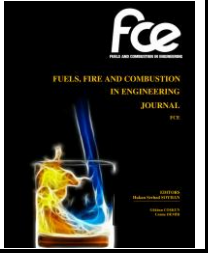
	ULUSLARARASI YAKITLAR, YANMA VE YANGIN DERGİSİ <i>FUELS, FIRE AND COMBUSTION IN ENGINEERING JOURNAL</i>		
	ISSN: 2564-6435		
	Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/fce		
	Geliş/Received 16.12.2020		
	Kabul/Accepted 28.04.2021	Doi https://doi.org/10.52702/fce.841524	

Wankel motorunun performansının numerik olarak incelenmesi

Bekir Tolga Altıparmak¹, Merve Küçük ^{*2}, Ali Sürmen³

ÖZ

Küçük motor hacminden yüksek güç üretimine imkân sağlayan Wankel tipi döner pistonlu motorlar; düşük titreşim, hafiflik, daha az parça sayısı gibi birçok avantajı beraberinde getirir. Bu durumun bir sonucu olarak yüksek volumetrik verim, vurutuya daha az bağımlılık ve güç/ağırlık oranının yüksek olması gibi pek çok avantajları sayesinde başta insansız hava araçları, hibrit araç uygulamaları, binek araçlar olmak üzere pek çok uygulama alanında tercih edilmektedir. Bu çalışmada, W802 gövde kodlu Wankel motorunda ana parçaların geometrik ölçülerine ulaşılmış ve CAD modeli oluşturulmuştur. Daha sonra bu temel ölçüler kullanılarak GT SUITE yazılımı yardımıyla 1 boyutlu performans analiz yapılmış ve raporlanmıştır. 1 boyutlu performans analizi verilerinin sınır koşulu olarak kullanıldığı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri ise devam etmektedir. Çalışma tamamlandığında tam yük koşulunda farklı hızlar için moment ve volumetrik verim yönünden karşılaştırılarak çevrim sürecine etki eden parametreler incelenmiş olacaktır.

Anahtar Kelimeler: döner pistonlu motor, iki-zamanlı çevrim, insansız hava araçları, Wankel motor.

Numerical investigation of the Wankel engine performance

ABSTRACT

Wankel type rotary engines which allow high power output from small engine volume are used in many applications, particularly in unmanned air vehicles, hybrid vehicle applications and automotive, owing to their such advantages as low vibration, lightweight, less components requirement and high power/weight ratio etc. In this study, firstly CAD model of the Wankel engine has been developed using basic geometrical calculations. Then 1 dimensional performance analyzes have been carried out in GT-SUITE software. Computational Fluid Dynamics (CFD) analyzes, in which 1D performance data used as initial conditions, are still ongoing. When the study is concluded, the parameters affecting the cycle process will be investigated by comparing in terms of moment and volumetric efficiency for different speeds under full load condition.

Keywords: rotary engine, two stroke cycle, unmanned air vehicles, Wankel engine.

* Merve Küçük

¹ Bekir Tolga Altıparmak, Yüksek Otomotiv Müh. Bursa Uludağ Üni., Bursa/Türkiye, btaltiparmak@gmail.com

² Arş. Gör. Merve Küçük, Bursa Teknik Üni., Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fak., Bursa/Türkiye, merve.altay@btu.edu.tr

³ Prof. Dr. Ali Sürmen, Bursa Uludağ Üni., Taşıt Tahrik ve Güç Sistemleri ABD, Bursa/Türkiye, surmen@uludag.edu.tr

1. GİRİŞ

Geçmişteki pek çok başarısız denemeden sonra 1954 yılında Dr.Felix Wankel (O tarihlerdeki adıyla Batı Almanya), NSU işbirliği ile dünyada döner motoru (Wankel Motor) başarılı bir şekilde geliştirmiştir. Dünyanın her yerinden mühendisler tarafından takip edilen yeni döner motor, dirençli ve kuvvetli oluşu sayesinde pratik bir motor haline gelmiştir. Gelişim sürecinde yaşanan sorunlara rağmen başarıyla geliştirilmiştir. Wankel Motoru endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir ve yenilikçi bir motor olarak tanınmıştır [1].

NSU ile birlikte yapılan geliştirme çalışmaları sonucunda, 1954 yılında birçok teknik sorunu çözümlenmiş DKM54 (Almanca: Drehkolbenmotor) motoru ortaya çıkmıştır. Bu motorun kullanıldığı NSU yapımı bir taşıt 1957 yılında 50 cm³ sınıfında dünya hız rekorunu kırmıştır.

1963 yılında ilk defa bu motor, piyasaya sürülecek Audi Spider'e yerleştirilmiştir. 1967'de motoru geliştiren Wankel, bu motora çift rotor eklemeyi başarmıştır. 900 cm³ iç hacmi olan motorun 103 kg ağırlığı vardır ve 136 beygirlik bir güç üretmeyi başarmıştır. Bu da o dönemin motorlarına göre geçilemeyecek bir hız sağlamıştır. Daha sonra Wankel motorunun bu performansını gören Japon ve Amerikan firmaları kendi imal ettikleri otomobillerde bu motoru kullanmaya başlamışlardır. 1972'de, 50 milyon dolarlık bir yatırımla bu motorun gücünü 185 beygire kadar çıkaran Amerikalılar bu motorun gelişmesinde Audi markası kadar büyük bir pay sahibi olmuşlardır. Bu yatırımdan sonra Rolls-Royce, Mercedes ve Alfa Romeo da Wankel motorunu kullanmışlar, 1970'lerin sonuna doğru ise bu motorun tüm haklarını Mazda'nın almasıyla diğer markaların Wankel motoru dönemi son bulmuştur. Şu anda Wankel motoru Mazda'nın RX-8 modelinde kullanılmaktadır [1].

Gkoutzamanis ve arkadaşları [3] SARM motoru adını verdikleri yeni bir döner pistonlu motor konsepti geliştirmişlerdir. İki boyutlu ve üç boyutlu HAD analizleri yürüterek elde ettikleri termodinamik verim ve güç çıkışı ile ilgili verileri pistonlu motorlarla kıyaslamışlardır.

2005 yılında Ercan'a ait yüksek lisans tezinde [4], verimli bir sıkıştırma evresi, limitli sıcaklıktaki yanma evresi ve bunu takip eden uzun bir güç alma

evresinden oluşan yeni bir termodinamik çevrim ile çalışan bir turbo döngüsel motor tasarlanmıştır. Motorun termodinamik ve yapısal tasarımı ve analizleri yapılmış ve bu analizler doğrultusunda iki tane prototip imal edilmiştir. İmal edilen prototiplerin komponent testleri tamamlanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

2005 yılında Arabacı'ya ait yüksek lisans tezinde [5], 16 cm³ türbin hacmine sahip turbo döngüsel Pars motorunda palet kalınlığı, yanma odası boyutu ve şeklinin motor performansına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Belirli hava debileri için yapılan deneylerde motor dinamometre ile yüklenerek veriler elde edilmiştir. Elde edilen veriler neticesine 30 l/min hava debisinde motor gücünde palet değişikliği ile %15, yanma odası değişikliği ile % 40'a varan artışlar sağlanmıştır.

Okur ve Akmandor'a ait 2017 yılında yapılan çalışmada [6], 300 DaN itki sınıfında klasik bir turbo jet motor performansı ile tamamen yerli bir konsept olan Pars turbo döngüsel motorun itki ve yakıt tüketim düzeyleri karşılaştırılmıştır. Pars turbo jet motor klasik turbo jet motora göre %35 daha az hava ile tüm kompresör basma oranları ve tüm türbin giriş sıcaklıklarında klasik turbo jet motoruna göre %5 daha fazla itki ürettiği ve %3 daha iyi özgül itkiye sahip olduğu ortaya konmuştur.

2009 yılında yine Okur ve arkadaşlarına ait çalışmada [7], termodinamik çevrimi ve rotor-gövde haznesi ile özgün bir yapıya sahip olan turbo döngüsel (PARS) motorun, buji konumlarının değiştirilmesi ile türbin performansına etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

Tüm bu çalışmalara rağmen Wankel motoru için AVL BOOST ticari yazılımında yer alan ek blok dışında geliştirilen özel bir simülasyon yazılımı olmadığı için pistonlu motorlara göre daha az araştırma yapıldığı göze çarpmaktadır. Son yıllarda Wankel motorlarına ilginin artması sebebiyle Twinmesh ticari yazılımında Wankel modülünün eklendiği görülmüştür. İkameti Ankara olan Navist Mühendislik firması, satışa sunduğu bu üründe müşterilerine wankel modülünü de seçenek olarak sunmaktadır.

Bu çalışmanın çıkarıldığı tez çalışmasında esinlenen ve yöntem belirlemede yararlanılan kaynak ise Spreitzer ve arkadaşlarına ait olan çalışmadır [8]. Bu çalışmada CONVERGE programı kullanılarak bir Wankel motor modeli

geliştirilmiş ve bu model kullanılarak gaz akışını ve yanma olayı ve analiz edilmiştir. Wankel motor modellerinde en önemli ve zor husus olan mesh yapısı, kullanılan yazılımla rotasyonlar sırasında otomatik üretilen mesh (automatic generating mesh) metodu kullanılarak oluşturulmuştur [8]. Çalışmadan elde edilen simülasyon sonuçları ile bu motor konseptinin bilinen dezavantajları ve problemleri (zayıf ısı verim, yüksek emisyonlar) doğrulanmıştır. Bu problemlere çözümler sunulmuştur.

Bu çalışmada referans alınan bir diğer önemli çalışma ise Tartakovsky ve arkadaşlarının 2012 yılında pistonlu motorlar için geliştirilmiş ticari bir yazılım kullanarak Wankel motor performansının simülasyonu gerçekleştirdikleri çalışmadır [9]. Çalışma sonunda Wankel ve pistonlu motorlar arasında geometrik benzerliği kullanarak bir algoritma ve emme/egzoz deşarj katsayılarının değerlendirilmesi için bir yöntem geliştirilmiştir. İki adet İHA Wankel deney motorundan alınan veriler ile simülasyon sonuçları karşılaştırılarak önerilen yaklaşımın yeterli olduğu gösterilmiştir.

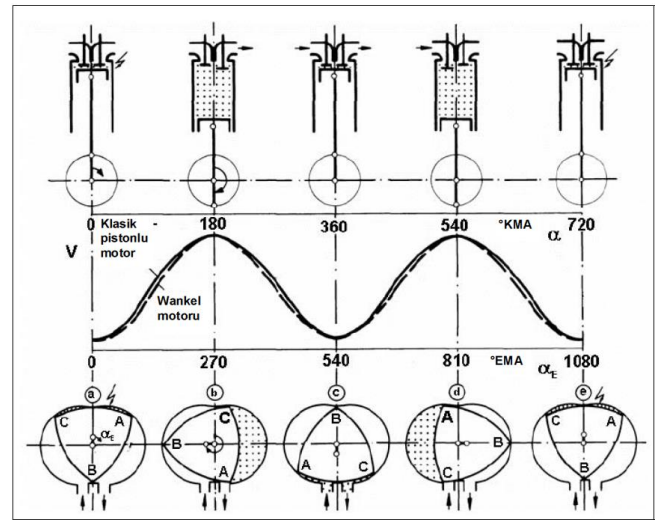
Resor HCCI döner pistonlu Wankel motoru üzerinde nümerik çalışmalar yürütmüştür [2]. Yanma odasında basınç, sıcaklık değişimleri, motor hızı vb. parametrelerin HCCI yanması üzerinde etkilerini incelemiştir. Çalışma sonunda, ön karışimli yakıt kullanımının yanma odasında basınç ve sıcaklık artımına sebep olduğu sonucuna varmıştır. Ayrıca HCCI döner pistonlu motorunun yakıt tüketimi ve kirletici emisyonlar açısından daha avantajlı olduğunu tespit etmiştir.

Aşınma problemleri ve buna bağlı olarak kısa ömürlü olmaları nedeniyle Wankel motorları çok yaygın uygulama alanı bulamamışlardır. Ancak son yıllarda özellikle savunma sanayisinde insansız hava araçlarının kullanımının yaygınlaşması ve askeri uygulamalarda verimliliğin öncelikli tercih olmaması, güç yoğunlukları çok yüksek olan bu motorların, özellikle ömür konusunun çok önemli olmadığı taarruzi İHA'larda kullanımını çok yaygınlaştırmıştır. Son yıllarda ülkemizde uygulanan askeri ve ekonomik ambargolar, teknolojik geçmişleri yüz yıllara dayanan iki zamanlı ve Wankel motorları gibi yüksek güç yoğunluklu motorların üretilmesini zorunlu kılmıştır. İki zamanlı üretimi başarılmıştır fakat savunma sanayimiz için üretimi mümkün olması halinde Wankel'in daha çok tercih edildiği bilinen bir gerçektir. Bu çalışma böyle bir üretim için

zemin teşkil edecek lisansüstü çalışmaların ilk aşamalarından derlenmiş bir çalışmadır. Çalışmada, hedef olan İHA larda halen kullanılmakta olan bir motorun geometrik ölçüleri esas alınarak, bir anlamda üretilecek özgün bir Wankel motorunun performansı için metodoloji doğrulaması yapılmak istenmektedir.

2. METARYAL VE METOD

Wankel motorlarının geometrilerinin standart dört zamanlı ve iki zamanlı motorlara göre farklı oldukları bilinmektedir. Bununla birlikte, literatürde Wankel motorları ve 4 zamanlı pistonlu motorlar arasında çeşitli geometrik ve dinamik benzerlikler kurularak Wankel motor modellemeleri yapılan pek çok çalışmaya rastlanmıştır. Aslında her iki motorda içten yanmalı motor kategorisinde yer aldığından, uygulanan benzetim methodologyla modelleme analiz sonuçlarının deneysel verilere yakın değerler verdiği görülmüştür (Şekil 1). Bu çalışmada da, modelleme aşamalarında, literatürdeki benzetim yöntemlerinden yararlanılmıştır.



Şekil 1. Klasik 4 zamanlı motor ile Wankel çevrimi karşılaştırılması [10].

2.1. CAD Model Oluşturulması

Leave Bu çalışmada üzerinde çalışılan motor, Vestel Hava Endüstrileri firmasından temin edilmiş olan 802W kodlu Wankel motorudur. Kullanılan motorun bazı teknik özellikleri Tablo 1'de belirtilmiştir.

Table 1. Mevcut Wankel motorun teknik özellikleri.

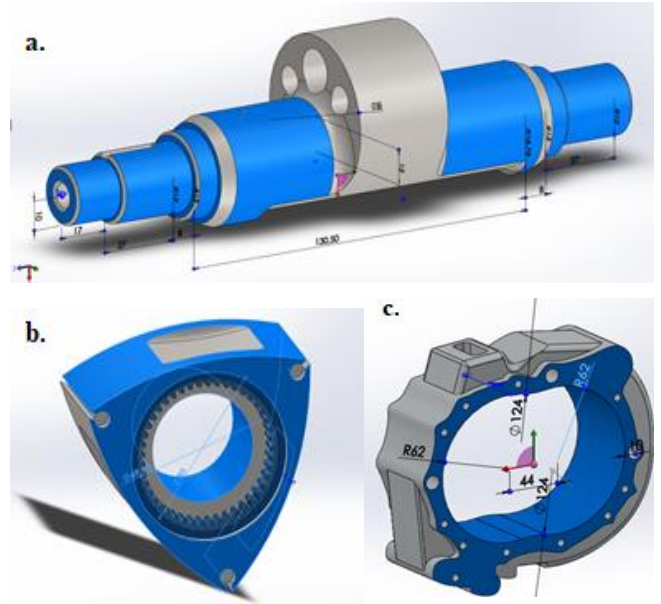
Rotor Sayısı	1 adet
--------------	--------

Giriş(Inlet)	Trokoid gövdede
Çıkış (outlet)	Trokoid gövdede
Net Emme Hacmi(cm ³)	319,84
Net Sıkıştırma Hacmi (cm ³)	31,85
Sıkıştırma oranı	9.6
Güç(kW)	24,8 (4000 RPM)
Buji sayısı/ pozisyonları	2 adet paralel
Soğutma sistemi	<ul style="list-style-type: none"> Ana gövde; sıvı soğutmalı. Ana gövde haricindeki (ön kapak, arka kapak, dişliler ve krank milini vs.) elemanlar; hava soğutmalı.

Şekil 2.'de görülen 802W kodlu Wankel motorunun modellemesi yapılırken tersine mühendislik ve ölçüm yöntemleri kullanılmıştır. Parçaların ölçümleri yapılırken elektronik kumpas, elektronik mikrometre ve 3 boyutlu ölçüm cihazı kullanılmıştır. Modeldeki tüm ölçüler motor parçalarının gerçek ölçüleridir. Wankel motoru, geometrisi sebebiyle belirli açılarda kendini tekrar eden alan ve hacim ölçüleri verir. Hedefimiz bu motor için ısıl analiz yapmaktır. Bu nedenle giriş ve çıkış portlarının kapalı olduğu aralıkta SOLIDWORKS CAD programında modellenmiştir (Şekil 3). Modelleme detay bilgileri bir sonraki aşamada verilecektir.



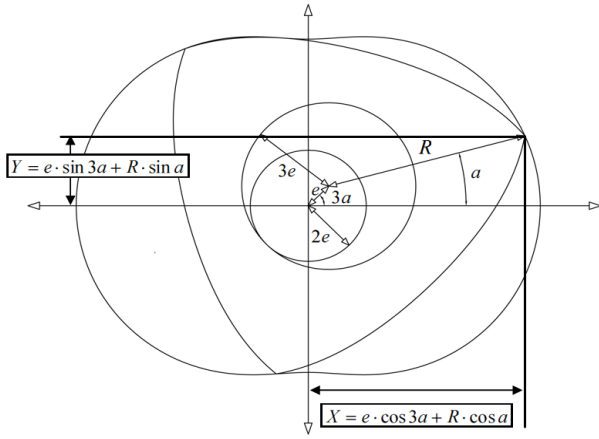
Şekil 2. İncelenen 802W kodlu Wankel motorunun sökülmüş halinin görüntüsü



Şekil 3. Oluşturulan katı modeller; a) Eksantrik mili b) Rotor, c) Motor gövdesi BDT modelleri.

2.1.1. Modellenen parçaların montajı

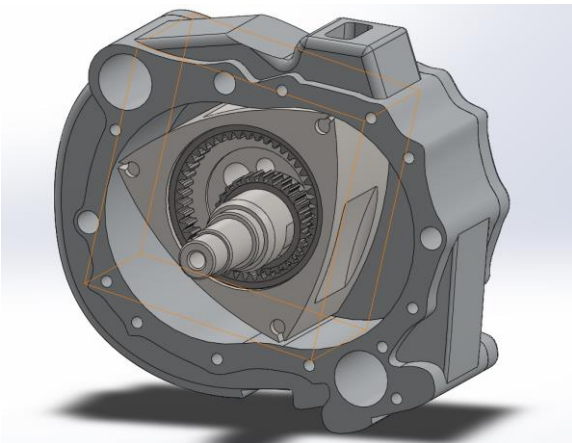
Wankel motoru tasarım geometrisi standart 4 zamanlı motorların geometrilerine kıyasla çok farklıdır. Wankel motor krank yapısı eksantrik olacak şekilde imal edilir. Teorik olarak birbirlerine oranı 2/3 olan iki çemberden küçüğünün büyük çember içerisinde kaymadan yuvarlanması prensibi ile çalışır ve geometrik tasarımında Şekil 4'teki oranlar kullanılır.



Şekil 4. Wankel gövde geometrisi şematik gösterimi.

Krank milinin eksantriklik ölçüsü her zaman küçük çemberin çap ölçüsünün $\frac{1}{4}$ oranında dizayn edilir. Bu şekilde üçgen yapıdaki piston oluşan yuvarlanma hareketi sonucunda bir eğri çizer ve gövdenin iç geometrisi oluşur. Gövde geometrisi sürtünme emniyeti göz önünde bulundurularak her zaman geniş üretilir. Teoride çember olarak hesaplanan yapılar üretim aşamasında dişli olarak imal edilir. Çember çapları aslında dönen dişlilerin modül çaplarıdır. Bu sebeple diş sayısı oranları da çember çapları ile orantılı olarak imal edilir. Üretilecek motorun hacmi ve güç seviyesine göre standart dışı özel üretim pinyon ve planet dişli çarklar imal edilebilir.

Bu oranlara uygun imal edilen Wankel W802 kodlu motor sökölüp, parçaları tek tek ölçüldükten sonra modellenmiştir. Elde edilen montaj resmi Şekil 5'teki gibidir.

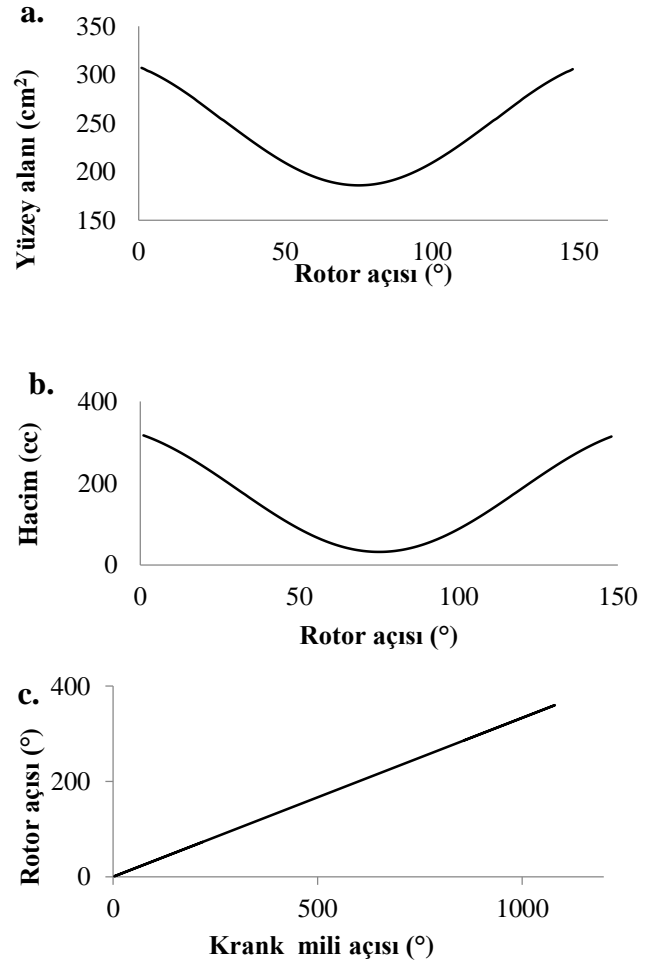


Şekil 5. Wankel W802 kodlu motorun montaj resmi

2.1.2. Yüzey Hacim Hesabı

Wankel motoru, geometrisi sebebiyle belirli açılarda kendini tekrar eden alan ve hacim ölçüleri

verir. Hedef ele alınan motor için ısıl ve mekanik analiz yapmaktır. Bu nedenle giriş ve çıkış portlarının kapalı olduğu 858° - 1080° veya 0° - 219° eksantrik mili açıları aralığındaki bölgeye ait rotor pozisyonu ve hacim geometrisi 3° lik krank dönüş ve 1° lik rotor dönüş hassasiyetinde SOLIDWORKS BDT programında modellenmiştir (Şekil 6).



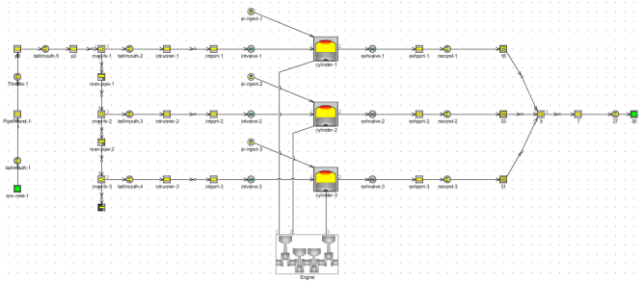
Şekil 6. Wankel W802 kodlu motorda rotor ve krank miline bağlı yüzey hacim grafikleri;
a. Yanma Odası Yüzey Alanı Grafiği, b. Yanma Odası Hacmi Grafiği, c. Rotor-Krank Mili Açısı Grafiği.

2.2. Parametrik Analizlerin (1 Boyutlu) Yürütülmesi

Mevcut motor için GT-SUITE yazılımında 1 boyutlu olarak model oluşturup analizler yapılmıştır. Bu analiz sonuçlarından motorun performans özelliklerini yorumlamak mümkündür. Ayrıca devam eden 3 boyutlu HAD simülasyonları için bu veriler sınır koşulu olarak kabul edilip ve daha kapsamlı sonuçlar elde etmek mümkün olacaktır. GT-SUITE modelinin

parametrik analiz sonuçları yararlı bir tahmin ve optimizasyon aracıdır. Bu parametrik analiz verileri, HAD analizleri için kütle akış hızları, emme, egzoz ve kaçak akışları için sınır koşulları saptamaktadır. Böylece hesaplama zamanından tasarruf elde edilmektedir. Bu sebeple güncel Wankel motoru çalışmalarının pek çoğunda özellikle deneysel veri olmayan şartlarda HAD analizleri öncesinde parametrik analiz yapılması tavsiye edilmektedir [8,9,11].

GT-SUITE esas olarak piston-silindir tasarımlarını modellemek için tasarlanan bir yazılımdır. Bu çalışmada bir döner motor olan Wankel motorunun GT-SUITE modeli, her bir yanma odacığı için piston ve silindir benzerlik yaklaşımları kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 7).



Şekil 7. Wankel motoru GT-SUITE modeli şeması.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılan çalışma tek boyutlu bir analiz olsa da motorun emiş ve egzoz manifoldları da dahil olmak üzere tüm ölçüsel parametreler programın benzerlik koşullarına göre tanımlanmış ve devire bağlı analizler yapılmıştır. Alınan sonuçlar sayısal ortamda yapılan bir analize göre tutarlı ve tasarım aşamasında başlangıç noktası olarak kullanılabilir niteliktedir.

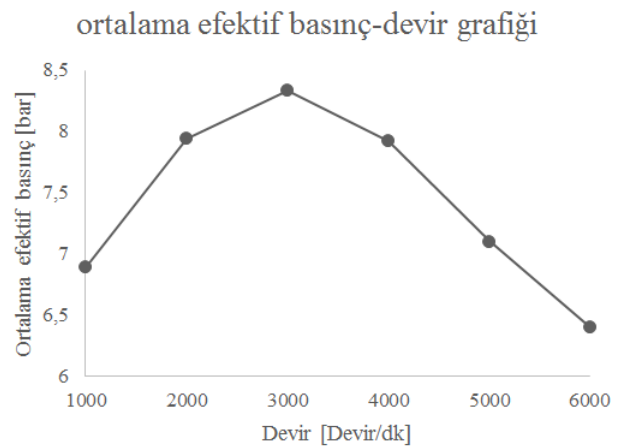
GT-SUITE programının alt yapısında motorun devir sayıları 1000 rpm ve 6000 rpm aralığında düzenlenip volumetrik verim, ortalama efektif basınç, özgül yakıt sarfiyatı, tork ve güç eğrileri oluşturulmuştur. Piston çapı değeri 111mm ve krank çapı değeri 29.06mm olarak girilmiştir. Bu değerlerin girilmesindeki amacımız yüzey alanı ve hacim parametrelerini Wankel motoruna benzetmektir. Çalışmanın temel amacı sonradan yapılacak olan daha büyük bir çalışma için ısıl başlangıç verileri elde etmektir. Bu nedenle yapılan bu benzetim değerleri sebebiyle motorun güç, tork ve özgül yakıt sarfiyatı verilerinde dengesizliklerin görülmesi beklenen bir sonuçtur.

Yine de imal edilmesi zor görünen bu geometrik değerlerde GT-SUITE programı, başlangıç verisi olarak kullanabileceğimiz ısı akışı ve ısı transfer katsayısı değerlerini verebilmiştir. Programın kullanılması aşamasında TEI firmasının motor tasarım birimindeki GT-SUITE modülleri kullanılmıştır. Yardımları için firmaya ve çalışanlarına teşekkür ederiz. Alınan veriler yorumlanarak benzer motor çalışmalarını içeren referans makalelerdeki veriler ile karşılaştırılmıştır. Bu yöntem ile elde edilen sonuçların motorun daha önce elde edilmiş çalışma verine yakın olduğu ve beklenen mantıklı değerlerin çıktığı görülmüştür.

Bu yöntem ve analiz çeşidi GT-SUITE programında sayısal parametreler ile oluşturulduğu için ele aldığımız motorun dışındaki farklı ölçülere sahip Wankel motorlarını analiz etmek için de kullanılabilir. Sadece motorun ölçüsel parametreleri, yakıt ve zamanlama verileri değiştirilerek oluşturulması planlanan yeni tasarım yapısına sahip motorlar için de hızlı bir tasarım doğrulama metodu olarak kullanılabilir.

Programdan elde edilen grafiklerde “case number” olarak gösterilen sayılar devir çarpanlarıdır. Grafikte okunmak istenilen bölgeye karşılık gelen sayı 1000 rpm değeri ile çarpılarak anlık devir sayısını bize göstermektedir.

3.1. Motorun ortalama efektif basınç grafiği

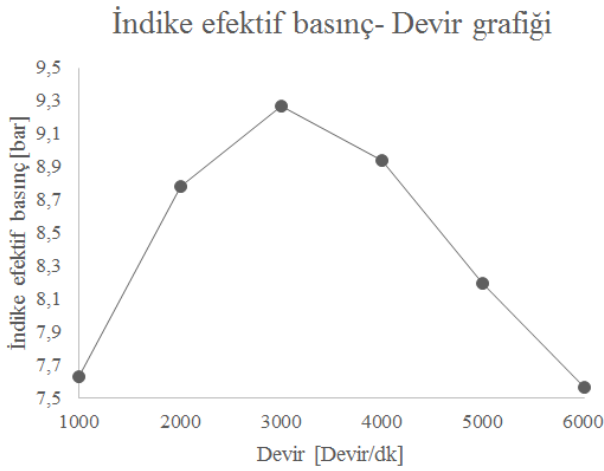


Şekil 8. GT-SUITE motor ortalama efektif basınç-devir grafiği.

Şekil 8’de görüldüğü üzere motor 3000 rpm devirde en yüksek ortalama efektif basınç seviyesine ulaşmıştır. Eğrinin devir arttıkça azalan eğri olarak gitmesi beklenen bir durumdur. Çizelgede en yüksek devir olan 3000 rpm

değerinde ortalama efektif basınç 8,4 bar seviyesinde okunmaktadır.

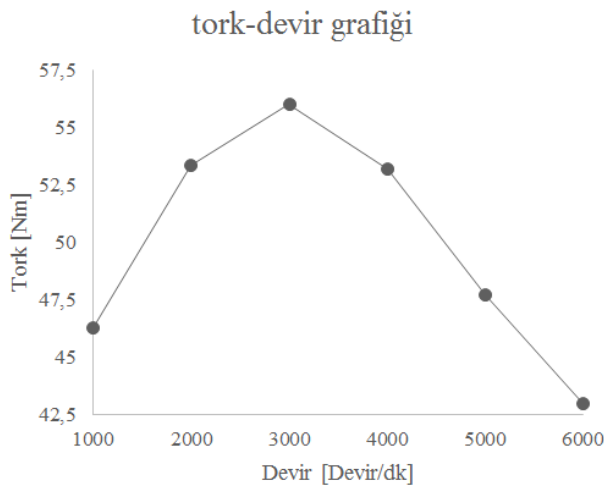
3.2. Motorun indike efektif basınç grafiği



Şekil 9. GT-SUITE motor indike efektif basınç-devir grafiği.

Beklendiği üzere ortalama indike basınç değerleri ortalama efektif basınç değerlerinden daha yüksek olmaktadır. Grafik 3000-4000 rpm aralığında 9,3 – 8,9 bar seviyelerinde okunmaktadır (Şekil 9).

3.3. Motorun tork eğrisi grafiği

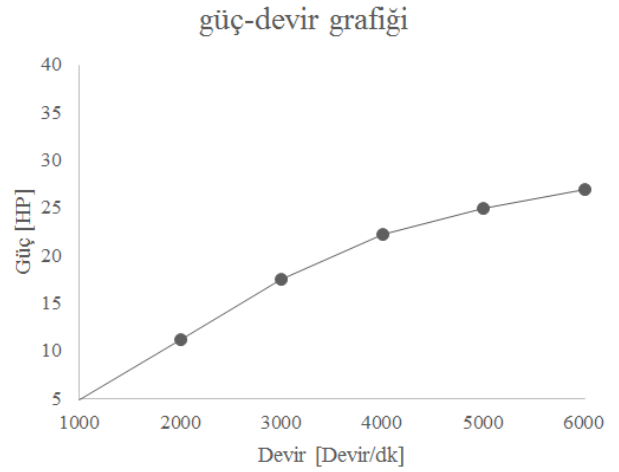


Şekil 10. GT-SUITE motor tork-devir grafiği.

Analizin tork verileri incelendiğinde, krank mili 3000 devirde seyrederken tork değeri yaklaşık 56 Nm seviyesine ulaşmaktadır (Şekil 10). Bu hacimdeki bir motor için ulaşılabilir mantıklı bir tork değeridir. Motorun emiş bölümünde kompresör veya turbo desteği olmadığı için motorun maksimum tork değerine bu kadar geç ulaşması beklenen bir durumdur. İnsansız hava araçlarında da tork değerinin her devirde yüksek olması tercih edilen bir durum değildir. Genellikle

devir ve güç değerlerinin yüksekliği irtifa şartlarında aracın pervaneler ve kanatlardaki hava akışını kontrol edebilmesi için önemi büyüktür.

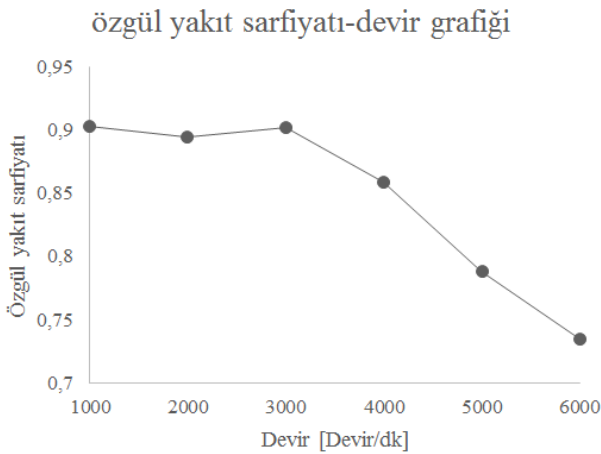
3.4. Motorun güç eğrisi grafiği



Şekil 11. GT-SUITE motor güç-devir grafiği.

Wankel motoru için güç verileri en önemli değerlerdir. Genellikle yüksek devir seviyelerine ulaşabilen wankel motorları yüksek yüzey alanı ve sürtünme değerleri sebebiyle geniş devir aralıklarında güç değerlerini dengeli şekilde tutamamaktadır. Sürtünme konusu Wankel motorları için hala üzerinde çalışmaların devam ettiği bir problemdir. Yanal sızdırmazlık segmanları, dönme hareketinin de oluşturduğu merkez kaç kuvveti sebebiyle motor gömleğinin iç yüzeyinde yüksek oranda sürtünmeye sebep olmaktadır. Grafikte de 6000 devir değerine kadar 25 HP değerine kadar yükselen güç, 6000 devir değerinden sonra yüksek yüzey alanından kaynaklanan sürtünmeler sebebiyle artışta azalma görülmüştür. Gerçek uygulamada bu azalmanın ne kadar olacağı tartışmaya açık bir konudur çünkü motor içindeki yağlama mekanizması ve irtifa sıcaklık değerleri sürekli değişkendir. Şu sonuç kesindir ki, tasarım aşamasında odaklanması ve geliştirilmesi gereken en önemli nokta bu güç değerinin yükseltilmesi ve geniş devir aralıklarına yayılabilmesi için çalışma yapılmasıdır.

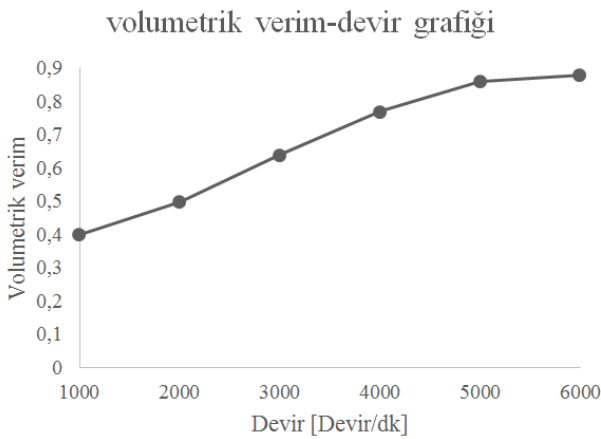
3.5. Motorun özgül yakıt sarfiyatı grafiği



Şekil 12. GT-SUITE motor özgül yakıt sarfiyatı-devir grafiği.

Özgül yakıt sarfiyatı grafiği incelendiğinde oluşan eğrinin benzinli bir motorda beklendiği gibi düşük devirlerde yüksek değerlerde olduğu, yüksek devirlerde ise özgül sarfiyatın düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum benzinli bir Wankel motoru için beklenen bir sonuçtur.

3.6. Motorun volumetrik verim grafiği



Şekil 13. GT-SUITE motor volumetrik verim-devir grafiği.

Motor tam gaz konumuna yaklaştıkça beklendiği şekilde volumetrik verimde stokyometrik sınıra yaklaşım gözlenmiştir. Devir arttıkça kelebek kısılma etkisi azalmaktadır. Buna karşılık supap mekanizması olmadığından klasik pistonlu motorlardaki basınç kaybı oluşmamaktadır. Dolayısıyla volumetrik verimi etkileyen mekanik kayıplar çok artmamakta fakat motora havanın giriş hızı arttığından ısınma kayıpları azalmaktadır. Onun için mekanik olarak düşüş

olsa da ısınma kayıplarının azalmasına karşılık gelen artış ağır basmakta ve volumetrik verim artmaktadır. Analiz teorik olsa bile belirlenen motor şartları neticesinde 6000 devire kadar Wankel motoru stokyometrik değere ulaşamamıştır.

4. SONUÇ VE GELECEK DÖNEM ÇALIŞMALARI

Çalışmada oluşturulan GT- SUITE model ile performans verileri hesaplanmıştır. Bu verilere göre Wankel motorundan aynı işletme koşullarında, aynı hacim/ağırlık oranı ve aynı sıkıştırma oranına sahip dört zamanlı pistonlu motorlara göre daha iyi performans elde edildiği söylenebilir. Bu yönüyle değerlendirildiğinde Wankel motorlar çalışma performansı bakımından iki zamanla motorlara oldukça benzerdir. Wankel motorun performans analizini konu alan çalışmanın 1 boyutlu parametrik analizlerini içeren kısmı burada sunulmuştur.

Bu verilerin 3 boyutlu HAD modelinde sınır koşulu olarak kullanıldığı analizler ise devam etmektedir. Çalışma nihayete erdiğinde Wankel motorun ısıl ve mekanik performans karakteristiği hakkında daha kapsamlı bilgiler elde edilmiş olacaktır.

REFERENCES

- [1] M.I. Özmen, "Tek Rotorlu Wankel Motorunun Ateşleme ve Püskürtme Ünitelerinin (Kontrol Ünitesinin) Tasarımı, İmalatı ve Bilgisayar Arayüzüyle Kontrolü," *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2015.
- [2] M. I. Resor, "Computational Investigation of Rotary Engine Homogeneous Charge Compression Ignition Feasibility," *Yüksek lisans tezi*, Wright State Üniversitesi, Ohio, 2014.
- [3] V. Gkoutzamanis, D. Mertzis, S. Nikolaidis, S. Savvakis, "Cfd Comparison for the SARM Rotary Engine with a Conventional Reciprocating Otto Cycle Engine," *6th BETA CAE International Conference*, Yunanistan, 2015.

- [4] T.Ercan, "Thermodynamic and structural Design and Analysis of a Novel Turbo Rotary Engine," *Yüksek Lisans Tezi*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 2005.
- [5] E. Arabacı, Turbo Döngüsel Bir Motorun Performansının Arttırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, İzmir, 2009.
- [6] M. Okur, S. Akmandor, "Türbo-Döngüsel Motor Tasarımı, İmalatı ve Performans Değerleri," *Sürdürülebilir Havacılık Araştırmaları Dergisi*, vol. 2, no. 1, pp. 19-25, 2017.
- [7] M. Okur, Y. İçingür, S. Akmandor, "Turbo Döngüsel Bir Motorda Farklı Buji Konumlarının Performansa Etkisi," 5. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük, 13- 15 Mayıs, 2009.
- [8] J. Spreitzer, F. Zahradnik, B. Geringer, "Implementation of a Rotary Engine (Wankel Engine) in a CFD Simulation Tool with Special Emphasis on Combustion and Flow Phenomena," *SAE Technical Paper*, 2015.
- [9] L. Tartakovsky, V. Baibikov, M. Gutman, M. Veinblat, "Simulation of Wankel Engine Performance Using Commercial Software for Piston Engine," *SAE Technical Paper*, 2012. doi:10.4271/2012-32-0098.
- [10] S. Pischinger, "Internal Combustion Engines Lecture Notes," vol. 1, Rheimsch – Westfälische Technische Hochschule, Aachen, 2005.
- [11] T. Costa, M. Nickerson, D. Littera, J. Martins, "Measurement and Prediction of Heat Transfer Losses on the XMv3 Rotary Engine," *SAE Int. J. Engines*, vol. 9, no.4, 2016. doi:10.4271/2016-32-0033.T.