinematic Analysis)

Şekil 2.a'da yer değiştirme pistonu, Şekil 2.b'de güç pistonu ve rombik hareket mekanizması bağlantıları görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yer değiştirme pistonu rodunun bağlandığı rombik kolların dişli üzerindeki kol muylusu bağlantısının yer değiştirme açısı (θ) referans alınarak motorun sıcak, soğuk ve genişleme hacim değişimleri elde edilebilir.



(a) Yer değiştirme pistonu (Displacer) b) Güç pistonu (Power piston)

Şekil 2. Stirling motor modelinin oluşturulduğu hareket mekanizması (The motion mechanism used to build the Stirling engine model)

Şekil 2'de görüldüğü gibi rombik kol bağlantısı ile dişlilerin dönme ekseni arasındaki mesafe,

$$R = \frac{l_{ro}}{2,666} \tag{1}$$

olarak yazılabilir [25,26].

Güç pistonu rombik kollarının yaptığı (β) açısı, yer değiştirme pistonu dişlilerinin dönme açısı cinsinden (θ),

$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{1}{2} - \frac{R}{l_{ro}}\sin\theta\right) \tag{2}$$

olarak yazılabilir [26]. Güç pistonu tepesinin dişlilerin eksenine göre yer değiştirmesi $\left(U_{pt}\right)$,

$$U_{pt} = R\cos\left(\theta\right) + l_{ro}\cos\left(\beta\right) + l_{pr} + h_p \tag{3}$$

olarak yazılabilir. Yer değiştirme pistonu üst ve alt ucunun dişlilerin eksenine göre yer değiştirme mesafesi de,

$$U_{dt} = R\cos\left(\theta\right) - l_{ro}\cos\left(\beta\right) + l_{dr} + h_d \tag{4}$$

$$U_{db} = R\cos\left(\theta\right) - l_{ro}\cos\left(\beta\right) + l_{dr} \tag{5}$$

olarak elde edilir. Buradan güç pistonu tepesinde bulunan genişleme hacmi değişimi,

$$V_{ex} = \left(H_{pct} - U_{pt}\right)A_{pc} \tag{6}$$

olur. Yer değiştirme pistonu üzerinde kalan sıcak hacim ve altında kalan soğuk hacim değişimleri de sırasıyla,

$$V_h = \left(H_{dct} - U_{dt}\right)A_{dc} \tag{7}$$

$$V_c = \left(U_{db} - H_{dcb}\right)\left(A_{dc} - A_{rod}\right) \quad (8)$$

olarak yazılabilir.

2.2. Termodinamik Analiz (Thermodynamic Analysis)

Stirling motorlarında kullanılan izotermal analiz metodu ideal bir gazın izotermal genişleme ve sıkıştırılması prensibine dayanmaktadır. Analizde akışın sürtünmesiz olduğu, çalışma maddesinin ideal gaz olduğu, çevrim boyunca gaz kütlesinin sabit olduğu ve kaçakların olmadığı kabul edilmektedir [27-29]. Ayrıca rejeneratördeki çalışma maddesi sıcaklığının da doğrusal değiştiği ve çalışma maddesi sıcaklığının her noktada rejeneratör sıcaklığında olduğu kabul edilmektedir (Eşitlik 9).

$$T\left(x\right) = \frac{T_h - T_c}{h_d} x + T_c \quad (9)$$

Analizde sıcak ve soğuk hacimlerde bulunan çalışma maddesi $T_h = 800\,K$ ve $T_c = 300\,K$ olarak kabul edilmiştir. Motorun analizinde çevrim süresi $\left(2\pi\right)$, Şekil 2'de görülen rombik dişli dönme açısı $\left(\theta\right)$ cinsinden 360 parçaya bölünerek her bir açı değeri için basınç ve hacim değişimleri hesaplanmıştır. İzotermal analizde basınç,

$$P = \frac{mR}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{V_i}{T_i}} \quad (10)$$

eşitliği ile hesaplanmıştır. Analizde net iş,

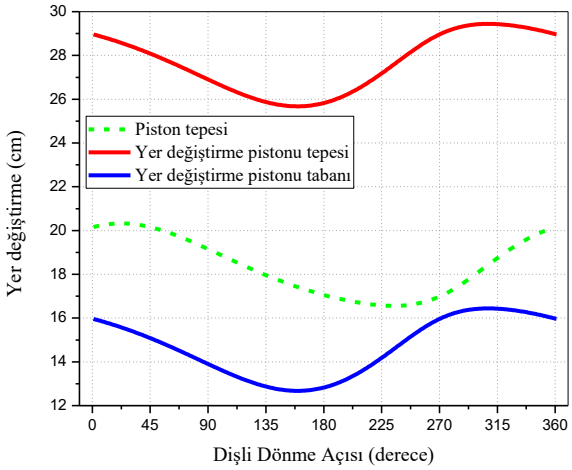
$$W = \sum_{i=1}^{i=n} P_i\left(V_i - V_{i-1}\right) \quad (11)$$

eşitliği ile hesaplanmıştır [17,30,31].

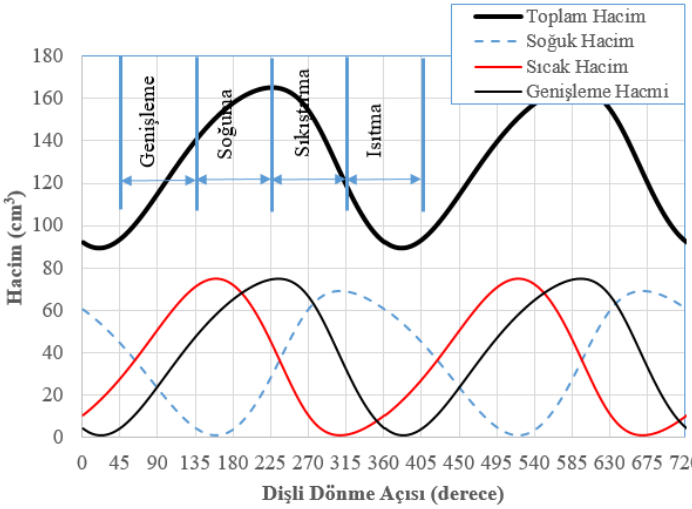
Motor ayrıca toplam 16 nodal hacme ayrılarak nodal termodinamik analiz metodu ile de 1, 3 ve 5 bar helyum şarj basıncı için motorun basınç-hacim değişimleri Fortran programı ile hesaplanmıştır. Rombik mekanizmalı gama tipi motor, yer değiştirme silindirinin altında kalan soğuk hacim $(i = 1)$, yer değiştirme silindiri ile pistonu arasında kalan ve rejeneratör olarak görev yapan ısıtma-soğutma kanalı $(i = 2,3,4...14)$, yer değiştirme silindirinin üzerinde kalan sıcak hacim $(i = 15)$ ve pistonun üzerinde kalan genişleme hacmi $(i = 16)$ olmak üzere toplam 16 nodal hacme ayrılmıştır. Her bir nodal hacimdeki sıcaklık, çalışma maddesi kütlesi ve basınç değerleri hesaplanmıştır. Yaklaşık 100 W çıkış gücü için tasarımı yapılan bu motorda analizler 500 rpm motor devri için yapılmıştır. Analizde nodal hacimlere Δt zaman aralığında giren ve çıkan entalpiler ile her bir nodal hacimdeki sıcaklık değişimleri $\left(\Delta T\right)$ hesaplanmıştır. Elde edilen sıcaklık değişimi kullanılarak her bir nodal hacim için sıcaklığın yeni değeri $\left(T_i = T_{i-1} + \Delta T\right)$ hesaplanmıştır. Nodal hacimlerdeki sıcaklıklar kararlı hale gelene kadar bu işlem tekrarlanmıştır [25,30,32,33].

3. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ (EVALUATION OF THE RESULTS)

Şekil 3'te kinematik analiz ile elde edilen, rombik dişli dönme açısına bağlı olarak piston ve yer değiştirme pistonunun yer değiştirmeleri görülmektedir. Şekil 4'te sıcak, soğuk, genişleme ve motorun toplam hacminin değişimleri görülmektedir. Şekil 4'te görüldüğü gibi rombik dişlinin 45º - 135° aralığında hareketi ile yer değiştirme ve güç pistonu üst ölü noktadan (ÜÖN) alt ölü noktaya (AÖN) hareket etmektedir. Bu süreçte sıcak hacim, genişleme hacmi ve toplam hacim artarken soğuk hacim azalmakta ve motor sabit sıcaklıkta genişleme yapmaktadır. Rombik dişlinin 135º - 225° arasındaki hareketinde ise güç pistonu AÖN'ya doğru hareketine devam ederken genişleme hacmi de artmaya devam etmektedir. Yer değiştirme pistonunun AÖN'dan ÜÖN'ya doğru hareketiyle sıcak hacim azalırken soğuk hacim artmakta ve sıcak hacimdeki çalışma maddesi soğuk hacme geçmektedir. Bu süreçte sıcak hacimdeki azalma yaklaşık olarak soğuk hacimdeki artışa eşit olduğundan çalışma maddesinin sabit hacimde soğutulması kabul edilmektedir. Genişleme hacminin artmasına bağlı olarak motorun toplam hacmi de artmaya devam etmekte ve maksimum hacim 227º'de 163 cm^3 olarak elde edilmektedir. Rombik dişlinin 225º - 315° aralığında hareketi ile güç pistonu AÖN'ya doğru hareket etmekte ve genişleme hacmi azalmaktadır. Yer değiştirme pistonu da ÜÖN'ya doğru hareketine devam ederken motorun toplam hacmi azalmakta ve çalışma maddesi sabit sıcaklıkta sıkıştırılmaktadır. Şekil 4'te rombik dişli 315º – 45° aralığında hareket ederken de güç pistonu AÖN civarında olup, yer değiştirme pistonunun AÖN'ya hareketi ile çalışma maddesine sabit hacimde ısı verme işlemi gerçekleşmekte ve sıcak hacme genişlemektedir.

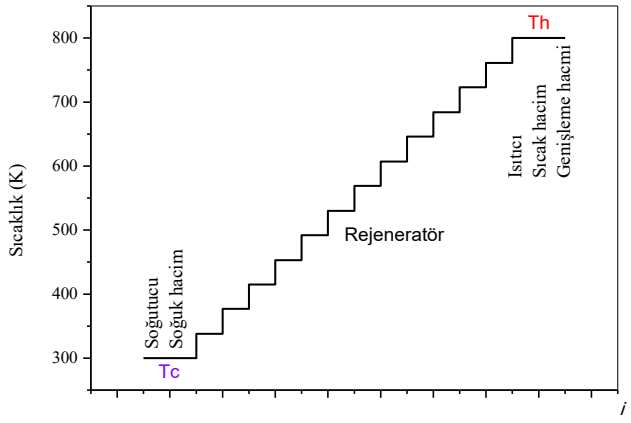


Şekil 3. Rombik dişli dönme açısına bağlı olarak piston ve yer değiştirme pistonunun yer değiştirmeleri (Displacements of the piston and displacer with the rhombic gear rotation angle)



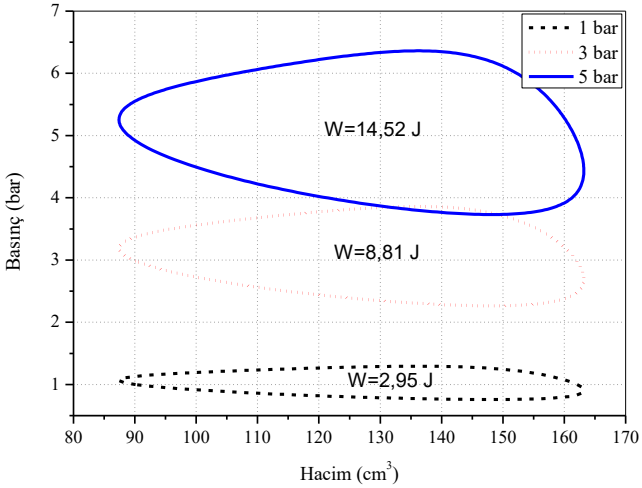
Şekil 4. Rombik dişli dönme açısına bağlı olarak sıcak, soğuk, genişleme ve toplam hacim değişimleri (Hot, cold, expansion and total volume variations with the rhombic gear rotation angle)

Şekil 5'te ısıtıcı ve soğutucu arasında motorun her bir bölgesindeki sıcaklık değişimleri görülmektedir. Motorda ısıtıcı sıcaklığı, yer değiştirme pistonu üzerinde kalan sıcak hacim ve güç pistonu üzerinde kalan genişleme hacminde bulunan çalışma maddesinin sıcaklığı 800 K olarak alınmıştır. Soğutucu sıcaklığı ve yer değiştirme pistonu altında kalan soğuk hacimde bulunan çalışma maddesi sıcaklığı da 300 K olarak alınmıştır. Genişleme hacmi ile soğuk hacim arasında çalışma maddesi sıcaklığının doğrusal değiştiği ve her noktada rejeneratör sıcaklığında olduğu görülmektedir.

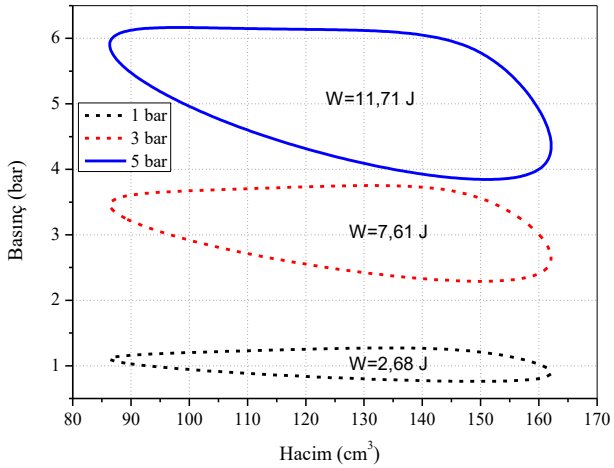


Şekil 5. Duvar sıcaklıkları (Wall temperatures)

Şekil 6'da izotermal analiz ile 1, 3 ve 5 bar şarj basınçları için motorun basınç-hacim değişimleri görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi 1, 3 ve 5 bar şarj basınçları için motorun net iş değerleri 2,95 J, 8,81 J ve 14,52 J olarak elde edilmiştir. Şekil 7'de de nodal analiz metodu ile 1, 3 ve 5 bar şarj basıncı için elde edilen basınç-hacim değişimleri görülmektedir. 1, 3 ve 5 bar şarj basınçları için motorun net iş değerleri sırasıyla 2,68 J, 7,61 J ve 11,71 J olarak elde edilmiştir. 500 rpm motor hızında, 5 bar şarj basıncında helyum gazı ile nodal analizde teorik olarak 97,61 W çıkış gücü elde edilmiştir. 5 bar şarj basıncında sonsuz ısı taşınım katsayısı veya ısı transferi yüzey alanına karşılık gelen izotermal analiz [33] ile karşılaştırıldığında nodal analizden elde edilen net işin %19,35 azaldığı görülmektedir. İzotermal analizde soğuk, sıcak ve genişleme hacmindeki gaz sıcaklıklarının T_c ve T_h duvar sıcaklıklarına eşit alınması da net işi arttırmaktadır. Motorda nodal analiz hesaplamalarında ısı taşınım katsayısı $600\ W/m^2K$ olarak alınmıştır. Motorda çalışma maddesi kütlesinin, şarj basıncındaki artışa bağlı olarak artması ile net iş değerlerinin arttığı görülmektedir. Literatürde Topgül [23], Aksoy ve arkadaşları [34] tarafından yapılan çalışmalarda da benzer sonuçların elde edildiği görülmektedir.



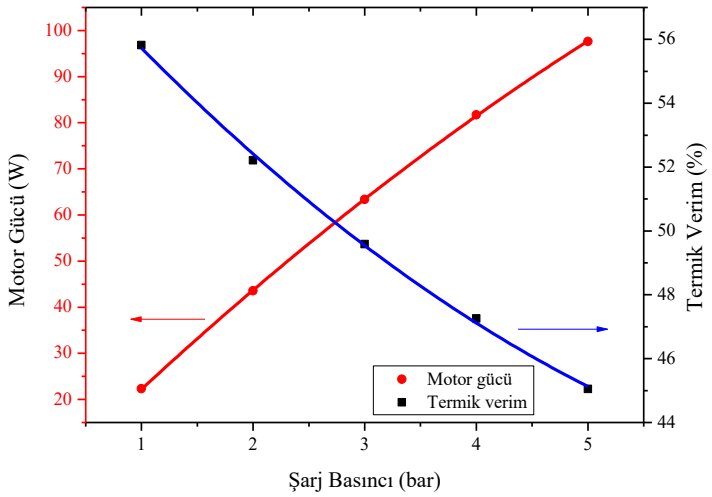
Şekil 6. Basınç-hacim değişimleri (İzotermal analiz) (Pressure-volume variations (Isothermal analysis))



Şekil 7. Basınç-hacim değişimleri (Nodal analiz) (Pressure-volume variations (Nodal analysis))

Şekil 8'de de nodal analiz metodu ile elde edilen, 1-5 bar şarj basınç aralığında şarj basıncına bağlı olarak motor gücü ve termik verim değişimleri görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi şarj basıncına bağlı olarak, motor içerisindeki çalışma maddesi kütlesinin artmasıyla motorun çıkış gücü artmaktadır. 1 bar şarj basıncında motor gücü 22,31 W iken, 5 bar basıncında teorik olarak 97,61 W çıkış gücü elde edilmiştir. Termik verim, net işin giren ısıya oranı (W/Q_{in}) olarak hesaplanmıştır. Şekilde görüldüğü gibi 5 bar şarj basıncında motorun termik verimi %45,05 olup, şarj basıncındaki artışa bağlı olarak azalmaktadır. Topgül [23] ve Solmaz ve Karabulut [32] tarafından yapılan çalışmalarda da şarj basıncına bağlı olarak motor gücünün arttığı ve termik verimin azaldığı

görülmektedir. Nodal analiz ile elde edilen termik verimin Carnot çevrim verimden $\left(\eta = 1 - {}^{T_c}\!/\!_{T_h}\right)$ düşük olmasının sebebi nodal hacimlerdeki çalışma maddesi sıcaklığının, duvar sıcaklıklarından farklı olmasından kaynaklanmaktadır [32].



Şekil 8. Şarj basıncına bağlı olarak motor gücü ve termik verim değişimleri (Engine power and thermal efficiency variations with charge pressure)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada piston ve yer değiştirme pistonunun ayrı silindirlerde yer aldığı gama tipinde ve rombik mekanizmasına sahip prototip bir Stirling motorunun kinematik ve termodinamik analizleri yapılmıştır. Özgün olarak tasarlanan gama tipi motorda dişlilerin çift taraftan yataklandığı bir rombik mekanizması kullanılmıştır. Motorda piston-yer değiştirme pistonunun sıcak uçtan bağlantısı ile ısı transferi yüzey alanının da arttırılması hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- İzotermal analiz metodu ile 1, 3 ve 5 bar şarj basınçlarında net iş değerleri 2,95 J, 8,81 J ve 14,52 J olarak elde edilmiştir.
- 600 W/m^2K ısı taşınım katsayısı için nodal analiz metodu ile 1, 3 ve 5 bar şarj basınçlarında net iş değerleri sırasıyla 2,68 J, 7,61 J ve 11,71 J olarak elde edilmiştir.
- 5 bar şarj basıncında izotermal analiz ile karşılaştırıldığında nodal analizden elde edilen net işin %19,35 azaldığı görülmektedir.
- 500 rpm motor hızında ve 5 bar helyum şarj basıncında nodal analizde teorik olarak 97,61 W çıkış gücü ve %45,05 termik verim elde edilmiştir.

Ülkemizde sanayi tesislerinin çok ciddi bir atık ısı potansiyeli bulunmaktadır. Bu atık ısıdan veya ülkemizin güneş enerjisi potansiyelinden faydalanarak elektrik enerjisi dönüşümü için dıştan ısı vermeli ve yüksek verimli Stirling motorları gelecek vaat etmektedir.

DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS (ETİK STANDARTLARIN BEYANI)

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS (YAZARLARIN KATKILARI)

***Begüm EROL*:** Literatür taraması, motorun tasarımı, analizler ve sonuçların değerlendirilmesi

Literature review, engine design, analyses and evaluation of the results.

***Can ÇINAR*:** Literatür taraması, motorun tasarımı, analizler ve sonuçların değerlendirilmesi

Literature review, engine design, analyses and evaluation of the results.

***Melih OKUR*:** Motorun tasarımı ve analizleri

Engine design and analyses.

***Volkan PARLAKTAŞ*:** Motorun tasarımı ve analizleri

Engine design and analyses.

CONFLICT OF INTEREST (ÇIKAR ÇATIŞMASI)

There is no conflict of interest in this study.

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

[1] Al-Nimr M, Khashan SA, Al-Oqla H. Novel techniques to enhance the performance of Stirling engines integrated with solar systems. Renewable Energy. 2023; 202: 894-906.

[2] Wang K, Sanders SR, Dubey S, Choo FH, Duan F. Stirling cycle engines for recovering low and moderate heat: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016; 62: 89-108.

[3] Schneider T, Müller D, Karl J. A review of thermochemical biomass conversion combined with Stirling engines for the small-scale cogeneration of heat and power. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020; 134: 110288.

[4] Yang HS, Ali MA, Teja KVR, Yen YF. Parametric study and design optimization of a kW-class beta type Stirling engine. Applied Thermal Engineering. 2022; 215: 119010.

[5] Wang H, Chen Y, Luo J, Zhang L, Kang H, Luo E, Zhu S. A novel high-power free-piston Stirling engine generator with integrated heat pipes for thermal-to-electric conversion of clean energy. Energy. 2025; 314: 134218.

[6] Kongtragool B, Wongwises S. A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2003; 7: 131-154.

[7] Phan TQ. Investigation on solar-powered low-temperature Stirling motor. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2017; 6: 21008-21013.

[8] Yang HS, Cheng CH. Development of a beta-type Stirling engine with rhombic-drive mechanism using a modified non-ideal adiabatic model. Applied Energy. 2017; 200; 62-72.

[9] Electricity and heat production from biogas CHP: discover technologies, https://biogasworld.com/news/biogas-chp-discover-technologies/, Erişim tarihi: 30.12.2025.

[10] Wazed SM, Hughes BR, O'Connor D, Calautit JK. Solar driven irrigation systems for remote rural farms. Energy Procedia. 2017; 142: 184-191.

[11] Wazed SM, Hughes BR, O'Connor D, Calautit JK. A review of sustainable solar irrigation systems for Sub-Saharan Africa. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018; 81: 1206-1225.

[12] Chen WL, Wong KL, Po LW. A numerical analysis on the performance of a pressurized twin power piston gamma-type Stirling engine. Energy Conversion and Management. 2012; 62: 84-92.

[13] NASA Tests New Heat Source Fuel for Deep Space Exploration, https://www.nasa.gov/humans-in-space/nasa-tests-new-heat-source-fuel-for-deep-space-exploration/, Erişim tarihi: 30.12.2025.

[14] De Moura EF, Henriques IB, Ribeiro GB. Thermodynamic-dynamic coupling of a Stirling engine for space exploration. Thermal Science and Engineering Progress. 2022; 32: 101320.

[15] Yang HS, Zhu HQ, Xiao XZ. Comparison of the dynamic characteristics and performance of beta-type Stirling engines operating with different driving mechanisms. Energy. 2023; 275: 127535.

[16] Li R, Grosu L, Li W. New polytropic model to predict the performance of beta and gamma type Stirling engine. Energy. 2017; 128: 62-76.

[17] Alfarawi S, Al-Dadah R, Mahmoud S. Enhanced thermodynamic modelling of gamma-type Stirling engine. Applied Thermal Engineering. 2016; 106: 1380-1390.

[18] Ntegmi GJB, Ninkam GM, Lanzetta F, Sapnken FE, Fateh MO, Pomou BFK, Tchinda R. Energy optimization of a dish/Stirling solar system for electricity generation. Results in Engineering. 2026; 29: 108501.

[19] Ergin T. Experimental optimization of displacer working gap in a gamma-type Stirling engine. Engineering Science and Technology, an International Journal. 2024; 52: 101677.

[20] Cheng CH, Yang HS, Keong L. Theoretical and experimental study of a 300-W beta-type Stirling engine. Energy. 2013; 59: 590-599.

[21] Topgül T, Okur M, Şahin F, Çınar C. Experimental investigation of the effects of hot-end and cold-end connection on the performance of a gamma type Stirling engine. Engineering Science and Technology, an International Journal. 2022; 36: 101152.

[22] Karabulut H, Yücesu HS, 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. 2009; 86: 68-73.

[23] Topgül T. Design, manufacturing, and thermodynamic analysis of a gamma-type Stirling engine powered by solar energy.

Strojniški Vestnik - Journal of Mechanical Engineering. 2022; 68: 757-770.

[24]Cinar C, Solmaz H, Ipci D, Yılmaz E, Aksoy F. Performance enhancement of a beta type rhombic drive Stirling engine. International Journal of Green Energy. 2020; 17: 884–893.

[25]Aksoy F, Solmaz H, Karabulut H, Cinar C, Ozgoren YO, Polat S. A thermodynamic approach to compare the performance of rhombic-drive and crank-drive mechanisms for a beta-type Stirling engine. Applied Thermal Engineering. 2026; 93: 359-367.

[26]Aksoy F, Cinar C. Thermodynamic analysis of a beta-type Stirling engine with rhombic drive mechanism. Energy Conversion and Management. 2013; 75: 319-324.

[27]Salih SA, Aljashaami BA, Alwan NT, Quasim MA, Shcheklein SE, Velkin VI. Isothermal thermodynamic analysis investigation of the Stirling engine types (alpha, beta, gamma): A theatrical study. Materials Today: Proceedings. Article in Press, 2023.

[28]Kwasi-Effah CC, Obanor AI, Aisien FA, Ogbeide O. Review of existing models for Stirling engine performance prediction and the paradox phenomenon of the classical Schmidt isothermal model. International Journal of Energy and Sustainable Development. 2016; 1: 6-12.

[29]Chmielewski A, Gumiński R, Maczak J. Analysis of isothermal thermodynamic processes in the Stirling engine. Proceedings of the Institute of Vehicles, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów. 2016; 106: 21-29.

[30]Karabulut H, Düzgün M, Topgül T. Üç silindirli gama tipi bir Stirling motorunun ve geleneksel gama tipi bir Stirling motorunun nodal termodinamik analizleri ve performans kıyaslaması. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi. 2023; 38: 45-56.

[31]Garcia MT, Trujillo EC, Godino JAV, Martinez DS. Thermodynamic model for performance analysis of a Stirling engine prototype. Energies. 2018; 11: 1-25.

[32]Solmaz H, Karabulut H. Performance comparison of a novel configuration of beta-type Stirling engines with rhombic drive engine. Energy Conversion and Management. 2014; 78: 627-633.

[33]Karabulut H, Aksoy F, Öztürk E. Thermodynamic analysis of a β type Stirling engine with displacer driving mechanism by means of a lever. Renewable Energy. 2009; 34: 202-208.

[34]Aksoy F, Solmaz H, Çinar C, Karabulut H. 1.2 kW beta type Stirling engine with rhombic drive mechanism. International Journal of Energy Research. 2017; 41: 1310-1321.