

**YENİ NESİL KOMPOZİT DIŞ GÖVDELİ BİR WANKEL
MOTORUNUN ISIL VE MEKANİK PERFORMANS
ANALİZİ**

Bekir Tolga ALTIPARMAK



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YENİ NESİL KOMPOZİT DIŞ GÖVDELİ BİR WANKEL MOTORUNUN ISIL
VE MEKANİK PERFORMANS ANALİZİ**

Bekir Tolga ALTIPARMAK
0000-0002-3521-9040

Prof. Dr. Ali SÜR MEN
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2021

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YENİ NESİL KOMPOZİT DIŞ GÖVDELİ BİR WANKEL MOTORUNUN ISIL VE MEKANİK PERFORMANS ANALİZİ

Bekir Tolga ALTIPARMAK

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ali SÜR MEN

Bu çalışmada mevcut olan bir Wankel motorunun 3 boyutlu modellemesi yapılarak bu model üzerinde ısıl ve mekanik performans analizleri yapılmıştır. Mevcut motorun soğutma sistemlerinin devre dışı bırakılması durumunda motor gövdesi üzerinde meydana gelen sıcaklık artışı ve genleşme miktarı incelenmiştir. Krank milinin 6000 devir/dk hızında döndüğü kabul edilmiştir ve yanmanın stokyometrik olarak gerçekleştiği kabulü yapılmıştır. Krank mili açısına bağlı olarak hacim ve yüzey alanındaki geçici değişiklikler SOLIDWORKS yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Daha sonra motor, tek boyutlu bir motor tasarım ve simülasyon aracı olan GT-SUITE yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Tek boyutlu analizler için öncelikle geometrik ve dinamik benzerlik kriterlerine uygun olarak mevcut Wankel motor ve 4 zamanlı motorlara benzetilmiştir. Elde edilen sonuçlar, bu konu ile ilgili literatürdeki çalışmalarla uyumludur. Daha sonra ısıl ve mekanik performans sonuçlarını detaylı olarak incelemek için 3 boyutlu analizler yapılmıştır. Bu aşamada Ansys programı kullanılmıştır ve model analize uygun hale getirilmiştir. Analizde başlangıç verileri olarak GT-SUITE programından elde edilen ısı akışı, ısı iletkenlik katsayısı ve sıcaklık değişkenleri Ansys programına zamana bağlı olacak şekilde tanımlanmıştır. motorun çalışma süresi 2700 saniye olarak belirlenmiştir ve krank mili dönüş hızı 6000 devir/dk olacak şekilde sabit tutulmuştur. Analiz sonuçlarında alüminyum gövde modeli üzerinde 98,34 °C sıcaklık farkı ve segmanların temas ettiği gövde iç yüzeyinde 0,609mm değerinde genleşme olduğu görülmüştür. Elde edilen bu veriler literatür araştırmalarımızda elde ettiğimiz verilere yakın ve mantıklı sonuçlardır. Bu çalışma sayesinde Wankel motorları için tasarım aşamasında soğutma modelleri geliştirilebileceği ve analizlerinin yapılabileceği öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Wankel motoru, motor modelleme, ısıl analiz, mekanik analiz, 3 boyutlu analiz, ısıl genleşme, soğutma modeli

2021, xii + 95 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

THERMAL AND MECHANICAL PERFORMANCE ANALYSIS OF A WANKEL ENGINE WITH OUTER BODY FROM NEW GENERATION COMPOSITES

Bekir Tolga ALTIPARMAK

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ali SÜRMEŒ

In this study, thermal and mechanical performance analyses have been conducted by constructing 3D modelling of an existing Wankel engine. In case the cooling systems of the current engine are disabled, the temperature increase and thermal expansion of the engine housing have been investigated numerically. It is assumed that the crankshaft rotates at a speed of 6000 rpm. In addition, combustion is supposed to occur stoichiometrically. Transient changes of the volume and surface area depending on the crankshaft angle has been calculated using SOLIDWORKS software. After that, the current engine has been modelled using GT-SUITE software which is a one dimensional engine design and simulation tool. For one dimensional analyses, firstly geometric and dynamic similarity rules of a standard 4-stroke engine have been applied to the Wankel engine. The results obtained are compatible with that of the studies on this topic in the literature. After that, 3-dimensional analyses have been conducted to investigate the thermal and mechanical performance results in detail. For this purpose, ANSYS software has been utilized and the engine model has been prepared for the 3D analyses. Heat flow, heat conductivity coefficient and temperature variables obtained from GT-SUITE program are defined in the Ansys program as the initial conditions for the transient simulations. The calculation time of the engine is determined as 2700 seconds and the crankshaft rotation speed is kept constant at 6000 rpm. Temperature difference of 98.34 °C is obtained in the engine model with the aluminium housing from the simulations. Also, expansion of 0.609 mm is obtained on the inner surface of the body, where the rings contacted. These results are logical and compatible with the data we have obtained in our literature review. Due to this study, it is estimated that cooling system models of Wankel engines can be developed and analysed at the design stage.

Key words: Wankel engine, engine modelling, thermal analysis, mechanical analysis, 3-dimensional analysis, thermal expansion, cooling model.

2021, xii + 95 pages.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı.....	1
1.2. Wankel Tasarımı ve Motor Geometrisi.....	2
1.2.1. Gövde Tasarımı.....	4
1.2.2. Ana Gövde Soğutucu Akışkan Kanalları	5
1.2.3. Soğutucu Hava Kanatları	7
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	9
2.1. Kaynak Araştırması.....	9
2.2. Kuramsal Temeller.....	14
2.2.1. Termodinamik Özelliklerin Belirlenmesi	14
2.2.2. Kütleinin Korunumu	15
2.2.3. Türlerin Korunumu	16
2.2.4. Yanma	18
2.2.5. Enerjinin Korunumu	21
2.2.6. Manifoldların Modellenmesi.....	22
2.2.7. Isı Transferinin Modellenmesi	24
3. MATERYAL VE YÖNTEM	29
3.1. Wankel Motor Parçalarının Sökülmesi	30
3.2. Wankel Motor Parçalarının Ölçümü ve Modellenmesi	32
3.2.1. Eksantrik Mili Modellenmesi.....	32
3.2.2. Wankel Pinyon Dişli Modellenmesi	33
3.2.3. Wankel İç Planet Dişli Modellenmesi	34
3.2.4. Rotor Modellenmesi.....	35
3.2.5. Ana Gövde Modellenmesi.....	37
3.2.6. Yüzey Alanı ve Hacim Hesaplamaları.....	39
3.3. Wankel Motorunun Sayısal Olarak Tek Boyutlu Modellenmesi.....	42
3.3.1. Wankel Motorunun GT-SUITE Programına Tanımlanması.....	42
3.3.2. Wankel Motoru Performans Veri Grafiklerinin Oluşturulması	44
3.3.3. GT-SUITE Programında Zamana Bağlı Veri Grafiklerinin Oluşturulması.....	50
3.4. Wankel Modelinin Ansys Programında 3 Boyutlu Analizi	59
3.4.1. Motor Gövdesinin 3 Boyutlu Analiz Modeli	60
3.4.2. Wankel Modelinin Thermal Transient Arayüzünde Analizi.....	66
4. BULGULAR	75
4.1. Thermal Transient Süreç Analizi Sıcaklık Verileri.....	75
4.2. Static Structural Arayüzünde Şekil Değiştirme Analizi Verileri	76

5. TARTIŞMA ve SONUÇ	79
KAYNAKLAR	84
EKLER	86
EK 1. Motor modelinin toplam hacim ve yüzey alanı değerleri	87
EK 2. Birim zamandaki ısı akışı ve ısı transfer katsayısı tablosu	92
ÖZGEÇMİŞ	95

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
m_c	Kontrol hacmi içerisindeki kütle
$m_{giriş}$	Emme manifoldu boyunca kütle
m_{egz}	Egzoz manifoldu boyunca kütle
m_{szn}	Contalara sızan kaçak kütle
$m_{çatlak}$	Çatlak kütle akışı
$m_{yakıt}$	Yanma odasına eklenen gaz haldeki yakıt oranı
x_b	Yanma ürünleri kütle oranı
x_f	Yanmış yakıt kütle oranı
λ	Stokiyometrik yakıt hava kütle oranı
m_f	Yanmış yakıt kütlesi
f	Yakıt
$grş$	Emme
egz	Egzoz
i	İleri kaçak
g	Geri kaçak
$\dot{m}_{f,yanma}$	Yakıt yanma hızı
$\dot{m}_{f,grş}$	Emme yakıt akış hızı
$\dot{m}_{f,egz}$	Egzoz yakıt akış hızı
$\dot{m}_{f,çatlak}^i$	İleri çatlak akış hızı
$\dot{m}_{f,çatlak}^g$	Geri çatlak akış hızı
\dot{x}_f	Yakıt kütle oranı zamana bağlı değişimi
\dot{x}_b	Yanma ürünleri kütle oranı değişim hızı
\dot{x}_a	Taze hava kütle oranı değişim hızı
$\dot{\phi}$	Ekivalans oranı değişim hızı
Q_c	Yakıt Enerjisi
θ_s	Ateşleme başladığındaki eksantrik mili açısı
θ_m	Maksimum yakıt enerjisi yayılma hızındaki eksantrik mili açısı
τ	Yanma oranı bozulma sabiti
$m_{f,çevrim}$	Her bir çevrimde enjekte edilen toplam yakıt miktarı
P_c	Yanma odası basıncı
\dot{P}_c	Zamana bağlı yanma odası basınç değişimi
V_c	Yanma odası hacmi
\dot{V}_c	Zamana bağlı yanma odası hacim değişimi
T_c	Yanma odası sıcaklığı
\dot{T}_c	Zamana bağlı yanma odası sıcaklık değişimi
\dot{m}_c	Kontrol hacmi içerisindeki kütle zamana bağlı değişimi
R_c	Yanma odası gaz sabiti
\dot{R}_c	Yanma odası gaz sabitinin zamana bağlı değişimi

$\dot{\rho}_c$	Yoğunluk değişim hızı
c	Kontrol hacmi
\dot{E}_c	Kontrol hacmi iç enerjisi
n_s	Kütlenin system sınırlarını geçebileceği yolların sayısı
i_j	J yönündeki entalpi
\dot{Q}_{ht}	Soğutma enerjisi kaybı
ρ	Motor indike şaft gücü
i	Entalpi
t	Zaman
j	Vektörel yön indisi
c_p	Basınç katsayısı
im	Emme manifold hava alt indisi
a	Atmosferden manifold taze gaz akışı alt indisi
int	Kontrol hacmindeki hava alt indisi
\dot{Q}_{im}	Emme manifold yüzeylerinden zamana bağlı ısı transferi
exh	Egzoz manifoldundaki akışkan alt indisi
em	Egzoz manifold akışkan alt indisi
\dot{m}_{ae}	Egzoz manifoldundan atmosphere sızan akışkan kütle değişimi
\dot{m}_{em}	Egzoz kanalından egzoz manifolduna kütle akış hızı
e	Özgül iç enerji
P_{em}	Egzoz manifold basıncı
\dot{P}_{em}	Egzoz manifold basıncının zamana bağlı değişimi
b	Yanmış gaz özellikleri alt indisi
Nu	Nusselt sayısı
Re	Reynolds sayısı
Pr	Prandtl sayısı
h	Isı transferi katsayısı
L	Karakteristik uzunluk
k	İletim katsayısı
μ	Dinamik, kinematik viskoziteler
ϑ	Karakteristik hız
c_m	Piston hızı
W_c	Yanma türbülansı sonucu oluşan ek hız değeri
$\bar{\vartheta}_{rotor}$	Ortalama rotor hızı
N	Motor hızı (devir/dk)
R_r	Rotor yarıçapı
$\vartheta_{yanma_olmayan}$	Emme ve sıkıştırma fazlarındaki karakteristik hız
c_1	Hız düzeltme sabiti-1
ϑ_{yanma_ek}	Yanma sonucu oluşan hız
c_2	Hız düzeltme sabiti-2
$P_{yanma_olmayan}$	Sıkıştırma ve Genişleme fazlarındaki karakteristik basınç
V	Hacim (m ³)
T	Sıcaklık
y	Yanma odası şartları indisi
ϑ_{yanma}	Yanma boyunca toplam gaz hızı
δQ_{ht}	Duvarlara ısı transfer hızı
T_{duvar}	Duvar sıcaklığı

A_s	Toplam yüzey alanı
$A_{gövde}$	Gövde yüzey alanı
A_{rotor}	Rotor yüzey alanı
$A_{yanıyüzey}$	Yan yüzey alanı
w	Rotorun eni
C	Düzeltilme faktörü
E	Eksantriklik değeri (mm)
$\emptyset_{rotor\ yatağı}$	Rotor yatağı çapı (mm)
D_{t1}	Pinyon dişli bölüm dairesi çapı (mm)
Z_{t1}	Pinyon dişli diş sayısı
M_{t1}	Pinyon dişli modülü
D_{t2}	İç planet dişli bölüm dairesi çapı (mm)
Z_{t2}	İç planet dişli diş sayısı
M_{t2}	İç planet dişli modülü

Kısaltmalar	Açıklama
İYM	İçten Yanmalı Motorlar
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
İHA	İnsansız Hava Aracı
SKB	Sayısal Kontrollü Bilgisayar
AÖN	Alt Ölü Nokta
ÜÖN	Üst Ölü Nokta
mm	Milimetre
cm	Santimetre
cm ²	Santimertekare
cm ³	Santimetreküp
°C	Santigrad derece
Cu	Bakır elementi
Ni	Nikel elementi
Si	Silisyum elementi
Al	Alüminyum elementi
AL 2025	Alüminyum bileşiği kodu
kW	Kilowatt
dk	Dakika
BDT	Bilgisayar Destekli Tasarım
Nm	Newtonmetre
K	Kelvin

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Wankel gövde geometrisi oranları	2
Şekil 1.2. Klasik 4 zamanlı motor ile Wankel çevrimi karşılaştırması	3
Şekil 1.3. Ön kapak demontajı yapılmış wankel motor gövdesi.....	4
Şekil 1.4. İHA Wankel motorunun soğutucu akışkan iletim kanalları	5
Şekil 1.5. Wankel motorundaki kanalların gövde bağlantı noktaları.....	6
Şekil 1.6. Kanatlı gövdeye sahip İHA Wankel motoru.....	7
Şekil 2.1. Wankel yanma odasının açık sistem olarak şematik gösterimi	15
Şekil 2.2. Kaçak ve çatlak modeli	16
Şekil 2.3. Eksantrik mili açısına göre yanma ısı yayılım hızı grafiği	19
Şekil 2.4. Modellenen Wankel motoru soğutma sisteminin şematik gösterimi.....	25
Şekil 2.5. Denklem 2.41'in, Ansdale tarafından belirlenen yüzey alan hesabıyla kıyaslanması.....	28
Şekil 3.1. Montaj halindeki Wankel motoru genel ekipmanları	30
Şekil 3.2. Parçaları çıkartılmış Wankel motoru genel görüntüsü.....	31
Şekil 3.3. Eksantrik mili genel görüntüsü	32
Şekil 3.4. Eksantrik mili BDT modeli.....	33
Şekil 3.5. Pinyon dişli BDT modeli	34
Şekil 3.6. İç planet dişli BDT modeli.....	35
Şekil 3.7. İç rotor BDT modeli	36
Şekil 3.8. İç rotor montaj modeli	37
Şekil 3.9. Ana gövde BDT modeli	38
Şekil 3.10. Wankel motorunun montajlanmış BDT modeli.....	39
Şekil 3.11. Farklı krank mili açılarındaki yanma odası hacim ve yüzey alanı değişimi.....	40
Şekil 3.12. Yanma odası yüzey alanı grafiği.....	41
Şekil 3.13. Yanma odası hacim grafiği	41
Şekil 3.14. Rotor-krank mili açısı grafiği.....	41
Şekil 3.15. GT-SUITE motor veri girişi arayüzü	43
Şekil 3.16. GT-SUITE motor ortalama efektif basınç-devir grafiği	44
Şekil 3.17. GT-SUITE motor indike efektif basınç-devir grafiği	45
Şekil 3.18. GT-SUITE motor tork-devir grafiği	46
Şekil 3.19. GT-SUITE motor güç-devir grafiği	47
Şekil 3.20. GT-SUITE motor özgül yakıt sarfiyatı-devir grafiği.....	48
Şekil 3.21. GT-SUITE motor volumetrik verim-devir grafiği	49
Şekil 3.22. GT-SUITE geometrik veri girişi arayüzü örnek gösterimi	50
Şekil 3.23. GT-SUITE açığa bağlı hava giriş kanalı modelleme arayüzü	51
Şekil 3.24. GT-SUITE açığa bağlı yakıt enjeksiyonu modelleme arayüzü	52
Şekil 3.25. GT-SUITE piston geometrisi modelleme arayüzü	53
Şekil 3.26. GT-POST Wankel P-V diyagramı	54
Şekil 3.27. GT-POST Wankel sıcaklık diyagramı	55
Şekil 3.28. GT-POST Wankel ısı transfer katsayısı diyagramı	56
Şekil 3.29. GT-POST Wankel ısı akışı diyagramı	58
Şekil 3.30. GT-POST Wankel modeli T-s diyagramı	58
Şekil 3.31. Wankel 3 boyutlu analiz modeli dış görüntüsü	62
Şekil 3.32. Wankel 3 boyutlu analiz modeli kesit görüntüsü.....	62
Şekil 3.33. Wankel 3 boyutlu analiz ağ yapısı	63
Şekil 3.34. Wankel analiz modeli açılal pozisyonları.....	65

Şekil 3.35. 1050° - 0° aralığındaki ısı akışı ve ısı transferi katsayısı değerleri	67
Şekil 3.36. 1050° - 0° aralığındaki analizin sıcaklık değerleri.....	68
Şekil 3.37. 0° - 30° aralığındaki analizin sıcaklık değerleri.....	69
Şekil 3.38. 30° - 60° aralığındaki analizin sıcaklık değerleri.....	69
Şekil 3.39. 60° - 90° aralığındaki analizin sıcaklık değerleri.....	70
Şekil 3.40. 90° - 120° aralığındaki analizin sıcaklık değerleri.....	70
Şekil 3.41. 120° - 150° aralığındaki analizin sıcaklık değerleri.....	71
Şekil 3.42. 150° - 180° aralığındaki analizin sıcaklık değerleri.....	71
Şekil 3.43. 180° - 210° aralığındaki analizin sıcaklık değerleri.....	72
Şekil 3.44. Çoklu ısı akışı tanımlama ekranı	73
Şekil 3.45. Çoklu ısı akışı tanımlama arayüzü	73
Şekil 4.1. Thermal Transiens süreç analizi son sıcaklık dağılımları.....	75
Şekil 4.2. Static Structural şekil değiştirme analizi verileri	77
Şekil 5.1. Soğutma sıvısı kanal detayı	80
Şekil 5.2. Soğutma önlemi alınması gereken bölge	81
Şekil 5.3. Dengelenmesi gereken genleşme bölgeleri.....	82

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 4.1. Sıcaklık ve şekil değiştirmenin maksimum fark değerleri..... 78

1. GİRİŞ

Wankel motoru 20. Yüzyılın ortalarından itibaren hayatımıza giren ve otomotiv sektöründe ticari anlamda kendisine yer bulabilmiş ilk eksantrik döner pistonlu motor uygulamalarındandır. Motorun mucidi olan Dr. Felix Wankel, 1957 yılında ilk prototipi tamamladığında 2 saatlik deneme testi sonuçlarına göre bu motordan 20 beygirlik güç elde etmeyi başarmıştı. Daha sonra 1958 yılında KKM kodlu aynı prensibe sahip wankel motorunu hayata geçirdi. KKM kodlu bu motor günümüzde hala kullanılan wankel motorlarının ilk prototipi konumundadır. İcat edildiği günden bu güne kadar ısınma , sürtünme , vuruş gibi problemleri beraberinde getiren bu motor, yaşanan problemlerin çözülebilmesi adına bir çok malzemenin geliştirilmesine ön ayak olmuştur. Çalışma prensibi sebebiyle aşırı sürtünme kaynaklı ortaya çıkan aşınma ve ısınmayı engellemek adına daha dayanıklı gövde ve segment malzemeleri üretilmiştir. Diğer yandan sadece wankel motorlarına özel geliştirilen yağlama yağları ortaya çıkmıştır. Günümüzde yüzlerce bilim insanı hala wankel motorunu geliştirmek amacıyla araştırmalara devam etmekte ve harcamalar yapmaktadırlar. Elimizde mevcut olan bir wankel motoru için daha dengeli bir ısınma dağılımı sağlayabilecek yeni bir gövde geometrisinin deneme analizlerini yapacağımız bu tez çalışmasında, modelimizden aldığımız veriler ışığında tersine mühendislik yöntemleri ile bilgisayar ortamına aktardığımız motor modeli üzerinde ısı dağılım analizleri gerçekleştirilecek ve sonuçlar yorumlanacaktır.

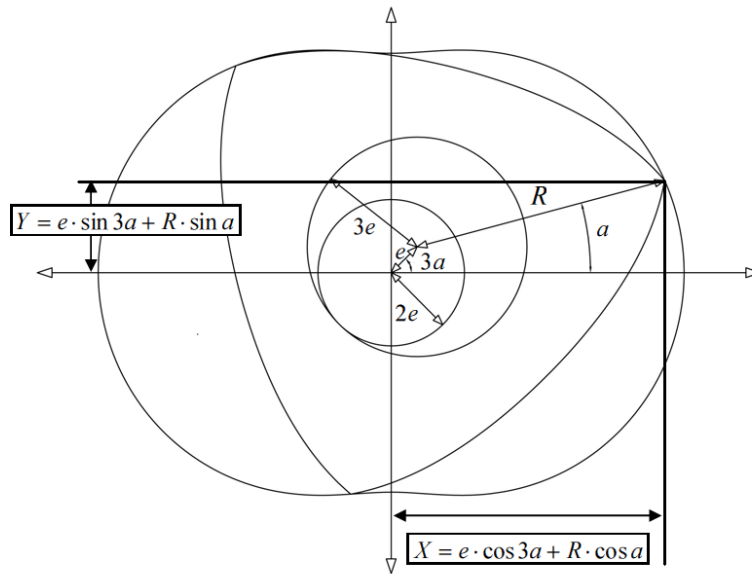
1.1 Tezin Amacı

Çalışmamızda hava soğutmalı bir Wankel motorunun rotor açısının değişimine bağlı olarak gövdedeki sıcaklık dağılımının modellenmesi gerçekleştirilecektir. Wankel motorlarının geometrilerinin standart dört zamanlı ve iki zamanlı motorlara göre farklı oldukları bilinmektedir. Wankel motorları da İYM kategorisinde incelendiği için yapılan tek boyutlu analizler, formülasyonlar ve kabuller neticesinde aslında günümüzde üretilen standart bir wankel motorunun, 4 zamanlı bir motorun çalışma mantığına yakın değerler verdiği görülmektedir. Özellikle değişken yüzey alanı ve hacim ölçümleri benzerlik göstermektedir. Odaklanılacak bir motor modelinin basınç ve

sıcaklık değerlerini elde edebilmek adına öncelikle bu modelin tasarımsal tüm parametrelerini bilmek gerekmektedir. Bu amaçla Vestel Hava Endüstrileri firmasının bize hibe olarak verdiği 802W kodlu Wankel motorunun tüm parçaları sökülerek, bu boyutlarla oluşturulacak olan katı model bilgisayar ortamına aktarılacak ve açığa bağlı sıcaklık, basınç, hacim ve yüzey alanı gibi değişkenler model üzerinde çözümlenecektir. Sonraki aşamada ise bulunan sıcaklık ve basınç değerleri yeni nesil geliştirilmiş bir malzemeye aynı motor geometrisinde bilgisayar ortamında HAD modülünde uygulanacak ve analiz sonuçlarına göre yeni malzeme ve soğutma yöntemlerinin gövde için uygun olup olmadığı teorik olarak belirlenecektir. Modelin gerçeğe yakınlığının sağlanabilmesi için verileri elde edeceğimiz matematiksel modeli iyi bir yaklaşım toleransı ile hesaplamalarda kullanmak bu tezin temelini oluşturmaktadır.

1.2 .Wankel Tasarımı ve Motor Geometrisi

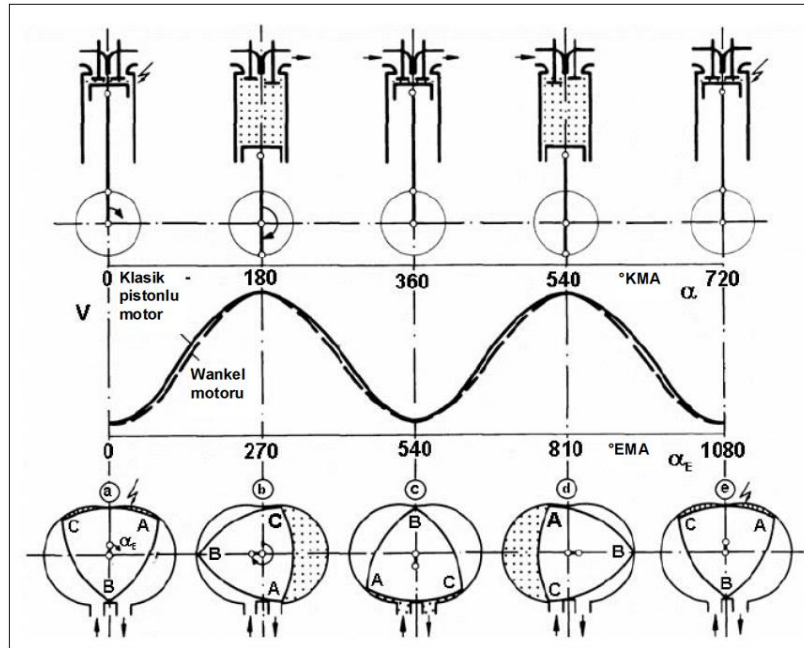
Wankel motoru tasarım geometrisi standart 4 zamanlı motorların geometrilerine kıyasla çok farklıdır. Hacim ve kütle olarak düşük olan bu motorlar ile yüksek güç seviyeleri elde edilir. Motor krank yapısı eksantrik olacak şekilde imal edilir. Teorik olarak çaplarının birbirlerine oranı 2/3 olan iki çemberden (Şekil1.1) küçüğünün büyük çember içerisinde kaymadan yuvarlanması prensibi ile çalışır.



Şekil 1.1. Wankel gövde geometrisi oranları

Krank milinin eksantriklik ölçüsü her zaman küçük çemberin çap ölçüsünün 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 modül değerlerine sahip özel üretim pinyon ve planet dişli çarklar imal edilebilir. Bu şekilde dişlilerin boşluksuz şekilde birbirlerine tam oturması sağlanır.

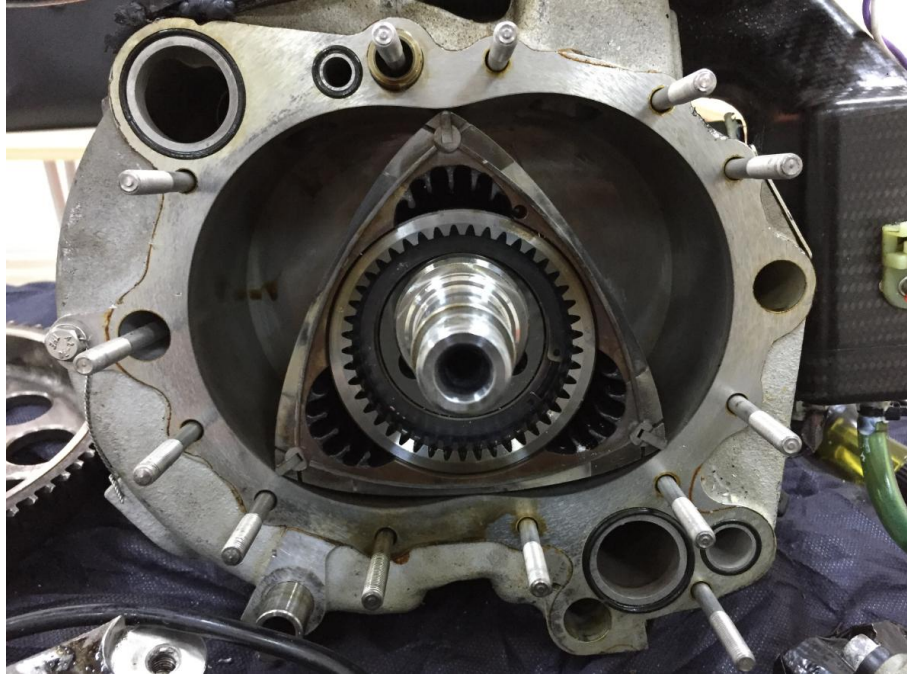
Wankel motorları da dört zamanlı olarak çalışır. Standart 4 zamanlı motorlara kıyasla supap mekanizmaları bulunmadığı için daha yüksek devirlere çıkabilirler. Motorun avansını supap yerine kullanılan giriş çıkış pencerelerinin geometrisi belirler. Üç bölmeli olarak dizayn edilen wankel motorları aynı anda sıkıştırma, genişleme, egzoz ve emiş zamanlarını yapabilmektedir. standart dört zamanlı motorlarda bir çevrim krank milinin 720° lik hareketi ile tamamlanır. Wankel motorunda pistonun uç noktasının gövde geometrisini tarayarak bir tam tur dönmesi ile krank mili 3 tam turluk yani 1080° lik hareket yapar.



Şekil 1.2. Klasik 4 zamanlı motor ile Wankel çevrimi karşılaştırması(Pischinger 2005)

1.2.1. Gövde Tasarımı

Wankel motorlarının parçaları özellikle hava endüstrisinde kullanılacak ise hafiflik ve çalışma anındaki gereklilikler sebebiyle farkı malzemeler kullanılarak üretilir. Alüminyum alaşımları hem düşük yoğunluğu hem de yüksek ısıl iletkenlik katsayısına sahip olmaları sebebiyle büyük oranda tercih edilirler. Cu ve Si elementleri ile alaşımlandırılmış alüminyum aynı zamanda yüksek mukavemet ve sürtünme direnci özelliklerini kazanır.



şekil 1.3. n kapak demontajı yapılmış wankel motor gövdesi

şekil 1.3.'te görülen n kapağı sökülmüş motor gövdesi bakır ile gçlendirilmif (Cu %4-%5) alüminyum alaşımından üretilmiştir. Aynı alaşım hava endüstrisinde araç gövdelerinde, otomotiv endüstrisinde silindir kapağı imalatında da kullanılmaktadır. Wankel motor gövdesi döküm tekniği kullanılarak imal edilecek şekilde tasarlanıp sonradan montaj ve hareket yüzeyleri SKB tezgahlarında yüksek toleransta işlenmektedir.

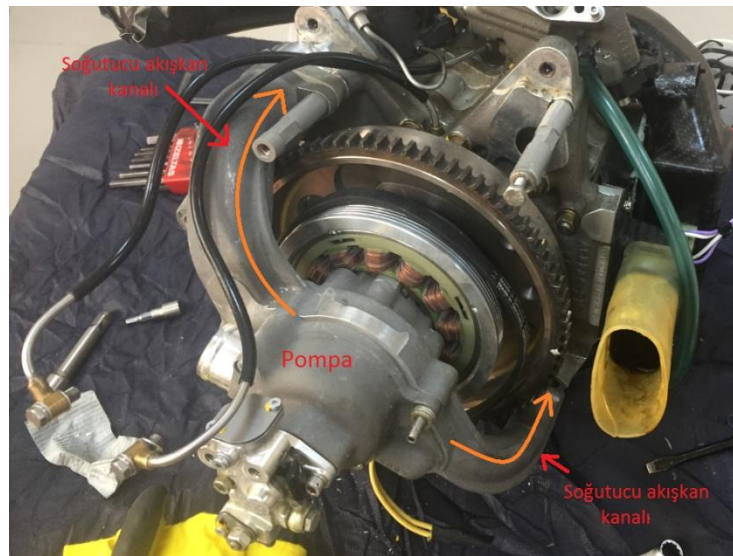
Çalışmanın isminden de anlaşılacağı üzere inceleme altına aldığımız wankel motorunun en önemli parçası gövdesidir. Her çevrimde aynı bölge üzerinde patlama ve genişleme zamanlarına maruz kalan gövde üzerinde eşit miktarda yayılma gösteremeyen ısınma

ve gövdenin üzerinde meydana gelen sıcaklık farklılıkları, dengesiz genişlemeye ve şekil değişikliğine neden olmaktadır. Oluşan şekil değişikliği piston üzerindeki seramik yapılı segmanların pozisyonlarını bozmakta ve yüksek devirlerde ana gövdenin iç yüzeyinde sürtünme kaynaklı aşınma problemini ortaya çıkarmaktadır.

Motor gövdesi üzerindeki ısı dağılımını ve sıcaklık farklarını dengelemek adına döküm parça imal edilmeden önce tasarım aşamasındayken soğutma önlemleri planlanır. Wankel motoru için ağırlık , çalışma ortamı sıcaklığı , motorun çevresinden akan hava debisi parametreleri incelendiğinde ısınmanın en yoğun olduğu genişleme hattında bölgesel soğutma yapılır. Motorun gövdesi detaylı incelendiğinde hangi soğutma yönteminin kullanıldığı anlaşılmaktadır. Güncel uygulamalarda en çok karşılaşılan iki yöntemden birincisi hava ile soğutma, ikincisi ise soğutucu sıvı akışkan ile soğutmadır.

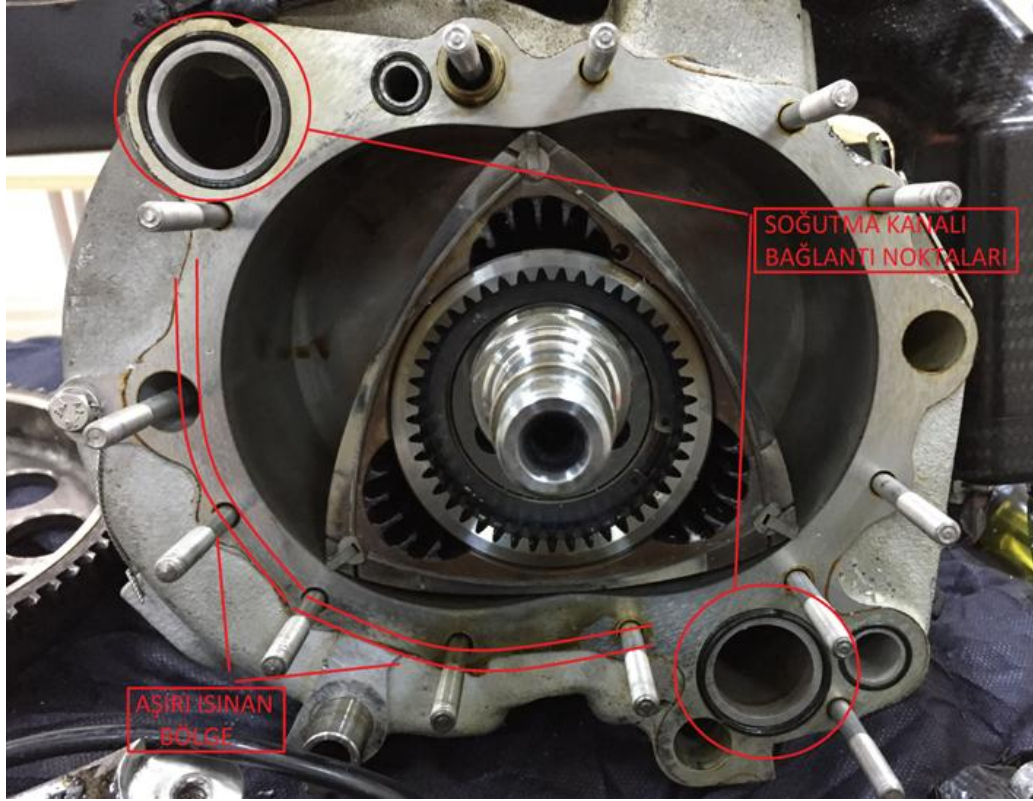
1.2.2. Ana Gövde Soğutucu Akışkan Kanalları

Gövde içerisine açılan soğutucu kanallar her tasarımda farklılık gösterir. Isıyı motordan uzaklaştırmak için kullanılan bu yöntemin temeli zorlanmış taşınımdır. Genişleme ve egzoz zamanlarında ortaya çıkan enerji sebebiyle bölgesel olarak aşırı ısınan ana gövdeyi soğutabilmek ve homojen olarak istenilen sıcaklık değerinde tutabilmek için sistemden çekilmesi gereken ısı hesaplanır.



Şekil 1.4. İHA Wankel motorunun soğutucu akışkan iletim kanalları

Vestel Hava Endüstrileri firmasının incelememiz için üniversitemize hibe ettiği W802 gövde modeline sahip wankel motorunun soğutma kanallarının montajlı hali Şekil 1.4'te görülmektedir. Pompaya bağlı olan soğutma kanalı iki farklı koldan motorun ana gövdesine işlenmiş temiz yüzeylerden sızdırmazlık contası ile bağlıdır.

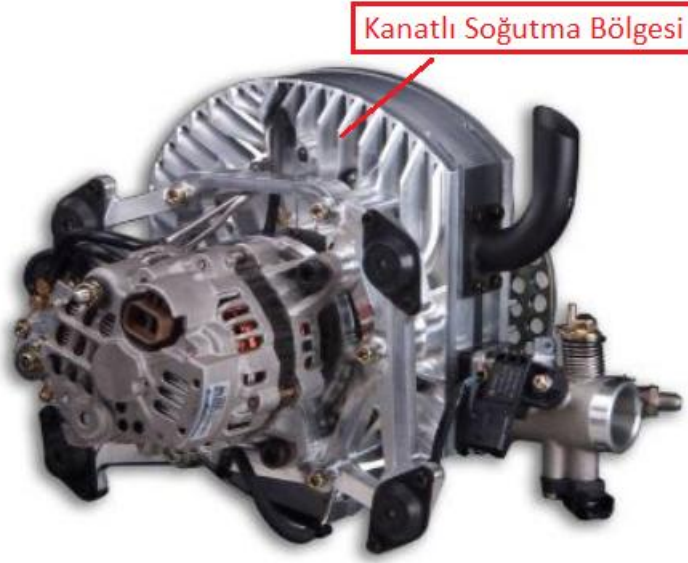


Şekil 1.5. Wankel motorundaki kanalların gövde bağlantı noktaları.

İncelediğimiz motorda soğutucu akışkan olarak yağ tercih edilmiştir. Pompadan basılan soğutucu sıvı iki kola ayrılan kanallar yardımı ile gövdeye ulaşır. Şekil 1.5'te kırmızı ile işaretlenmiş bağlantı noktalarından giren sıvı soğutma işlevini gerçekleştirdikten sonra gövde içerisindeki soğucu kanalların birleşmesiyle oluşan tek bir kanaldan tahliye edilir. Tahliye olan sıvı radyatöre geri döner ve soğuduktan sonra tekrar pompaya aktarılır. Bu sistem motorda ana gövdeyi soğutmak için tasarlanmıştır. Ana gövde haricindeki ön kapak, arka kapak, piston, dişliler ve krank milini soğutmak amacıyla bir hava pompalı soğutma sistemi de motora montajlı bir şekilde eş zamanlı olarak çalışmaktadır. Piston üzerindeki hava kanatçık tasarımının temel amacı bu soğutmayı hızlandırmaktır.

1.2.3. Soğutucu Hava Kanatları

Wankel motorlarında ısı taşınımının yetersiz olduğu bölgelerde soğutucu kanatçıklar ile zorlanmış ısı transferi yapılır. Bu yöntemin uygulandığı motor örnekleri çok fazladır. Ana gövde üzerinde çok daha belirgin olan bu kanatlar özellikle ısının yoğun olduğu bölgede daha sık ve uzun olacak şekilde tasarlanırlar. İHA larda düşük ortam sıcaklığı ve yüksek hız sebebiyle gövde geometrisi etrafında dolanan hava debisi çok yüksek olduğu için bu yöntem tercih edilir.



Şekil 1.6. Kanatlı Gövdeye Sahip İHA Wankel Motoru

İHA uygulamalarında motordaki ağırlık artışı en önemli parametrelerden biridir. Düşük kütle İHA' lar için daha yüksek irtifa ve uçuş süresine olanak verir. Şekil 1.6' da görüldüğü üzere motor gövdesine bağlı olarak imal edilen bu kanatlar ana gövdede kütle artışına sebep olmaktadır. Bu noktada tasarımı optimize etmek en önemli noktadır. Motorda oluşacak iç kuvvetlere ve ısıya karşı direnç gösterecek doğru kalınlık ve malzeme cinsi tayin edilirse ana gövde radyatör mekanizmasından tamamen kurtulacak ve kendini soğutabilir hale gelecektir. Kütle hesaplamalarından sonra motorun ana gövdesindeki ağırlık artışı; radyatör sisteminin yoğunlaştırucusu, pompası ve iletim borularının ağırlıkları toplamından küçük ise kanat tasarımı tercih edilir. Yeni nesil kompozitler ile desteklenmiş alüminyum alaşımlarının wankel motorunun ana

gövdesinde tercih edilmesinin en önemli sebepleri yüksek ısı iletimine ve mukavemete sahip olmalarıdır.

Projemizde incelediğimiz motor üzerinde odaklandığımız temel amaç aslında budur. Denenmek istenen yeni nesil malzeme ve kompozitlerin uygunluğunu tayin edebilecek bir model oluşturmak ve bu modeli her wankel motoru için uygulanabilir hale getirmektir. Bu şekilde yeni tasarım süreçlerinin önü açılacak ve daha hızlı öngörü sağlanacaktır.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kaynak Araştırması

Tezin kaynak araştırması yapılırken, klasik 2 zamanlı ve 4 zamanlı motorlara kıyasla özelleştirilmiş bir mekanik yapıya sahip olan wankel motorunun geometrik yapısı, ısıl ve performans analizlerini içeren çalışmalar incelenmiştir. Kaynak olarak gösterilen tezler, makaleler ve tüm çalışmaların uygulanabilirlik durumları kontrol edilerek çalışmamıza uygun olan verileri kullanılmıştır. Günümüzde otomotiv endüstrisinde kendisine fazla yer bulamayan wankel motorları, askeri endüstrideki gelişmeler ve insansız hava araçlarında kullanılabilir alternatif bir motor olması sebebiyle tekrar mercek altına alınmıştır. Araştırmada kullanılan kaynaklar bize göstermektedir ki, bu motor üzerinde yapılan modelleme çalışmaları motorun geometrisi ve çalışma şekli sebebiyle biraz kısıtlıdır. Mühendislik yaklaşımı ile yapılan bazı kabuller neticesinde ise gerçek çalışma şartlarına ve değerlerine yakın sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu sonuçlar ile yapılan analizler neticesinde bu motorların istenilen kullanım şartlarına uygun şekilde geliştirilebileceği ön görülmektedir.

Bu kapsamda wankel motorlarında ısıl ve performans yaklaşımlarını içeren çalışmalar ile birlikte motorlarda kullanılan malzemeler ve motorun çalışma anında motor üzerindeki verileri alabileceğimiz bilgisayar programlarını içeren çalışmalar detaylı şekilde incelenmiştir.

Tartakovsky ve ark. (2012) çalışmasında günümüzde 4 zamanlı sıralı pistonlu motorlar için kullanılan formülleri ve ticari yazılımları kullanarak wankel motorlarının geometrisine uygun ısı transferi ve yanma modeline bağlı bir performans analizi gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışmada wankel motoruna tam uyum sağlayacak bir program bulunamadığı için bir geometrik benzerlik algoritması tasarlanmıştır. Benzerlik kriterleri olarak yer değiştirme eşitliği , sıkıştırma oranı , çalışma odası hacmi ve yüzey hacim oranı (Krank mili açısına göre) alınmış ve bu durum oluşturulan sanal pistonlu motorun temel boyutlarının bulunmasını sağlamıştır. motorun emme girişi ve egzoz çıkışı HAD programında modellenip kanallardan pistonun konumuna bağlı hava yakıt

karışımı ve yanmış egzoz gazı akış hızlarının modelleri grafikler ile sunulmuştur. Motordaki yanma hızı ve ısı yayma davranışları Wiebe denklemi ile wankel motoruna göre modellenmiştir. Bu veriler ile oluşturulan korelasyonda motorun gücü ve yakıt tüketimi verileri tatmin edici miktarda yakınlık göstermiştir. Geliştirilen bu simülasyonun wankel motorları için ateşleme zamanı, hava/yakıt oranının motor üzerindeki etkisi, hava filtresi ve egzoz susturucu özelliklerinin performansı, emme ve egzoz girişlerinin zamanlaması ve geometrisi, uçuş yüksekliği gibi değişkenlerin iyileştirilmesinde kullanılabilir bir yapı olarak önerilmektedir.

Spreitzer ve ark. (2015) çalışmasında wankel motorlarının özel geometrik yapısını modelleyebilmek ve daha verimli sonuçlar alabilmek için ticari olarak kullanılan “Convergent Science” yazılımını kullanmıştır. Bu yazılım ile yaptıkları modellemede wankel motorlarının bilinen dezavantajlarını ve sorunlarını (Zayıf termal verimlilik, yüksek emisyonlar) doğrulamayı başarmışlardır. Motordaki yanma sıkıntılarının hassas şekilde tespit edilebilmesi, bu modelde derinlemesine ve detaylı şekilde verimlilik kayıpları ve yanma süreci ile ilgili yeni analiz sonuçları ortaya çıkarmıştır. Yapılan analizde ısı salınım konumları açığa bağlı olarak gözlemlenebilir, motor geometrisine bağlı en verimli ısı yayılım modeli tespit edilebilmektedir. Motordaki ateşleyicinin zamanlaması yanma modeline göre düzenlenebilmektedir.

Boretti (2015) çalışmasında Mazda Renesis tasarımından sonra geliştirilen bir Wankel motorunda jet ateşleme kullanımının avantajlarını vurgulamıştır. Geleneksel bujilerin yanma anındaki yavaş tepkileri sonucunda yakıtı enjeksiyon yardımı ile belirlenmiş bir püskürtme modelinde ateşleme bölgesine püskürtüp, yanmanın daha hızlı ve eksiksiz gerçekleşmesi amaçlanmaktadır. Yapılan bu modellemede geliştirilen püskürtme tasarımı hem daha büyük güç yoğunluğu hem de daha iyi yakıt dönüşüm verimliliği sağlamaktadır. Wankel motorlarının günümüzde insansız hava araçları için alternatif bir motor olmasıyla birlikte bu motorlarda gücü yükseltecek uygulamalar değer kazanmaktadır. Boretti bu enjeksiyon ile ateşleme yönteminde motorun daha yüksek güç seviyesine çıkacağını önermektedir. Çalışmadan alınan veriler sonucunda önerilen teknoloji ile motora turboşarj eklemek ve benzin haricindeki geleneksel jet yakıtlarını bu motorlarda kullanılması gibi konuların geliştirilmesi mümkün görünmektedir.

Malkaz (2011) Çalışmasında Mazda 13B kodlu Wankel motorunun egzoz çıkışı ve temiz hava girişi geometrilerini değiştirerek teorik olarak motoru iki zamanlı olacak şekilde yeni bir model önermiştir. Yaptığı yapısal analizlerde motorun krank mili açısına göre anlık sıcaklık ve basınç değerlerini teorik olarak bulup bu yeni değerler altında motorun sorunsuz çalışabilmesi için gerekli tasarımsal değişiklikleri tezinde konu almıştır. Mekanik olarak segman dayanımları ve sızdırmazlıkları, yanmaya bağlı sıcaklık ve gerilim dağılımları incelenerek motorun gövdesi için yeni bir tasarım geometrisi önerilmiştir. Yapılan bu değişikliklerin getirdiği güç yoğunluğundaki artış ile bu motor insansız hava araçları için bir prototip olarak üretilip geliştirilebileceği savunulmaktadır.

Farzadı (2015) Çalışmasında referans olarak aldığı bir Wankel motorunun tasarım parametrelerini değiştirerek motorun yakıt tüketimini düşürmeyi ve otomotiv endüstrisi için daha verimli bir motor haline getirebilecek bir yol bulmayı amaçlamıştır. Wankel tipi döner pistonlu motorun emme ve sıkıştırma periyodu boyunca akış analizini gerçekleştirerek, optimum dizayn elde edilmeye çalışılmıştır. Motorun yanma odasında gelişen fiziksel olaylar karmaşık olduğundan bu modelleme SOLIDWORKS programında yapılmış ve akış analizleri için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) programı olarak ANSYS FLUENT kullanılmıştır. Veriler değerlendirildiğinde, farklı devirlerde basınç ve sıcaklık dağılımı, türbülans dağılımı incelenmiştir. Bu dağılımlar yanma odası içerisinde hangi bölgelerde nasıl eğilim gösterdiği araştırılmıştır. Modelde yanma ile ilgili bir çalışma olmadığı, sadece havanın motor içerisinde nasıl bir davranış izleyeceğini ortaya çıkarmak için analizlerin yapıldığı bilgisi sunulmuştur. Bu nedenle sonuçların gerçek çalışma şartlarını vermemesi ile birlikte motorun emiş ve egzoz şartları için fikir oluşturacağı savunulmuştur. Bu çalışmanın üzerine Wankel motorlarının 2 zamanlı olarak model çalışmasının yapılabileceği bu tez çalışmasında önerilmektedir.

Abraham ve ark. (1991) Çalışmasında yanma odasına direkt püskürtmeli enjeksiyon yapısına sahip bir wankel motorunun modelini oluşturarak, bu model üzerinde motorun ana gövdesine ait anlık ısı akışı analizlerini ve gövdede oluşan termal gerilim

analizlerini gerçekleştirmiştir. Bu analizlerde motorun gövdesine ait 3 boyutlu model ve sonlu elemanlar tekniklerinden yararlanılmıştır. Yanmanın olduğu krank mili açıları için yapılan analizlerde alınan verilere göre 20 °C lik tolerans ile gövde ve rotor kapaklarının yüzey sıcaklık verilerine ulaşılmıştır. Yapılan analizler yüksek hassasiyet seviyesine sahip olmadığı için bu tolerans değerinin ortaya çıktığı bilgisi verilmektedir. Bu çalışmadan alınan verilerin, motorun imalatına başlamadan önce tasarım parametrelerinde yol göstereceği savunulmaktadır.

Wu ve ark. (2014) Çalışmasında insansız hava araçlarında kullanılan bir Wankel motorunun modeli üzerinden motor üzerinde oluşan dengesiz ısı yayılımını ve termal gerilme sebebiyle oluşan şekil değiştirmeleri engellemeye yönelik bir yöntem geliştirmiştir. Modelin ana gövdesi üzerinde aşırı ısınan bölgeler belirlenerek bu bölgelere ısı iletim katsayısı daha yüksek bir malzeme ile dolgu yapılmıştır. Bu sayede ilk analizlerde teorik olarak 159 °C ölçülen sıcaklık farkı, motorun gövdesine dengeli bir şekilde dağıtılıp 18°C sıcaklığa indirilmiştir. Yaklaşık olarak 8,8 kat düşen fark sebebiyle, gövde geometrisinde sıcaklık farkına bağlı olarak meydana gelen şekil değişikliği önemli ölçüde azalmıştır. Çalışmada önerilen tekniğin verileri bilgisayar ortamında oluşturulduğu için gerçek veriler ile tam uyum gösterip göstermediği ile ilgili bir bilgi mevcut değildir. Motor tasarım aşamasında yol gösterici bir çalışma olarak kullanılabilir.

Badgley ve ark. (1989) Çalışmasında bir Wankel motorundaki dengesiz ısı dağılımını engellemek için ana motor parçalarının ısıya maruz kalan yüzeylerine zirkonya bileşiği emdirilmesi metodu ile adyabatik hale getirilmeye çalışılan parçaların analizlerini gerçekleştirmiştir. Bu sistem ısı dağılımının kontrolü konusuna yeni bir bakış açısı getirmektedir. Kaplanan yüzeylerde ısı kalkanı etkisi oluşmakta ve termal gerilmeler en aza indirilmektedir. Zirkonya kaplama teknolojisi geçmişte performansı arttırılmış bir Mazda 13B motoruna uygulanmış ve performans artışına rağmen motorun termal gerilim ve şekil değiştirmesi neredeyse ilk haline yakın değerlerde oluşmuştur. Çalışmada yapılan ısı analizleri bu sonucu doğrulamaktadır.

Gkoutzamanis ve ark. (2015) 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.

Ercan (2005) Yüksek lisans tezinde 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. Ayrıca imal edilen prototiplerin komponent testleri tamamlanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Arabacı (2005) Yüksek lisans tezinde 16 cm^3 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/dk hava debisinde motor gücünde palet değişikliği ile %15, yanma odası değişikliği ile %40'a varan artışlar sağlanmıştır.

Costa ve ark. (2016) Çalışmasında XMv3 Döner Motorundan Isı Transferi Kayıplarının Ölçülmesi ve simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Sabit parçalardaki ısı transfer hızı, o devrenin soğutma havasının termal enerji dengesi ile ölçülmüştür. Ancak, rotorun soğutma havası motorun egzoz gazı ile karıştığı için, benzer bir prosedür rotor devresi için pratik olmadığından CONVERGE HAD modeli geliştirilmiş ve GT-POWER ile birlikte, rotor ve sabit parçaların ısı transferi arasındaki oranı belirlenmiştir. Hem deneysel hem de numerik metotların kullanıldığı bu çalışma da tez çalışması için iyi bir referans kabul edilmiştir.

Leboeuf ve ark. (2018) Makale çalışmasında Wankel motorların en önemli sorunu olan sızdırmazlık problemine çözüm getirmeye çalışmışlardır. Yüksek verimli bir döner motor sızdırmazlık sisteminin performansını belirlemek için matematiksel model oluşturmuş ve numerik analizini gerçekleştirmişlerdir. Modelleme sonuçları,

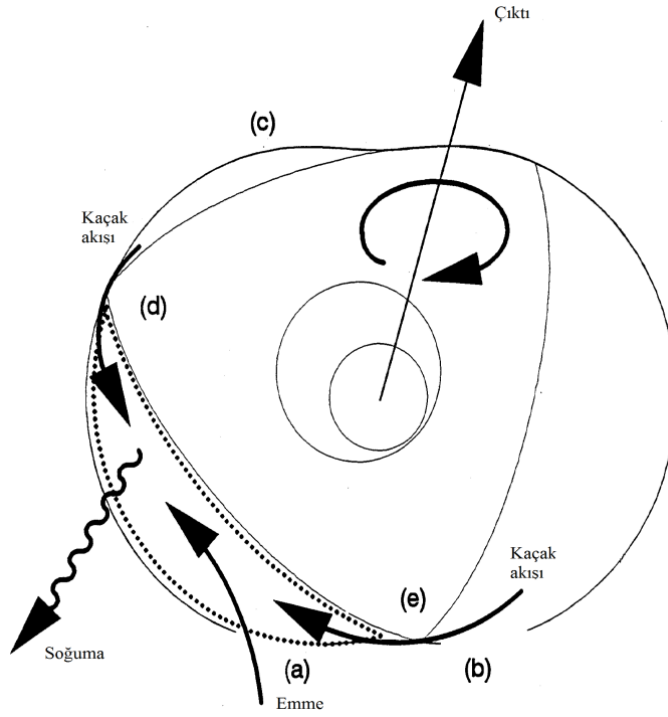
modellenen döner motorun sızdırmazlığının, geliştirilen sızdırmazlık stratejisi ile benzer büyüklükteki bir Wankel'e kıyasla yaklaşık % 65 kadar azaldığını göstermiştir. Bu sonuç deneysel verilerle de desteklenmiştir.

2.2. Kuramsal Temeller

Proje süreci boyunca kaynaklardan edinilen ve deneyimler sonucunda ulaşılan tüm formülasyonlar hesaplamalarda kullanılmıştır. Modelin doğrulanması aşamasında bu bölümdeki formüller ile ölçüm kontrolleri yapılmıştır.

2.2.1. Termodinamik Özelliklerin Modellenmesi

Wankel motorlarda yanma odası, içerisindeki gazın üniform sıcaklık basınç ve kompozisyona sahip olduğu açık bir termodinamik sistem şeklindedir. Sistemin 0-boyutlu modeli Şekil 2.1'de görülmektedir. Çevrim boyunca gerçekleşen olaylar, yanma odalarından yalnız biri referans alınarak modellenmiştir. Modellenmeyen diğer iki yanma odası da aynı çevrim süreçlerinden geçeceği için modellenen yanma odasının özellikleri diğerleri içinde geçerli kabul edilebilecektir. Şekil 2.1' de kesikli çizgiyle gösterilmiş yanma odası modelleme de kullanılan yanma odasıdır ve rotor saat yönünde dönmektedir. Basit bir yaklaşımla, kütle ve enerjinin korunumu açık bir sistem için ideal gaz denkleminde yararlanılarak elde edilmiştir. Söz konusu matematiksel bağıntılar, çeşitli kaynaklarda pistonlu motorlar için yapılmış modelleme çalışmalarının Wankel motorlara uyarlanması ile elde edilmiştir (Norman 1983, Bartrand ve ark 1993).



Şekil 2.1. Wankel yanma odasının açık sistem olarak şematik gösterimi

(a) Emme portu, (b) egzoz portu, (c) kaçak yolu, (d) çatlak akışı, (e) yakıt enjektörü (Norman 1983).

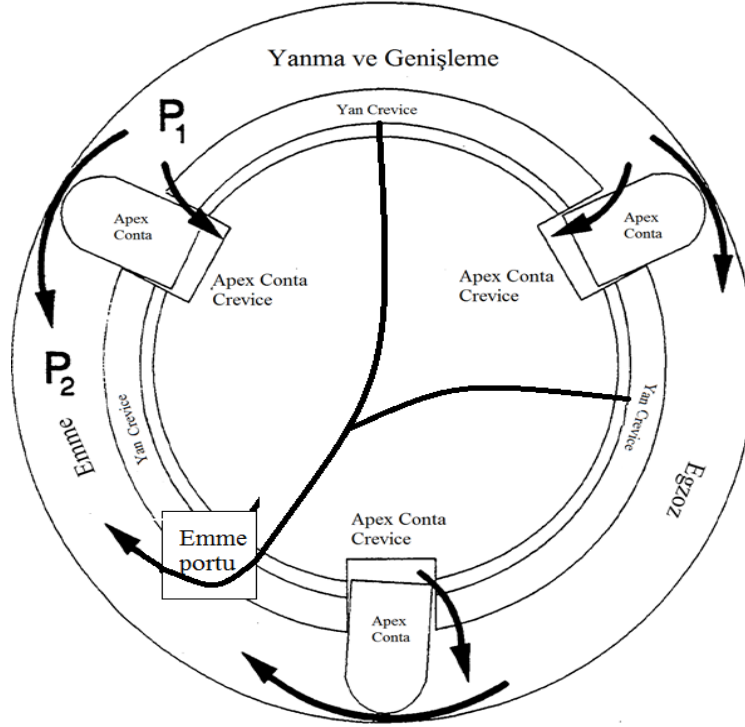
2.2.2. Kütlelerin Korunumu

Şekilden de görüleceği üzere kaçaklar yan contalar, tepe contaları boyunca, çatlak akışı ise yan contalar boyunca tepe conta boşluklarında enjektör ve buji boşluklarında oluşmasına rağmen kaçak ve çatlak akışları tepe contalarında toplanırlar (Şekil 3.16). Kütle korunumu denklemini ve değişkenlerini yazalım.

$$\text{Kütle korunumu; } \frac{dm_c}{dt} = \dot{m}_c = \dot{m}_{giriş} - \dot{m}_{egz} + \dot{m}_{szn} + \dot{m}_{çatlak} + \dot{m}_{yakıt} \quad (2.1)$$

m_c ; kontrol hacmi içerisindeki kütle, $m_{giriş}$; emme manifoldu boyunca kütle, m_{egz} ; egzoz manifoldu boyunca kütle, m_{szn} ; contalara sızan kaçak kütle, $m_{çatlak}$; çatlak kütle akışı, $m_{yakıt}$; yanma odasına eklenen gaz halinde yakıt oranıdır

(Bartrand ve ark. 1993). Her değişkenin üzerindeki nokta değişkenin zamana bağlı türevini göstermektedir.



Şekil 2.2: Kaçak ve Çatlak Modeli (Norman 1983)

2.2.3. Türlerin Korunumu

Yanma odası içerisinde üç tür bulunduğu varsayılmaktadır. Bunlar; yanmamış hava, yanma ürünleri ve yanmış yakıttır. Yanmış yakıt kütlesi çevrim boyunca yanan tüm yakıt kütlesini temsil eden bir büyüklüktür. Yanma ürünleri kütle oranı (x_b) ve yanmış yakıt kütle oranı (x_f) ilişkisi; $x_f = \left(\frac{\lambda}{\lambda+1}\right) x_b$ şeklindedir. λ ; stokyometrik yakıt hava kütle oranıdır.

Yakıt, oluşturulan modelde yanma başlangıcına kadar kontrol hacmi içerisinde yer almaz. Bu sebeple yanmamış gaz halindeki yakıt yanma odasındaki temel gazlar

arasında yer almaz. Sistemdeki yanma ürünleri ve taze hava, kontrol hacmi üzerinden kütle akışı ve yanmanın etkisi ile tükenir veya artar. Yanmış yakıt kütlesi (\dot{m}_f);

$$\dot{m}_f = \dot{m}_{f,grş} - \dot{m}_{f,egz} + \dot{m}_{f,çatlak}^i + \dot{m}_{f,çatlak}^g \dot{m}_{f,szn}^i + \dot{m}_{f,szn}^g + \dot{m}_{f,yanma} \quad (2.2)$$

Denklem 2.2'deki alt indisler, f; yakıtı, grş; emme, egz; egzoz, kçk; kaçak akışı sembolize etmektedir. Üst indisler; i ve g; ileri ve geri kaçak ve çatlak akışlarını göstermektedir. $\dot{m}_{f,yanma}$; ifadesi ise yakıt yanma hızını göstermektedir. Yakıt ve portlardan yakıt akışı arasındaki ilişki akış yönüne bağlıdır. Emme ve egzoz yakıt akışı ilişkisi aşağıdaki gibidir.

$$\dot{m}_{f,grş} = \begin{cases} x_{f,im} \dot{m}_{grş} & \dot{m}_{grş} \geq 0; \\ x_f \dot{m}_{grş} & \dot{m}_{grş} < 0. \end{cases} \quad (2.3)$$

$$\dot{m}_{f,egz} = \begin{cases} x_f \dot{m}_{egz} & \dot{m}_{egz} \geq 0; \\ x_{f,em} \dot{m}_{egz} & \dot{m}_{egz} < 0. \end{cases} \quad (2.4)$$

Çatlak ve kaçak akışlarında yakıt akış hızı da akış yönüne bağlıdır.

$\dot{m}_f^i = \dot{m}_{f,çatlak}^i + \dot{m}_{f,szn}^i$ ve $\dot{m}_f^g = \dot{m}_{f,çatlak}^g + \dot{m}_{f,szn}^g$ eşittir. İleri ve geri çatlak ve kaçak akışları aşağıdaki gibidir;

$$\dot{m}_{f,çatlak}^i = \begin{cases} x_{f,çatlak}^i \dot{m}_f^i & \dot{m}_f^i \geq 0; \\ x_f \dot{m}_f^i & \dot{m}_f^i < 0. \end{cases} \quad (2.5)$$

$$\dot{m}_{f,çatlak}^g = \begin{cases} x_{f,çatlak}^g \dot{m}_f^g & \dot{m}_f^g \geq 0; \\ x_f \dot{m}_f^g & \dot{m}_f^g < 0. \end{cases} \quad (2.6)$$

Yakıt kütle oranı, taze hava kütle oranı yanma ürünü kütle oranı yanma odası kompozisyonunu oluşturur. Yanma odası yakıt kütle oranı ($x_f = m_f/m_c$) zamana bağlı değişimi aşağıdaki bağıntıdan elde edilebilir.

$$\dot{x}_f = \frac{\dot{m}_f}{m_c} - x_f \frac{\dot{m}_c}{m_c} \quad (2.7)$$

Yanma ürünleri kütle oranı değişim hızı (\dot{x}_b)

$$\dot{x}_b = \dot{x}_f \frac{\lambda+1}{\lambda} \quad (2.8)$$

Taze hava kütle oranı değişim hızı (\dot{x}_a)

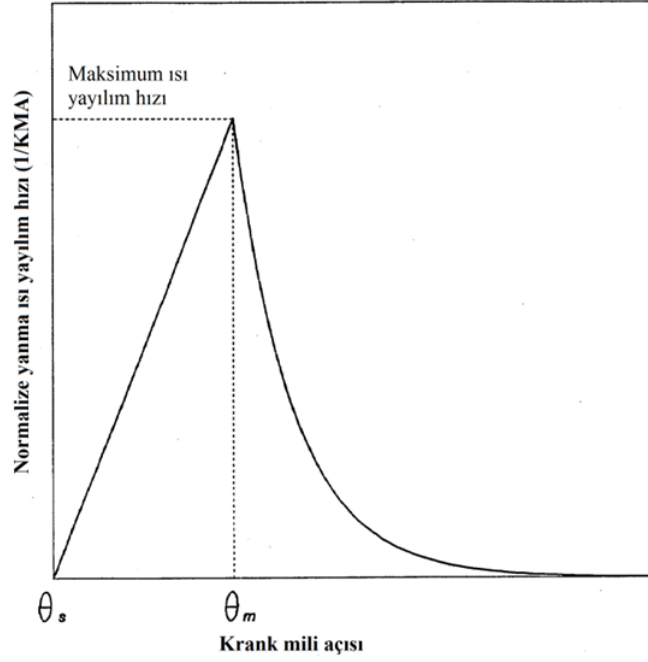
$$\dot{x}_a = -\dot{x}_b \quad (2.9)$$

Ekivalans oranı değişim hızı ($\dot{\phi}$);

$$\dot{\phi} = \frac{1}{\lambda} \frac{\dot{x}_f}{(1-x_f)^2} \quad (2.10)$$

2.2.4. Yanma

(Gatowski ve ark. 1984) yanma odası basınç verilerinden yararlanarak, krank miline bağlı yanma ısı yayılım hızı grafiğini oluşturmuştur ve buna göre yanmayı iki aşamada incelemişlerdir (Şekil 2.3.).



Şekil 2.3. Eksantrik mili açısına göre yanma ısı yayılım hızı grafiği
(Gatowski ve ark. 1984)

Yanma ısı yayılım hızı belirli bir değere kadar lineer olarak artar daha sonra eksponansiyel olarak düşer. Birinci aşamada yanma ısı yayılım hızı aşağıdaki gibidir;

$$\frac{dQ_c}{d\theta} = \left(\frac{dQ_c}{d\theta}\right)_{max} \left(\frac{\theta - \theta_s}{\theta_m - \theta_s}\right) \quad (2.11)$$

İkinci aşamada;

$$\frac{dQ_c}{d\theta} = \left(\frac{dQ_c}{d\theta}\right)_{max} e^{\frac{\theta - \theta_m}{\tau}} \quad (2.12)$$

(2.11) ve (2.12) denklemlerinde Q_c ; yakıt enerjisi, θ_s ; ateşleme başladığındaki eksantrik mili açısı, θ_m ; maksimum yakıt enerji yayılım hızındaki eksantrik mili açısı, $\left(\frac{dQ_c}{d\theta}\right)_{max}$; maksimum ısı yayılım hızı, τ ; yanma oranı bozulma sabitidir. Bozulma sabiti ifadesi elde etmek için Denklem (2.11)'de ifade edilen ısı yayılım hızının θ_s ' ten θ_m 'e kadar integrali alınır ve Denklem (2.12)'de ifade edilen ısı yayılım hızının θ_m ' den ∞ 'a kadar integrali alınır. Ortaya çıkan entegre ısı yayılımları, yanmada serbest kalan toplam yakıt

enerjisine eşit olduğu varsayımı yapılır. Yakıtın tam yanması gerçekleşmediği için, yakıt enerjisi verim ifadesiyle gösterilir.

$$\tau = \frac{X_c (m_{f,\text{çevrim}} * LHV)}{\left(\frac{dQ_c}{d\theta}\right)_{max}} - \frac{1}{2} (\theta_m - \theta_s) \quad (2.13)$$

$m_{f,\text{çevrim}}$; her bir çevrimde enjekte edilen toplam yakıt miktarıdır. Daha önce de bahsedildiği gibi oluşturulan bu modelde, yakıt buharlaşıp yanana kadar ki aşamalarda yanma odası gazlarından biri olarak kabul edilmemektedir. Yakıt yanma hızı;

$$\dot{m}_{f,\text{yanma}} = \frac{m_{f,\text{çevrim}} * \left(\frac{dQ_c}{d\theta}\right)}{m_f * LHV} \quad (2.14)$$

İdeal gaz denklemi, ideal gaz ilişkisi zamana bağlı yanma odası basınç değişikliğini ortaya koyan bir ifade olduğu söylenebilir. İdeal gaz bağıntısının zamana göre diferansiyeli;

$$\dot{P}_c = P_c \left(\frac{\dot{R}_c}{R_c} + \frac{\dot{m}_c}{m_c} + \frac{\dot{T}_c}{T_c} - \frac{\dot{V}_c}{V_c} \right) \quad (2.15)$$

Gaz sabitinin zamana bağlı türevi \dot{R}_c 'dir. Yoğunluk değişim hızı;

$$\dot{\rho}_c = \left(\frac{\partial \rho_c}{\partial T_c}\right)_{P_c, \phi} \dot{T}_c + \left(\frac{\partial \rho_c}{\partial P_c}\right)_{T_c, \phi} \dot{P}_c + \left(\frac{\partial \rho_c}{\partial \phi}\right)_{P_c, T_c} \dot{\phi} \quad (2.16)$$

$\left(\frac{\partial \rho_c}{\partial T_c}\right)$ ve $\left(\frac{\partial \rho_c}{\partial P_c}\right)$ kısmi türevleri ideal gaz bağıntısına göre yeniden düzenlenir ve Denklem (2.16) daha sade hale getirilirse,

$$\dot{\rho}_c = -\frac{P_c}{R_c T_c^2} \dot{T}_c + \frac{1}{R_c T_c} \dot{P}_c + \left(\frac{\partial \rho_c}{\partial \phi}\right) \dot{\phi} \quad (2.17)$$

Gaz sabiti değişim hızı,

$$\dot{R}_c = \frac{1}{\rho_c T_c} \dot{P}_c - \frac{P_c}{\rho_c^2 T_c} \dot{\rho}_c - \frac{P_c}{\rho_c T_c^2} \dot{T}_c \quad (2.18)$$

Denklem (2.17), Denklem (2.18)'de yerine konursa gaz sabiti değişim hızı,

$$\dot{R}_c = \frac{P}{\rho^2 T_c} \left(\frac{\partial \rho_c}{\partial \phi} \right) \dot{\phi} \quad (2.19)$$

Denklem (2.19), Denklem (2.15)'te yerine konursa basıncın zamana bağlı değişimi elde edilmiş olur.

$$\dot{P}_c = \frac{P_c}{\rho_c} \left(\frac{\partial \rho_c}{\partial \phi} \right) \dot{\phi} + \frac{P_c}{m_c} \dot{m}_c + \frac{P_c}{T_c} \dot{T}_c - \frac{P_c}{V_c} \dot{V}_c \quad (2.20)$$

2.2.5. Enerjinin Korunumu

Enerji emme akışı, egzoz akışı kaçak ve çatlak akışı ve yanma vasıtasıyla açık termodinamik sistemin sınırlarından geçmektedir. Yanma odası kontrol hacmine termodinamiğin 1. yasası uygulanırsa;

$$\dot{E}_c = \sum_{j=1}^{n_s} \dot{m}_j i_j - \dot{Q}_{ht} - \dot{q} \quad (2.21)$$

\dot{E}_c ; kontrol hacmi iç enerjisi, n_s ; kütlelerin sistem sınırlarını geçebileceği yolların sayısı, i_j ; j yönündeki entalpi, \dot{Q}_{ht} ; soğutma enerjisi kaybı, \dot{q} ; motor indike şaft gücüdür. Büyüklüklerin üzerindeki nokta zamana bağlı türevi göstermektedir. Denklem (2.21) denkleminde eşitliğin sol tarafı aşığıdaki gibi genişletilebilir. Burada yanma odasındaki kinetik ve potansiyel enerjiler ihmal edilmiştir.

$$\frac{d}{dt} (m_c i_c - P_c V_c) = \sum_{j=1}^{n_s} \dot{m}_j i_j - \dot{Q}_{ht} - \dot{q}$$

$$\dot{m}_c i_c - m_c \dot{i}_c - \dot{P}_c V_c - P_c \dot{V}_c = \sum_{j=1}^{n_s} \dot{m}_j i_j - \dot{Q}_{h,t} - P_c \dot{V}_c$$

$$m_c \dot{i}_c = \sum_{j=1}^{n_s} \dot{m}_j i_j - \dot{Q}_{h,t} - P_c \dot{V}_c - \dot{m}_c i_c \quad (2.22)$$

Entalpinin türevi kısmi türevler cinsinden ifade edilirse;

$$\dot{i}_c = c_p \dot{T}_c + c_t \dot{P}_c + c_\phi \dot{\phi} \quad (2.23)$$

Yukarıda elde edilen denklemler Denklem (2.22)' de yerine konursa zamana bağlı sıcaklık değişimi elde edilir;

$$\dot{T}_c = \frac{\sum_{j=1}^{n_s} \dot{m}_j i_j - \dot{Q}_{h,t} - P_c \dot{V}_c - \dot{m}_c i_c + \left[\frac{\gamma}{\rho_c} \frac{\partial \rho_c}{\partial \phi} \dot{\phi} - m_c c_\phi \right] \dot{\phi} + \frac{\gamma}{m_c} \dot{m}_c - \frac{\gamma}{V_c} \dot{V}_c}{m_c c_p - \frac{\gamma}{T_c}} \quad (2.24)$$

Burada, $\gamma = P_c(V_c - m_c c_t)$ 'dir.

2.2.6. Manifoldların Modellenmesi

Emme ve egzoz manifoldları volumetrik verimin tahmini için önem arz etmektedir.

Emme ve egzoz manifoldları sabit hacme sahip termodinamik özelliklerin üniform dağıldığı kontrol hacimleri olarak modellenir.

Emme Manifoldu

Emme manifoldu modellenirken ayrıca çevrim boyunca emme manifoldu kompozisyonunun fazla değişmesi beklenmez dolayısıyla da kompozisyonun değişimini gösteren türev ifadeleri ihmal edilebilir. Kütle ve enerjinin korunumu bir de ideal gaz bağıntısı emme manifoldu modeline uygulandığında, elde edilen zamana bağlı basınç ve sıcaklık ifadeleri aşağıdaki gibidir;

$$\dot{m}_{im} = \dot{m}_a - \dot{m}_{int} \quad (2.25)$$

$$\dot{T}_{im} = \left(\frac{T_{im}}{P_{im}V_{im}} \right) \left[\frac{\dot{m}_a(i_a - i_{im}) + R_{im}T_{im}\dot{m}_{im} + \dot{Q}_{im}}{\frac{c_{p,im}}{R_{im}} - 1} \right] \quad (2.26)$$

$$\dot{P}_{im} = P_{im} \left(\frac{\dot{m}_{im}}{m_{im}} + \frac{\dot{T}_{im}}{T_{im}} \right) \quad (2.27)$$

Bu denklemlerde \dot{Q}_{im} ; manifold yüzeylerinden ısı transferidir. Emme manifold özellikleri ‘im’, atmosferden manifoldta gaz akışı ‘a’ alt indisleriyle sembolize edilir. Dışarıdan emme manifoldu yüzeylerine ısı transferi ihmal edilmiştir.

Egzoz Manifoldu

egzoz manifoldu modeli emme manifolduna benzer şekildedir tek fark egzoz manifoldu kompozisyonu zamana bağlı değişimi oldukça yüksektir. Dolayısıyla manifold kompozisyonunun zamana bağlı kısmı türevleri dâhil edilir fakat emme manifoldu modellenirken ihmal edilmişlerdir. Egzoz manifoldunda kütle korunumu;

$$\dot{m}_{em} = \dot{m}_{exh} - \dot{m}_{ae} \quad (2.28)$$

\dot{m}_{ae} ; egzoz manifoldundan atmosfere sızıntı şeklindeki akışkan kütesidir. Egzoz manifoldundaki taze hava kütle oranı değişim hızı;

$$\dot{x}_{a,em} = \frac{\dot{m}_{exh}}{m_{em}} (x_{a,exh} - x_{a,em}) \quad (2.29)$$

Burada ‘a’ alt indisi taze atmosfer havasını sembolize etmektedir.

$$\dot{T}_{em} = \frac{\dot{m}_{exh}(i_{ex} - i_{em}) - m_{em}(e_{a,em} - e_{b,em})\dot{x}_{a,em} + R_{em}T_{em}(\dot{m}_{exh} - \dot{m}_{ae}) + \dot{Q}_{im}}{m_{em}(c_{p,em} - R_{em})} \quad (2.30)$$

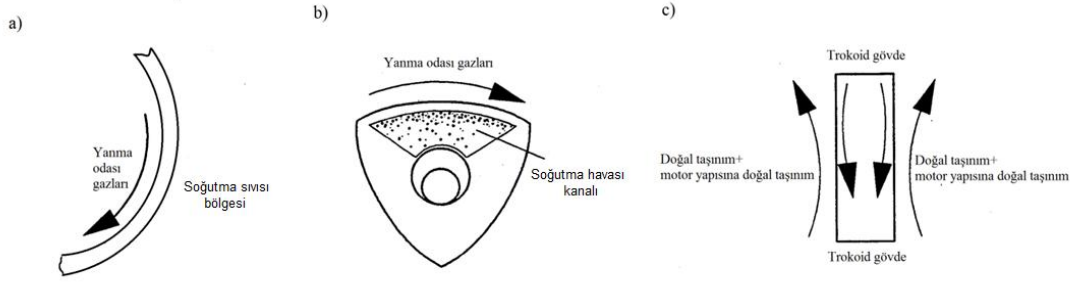
'e' özgül iç enerji, \dot{m}_{em} ; egzozportundan egzoz manifolduna kütle akış hızı, 'b' alt indisi yanmış gaz özelliklerini gözstermektedir. İdeal gaz denklemi düzenlenirse egzoz manifoldunda zamana bağlı basınç değişimi matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\dot{P}_{em} = P_{em} \left[\frac{\dot{m}_{em}}{m_{em}} + \frac{\dot{T}_{em}}{T_{em}} + \frac{\dot{x}_{a,em} (R_{a,em} - R_{b,em})}{R_{em}} \right] \quad (2.31)$$

2.2.7. Isı Transferinin Modellenmesi

Wankel motorlarında ısı transferi bu alandaki en temel ilgi alanlarındanıdır. Genellikle içten yanmalı motorlarda ısı transferi yanma ve genişleme stroklarında gerçekleşmektedir.

Bu motorların yanma odası şekli hacme oranla daha yüksek yüzey alanına sahip olduğundan dolayı ısı transferi miktarı pistonlu motorlara göre çok daha yüksektir. Isı transferinin daha yüksek olmasının bir diğer nedeni de gövde duvarlarından yüksek hızlarda dolgu geçişidir. Isı transfer katsayısının doğru şekilde tahmini bu çalışmaya konu olan Wankel tasarımında kullanılacak modelin sıcaklık dağılımı ve malzemesi açısından da hayati önem arz etmektedir. İncelenen motorun gövdesi sıvı soğutmalı rotoru ise hava soğutmalıdır. Isı transferi matematiksel modeli oluşturulurken bu durum dikkate alınmıştır ancak 3 boyutlu analizlerde dengesiz sıcaklık dağılımlarını görebilmek için soğutma önlemleri iptal edilmiştir. Söz konusu soğutma sistemleri Şekil 2.4.'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Modellenen Wankel motoru soğutma sisteminin şematik gösterimi.

a) Trokoid gövde cidarları soğutulması, b) Rotor soğutulması, c) Trokoid gövde yan duvarlarının soğutulması.

Woschni içten yanmalı motorlar için geliştirilmiş anlık ısı transferi katsayısının tahmini konusundaki çalışmasında yanma odasındaki ısı transferini düz bir levha üzerinden ısı transferine benzer kabul etmiştir.

Düz levha üzerinden ısı transferi Nusselt sayısı üzerinden incelenebilir.

$$Nu = C Re^a Pr^b = \frac{hL}{k} \quad (2.32)$$

Denklem 2.32’de; Nu; Nusselts sayısı, Re ; Reynolds sayısı ($Re = \frac{\vartheta L}{\nu}$), Pr; Prandtl sayısı ($Pr = \frac{\mu C_p}{k}$)’dır. Ayrıca, h; ısı transferi katsayısı, L; karakteristik uzunluk, k; iletim katsayısı, μ , ϑ ; dinamik, kinematik viskoziteler, ϑ ; karakteristik hız, C, a,b; düzeltme sabitleridir. Farklı deneysel çalışmalarda C,a ve b düzeltme sabitleri için sırasıyla 0.037, 0.8 ve 0.3 değerleri uygun görülmüştür (Norman 1983, Stanton 1987, Woschni 1967). Sabit değerleri bu kaynakları referans alarak Denklem 2.32 ‘de yerine koyduğumuzda;

$Nu = 0.037 Re^{0.8} Pr^{0.3}$ denklemi elde edilmiştir. Ayrıca deneysel çalışma sonuçlarından $Nu = 0.035 Re^{0.8}$ olarak sadece Re sayısının bir fonksiyonu olarak yazmakta mümkündür.

Isı transferi katsayısı özellikle Woschni tarafından yapılan çalışma referans alınıp Wankel motorlarına uyarlanmaya çalışılarak matematiksel olarak modellenmiştir.

Isı transfer katsayısı Nu sayısından elde edilebileceği gibi ayrıca literatürde içten yanmalı motorlardaki yanma odası taşınımıyla ısı transfer katsayısı basıncın sıcaklığın piston hızı gibi parametrelerin bir fonksiyonu olarak da elde edilmiştir (Woschni 1967). Bu genelleştirilmiş ısı transfer katsayısı; temelde yanma odası boru içi türbülanslı akış hesaplarından yola çıkılarak temin edilmiştir. Pistonlu motorlarda taşınımıyla ısı transfer katsayısı; emme/ sıkıştırma stroklarında $h = 110 [d^{-0.2}p^{0.8}T^{-0.53}(C_1c_m)^{0.8}]$ ve yanma/genişleme stroklarında $h = 110 [d^{-0.2}p^{0.8}T^{-0.53}(C_1c_m + C_2W_c)^{0.8}]$ şeklinde hesaplanmaktadır (Woschni 1967). Denklemden c_m ; piston hızıdır. Bu hız değeri emme ve sıkıştırma stroklarında gaz hızına karşılık geldiği için alınmıştır. W_c ; yanmadan dolayı türbülans sonucu piston hızına ek olarak oluşan hız değeridir. Bu denklemlerden de görüleceği üzere wankel motorlarında ısı transferi modellerken gaz hızı önemli bir değişken parametredir.

Woschni'ye göre içten yanmalı motorlarda ısı transferi iki faz olarak karakterize edilir(Woschni 1967);

1. Yanma olmadığında ısı transferi.
2. Yanma boyunca ısı transferi.

Yanma Olmadığında Gaz Hızı

Yanma olmadığı durumda bütün gaz hızı ortalama rotor hızıyla orantılıdır. Ortalama rotor hızı($\bar{\vartheta}_{rotor}$);

$$\bar{\vartheta}_{rotor} = \frac{\pi N R_r}{90} \quad (2.33)$$

Burada N; motor hızı (devir/dk) ve R_r ; rotor yarıçapıdır. Yanma olmayan yani emme ve sıkıştırma fazlarındaki karakteristik hız;

$$\vartheta_{yanma_olmayan} = c_1 \bar{\vartheta}_{rotor} \quad (2.34)$$

Burada c_1 ; düzeltme sabitidir.

Yanma Boyunca Yanan Gaz Hızı

Yanma boyunca ise yanan gaz hızlı bir şekilde genişleyeceği için gaz hızı rotorun ve gödenin hızına kıyasla daha hızlı hale gelir ve ortalama rotor hızına ek bir hız oluşur (Roberts 1983);

$$\vartheta_{yanma_ek} = c_2 \left(\frac{V_y}{V_1} \right) \left(\frac{T_1}{P_1} \right) (P_y - P_{yanma_olmayan}) \quad (2.35)$$

Burada; c_2 ; düzeltme sabiti, V ; hacim (m^3), T ; sıcaklığı sembolize etmektedir. y alt indisi; yanma odası şartlarını ve 1 alt indisi; emme portu kapalıyken ki şartları göstermektedir. $P_{yanma_olmayan}$ basınç değeri izantropik sıkıştırma ve genişleme stroklarındaki değerdir. Yanma boyunca toplam gaz hızı;

$$\vartheta_{yanma} = c_1 \bar{\vartheta}_{yanma_olmayan} + c_2 \left(\frac{V_y}{V_1} \right) \left(\frac{T_1}{P_1} \right) (P_y - P_{yanma_olmayan}) \quad (2.36)$$

Bu denklemlerden emme ve sıkıştırma boyunca ısı transferi katsayısı;

$$h = C_1 131 [R_r^{0.8} p^{0.8} T^{-0.53} (2.28 \bar{\vartheta}_{rotor})^{0.8}] \quad (2.37)$$

Yanma ve genişleme boyunca ısı transfer katsayısı (Roberts 1983);

$$h = C_1 131 [R_r^{0.8} p^{0.8} T^{-0.53} (2.28 \bar{\vartheta}_{rotor} + C_2 \vartheta_{yanma})^{0.8}] \quad (2.38)$$

Denkleme; sonuçların genel ısı transfer katsayısı ve şarj hızındaki hassasiyetini belirlemek amacıyla C_1 ve C_2 düzeltme sabitleri ilave edilmiştir.

Duvarlara ısı transfer hızı;

$$\delta Q_{ht} = h A_s (T - T_{duvar}) \quad (2.39)$$

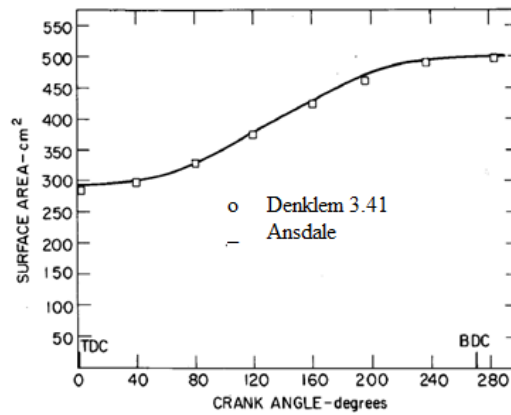
A_s ; toplam yüzey alanıdır.

$$A_s = A_{gövde} + A_{rotor} + 2A_{yanıyüzey} \quad (2.40)$$

Toplam yüzey alanı hesabı için, rotor yüzeyi tüm çevrim boyunca sabittir ve dairesel yay formunda olduğu yaklaşımıyla modellenebilir. (Danieli ve ark. 1978) tarafından toplam yüzey alanı hesabında izlenen yol şöyledir; Geometrik olarak yanma, rotor boyutları tarafından tanımlanan uzunluk ve genişlikteki bir kutuda yayılan iki alev olarak modellenmiştir. Kutunun yüksekliği, hazne hacminin zaman davranışına uyması için sinüzoidal şekilde değiştiği düşünülmüştür. Bu kutunun yüzey alanı gerçek motorunkinden yaklaşık% 10 farklılık gösterir. Böylece yüzey alanı için düzeltilmiş bir alan hesabı yapılmıştır. Buna göre;

$$\frac{A_s}{2} = \frac{V}{wL} + wL + C \quad (2.41)$$

Burada; C; düzeltme faktörü yaklaşık% 10 farklılık hesaba katılarak belirlenmiştir. V; hacim b; rotorun eni, L; rotorun uzunluğudur. Şekil 2.5'de, Denklem 2.41 de elde edilen değerlerin Ansdale'nin çalışmasındaki yüzey alanı verileriyle kıyaslanmıştır.



Şekil 2.5. Denklem 2.41'in, Ansdale tarafından belirlenen yüzey alan hesabıyla kıyaslanması (Danieli ve ark. 1978)

Matematiksel olarak elde edilen yüzey alanı her bir krank mili açısı için bilgisayar ortamında modellenmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Vestel Hava Endüstrileri firmasının üniversitemize hibe ettiği Wankel motorunun ısı ve yapısal analizini gerçekleştirebilmek için silindir içi basınç ve sıcaklık değerlerinin hesaplandığı bir yanma analizi çalışması yapılacaktır. Motorun sadece mekanik parçalarına sahip olduğumuz için çalıştırıp sıcaklık ve basınç ölçümleri yapmak imkan dahilinde değildir. Bu sebeple teorik olarak eksantrik milinin veya rotorun açısal değişimine bağlı sıcaklık ve basınç değerlerini veren bir model oluşturulacaktır. Bu modelden alınan ilk sonuçlar ile motordaki yanma süreçleri analiz edilecek ve gövde üzerindeki sıcaklık dağılımının değişimi açısal olarak incelenecektir. Analizleri yüksek doğruluk seviyesinde yapabilmek adına üniversitemize hibe edilen wankel motoru sökülecek ve tersine mühendislik yöntemleri kullanılarak ana parçaları bilgisayar ortamında yeniden modellenecektir. Modellenen parçaların teorik ölçü hesaplarına uygunlukları kontrol edilecektir.

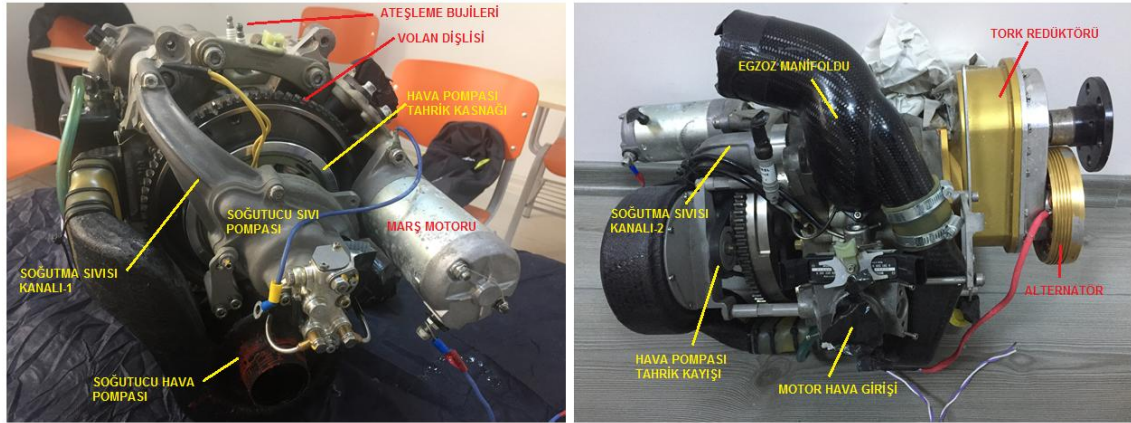
Wankel motorları için de yanma odasının hacminin en küçük olduğu nokta üst ölü nokta (ÜÖN), hacmin en büyük olduğu nokta alt ölü noktadır (AÖN). İncelediğimiz motor için üst ölü nokta buji bağlantısının olduğu bölgededir ve 0° açı olarak kabul edilir. Hacim hesabı ve model doğrulaması sonucunda ÜÖN ve diğer tüm açısal veriler çizelgede sunulacaktır.

Motor modellemesi yapılırken tersine mühendislik ve ölçüm yöntemleri kullanılacaktır. Modeldeki tüm ölçüler motor parçalarının gerçek ölçüleridir. Wankel motoru, geometrisi sebebiyle belirli açılarda kendini tekrar eden alan ve hacim ölçüleri verir. Hedefimiz motor için ısı ve mekanik analiz yapmaktır. Bu nedenle giriş ve çıkış portlarının kapalı olduğu $(858^\circ) - (1080^\circ \text{ veya } 0^\circ) - (219^\circ)$ eksantrik mili açıları aralığındaki bölgeye ait rotor pozisyonu ve hacim geometrisi 1° lik rotor hassasiyetinde SOLIDWORKS BDT programında modellenecektir. Modelin ana gövdesi odaklanılan ana parça olduğu için model detaylı şekilde bilgisayar ortamına aktarılacaktır. Sonraki aşamada modelden elde edilen ölçüler ile GT-SUITE programında motor tek boyutlu olarak modellenecek ve kuramsal temeller bölümünde yararlanılan denklemler ile bilgisayar ortamında başlangıç değerleri olarak kabul edeceğimiz ilk sıcaklık ve basınç

parametreleri elde edilecektir. Tek boyutlu ısı denklemlerinden çıkan sıcaklık ve basınç parametreleri ile yeni malzemeye sahip gövdeye ANSYS programında ısı analiz denemeleri uygulanacaktır. Yapılan denemeler sonucunda tasarım optimize edilip nihai şeklini alacaktır. Başlangıç modelimiz hem hava hem de su soğutmalı bir yapıda olduğu için, model üzerinde değişiklikler yapılarak ana gövde İHA'larda kullanılmaya uygun olacak şekilde sadece hava soğutmalı hale getirilmeye uygunluğu kontrol edilecektir. Elde edilen sonuçlar tartışılarak yeni malzemelerin, gövdenin ana maddesi olan alüminyum alaşımı yerine veya alaşıma destek olacak bir yapıda kullanılıp kullanılmayacağı tartışılacaktır.

3.1. Wankel Motor Parçalarının Sökülmesi

Elimizdeki wankel motorunu inceleyebilmek için motorun tüm alt parçalarının sökülmesi amaçlanmaktadır. Motor bize elektronik aksamaları, elektrik dağıtıcısı ve radyatör mekanizması üzerinden sökülmiş halde gönderilmiştir. Şekil 3.1'de motorun montajlı halinin genel görünümünü incelediğimizde iki adet soğutma sisteminin olduğunu öngörmekteyiz.



Şekil 3.1. Montaj halindeki wankel motoru genel ekipmanları

Pompa ile basılan soğutucu sıvı motorun ana gövdesini soğutmaktadır. Hava pompası ile basılan soğuk hava ile önce gövdenin ön kapağında geçmekte, segmanlar ile ayrılmış boşluktan yararlanarak dişlilere, rotora ve eksantrik miline ulaşmaktadır. Bu

kanallarda ısınan hava gövdenin arka kapağındaki kanaldan egzoz manifolduna paralel şekilde bağlanmıştır.

Motorun ana gövdesine ulaşabilmek ve gerekli ölçüleri alabilmek için parçaların sökme sırası tayin edilmiştir. Motorun ön yüzünden başlanarak marş motoru, soğutucu hava pompası, soğutucu sıvı pompası, soğutma sıvısı kanalları, hava pompası tahrik kasnağı, volan somunu ve dişlisi, gövde ön kapağı, eksen pimleri, rotor, eksantrik mil sıralaması takip edilerek motoru sökme işlemi tamamlanmıştır. Motordaki volan dişlisini krank miline sabitleyen somun ısıtılarak genişletilmiş ve sökülmüştür. Motorun ana gövdeye kadar sökölme işlemi 6 saatlik bir sürede tamamlanmıştır.



Şekil 3.2. Parçaları çıkartılmış wankel motoru genel görüntüsü

Ana gövde , rotor, dişliler, ve eksantrik mili çıkartıldıktan sonra SOLIDWORKS programında yapılacak olan katı modelleme için ölçü alma aşamasına geçilmiştir. Parçaların ölçümleri yapılırken elektronik kumpas, elektronik mikrometre ve 3 boyutlu ölçüm cihazı kullanılmıştır. Ölçüm ekipmanları, bünyesinde çalışmakta olduğum

Baykal Makine A.Ş. firmasından tedarik edilmiştir. Tüm parçaların ölçümlerinin yapılması ve modellenmesi süreci başlangıçtan itibaren 1 haftalık bir süreci kapsamaktadır. Modelleme yapılırken analiz esnasında ihtiyaç duyulacak parçalar dikkate alınmıştır. Motor üzerindeki marş motoru, hava pompası, akışkan pompası, volan dişlisi, kayış kasnak mekanizması gibi ekipmanlar modele dahil edilmemiştir.

3.2. Wankel Motor Parçalarının Ölçümü ve Modellenmesi

Bir mekanizmanın üç boyutlu modellenmesi yapılacak ise modellemenin yapılacağı programın montaj yapısını ve mekanizmanın temas ilişkilerini çok iyi bilmek gerekir. Solidwork programında montaj modeli yapılabilmesi mekanizmanın tüm alt parçaları tek tek modellenmeli ve sonrasında montaj modülünde parçalar gerçek temas yüzeylerinden birleştirilmelidir.

3.2.1. Eksantrik Mili Modellenmesi

Motorun eksantrik milinin ölçümleri elektronik kumpas ve mikrometre ile yapılmıştır. Mil üzerindeki en önemli ölçü eksantriklik değeridir.



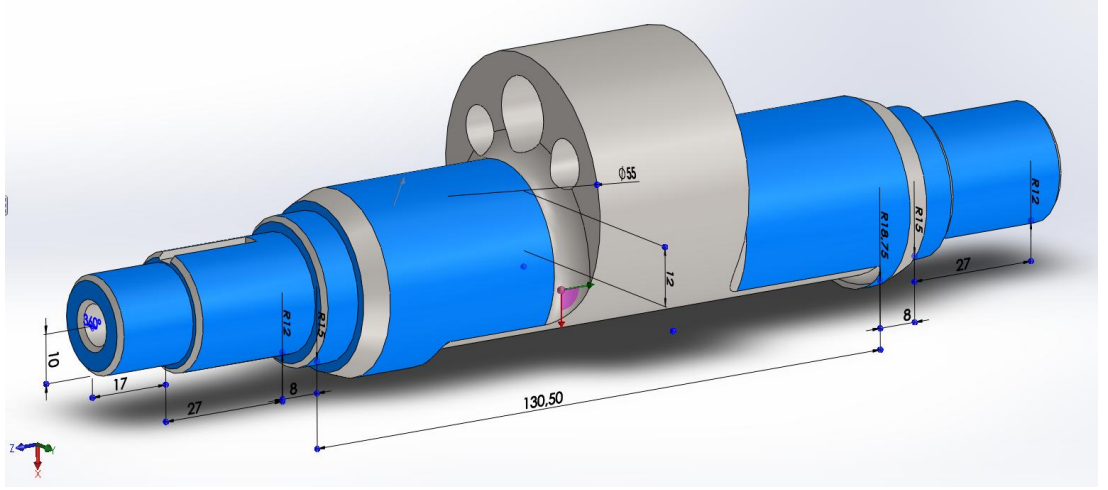
Şekil 3.3. Eksantrik mili genel görüntüsü

Yapılan hassas ölçümler sonuunda %0,05 tolerans aralığında eksantriklik(E) değeri

$$E = 12\text{mm}$$

$$\text{Rotor yatağı çapı } (\varnothing_{\text{rotor yatağı}}) = 55\text{mm}$$

Milin diğer tüm detaylı ölçüleri oluşturulan model üzerinde şekil 3.4'te gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Eksantrik mili BDT modeli

Model gerçek işleme tekniğine uygun şekilde kendi pah ve yarıçap ölçüleri korunarak oluşturulmuştur. Montaj modülü için kullanıma uygun hale getirilmiştir.

3.2.2. Wankel Pinyon Dişli Modellenmesi

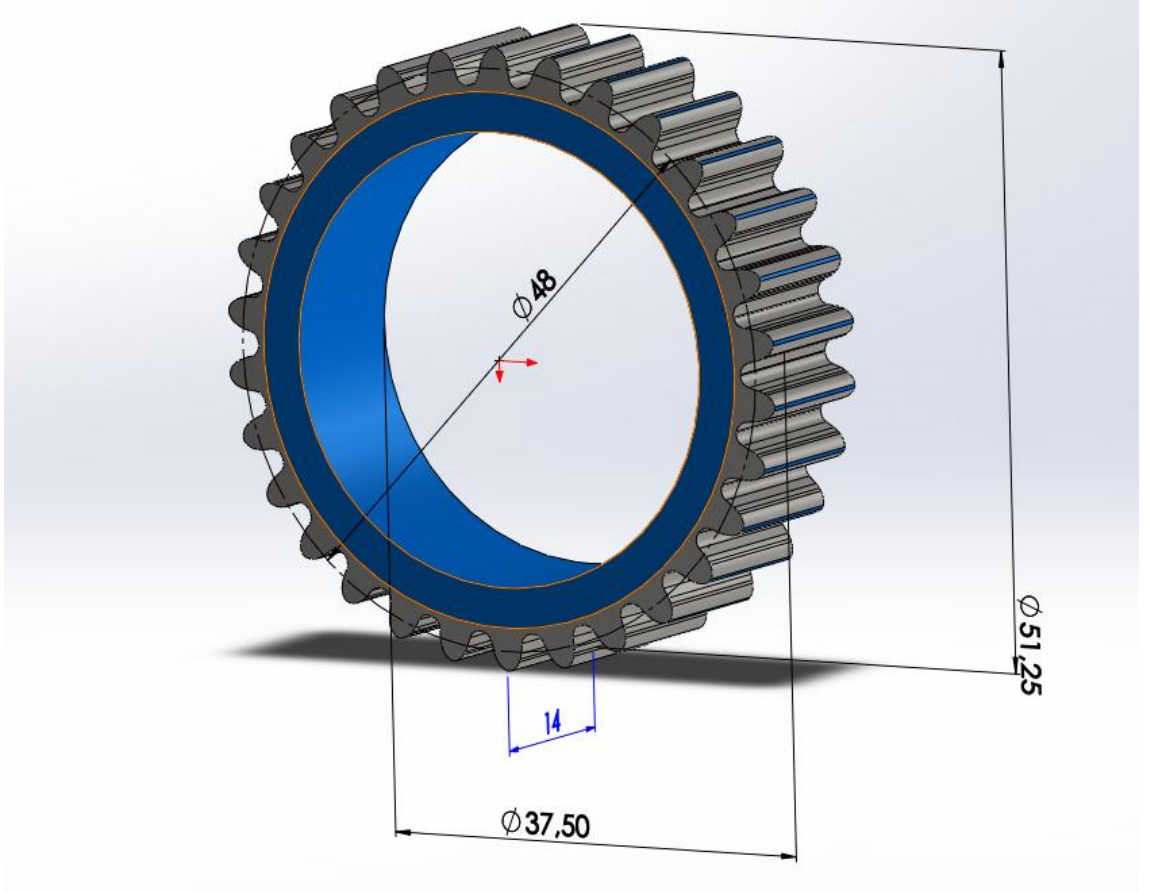
Pinyon dişli mekanizması wankel motorunun matematiksel modelindeki küçük çaptır. Çap değeri eksantriklik değerinin dört katına eşittir. Tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken en önemli nokta mekanik olarak çap değeri, pinyon dişlinin bölüm dairesi çapına eşit olmak zorundadır. Motor üzerindeki büyük dişli ve küçük dişlinin temas noktaları, üretilmiş olan çarkların bölüm dairesi çaplarından hesaplanır. Pinyon dişli için ölçüm değerleri aşağıda belirtildiği gibidir.

$$D_{t1} = \text{Bölüm Dairesi Çapı} = 48\text{mm}$$

$$Z_{t1} = \text{Pinyon diş sayısı} = 30 \text{ adet}$$

$$M_{t1} = \text{Pinyon Modül} = D_{t1} / Z_{t1} = 48/30 = 1,6$$

Bulmuş olduğumuz modül değeri standartlaştırılmış değerlerin dışındadır. Bu durum pinyonun özel olarak işlendiği anlamına gelmektedir. Pinyonun diş formunun hassas ölçümü yapıldıktan sonra Pinyon bilgisayar modeli oluşturulmuştur ve montaj durumuna hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.5. Pinyon dişli BDT modeli

3.2.3. Wankel İç Planet Dişli Modellenmesi

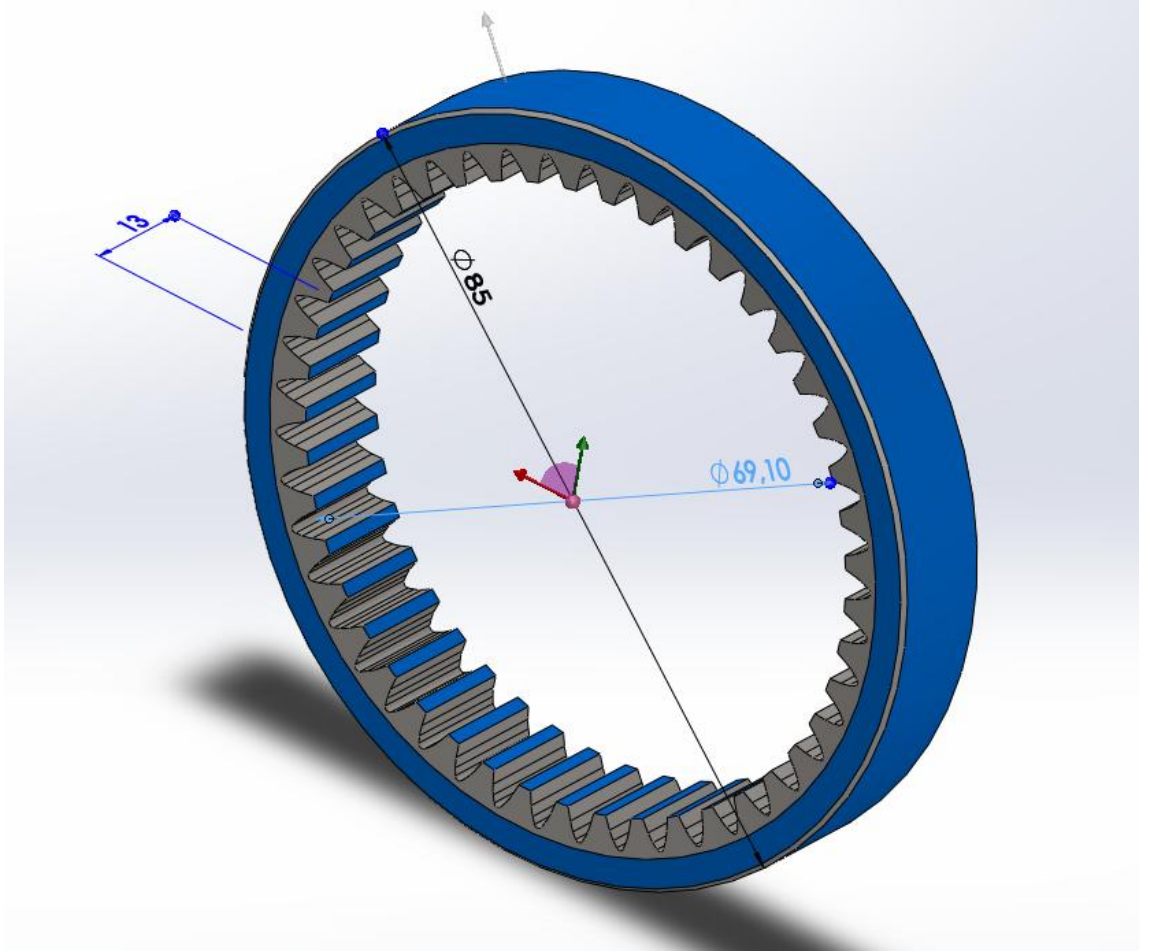
İç planet dişli mekanizması wankel motorunun matematiksel modelindeki büyük çaptır. Çap değeri eksantriklik değerinin altı katına eşittir. Dişli mekanizmalarındaki zorunluluk sebebiyle iki dişlinin birbiri ile çalışabilmesi için bu dişlilerin modülleri eşit olmalıdır. Bu nedenle pinyon dişli ile iç planet dişlinin modülleri ve diş geometrileri birbirine eşit imal edilir. Planet dişli üretildikten sonra rotorun iç yüzeyine oturacak şekilde montajlanır. Planet dişli için ölçüm değerleri aşağıda belirtildiği gibidir.

D_{t2} = Bölüm Dairesi Çapı = 72mm

Z_{t2} = Planet diş sayısı = 45 adet

M_{t2} = Planet dişli Modülü = $D_{t2} / Z_{t2} = 72/45 = 1,6$

Yapılan ölçümlerden alınan sonuçlar neticesinde planet dişlinin bilgisayar modeli oluşturulmuş ve montajlanmaya hazır hale getirilmiştir.



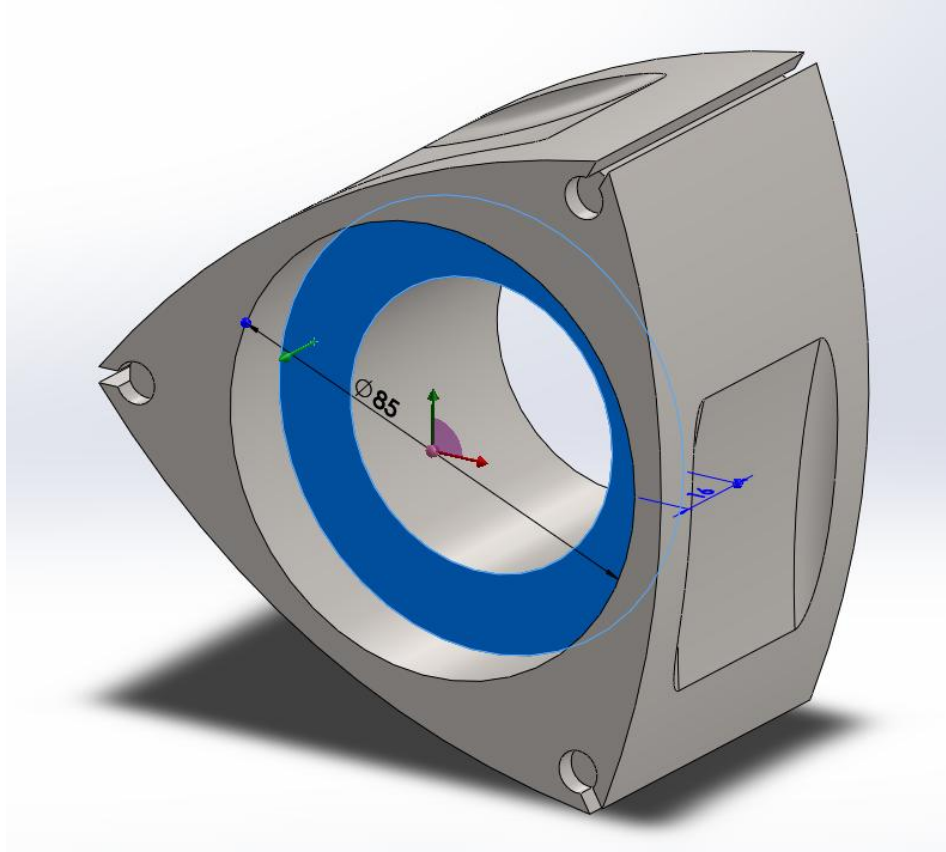
Şekil 3.6. İç planet dişli BDT modeli

3.2.4. Rotor Modellenmesi

Rotor mekanizması motor üzerindeki en önemli aksamlardan biridir. Rotor geometrisi oluşturulurken eksantrik milinin eksantriklik değeri önemlidir. Şeklin ana hatlarını ve

eğrileri belirleyen matematiksel model kuramsal temeller bölümünde verilmiştir. Geometriyi oluşturan koordinat sistemi denklemlerinde eksantriklik çarpan olarak yer alır. Bilgisayar modeli oluşturulurken ve ölçümler yapılırken rotor ölçülerinin matematiksel olarak uygunluğu da kontrol edilmiş. Yapılan ölçümler sonucunda gerçek yapı ile matematiksel model arasında ölçü uyumsuzluğu görülmemiştir.

Tasarım yapılırken rotor ve onun göbeğine bağlanan iç planet dişlisi ayrı düşünülemez. Hesaplamalar bu iki parça birbirine bağlanmış haldeyken yapılmalıdır. Dişlilerin bağlantı delik pozisyonları motorun dönüş rotasyonuna göre açılır. Rotorun oluşturulan bilgisayar modeli şekil 3.7 de gösterilmiştir.

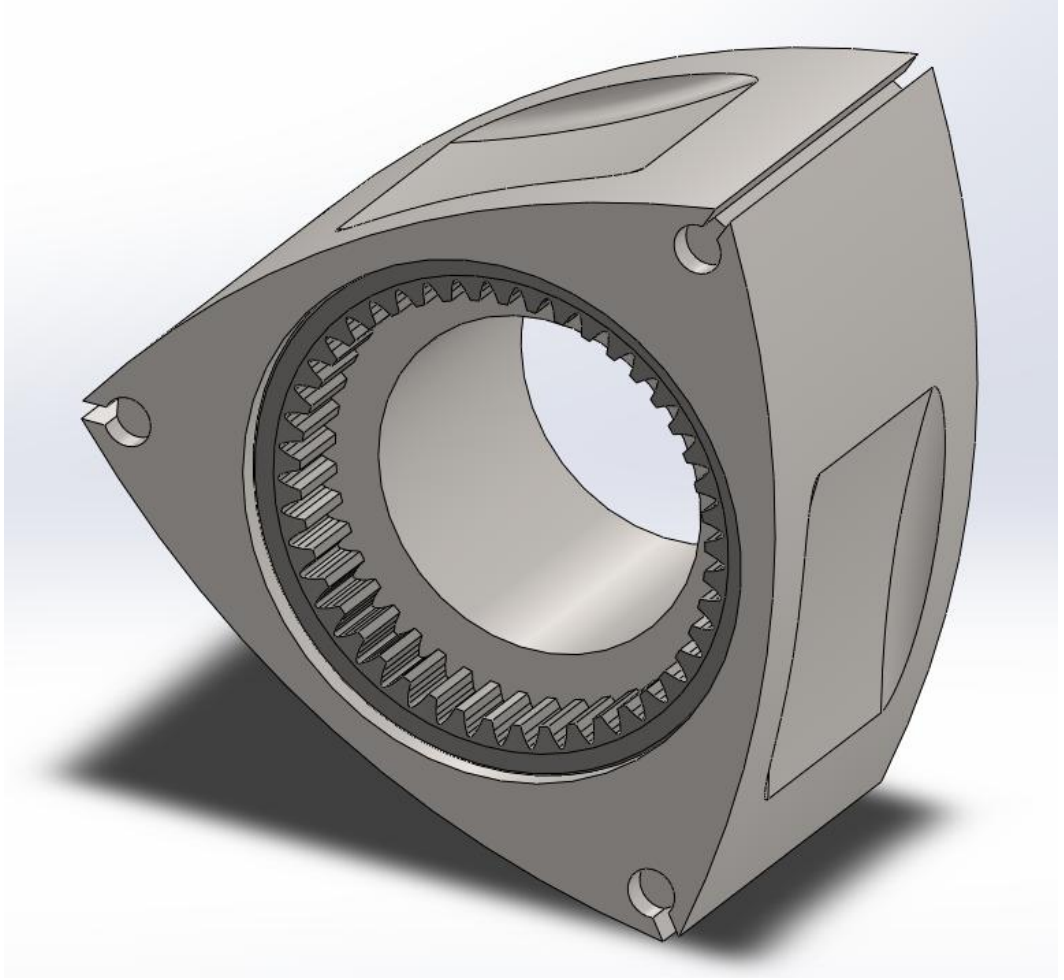


Şekil 3.7. İç Rotor BDT modeli

Rotorun merkezine açılan Ø85 mm lik temiz işlenmiş yüzeye iç planet dişli oturtulup sabitlenir. Bu sayede mekanik olarak rotor ve planet dişlinin bölüm dairesi çapı hesaplamalarda bir bütün olarak alınır.

Rotor modeli tamamlandıktan sonra gövdenin içine yerleştireceğimiz ana parçaların modellenme süreci tamamlanmıştır. Sabitlemeyi ve bütünlüğü sağlayan civata, segman ve rulman gibi ara parçalar modelde analizi zorlaştıracığı öngörülerek modelde dahil edilmemiştir.

Rotorun planet dişli ile montajlanmış bilgisayar modeli şekil 3.8.' de gösterilmiştir.

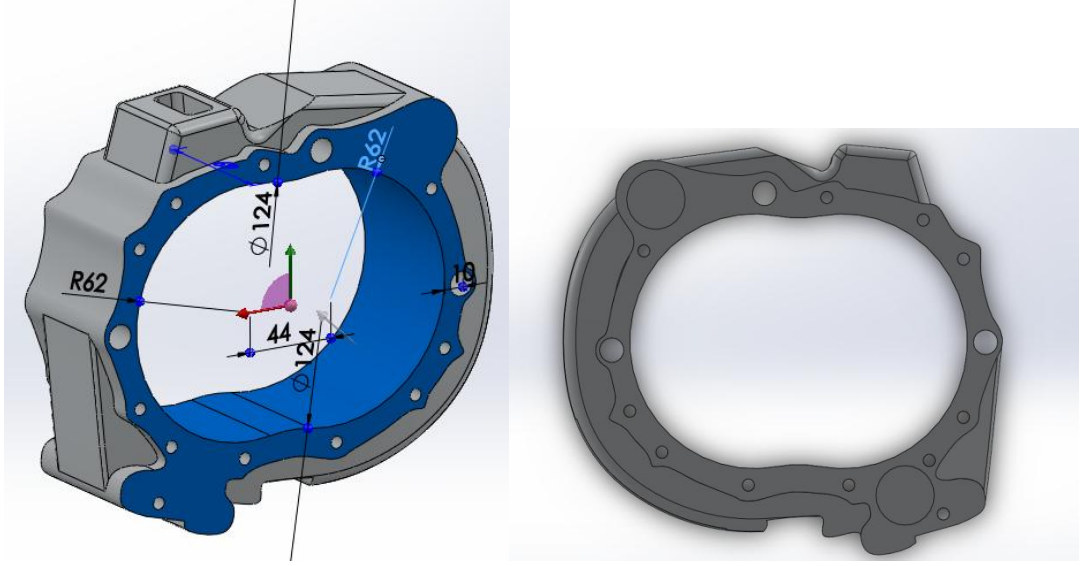


Şekil 3.8. İç Rotor Montaj Modeli

3.2.5. Ana Gövde Modellenmesi

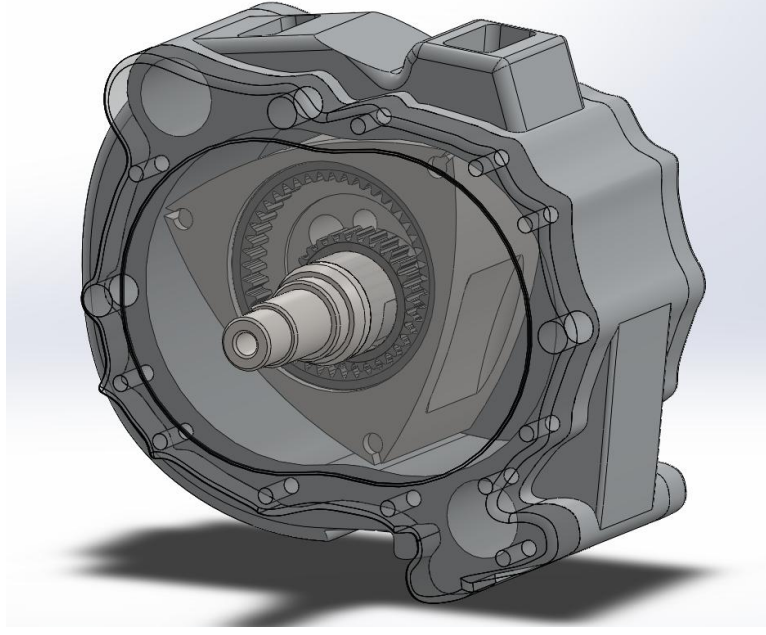
Gövdenin içine montajlanacak olan alt parçaların modellenmesinden sonraki aşamada oluşturulan modelin en önemli parçası olan ana gövdenin modellenmesine başlanmıştır. İlk aşamada mühendislik ölçüm teknikleri kullanılarak gövdenin iç eliptik yapısının geometrik noktaları çıkartılmış ve birleştirilmiştir. Motorun ana gövdesinin işleme tekniği ve yüzey segmanlarının uyumlu olabilmesi sebebiyle matematiksel model ile

gerçek motor gövdesi arasında yaklaşık 1mm lik bir yarıçap farkı gözlemlenmiştir. Bu durum wankel motorlarının çalışma prensibi sebebiyle olması gereken doğal bir durumdur. İç yüzey geometrisi oluşturulduktan sonra kumpas ve mikrometre ile modelin tüm detay ölçüleri alınmış ve %98 oranında uyumluluk gösteren ana gövde katı modeli oluşturulmuştur.



Şekil 3.9. Ana gövde BDT modeli

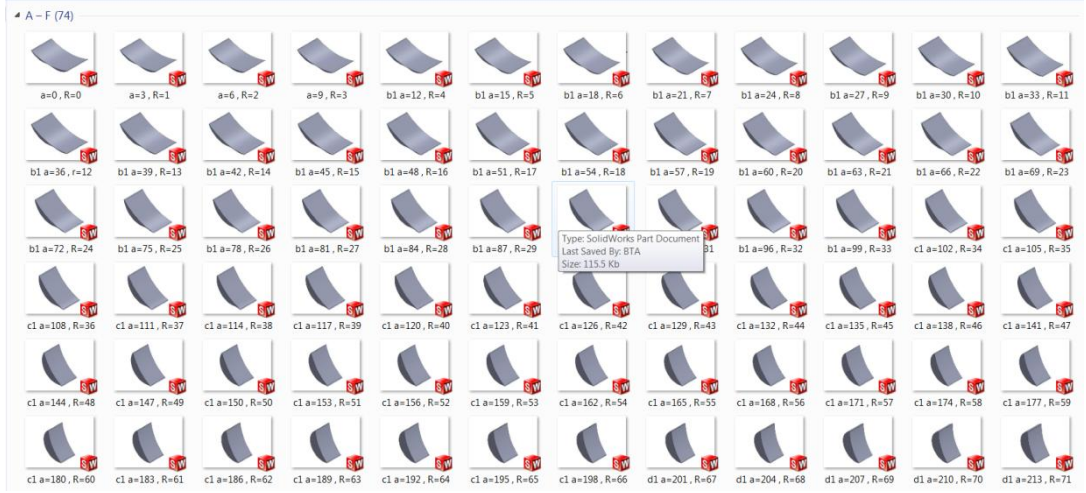
Modelin temel ölçüleri Şekil 3,9' da görüldüğü gibidir. Aynı eliptik yapıya sahip gövde yan kapakları da modellendikten sonra bütün parçalar SOLIDWORKS programının montaj modülünde bir araya getirilmiştir. Montaj ilişkileri tanımlanırken motorun matematiksel oranlarına uygun olacak şekilde rotorun eliptik hareketine imkan veren montajlama yöntemi tercih edilmiştir.



Şekil 3.10. Wankel motorunun montajlanmış BDT modeli

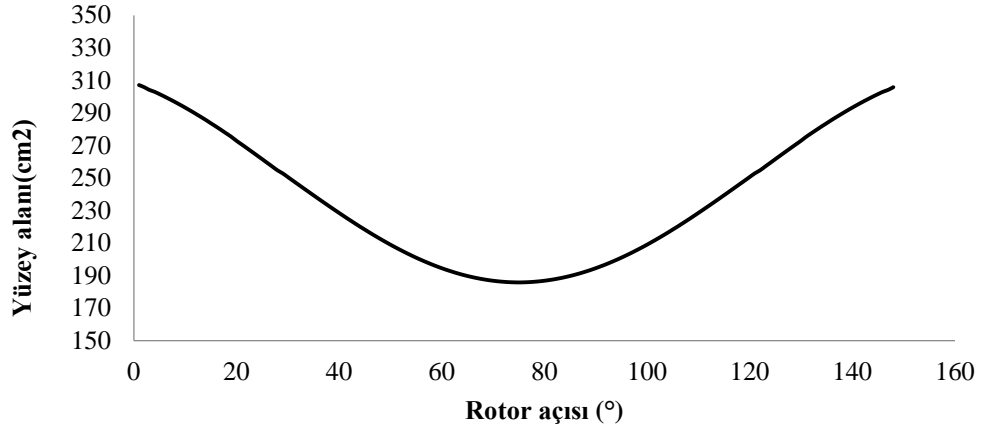
3.2.6. Yüzey Alanı ve Hacim Hesaplamaları

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 CAD programında modellenmiştir. Motorun hareketi esnasında değişen oda geometrileri bilgisayar ortamında tek tek modellendikten sonra hacim ve yüzey geometrilerinden alınan veriler motorun rotor oyduğundaki hacim ve yüzey alanı değerleri ile birleştirilerek Excell programında listelenmiştir. Toplam hacim ve yüzey alanı değerleri EK 1’de verilmiştir.

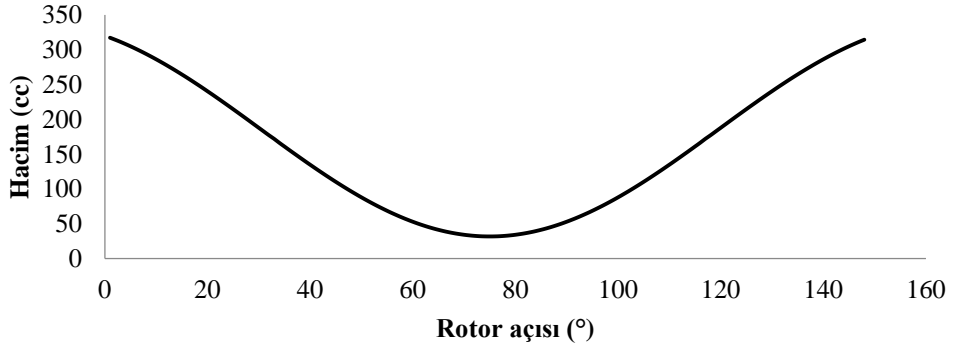


Şekil 3.11. Farklı krank mili açılarındaki yanma odası hacim ve yüzey alanı değişimi

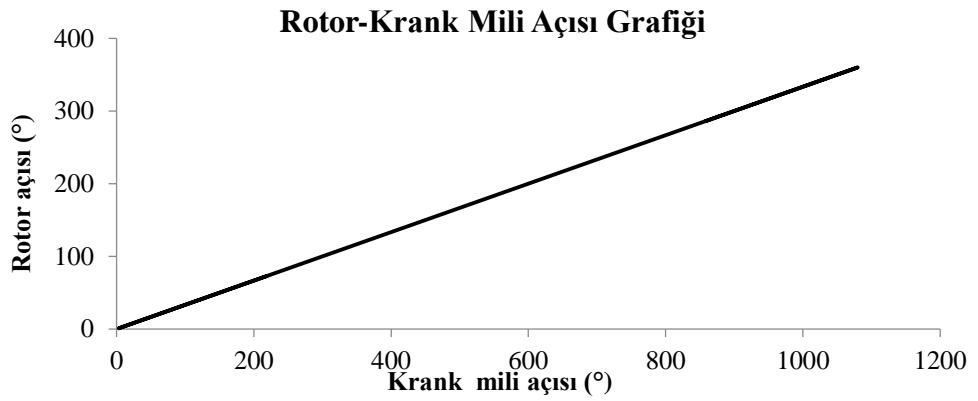
Yanma odası hacim ve yüzey alanı verileri, motorun krank milinin 3 kez 360°lik tur yapması sonucunda referans olarak belirlenen bir yanma odasının gerçek geometrik değerlerini bize sunmuştur. Bu veriler birleştirilerek yüzey alanı ve hacim grafikleri elde edilmiştir. Grafiklerden okunan veriler bir sonraki aşama olan tek boyutlu matematiksel motor modellemesinde veri kaynağı olarak kullanılacaktır. Motorun tek boyutlu modeli GT-SUITE programında gerçekleştirilecektir. Modelleme yapılırken emiş ve egzoz manifoldu alan ve hacim değişkenlikleri de dahil olmak üzere tüm geometrik yapı sayısal değerler ile modellenecek. Motorun sayısal kopyası bilgisayarda rotor konumuna göre yanma odasının sıcaklık ve basınç değerlerini verecek şekilde düzenlenecektir. Oluşturulan excell formatından alınan ilk hacim ve yüzey alanı verileri aşağıdaki grafiklerde okunduğu gibidir.



Şekil 3.12. Yanma odası yüzey alanı grafiği



Şekil 3.13. Yanma odası hacim grafiği



Şekil 3.14 Rotor-krank mili açısı grafiği

Wankel motorlarının günümüzde ticari olarak çok fazla uygulama alanı bulunmadığı için bu motorların termodinamik yapılarını hesaplayabilen programlar çok sınırlı kalmıştır. Wankel motorlarının eliptik dönme hareketi sonucunda oluşan yanma odası şekillerini bir matematiksel modele oturtmak bilgisayarlar için çok karmaşık bir hesaplama ağına sebep olmaktadır. Standart pistonlu motorlarda piston hareketi tek ekseninde gerçekleştiği için yanma odası ve strok hacmi geometrisini bilgisayarda şekillendirmek çok daha kolaydır. Bu sebepten dolayı standart pistonlu motorların HAD programlarında pistonlu motorlar için ticari yapıdaki hesaplama modülleri yüksek düzeyde geliştirilmiştir. Piyasa taleplerinin de bu yönde olması sebebiyle bir çok programda hazır halde standart pistonlu motorun ısıl performansını tek veya çok boyutlu olacak şekilde hesaplayabilen paketler sunmuşlardır.

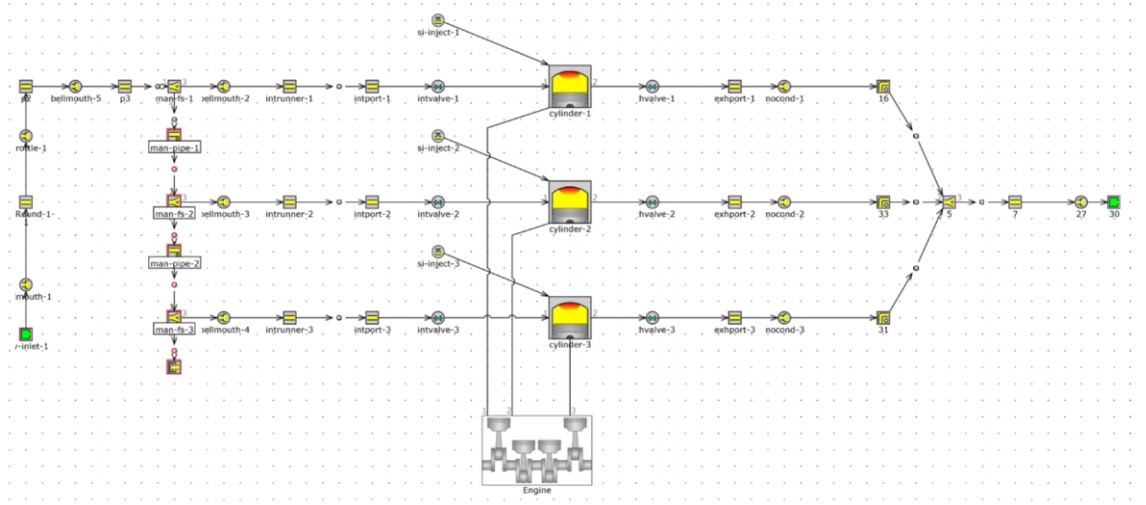
3.3. Wankel Motorunun Sayısal Olarak Tek Boyutlu Modellenmesi.

Wankel motoru çalışma geometrisi olarak standart pistonlu motorlara göre farklı bir yapıda olsa da bu motorlar ile hemen hemen aynı temel denklemlere ve matematiksel modele sahip bir yapı izler. Bu benzerlik wankel motorları için çizilen basınç ve hacim diyagramlarında da görülebilmektedir. Bu durum tek boyutlu bir wankel modeli oluştururken, standart pistonlu motorlar için geliştirilen hazır bilgisayar programlarının bazı değişiklikler ile wankel motorları için de kullanılabilceğini ön görmemizi sağlamıştır. Yapılan araştırma neticesinde GT-SUITE modelleme programının bu işi yapabilecek en uygun program olduğuna karar verilmiştir.

3.3.1. Wankel Motorunun GT-SUITE Programına Tanımlanması.

Wankel motorunun sayısal modellemesinin GT-SUITE programı üzerinde devam etmesi fikrinin danışman hocam Prof.Dr. Ali Sürmen tarafından onaylanması üzerine ilk olarak geometrik parametreler üzerinden çalışmaya başlanmıştır. Programa ve wankel motorları ile ilgili analiz yapılarına hakim olan Arş.Gör. Merve Altay modellemenin her aşamasında takip ve destek sağlamıştır. Programın kullanılması aşamasında TEI firmasının motor tasarım birimindeki GT-SUITE modülleri kullanılmıştır. Yardımları için firmaya ve çalışanlarına tekrar teşekkür ederiz.

GT-SUITE programının temel özelliği, ticari olarak üretilecek otomotiv ile ilgili mekanik ve termodinamik yapıları birbiri ile montajlanmış gibi ilişkilendirebiliyor olması ve sistemleri son verileri alacak şekilde birleştirip, zamana ve devir sayısına bağlı analiz edebilmesidir. Programın bu özelliği kullanılarak motorun mekanik yapısı sayısal veriler şeklinde programa işlenmiştir. Tasarım ölçüleri programa girişten çıkışa kadar eksiksiz girildikten sonra programın arayüz görüntüsü şekil3.15'te görüldüğü gibidir.



Şekil 3.15. GT-SUITE motor veri girişi arayüzü

Motor için 1000-6000 devir aralığında programa çözüm yaptırılmıştır. Alınan sonuçlar referans kaynaklarda alınan sonuçlar ile benzer ve wankel motoru için tutarlıdır. Aynı zamanda program üzerinde giriş ve egzoz manifoldlarındaki sıcaklık değişimleri de gözlemlenmektedir.

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. Tahmin edildiği üzere veriler nihai tasarım için çok yetersiz kalacaktır ancak bu veriler ile

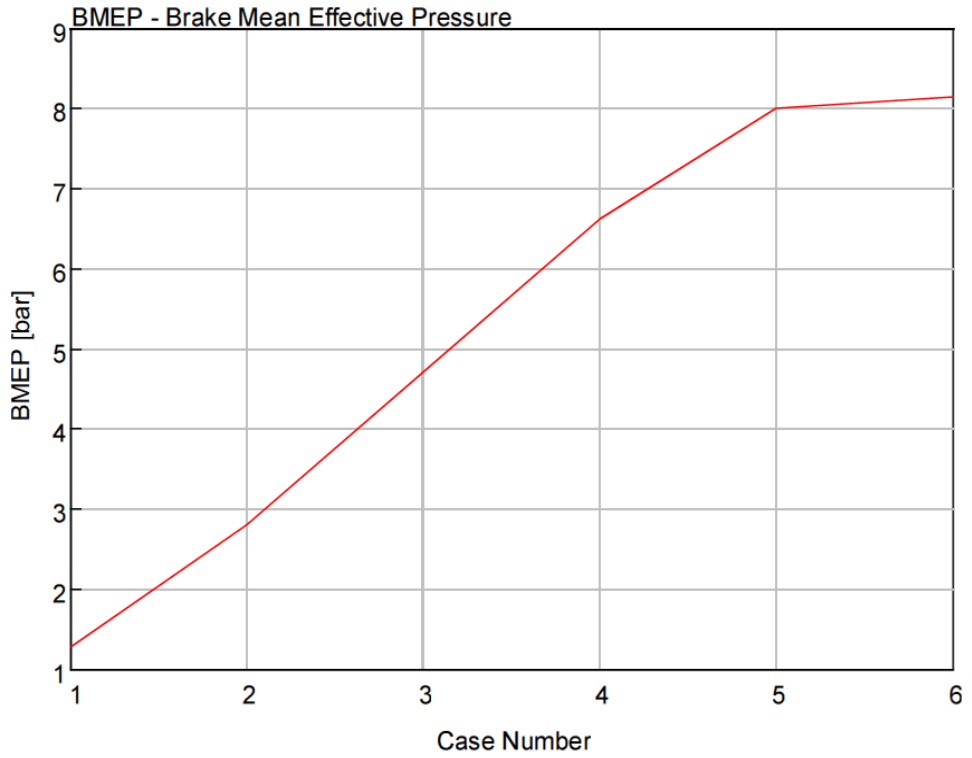
oluşturulan ilk tasarımın sonrasında 3 boyutlu HAD analizler ile desteklenmesiyle ortaya çıkartılacak olan son tasarım için ilk adım olarak kullanılabilir.

Programdan elde edilen grafiklerin doğru şekilde yorumlanması, tasarımda odaklanacağımız noktaları belirlemek ve doğru önlemleri sunmak için büyük önem taşımaktadır.

3.3.2. Wankel Motoru Performans Veri Grafiklerinin Oluşturulması.

GT-SUITE programının alt yapısında motorun volumetrik verim, ortalama efektif basınç, özgül yakıt sarfiyatı, tork ve güç eğrileri oluşturulmuştur. Alınan veriler yorumlanarak benzer motor çalışmalarını içeren referans makalelerdeki veriler ile karşılaştırılmıştır. elde edilen sonuçların motorun daha önce elde edilmiş çalışma verine yakın olduğu ve beklenen mantıklı değerlerin çıktığı görülmüştür.

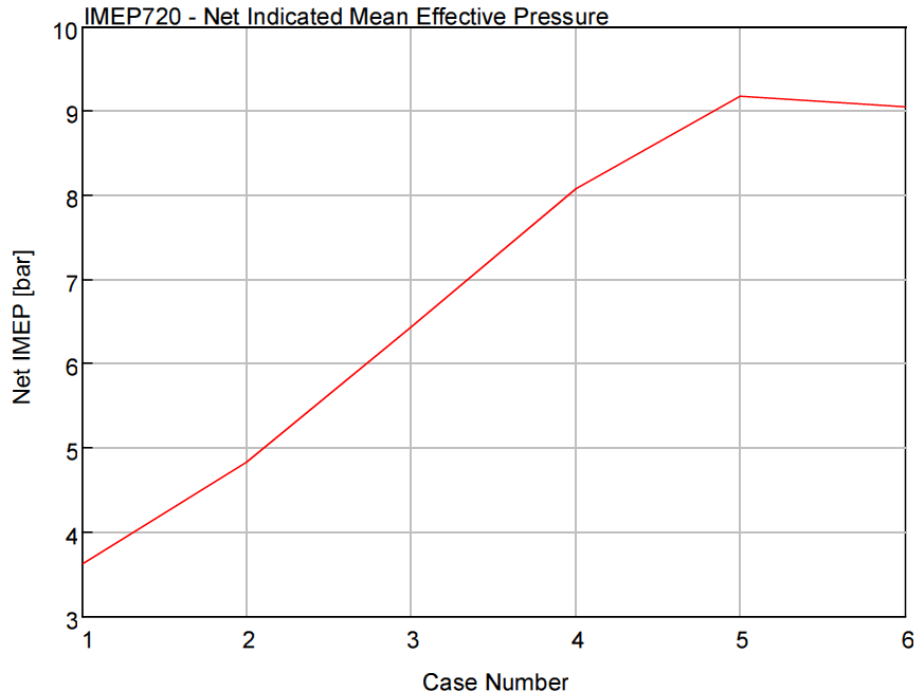
Motorun Ortalama Efektif Basınç Grafiği



Şekil 3.16. GT-SUITE motor ortalama efektif basınç-devir grafiği

Şekil 3.16.'da görüldüğü üzere motor 6000 devir/dk devirde en yüksek basınç seviyesine ulaşmıştır. Eğrinin devir arttıkça azalan eğri olarak gitmesi beklenen bir durumdur. Çizelgede en yüksek devir olan 6000 devir/dk değerinde basınç 8,2 bar seviyesinde okunmaktadır.

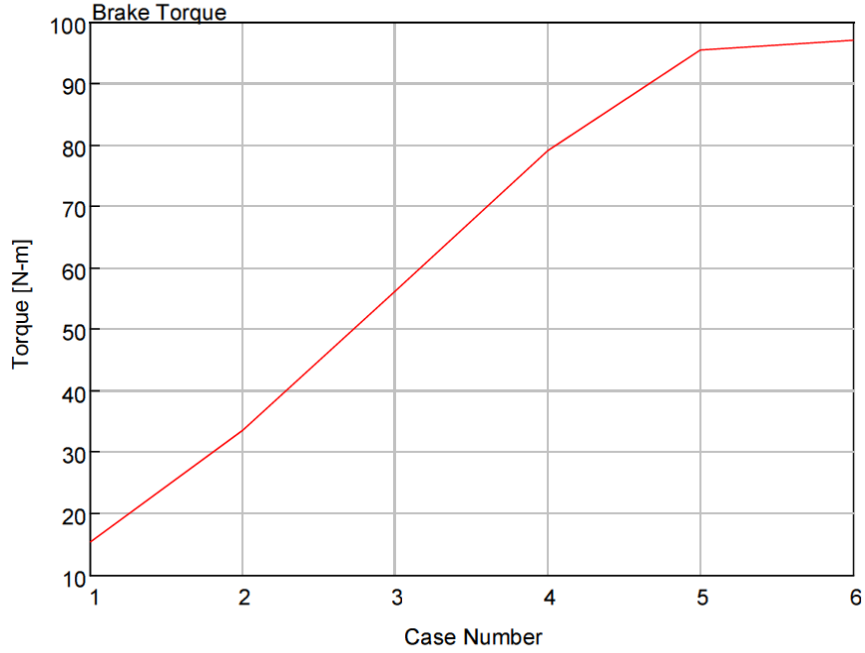
Motorun İndike Efektif Basınç Grafiği



Şekil 3.17. GT-SUITE motor indike efektif basınç-devir grafiği

Beklendiği üzere indike basınç değerleri ortalama basınç değerlerinden daha yukarıda gelmiştir. Grafik 5000-6000 devir/dk aralığında 9,2 – 9 bar seviyelerinde okunmaktadır.

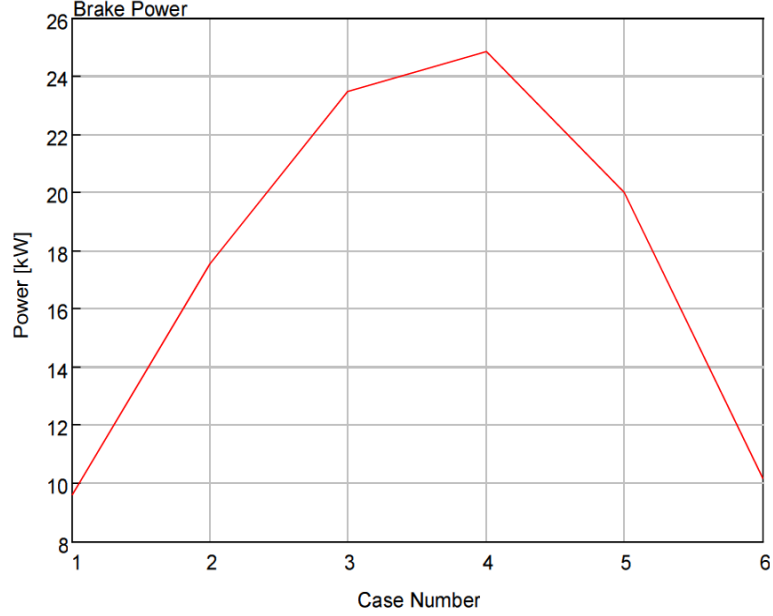
Motorun Tork Eğrisi Grafiği



Şekil 3.18. GT-SUITE motor tork-devir grafiği

Analizin tork verileri incelendiğinde wankel motorunun tam beklendiği gibi benzinli motor karakteristiğinde yüksek devir çevirebilen ve maksimum torkunu geç veren bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Krank mili 6000 devirde seyrederken tork değeri yaklaşık 97 Nm seviyesine ulaşmaktadır. Bu hacimdeki bir motor için ulaşılabilecek 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.

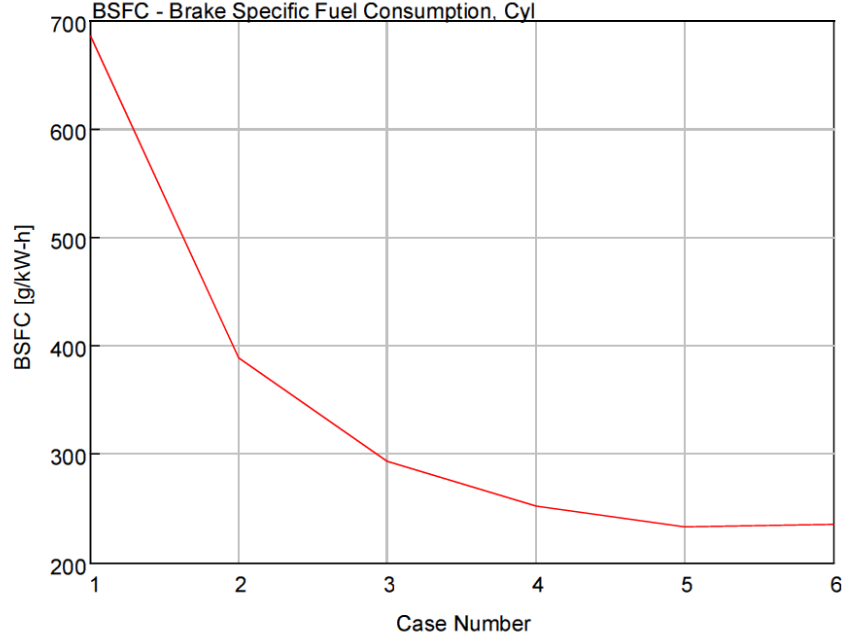
Motorun Güç Eğrisi Grafiği



Şekil 3.19. 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 4000 devir değerine kadar 25 kW değerine kadar yükselen güç, 4000 devir değerinden sonra yüksek yüzey alanından kaynaklanan sürtünmeler sebebiyle büyük oranda düşüş göstermektedir. Gerçek uygulamada bu düşmenin ne kadar olacağı tartışmaya açık bir konudur çünkü motor içindeki yağlama mekanizması ve irtifa sıcaklık değerleri sürekli değişkendir. Şu sonuç kesindir ki tasarım aşamasında odaklanılması ve geliştirilmesi gereken en önemli nokta bu güç değerinin yükseltilmesi ve geniş devir aralıklarına yayılabilmesi için çalışma yapılmasıdır.

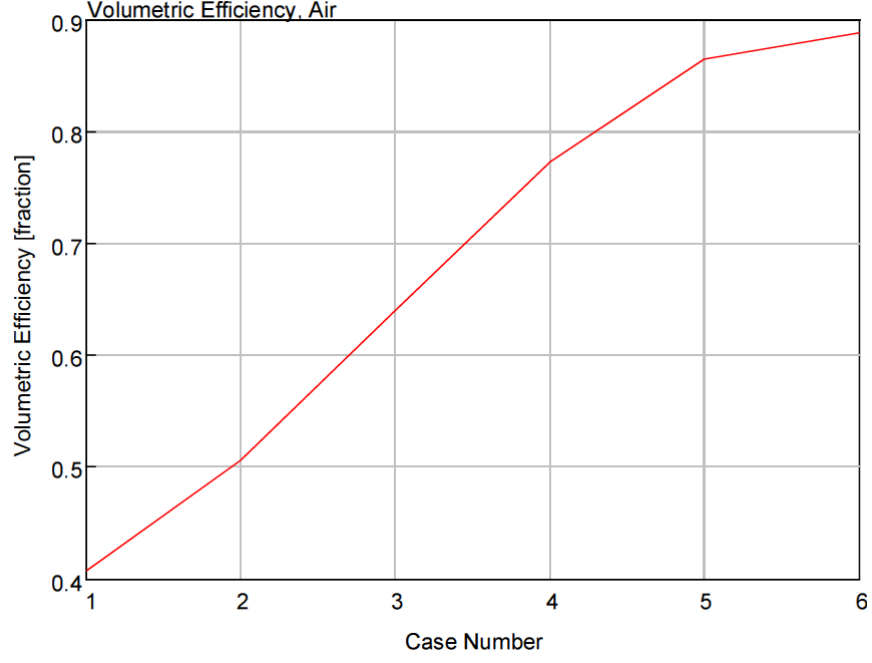
Motorun Özgül Yakıt Sarfıyatı Grafiği



Şekil 3.20. GT-SUITE motor özgül yakıt sarfıyatı-devir grafiği

Özgül yakıt sarfıyatı grafiği incelendiğinde oluşan eğrinin benzinli bir motorda beklendiği gibi düşük devirlerde yüksek değerlerde olduğu, yüksek devirlerde ise özgül sarfıyatın düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum benzinli bir wankel motoru için beklenen bir sonuçtur. Wankel motorunda supap zamanlaması kontrol mekanizması bulunmadığı için devir arttıkça giriş kanalının açık kalma süreleri kısalmaktadır. Yükselen devir ile birlikte vakum etkisi artarken, emiş manifolduna enjekte edilen yakıt motorun geometrik yapısı sebebiyle hava ile düzgün şekilde karışıp yanma odasına iletilmemektedir. Özgül yakıt sarfıyatı grafikleri standart 4 zamanlı benzinli motorlarda supap kontrolü mekanizmalarına sahip olduğu için düşük devirlerde yüksek ve devam eden devirlerde hafif dalgalı bir yapıda oluşurken. Wankel motorlarında devirin artmasıyla ve belirtilen sebepler yüzünden sürekli azalan bir eğri oluşturur.

Motorun Volumetrik Verim Grafiği



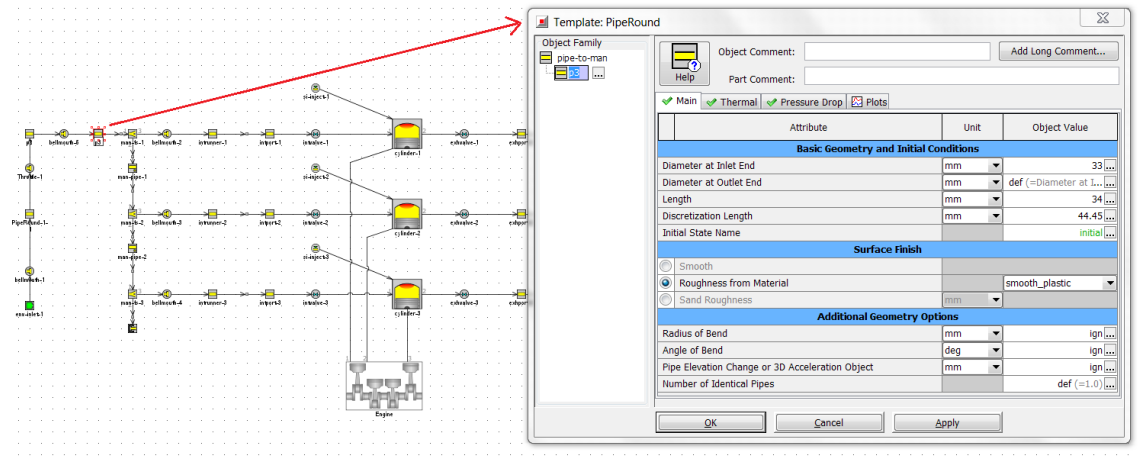
Şekil 3.21. GT-SUITE motor volumetrik verim-devir grafiği.

Motor tam gaz konumuna yaklaşıkça beklendiği şekilde volumetrik verimde stokyometrik sınıra yaklaşım gözlenmiştir. Motor 6000 devire ulaşıncaya kadar yanma odasındaki vakum etkisi sürekli arttığı için içeri alınan hava miktarında artış olması doğal bir sonuçtur. Analiz teorik olsa bile belirlenen motor şartları neticesinde 6000 devire kadar wankel motoru stokyometrik değere ulaşamamıştır.

Elde edilen veriler yanma analizinde kullanılmak üzere programda kaydedilmiştir. Motorda patlama anından sonraki genişleme süreci boyunca yanma odasında meydana gelen değişimleri gözlemleyebilmek için daha detaylı yanma verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Yapılan motor simülasyonunda GT-SUITE programı üzerinde bu verileri zamana veya ağıya bağlı olarak elde etmek mümkündür.

3.3.3. GT-SUITE Programında Zamana Bağlı Veri Grafiklerinin Oluşturulması.

Wankel motorunun geometrik yapısı ve bu geometrilerin programda doğru şekilde modellenmesi, simülasyon verilerinin fiziksel verilere yakınlık göstermesi açısından büyük önem arz etmektedir. Yapılan fiziksel ölçümler ve üç boyutlu bilgisayar modeli, tek boyutlu yanma simülasyonu için gerekli olan tüm ölçüleri elde etmemimizi sağlamıştır. Motorun çalışması durumunda krank milinin sabit bir devirde döndüğünü düşünecek olursak piston mekanizmasına bağlı tüm değişken parametreleri bir fonksiyon olarak programa aktarmamız gerekmektedir.



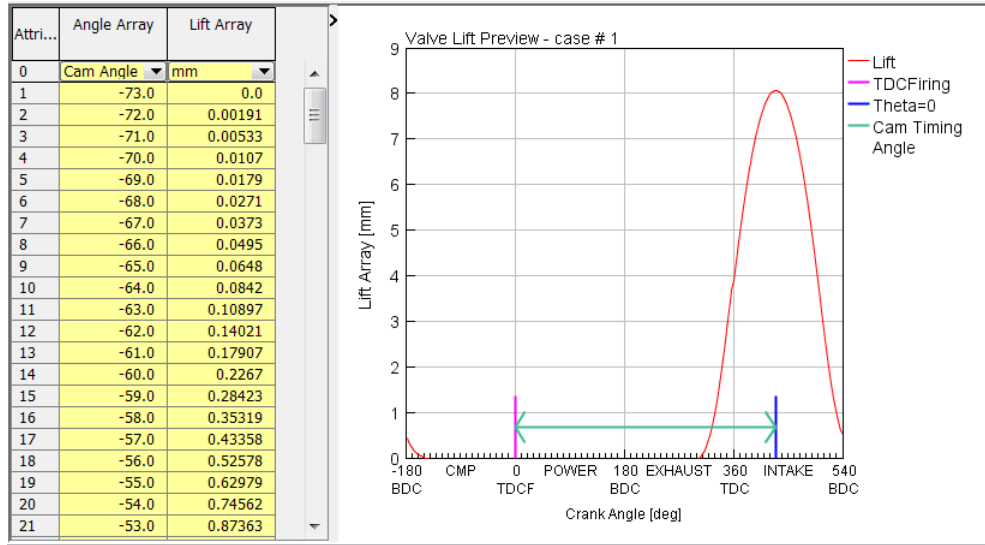
Şekil 3.22. GT-SUITE geometrik veri girişi arayüzü örnek gösterimi

Şekil 3.22.'de motorun emiş manifoldunun bir bölümünün geometrik ölçülerinin mm olarak program arayüzüne girilmesi gösterilmiştir.

Yakıt-Hava Karışımı Modellemesi

Wankel motoru çalışma prensibi sayesinde üç ayrı odayı aynı geometri üzerinde birleştirmektedir. Bu durum tasarımsal olarak mekanizmaya uygun supap yapısı tasarlamayı çok zorlaştırmaktadır. Bu nedenle Wankel motorlarında sürekli açık emiş ve egzoz boğazları bulunur. İncelediğimiz motor da bu özelliğindedir. Piston dönme

hareketini yaparken emiş kanalı hizasında hangi oda var ise o oda için emiş işlemi gerçekleşir. Emiş stroğu yapmayan diğer odalar için ise emiş boğazı geometrik olarak kapalı olur ve hesaplamalar bu kabul yapılarak gerçekleştirilir. GT-SUITE üzerinde yapılan simülasyon modelinde supap zamanları ve açılma miktarları, emiş boğazının açık kalma süreleri ve boğaz kesit alanı ile birbirine benzetilerek programa tanımlanmıştır.

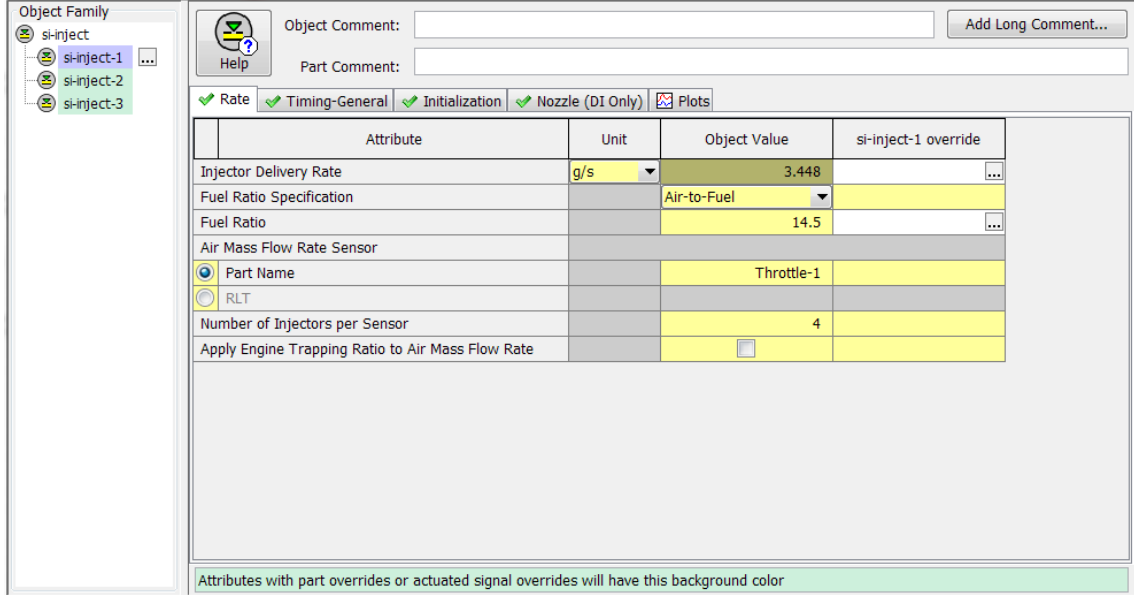


Şekil 3.23. GT-SUITE açığa bağlı hava giriş kanalı modelleme arayüzü

Şekil 3.23. 'te görüldüğü şekilde hava giriş kanalının üç oda için oda için açık kaldığı açı aralığı programın arayüzüne tanımlanmıştır. bu ölçüsel yaklaşımı yapmak, simülasyonun Wankel motor yapısına uygun olarak çalışabilmesi için gereklidir. Genişleme stroğunu takip eden egzoz stroğu için de aynı yaklaşım ile açığa bağlı olarak üç farklı egzoz kanalı tanımlaması yapılmıştır.

Wankel motorunun yanma odalarındaki patlama motorun gövdesinde oluşan ısının temel kaynağıdır. Bu nedenle yakıt-hava karışımı düzgün şekilde hesaplanmalı ve programa doğru değişkenlere bağlı olarak tanımlanmalıdır. Yapılan üç boyutlu modelde emiş hacmimiz 319.84cc'dir. Motorun stokyometrik oranda ($\lambda=1$) çalışması durumunda 14.5 yakıt oranı değeri elde edilmektedir. Kullanılan yakıt cinsi benzindir.

Teorik olarak bu değerin kullanılması sıkıntı oluşturmaz ancak GT-SUITE simülasyonunda emiş manifoldunda enjeksiyon tanımlaması yapıldığı için havanın kütlesine bağlı olarak bulduğumuz bu yakıtın krank açısına bağlı olan integrasyonu oluşturulmalıdır. Yani yakıtın püskürtülmesi bir süreçtir ve bu sürece uygun olarak bilgisayar programına tanımlaması yapılmalıdır.



Şekil 3.24. GT-SUITE açığına bağlı yakıt enjeksiyonu modelleme arayüzü

Şekil 3.24. 'te bulduğumuz değerler geometriye uyum sağlayacak şekilde programa aktarılmıştır. Üç farklı oda için ayrı ayrı enjeksiyon zaman modelleri aslında tek bir enjeksiyonu temsil etmektedir. Wankel motorunda her odaya zamanı geldiğinde tek ve aynı enjeksiyon püskürtme yaptığı için böyle bir benzetim yapmak zorunludur. Bu program tamamlandığında krank açısına ve devire bağlı olarak püskürtülen yakıt miktarı otomatik olarak düzenlenmektedir.

Piston Hacimlerinin GT-SUITE Arayüzünde Modellemesi

Üç boyutlu olarak modellediğimiz Wankel motorundan elde ettiğimiz hacim değerleri için açığına bağlı olarak oluşturulan çizelgede, krank açısına bağlı olarak meydana gelen hacim değişimi üç boyutlu modelleme bölümünde belirlenmişti. GT-SUITE simülasyonunda Wankel geometrisi, Standart pistonlu motor geometrisine benzetildiği

için aynı krank dönüş açılarında aynı hacim ve yüzey alanı değişimlerini veren bir sayısal piston modeli oluşturulmalıdır.

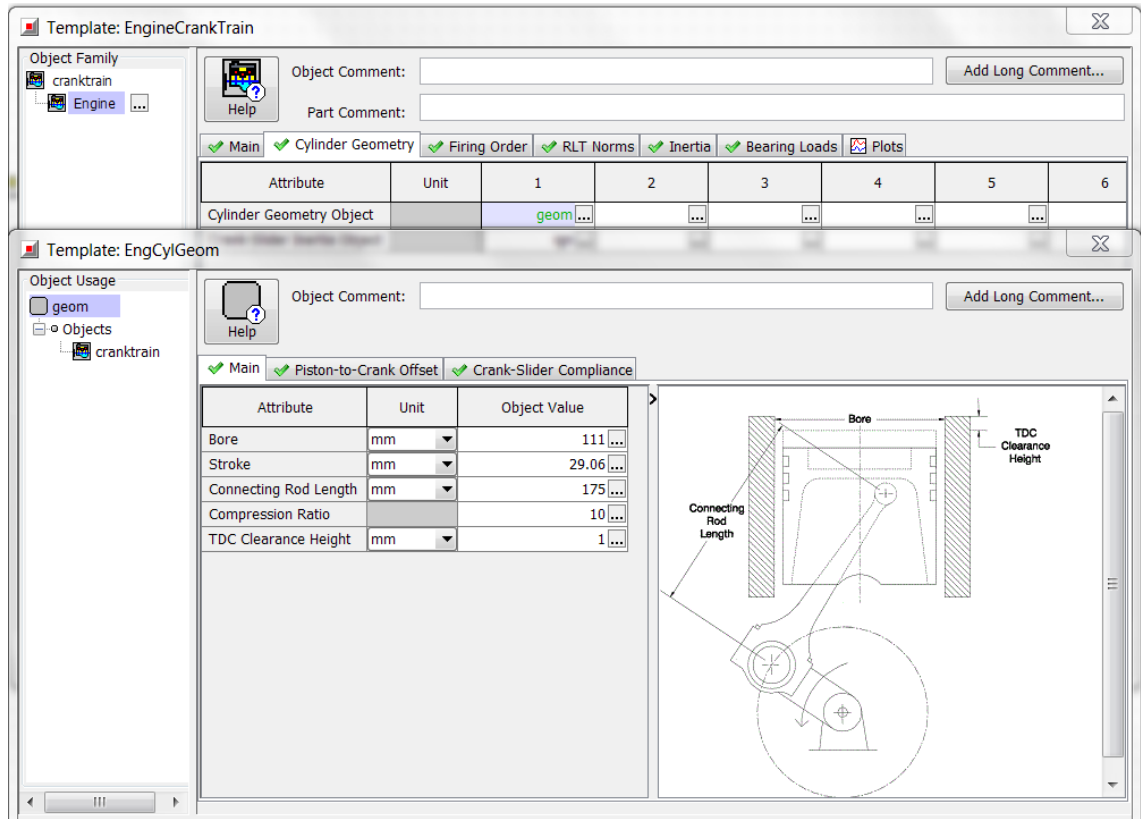
Wankel motorunun en büyük oda hacmi = emiş hacmi = 319.84cc

Wankel motorunun sıkıştırma Hacmi = 31.85cc

Wankel motoru sıkıştırma oranı = 1/10

Hacim değişim miktarı : $319.84 - 31.85 = 287.99\text{cc}$

Aynı yöntem ile yüzey alanı değişimleri de belirlendikten sonra programa girilecek piston geometrisi değerleri ortaya çıkmıştır. Wankel motorunun krank milinin 270 derecelik dönüşü standart 4 zamanlı pistonlu motorlarda 180 dereceye denk gelmektedir. Bu fark dikkate alınarak hesaplama yapılmıştır.



Şekil 3.25. GT-SUITE piston geometrisi modelleme arayüzü

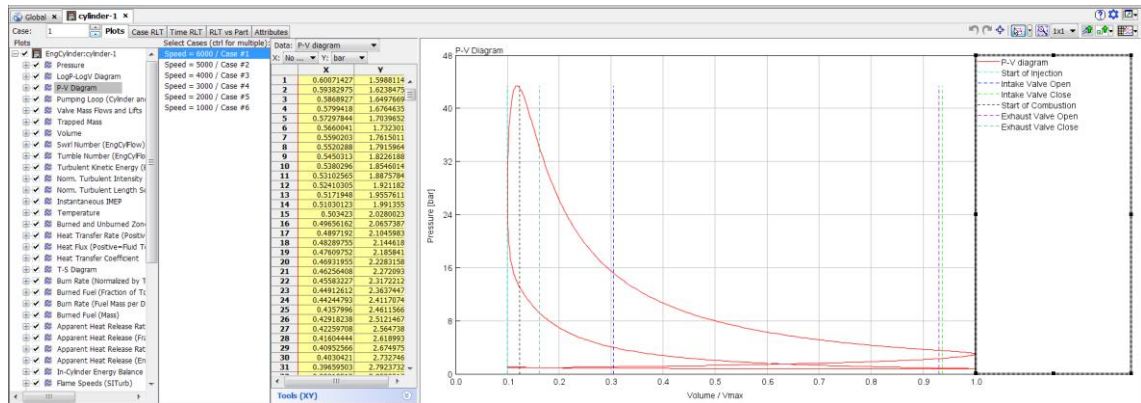
Şekil 3.25’ te piston modelinin ölçülerinin girildiği arayüz gösterilmektedir. Ölçüsel yaklaşım neticesinde en uygun çap ve motor stroğu değerleri programa tanımlanmıştır. Normal şartlarda piston çapı 111mm ve krank mili 29.06mm ölçülerinde bir 4 zamanlı

standart pistonlu motorun imal edilebilmesi çok zordur. Ancak burada yapılan yaklaşım sebebiyle doğru hacimsel ve yüzeysel değişimleri tutturabilmek için bu değerleri girmek gereklidir. sayısal simülasyon olması sebebiyle program, fiziksel yapıları göz ardı ederek çözüm verilerini bize sunacaktır. tüm geometrik tanımlamalar programa girildikten sonra açığa bağlı simülasyon çalıştırılıp ilk sonuçlar alınmıştır. Performans analizi neticesinde bizim çalışmamızda ısı ve mekanik performansı etkileyen veriler dikkate alınacaktır.

Simülasyon sonuçları GT-SUITE programının GT-POST modülünde görüntülenmektedir. Program açığa bağlı olarak bir silindire ait 47 farklı parametrede grafik veri çıkarabilmektedir.

GT-POST Arayüzünde Wankel P-V Diyagramı

Wankel motorlarının P-V diyagramları şekil olarak standart 4 zamanlı pistonlu motorların grafikleri ile benzer yapıya sahiptir. Silindirde meydana gelen maximum basıncı kolaylıkla görebileceğimiz ve benzetim methodu ile yaklaşımda bulunduğumuz hacimlerin doğruluğunu kontrol edebileceğimiz önemli bir veri tablosudur. GT-POST belirlediğimiz geometride ve bu geometriye ait değişken devir yapılarında bize P-V diyagramını otomatik olarak oluşturmaktadır.



Şekil 3.26. GT-POST Wankel P-V diyagramı

Oluşan grafik istenilen noktada bilgisayarda işaretlendiğinde bize basıncı Bar biriminde, hacmi ise cc biriminde göstermektedir. Yanma odasında oluşan maximum basınç değeri

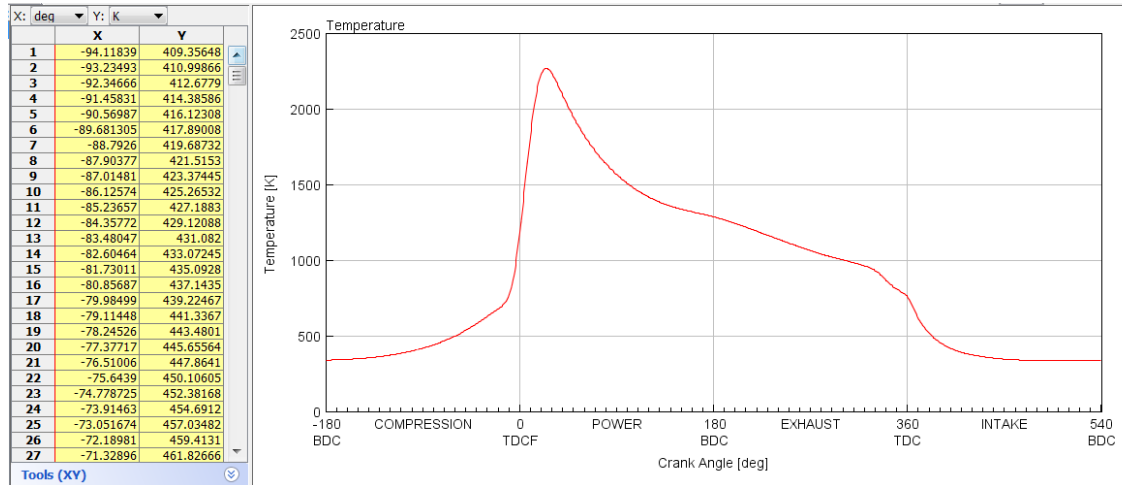
6000 devir/dk durumunda 43.39 Bar seviyesine ulaşmıştır. Motor geometrisi sonraki aşamada bu devir değeri için emniyet gözetecek şekilde analiz edilecektir. Yapılan Hacimsel benzetim verilerinde ise tutarsızlık görülmektedir. Giriş valfinin kapanması anında odanın hacmi 312 cm³ değerine ulaşmaktadır.

Teorik değerimizin 319.84 cm³ olması durumu ile karşılaştırırsak
 $312 / 319.84 = 0,975$

Benzerlik oranı olarak %97,5 oranında bir hacimsel yaklaşım değeri ortaya çıkar. Bu değer yapılacak üç boyutlu analiz için ön bilgi sağlaması adına yeterince yüksek bir orandır.

GT-POST Arayüzünde Wankel Sıcaklık Diyagramı

Yanma sonucu oluşan ısının motor gövdesine ve iç duvarlarına olan etkisini gözlemleyebilmek için ısı ve sıcaklık ile ilgili GT-POST modülündeki tüm veriler kullanılacaktır. Krank açısına bağlı olarak yanma odasında meydana gelen sıcaklık değişimleri, yaptığımız simülasyonun sonucu olarak GT-POST analiz grafikleri arasında yer almaktadır.



Şekil 3.27. GT-POST Wankel sıcaklık diyagramı.

Değişken açığa ve devire bağlı bir analiz olduğu için programın sunduğu onlarca grafik verisi burada tek tek belirtmemiz mümkün değildir. Başka model yapısına sahip Wankel

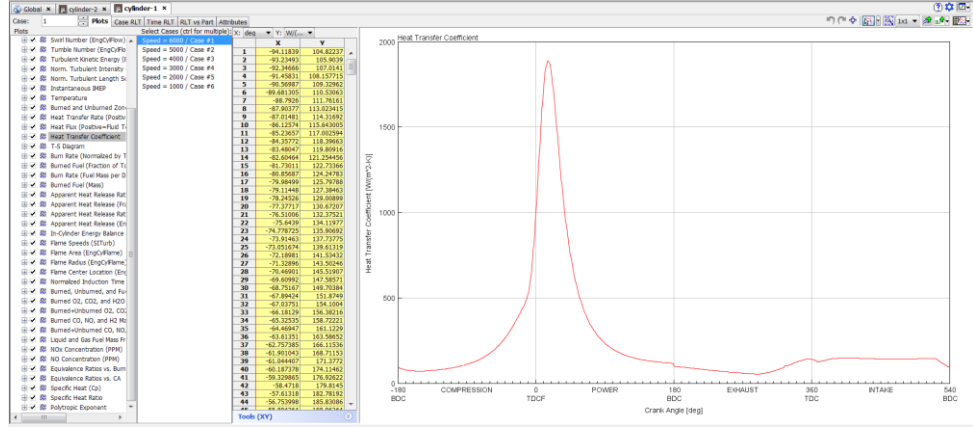
motorları için de uygulanabilir bir simülasyon olması nedeniyle verilerin nasıl oluşturulduğunu açıklamak bu aşamada yeterli olacaktır.

Simülasyon her devir için modellenabilir ve her farklı devir tercihi için açığa bağlı sıcaklık verisi alınabilir. Bu çalışmada 1000,2000,3000,4000,5000,6000 devir sayıları için hesaplama yaptırılmıştır. Tahmin edildiği üzere Wankel üzerindeki yüklerin ve sıcaklık değerlerinin 6000 devir seviyesinde maximum değerlerine ulaştığı görülmüştür. Odalarda yükselen sıcaklık değeri motorun gövdesi tarafından emilecek ve soğutma döngüsü düzene oturana kadar ısı akışı meydana gelecektir. Öngörülen durumda motor çalışmaya devam ettikçe oluşan ısının, motorun gövde geometrisine zarar vermeden havaya aktarılması amaçlanmaktadır.

Şekil 3.27.'de 6000 devir durumunda düzene girmiş Wankel motor modeli için yakıtın yanması sonucu ortaya çıkan maximum sıcaklık değeri krank açısının 37° olduğu konumda 2267 K değerinde okunmaktadır. Üç boyutlu analiz yapısında bu değerler kullanılacaktır.

GT-POST Arayüzünde Wankel Isı Transfer Katsayısı Diyagramı

Yanma odasında yükselen sıcaklıkla birlikte odanın iç yüzeylerinden, motorun gövdesine ısı akışı olacağı kesindir. Bu akışı analiz edebilmek için gerekli olan ısı transfer katsayısı, analizin en önemli değişkenlerinden biridir. Kuramsal temeller bölümünde ısı transfer katsayısı için kaynaklardan edinilen formülasyonda bu parametrenin sıcaklık ve ortalama rotor hızı (" T " ve " $\bar{\vartheta}_{rotor}$ ") değerlerine doğrudan bağımlı olduğu görülmektedir. GT-POST arayüzü de alt programlarında aynı kuramsal yapılar ile çözümlene yaptığı için ısı transfer katsayısının sabit bir değer olması düşünülemez. Alınan sonuçlarda krank açısına bağlı olarak değişkenlik gösteren bir ısı transferi katsayısı grafiği görülmüştür.



Şekil 3.28. GT-POST Wankel ısı transfer katsayısı diyagramı.

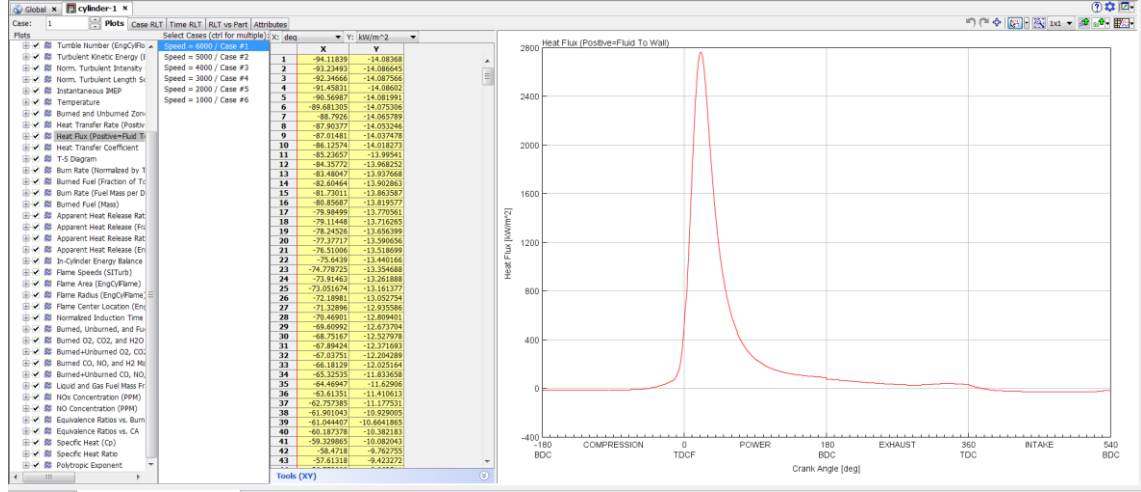
Şekil 3.28.'de 6000 devir durumunda düzene girmiş Wankel motor modeli için bağıntılı parametrelere bağlı olarak ortaya çıkan maximum ısı transfer katsayısı değeri krank açısının 24° olduğu konumda $1887 \text{ W/m}^2.\text{K}$ değerinde okunmaktadır. Üç boyutlu analize geçildiğinde bu veriler program arayüzünde kullanılacaktır. Hangi açı değeri için analiz yapılacak ise o katsayı analiz verisi olarak girilecektir.

GT-POST Arayüzünde Wankel Isı Akış Diyagramı

Yanmanın etkisiyle oluşan ısının emilmesi ve bu emilimin hızı Wankel motorunun gövde ve parçaları için çok önemlidir. Üretilen ısının parçalardan uzaklaştırılması, dengelenmiş bir ısı akış mekanizması ile yapılmalıdır. Bu yapı motor parçalarının fiziksel yapısına zarar verecek yüksek ısıyı uzaklaştırmakla birlikte, yanmayı tehlikeye sokacak aşırı soğumaya da neden olmaması gerekmektedir. Wankel motorları için de soğutma yöntemleri tasarım ve prototip aşamasında belirlenmelidir. Gövde ve parçaların soğutma ihtiyacına göre hava ile soğutma, sıvı ile soğutma ya da bu iki yöntemin aynı anda kullanıldığı tasarım yapıları mevcuttur. Motorun soğutulması gereken parçalarına aynı ana gövde üzerinde farklı kanallar açılarak soğuk hava veya soğutma sıvısı enjekte edilebilir. Üzerinde çalıştığımız Wankel motorunda da sıvı ile soğutma ve hava ile soğutma teknikleri bir arada kullanılmıştır.

GT-POST program arayüzünde modellenmiş Wankel için yanma odası iç yüzeyi alanları, krank açısına bağlı olarak değişecek şekilde hesaplanmıştır. Bu durum

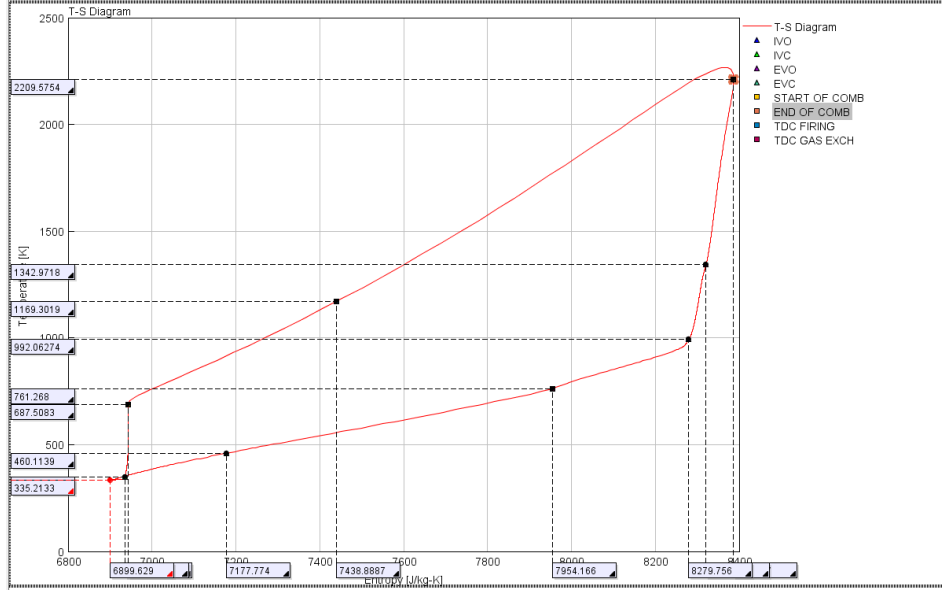
sayesinde program bize ısı akışı ile ilgili veriler sunmaktadır. Programdan alınan diyagramda sabitlenmiş bir devirde krank açısına göre yanma odasından duvarlara doğru olan ısı akışı miktarları okunabilmektedir.



Şekil 3.29. GT-POST Wankel ısı akışı diyagramı.

Şekil 3.29.'da ısı akışı diyagramında Wankel motor geometrisine göre duvarlara doğru olan maksimum ısı akışı değeri krank mili 27° pozisyonundayken 2764 kW/m^2 dir.

Diyagram üzerindeki maksimum değer de dahil olmak üzere patlama ve genişleme anındaki tüm akış verileri üç boyutlu analizde başlangıç verisi olarak kullanılacaktır. Yanma sonucu ısı ve sıcaklık ile ilgili GT-POST programının bize verdiği tüm verilere ulaşılmıştır. Son olarak programın oluşturduğu T-s diyagramı incelenmiş ve anormal bir grafik yapısı oluşmadığı görülmüştür.



Şekil 3.30. GT-POST Wankel modeli T-s diyagramı.

Çalışmamızda örnek olarak gösterdiğimiz her grafik, yeni ölçü ve parametreler için güncellenebilir özelliğindedir. Bu bölümde sistemin çalışma şeklini örnek grafikler ve veri giriş arayüzleri ile izah etmiş bulunmaktayız. GT-SUITE programı ve GT-POST modülü ile genellikle standart pistonlu motorlar için kullanılan analiz yöntemleri Wankel motoru yapısına uygun olacak şekilde değiştirilmiş ve sonuçlara ulaşılmıştır. Bu sebeple bu çalışmamız esnek yapılı bir analiz yöntemi ve programı olarak örnek teşkil etmektedir.

Sonraki aşamada bu veriler ışığında hesaplanabilir sonlu elemanlar analizleri ile tasarım modeli üzerinde daha detaylı verilere ulaşılması amaçlanmaktadır. Elimizde hazır bir Wankel motor modeli bulunduğu için tüm üç boyutlu analiz çalışmaları o model üzerinde gerçekleştirilecektir. Isıl ve geometrik yapı verileri yorumlandığında tasarım modeli üzerinde nasıl geliştirmeler yapılabileceği konusunda somut veri ve fikirler ortaya çıkacaktır.

3.4. Wankel Modelinin Ansys Programında 3 Boyutlu Analizi

Çalışmamızda kullanılan Wankel motoru için yapılan 3 boyutlu katı modelleme ve tek boyutlu veri analizi çalışmalarından sonra motor ile ilgili ısıl ve mekanik performans

sonuçlarını model üzerinde görüp, öngörülerde bulunabileceğimiz en önemli aşamaya ulaşılmıştır. 3 boyutlu analiz söz konusu olduğunda, tek boyutlu analizde olduğu gibi motor ile ilgili her koşuldaki ısı ve mekanik verileri elde etmek mümkün değildir. Analiz için öncelikle koşullar belirlenmeli ve o koşullardaki çözümlemeyi yapabilecek katı model yapısı oluşturulduktan sonra detaylı veri analizlerine geçilmelidir.

Bu çalışmada Wankel motorunun ısı performansı söz konusu olduğunda odaklanacağımız nokta motorun içerisinde oluşan ısının, motor gövdesine olan etkisini incelemektir. Yanma sonucu oluşan ısı sürekli olarak gövdenin iç yüzeylerinden gövdenin dışına doğru bir akış yolu izler. Bu ısı akışı bir süreçtir ve analiz yapılırken bu süreç içerisindeki tüm parametreler birleştirilmelidir. GT-POST arayüzünden elde edilen sıcaklık, ısı akışı, ısı iletkenlik katsayısı, hacim, yüzey alanı ve basınç parametreleri üç boyutlu analiz için büyük önem taşımaktadır. Tek boyutlu analizde istenilen her devir/dk değeri için programdan sonuçların alınabildiği bilinmektedir ve yapılan analizlerde ve örnekleme grafiklerinde motor için maksimum veriler 6000devir/dk değerinde elde edilmektedir. Bu şartlar altında motoru ısı ve mekanik açıdan zorlayabilmek için analiz katı modeli 6000devir/dk hızıya göre oluşturulmalı ve verilerin integrasyonları bu hızdaki zaman aralıklarına göre hesaplanıp Ansys programının arayüzüne girilmelidir. Ansys ticari programı içerisinde Wankel motorunu hesaplayabilecek özel bir arayüze sahip değildir ancak bu durum bir Wankel motor modelinin Ansys içerisinde analiz edilemeyeceği anlamına gelmez. Program içerisinde zamana bağlı ısı ve mekanik analizler yapabilen arayüzler mevcuttur. Mühendislik temellerine uyan doğru yaklaşım metodları ile mantıklı ve gerçeğe yakın sonuçlara ulaşmak mümkündür. Başlangıç için analiz edilecek 3 boyutlu modellerin, Ansys programına uyumlu olacak şekilde değiştirilmesi en önemli noktadır.

3.4.1. Motor Gövdesinin 3 Boyutlu Analiz Modeli

Motor modeli oluşturulurken odaklandığımız yapı motorun montajlı gövdesidir. Bu sebeple motor gövdesi, gövde ön ve arka kapakları, rotor,giriş ve çıkış kanalları model üzerinde bulunmak zorundadır. Bu ana parçalar üzerinde analizi ve programın oluşturduğu ağ elemanları yapısını bozacak tüm detayları model üzerinden kaldırmak

bilgisayar işlemcisinin analiz hesaplama sürecini kısaltacak ve programın çalışmasını kolaylaştıracaktır. Bu detaylar bağlantı civataları, pimler ve soğutma kanal girişleri olarak örneklendirilebilir.

Analiz modelini oluştururken modelin malzeme özelliklerinin tanımlanması gereklidir. Elimizdeki motorun gövdesi AL 2024 kodlu Alüminyum alaşımından imal edilmiştir. Bu malzeme otomotiv endüstrisinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Isıya dayanıklı olması ve doğru bir ısı işlemi ile 55-60 HRC yüzey sertliğine ulaşabilmesi nedeniyle bu malzemenin tercih edildiği düşünülmektedir. Motorun gövde parçalarının neredeyse tamamı bu malzemeden imal edilmiştir. Standart çeliklere göre dayanımı düşük olmasına rağmen ağırlığının düşük olması ve ısı iletkenliğinin yüksek olması sebebiyle İHA larda da kullanıma uygundur. Motorun giriş ve çıkış manifoldlarında kompozit yapılı carbonfiber malzemeler de görülmüştür. Ancak bu malzemelerin tercih sebebi sadece ağırlık azaltmak olduğu için ısı performans analizlerinde modele dahil edilmelerine gerek görülmemiştir.

Motorun gövde modeli oluşturulurken 6000devir/dk için belirli dönüş açılarında birbirini takip eden katı modeller oluşturulması zamana bağlı olarak analizi yapabilmek için kullanacağımız yöntemdir. Krank milinin her 30° lik dönüşüne ve rotorun her 10°lik dönüşüne karşılık gelen 8 farklı model oluşturulacaktır. Burada duvarlara olan ısı akışının maksimum olduğu patlama ve genişleme zamanları analiz edilecektir. Bu iki zamanda referans olarak alınan yanma odası için giriş ve çıkış kanallarının kapalı olduğu açı aralığı seçilecektir. İlk aşamada belirlenen pozisyonlar için duvarlara olan ısı akışları belirlenecektir. Sonrasında geometri diğer yanma odaları için birbirini tekrar etmesi sebebiyle tüm süreç ve veriler belirli bir zaman aralığında birleştirilerek zamana bağlı sonuçlara ulaşılabilecektir. Model aralıklarının 10° lik rotor açısında olmasına rağmen GT-POST programından alınan veriler rotorun 1° lik hareketine göre Ansys programına girilecek ve integrasyonu yapılacaktır. Bu durum daha hassas sonuçlar elde edebilmemize olanak sağlayacaktır. motorun 6000devir/dk hızdaki pozisyon hesaplamaları aşağı verilmiştir.

Krank dönüş hızına göre

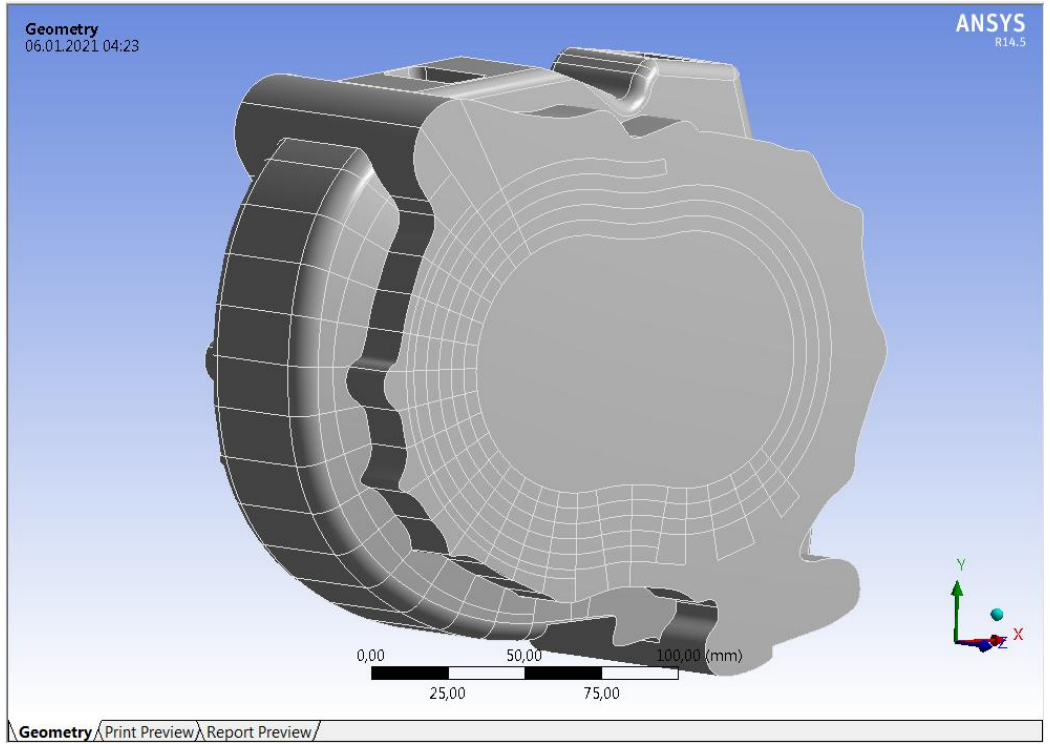
6000 devir/dk = 100 devir/saniye

→ 1° lik krank açısı için 0,0000277saniye

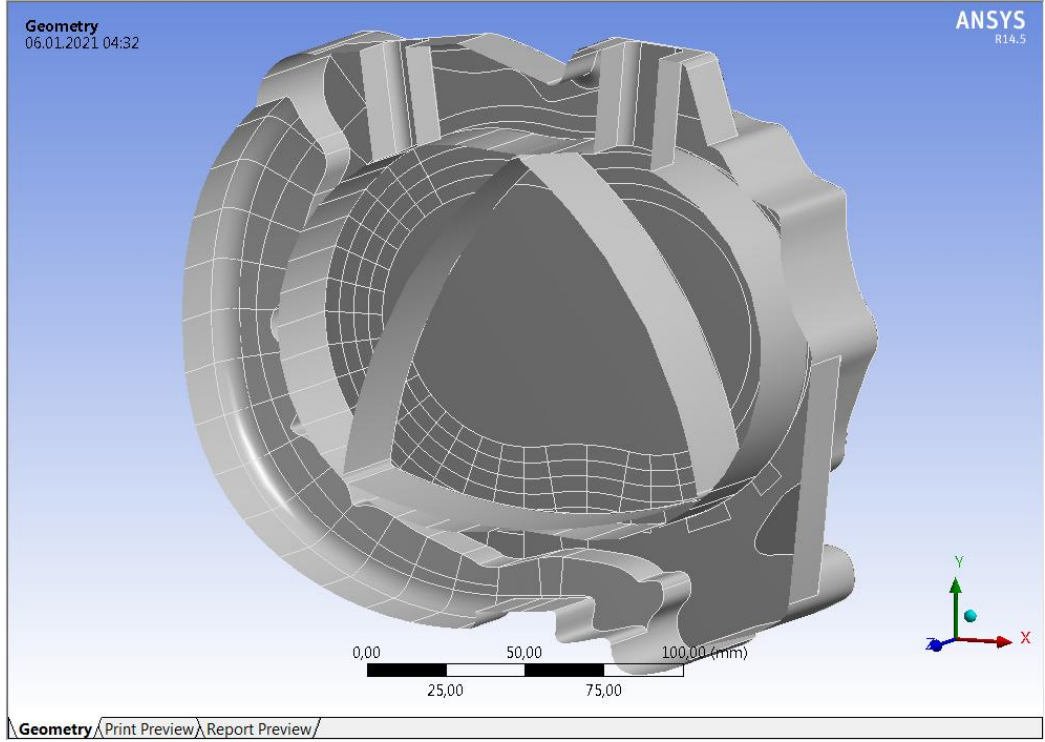
→ 1° lik rotor açısı için 0,0000831saniye

Zaman aralıkları belirlenmiştir. Programda 10°lik rotor açısı için integrasyonu yapılacak zaman değerler EK 2’de detaylı şekilde verilmiştir.

Belirlenen parametreler ile birlikte analizi yapılacak olan modelin genel görünümü şekil 3.31. ve şekil 3.32.’de verilmiştir.



Şekil 3.31. Wankel 3 boyutlu analiz modeli dış görüntüsü

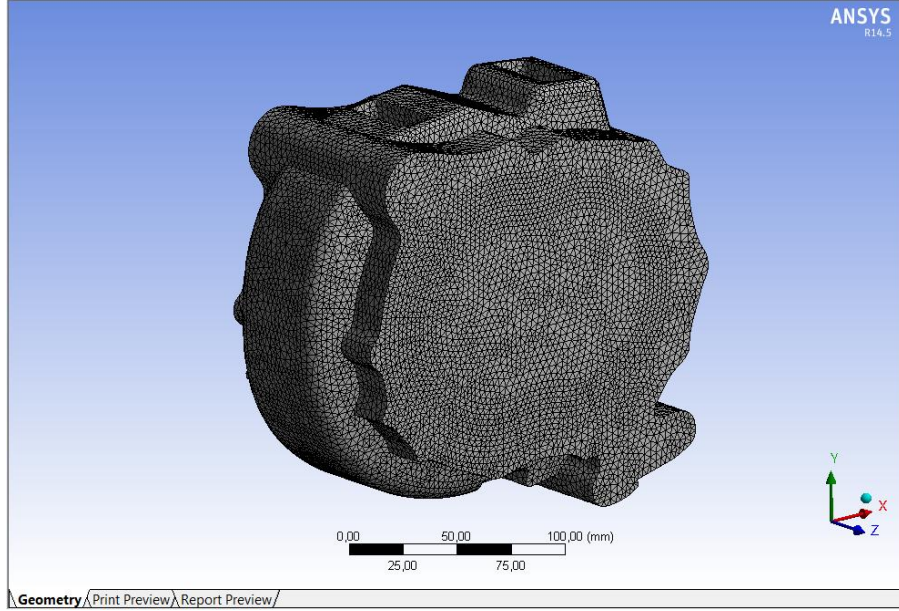


Şekil 3.32. Wankel 3 boyutlu analiz modeli kesit görüntüsü

Şekil 3.31. ve Şekil 3.32.'de görüldüğü üzere modelin iç yüzeyleri ve dış yüzeyleri arasında yüzey ayırım çizgileri oluşturulmuştur. Bu çizgilerin aralıkları rotorun 10° lik hareketine uyum sağlayacak şekilde ölçülendirilmiştir. Yüzeyleri ayırmanın temel nedeni farklı anlardaki ısı ve sıcaklık verilerini gövde geometrisinin farklı bölgelerine tanımlayabilmektir. Bu sayede ısı aktarım katsayısı da dahil olmak üzere zamana bağlı tüm parametreler farklı rotor açısına sahip geometriler arasında aktarılabilen ve rotorun döngüsü geniş zaman aralıklarında modellenebilmektedir.

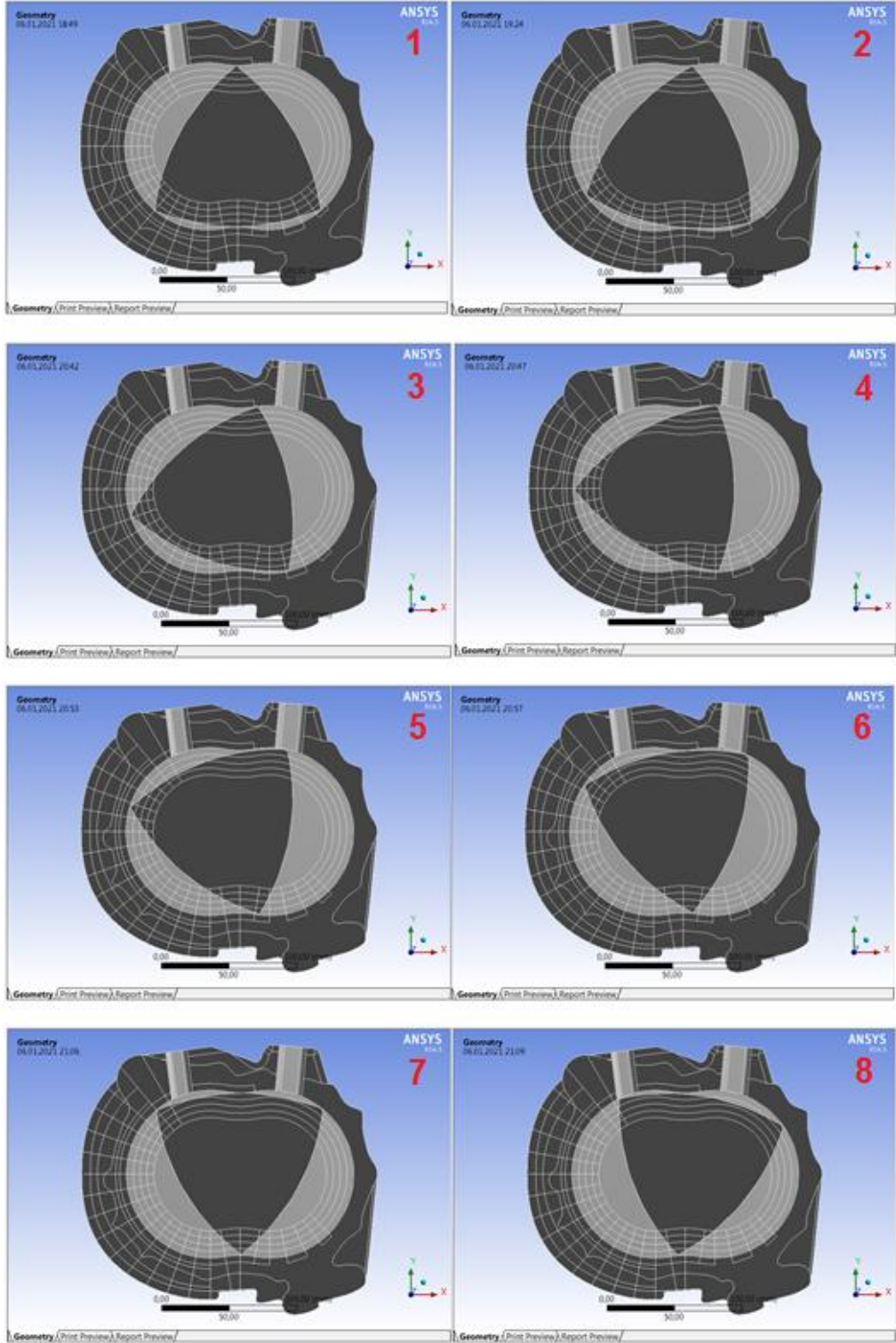
Ansys analiz programı, zamana bağlı ısı hesaplamaları gerçekleştirebilmek için geliştirilmiş olan Thermal Transient arayüzüne sahiptir. Bu arayüzde ısı akışı, sıcaklık, ısı iletkenlik katsayısı parametreleri belirli bir zamana bağlı olarak programa tanımlanabilir ve hesaplanabilir. Program girilen verilerin otomatik olarak integrasyonunu hesaplamakta ve tanımlı geometri üzerinde süreç sonundaki ısı akışı ve sıcaklık değerlerini gösterebilmektedir. Hesaplamaların hassasiyeti model üzerine tanımlanan ağ örgüsüne ters orantılı olarak bağlıdır. Ağ örgüsünün ölçüleri ne kadar küçük olursa, hassasiyet o kadar yüksek olacaktır ancak ölçülerin ağ ölçüsünün çok

küçük olması durumu hesaplama elemanlarının sayısını arttıracak ve çözümün sürecini uzatacaktır. Burada analizi yapacak olan bilgisayarın işlemci yapısına göre uygun ölçünün seçilmesi önemlidir.



Şekil 3.33. Wankel 3 boyutlu analiz ağ yapısı

Bizim modelimizde geometrinin yapısına uygun olarak 2mm kenar büyüklüğüne sahip üçgen ağ örgüsü uygulanmıştır. Ağ örgüsünün geometrik şekli değiştirilebilir ancak modelimizde de olduğu gibi yüzeyler arası geçişlerin çok fazla olduğu uygulamalarda, geçişler arası hesaplama hatalarının en aza indirilmesi için program üçgen yapılı ağ örgüsünü önermektedir. Ağ örgüsü hassasiyetin yüksek olmasını istediğimiz ısı akış yüzeylerinde yoğunlaştırılmıştır. Ağ yapıları netleştirildikten sonra 10° lik rotor açıları ile birbirini takip eden 8 adet geometri oluşturulmuştur. Malzeme tanımlamaları, yüzey ayırma işlemleri ve hesaplama ağ örgüsü tüm geometrilere tanımlanmıştır. oluşturulan geometriler, referans olarak seçilen yanma odasında meydana gelen yanma ve genişleme zamanlarını modelleyecek şekilde sıralı olarak oluşturulmuştur.



Şekil 3.34. Wankel analiz modeli açılal pozisyonları

Sekil 3.34.'te numaralandırılmış olarak verilen resimler sırasıyla $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$ ve 210° krank açılarını temsil etmektedir. Geometrik

modellerin uygun şekilde düzenlenmesiyle birlikte programın Thermal Transient arayüzünde ısı analizlere başlanabilir. Bir sonraki bölümde parametrelerin nasıl tanımlanacağı detaylı şekilde gösterilecektir.

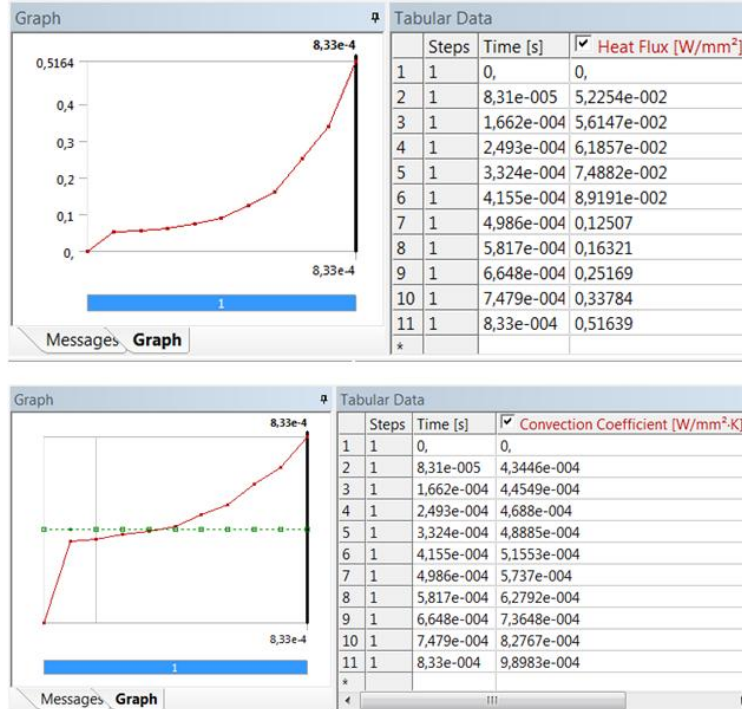
3.4.2. Wankel Modelinin Thermal Transient Arayüzünde Analizi

Çalışmamızın bu bölümünde Thermal Transient arayüzüne parametreleri tanımlamadan önce analizin yöntemini belirlemek gereklidir. Wankel motorunda gerçekleşen yanma bir süreçtir ve aynı zamanda sürekliliği vardır. Yanma motorun çalışma prensibi sebebiyle birbirini takip eden her yanma odası için 0° krank mili konumunda gerçekleşir. Referans yanma odası için giriş ve çıkış kanalları kapalı konumdayken krank mili 210° lik konuma ulaşıncaya kadar genişleme evresi devam eder. Bu süreç yanma odası iç yüzeyinin duvarlarından motorun ana gövdesine, kapaklarına ve rotoruna en çok ısı akışının olduğu süreçtir. Zamana bağlı olarak değişen bu ısı akışı ve ısı iletkenlik katsayısı değerleri sabit kabul edilip, motorun analiz modeline tanımlanırsa gerçeğe yakın ve mantıklı sonuçlar elde edilemez. Bu nedenle yanma ve genişleme süreçleri olabildiğince küçük parçalara bölünmelidir. Krank mili 0° pozisyonundan 210° pozisyonuna gelene kadar geçen süreçteki ısı akışı miktarı, rotorun her 1° lik hareketi için analiz geometrisine tanımlanırsa, sabit durumdaki verilere göre çok daha hassas ve gerçeğe yakın sonuçlara ulaşılabilecektir.

Hesaplamalarımızda 6000devir/dk krank mili hızı için rotorun 1° lik hareketini 0,0000831saniye olarak bulmuştuk. Hesap yaparken krank mili ile rotorun dönüş oranının $1/3$ olduğu unutulmamalıdır. Bu süreci oluşturduğumuz geometrilere göre genişletirsek her 10° lik rotor hareketi için geçen süre 0,000833saniye olacaktır. Bu süreç aralığında kalan tüm değişken ısı akışı ve iletkenlik katsayısı değerleri, programa teker teker tanımlanıp integrasyonu alınacaktır. 10° lik rotor hareketi sonucunda oluşan ısı akışı ve sıcaklık dağılımı verileri 8 farklı geometride elde edilecek ve sonrasında bölünmüş yüzey geometrisi sayesinde tek bir model üzerindeki ayrılmış yüzey alanlarına bu veriler teker teker tanımlanacaktır. Wankel geometrisinde yanma ve genişleme zamanları aynı bölgede ve tekrar eden yapıda olduğu için elde edilen ısı akışı modeli, programa tekrarlanabilir şekilde tanımlandıktan sonra motorun analiz ortamında

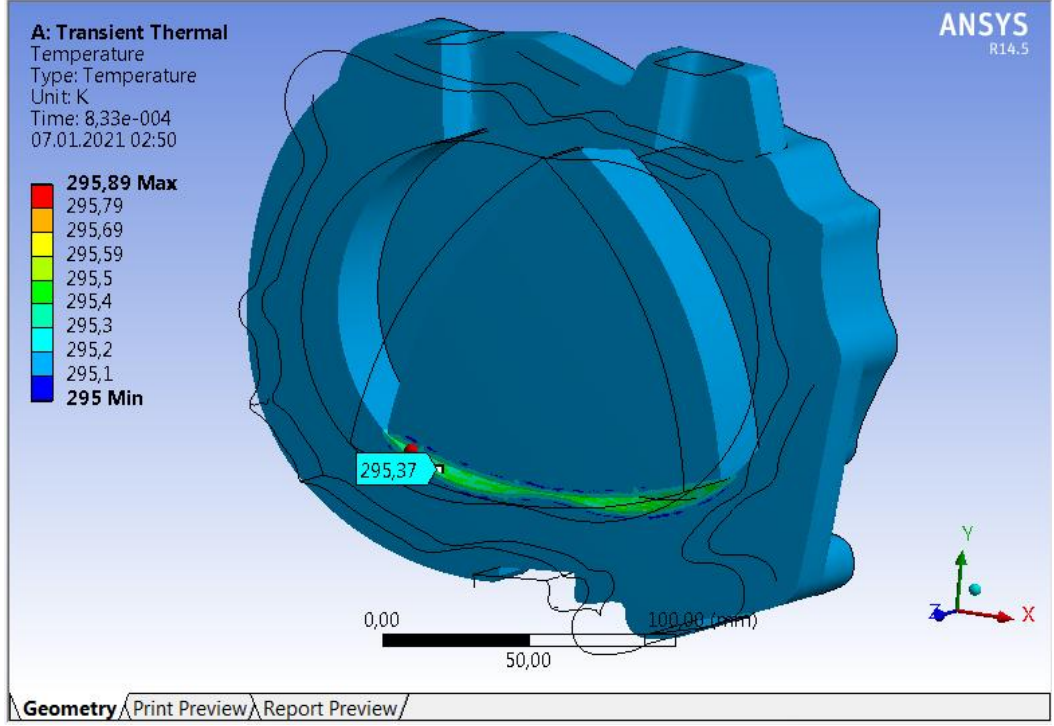
çalışma süreci dakikalara hatta saatlere kadar genişletilebilir. Küçük verileri hassas bir şekilde birleştirerek, asıl elde etmek istenilen sıcaklık verilerine ulaşılmasını sağlayan bu yöntem aslında bir çeşit tümevarım metotudur.

Analize başlarken öncelikle başlangıç şartları belirlenmeli ve programa tanımlanmalıdır. Krank milinin 6000devir/dk sabit hızda olduğunu kabul etmiştik ancak krank bu hız değerine bir anda ulaşamaz. Motor çalıştıktan bir kaç saniye sonra kelebeğin doğru pozisyona gelmesiyle birlikte hız değeri sabitlenir. Geçen bu süre zarfında motorun gövdesinde bir miktar sıcaklık artışı meydana gelmektedir. Bu durum dikkate alınarak gövdenin başlangıç sıcaklığı 295,14 K değerinde kabul edilmiştir. Yapılacak olan bu sıralı analizler krank milinin 6000devir/dk değerine çıktıktan sonraki yanma odasında meydana gelen ilk sıcaklık artış değerlerini bize verecektir. Süreçler çok kısa olacağı için bu birim analizlerde sıcaklık artış değerlerinin küçük olması beklenmektedir. İlk analiz ve geometrik model, krank milinin $1050^{\circ} - 0^{\circ}$ aralığını kapsamaktadır. GT-POST verilerine göre patlamanın başlangıcı ancak bu sürecin sonuna denk geldiği için ısı akışı verileri çok düşüktür. Her farklı geometri için oluşturulmuş ısı akışı ve katsayı verileri çizelge da verilmiştir.



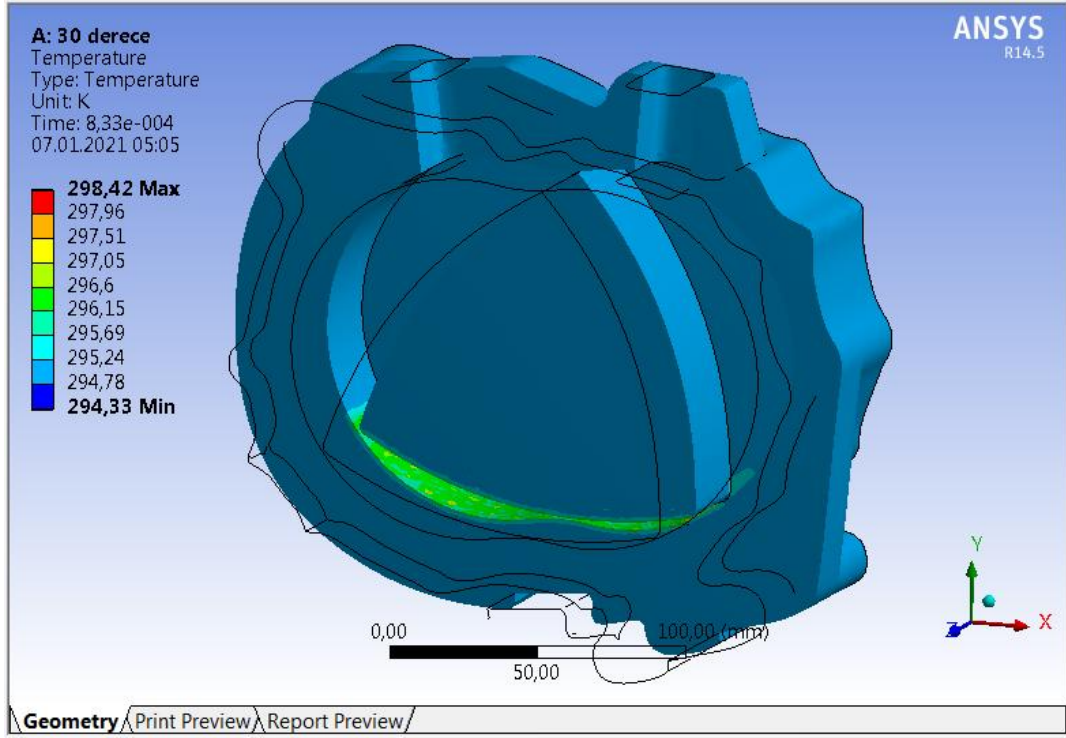
Şekil 3.35. $1050^{\circ} - 0^{\circ}$ aralığındaki ısı akışı ve ısı transferi katsayısı değerleri

Şekil 3.35'te Thermal Transient arayüzünde 0,000833saniye süreci için giriş verilerinin integrasyonu verilmiştir. bu aşamadan sonra analiz programı çalıştırılıp, motor geometrisi üzerinde sıcaklık değerleri Kelvin cinsinden okunabilir.

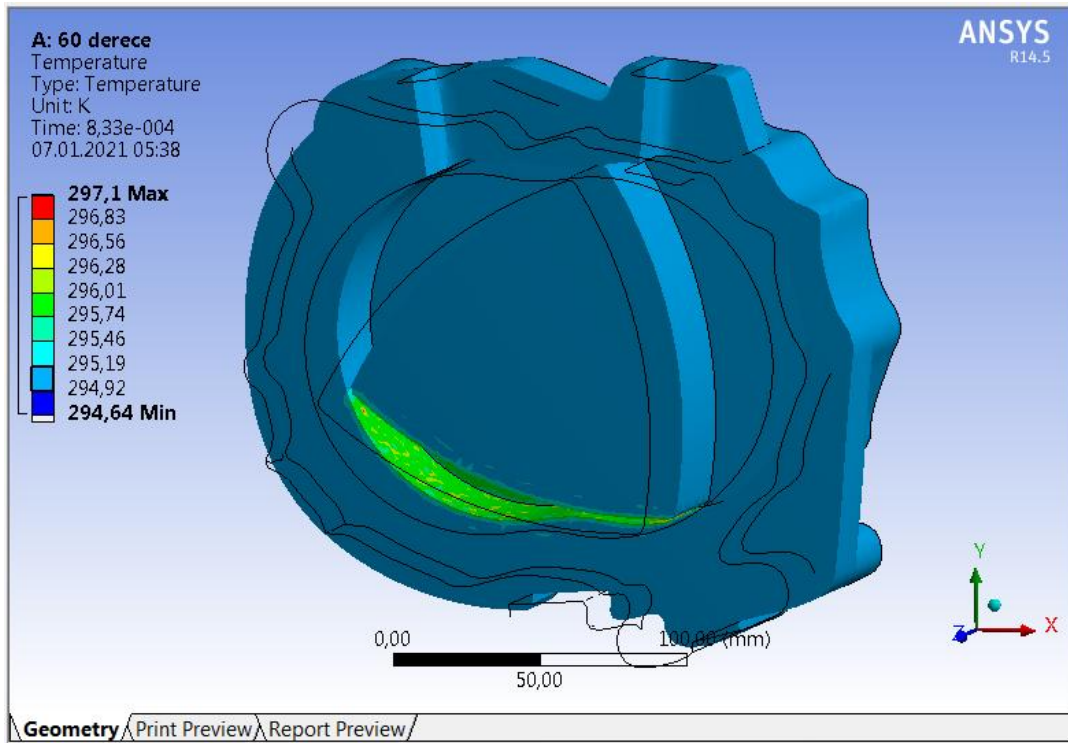


Şekil 3.36. 1050° - 0° aralığındaki analizin sıcaklık değerleri

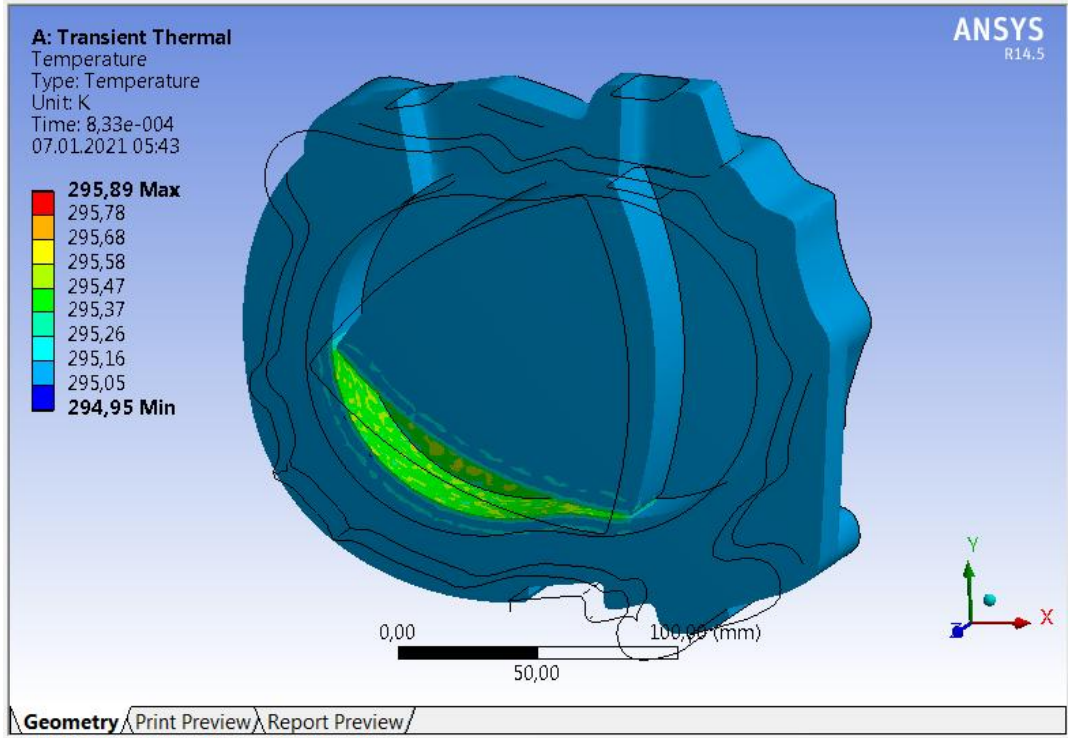
Şekil 3.36.' te Transient Thermal arayüzünde 1050° - 0° aralığındaki analizin 3 boyutlu model üzerindeki sıcaklık dağılımı sonuçları gösterilmektedir. Her ısıl analizin sonunda program, modelin solunda bir renk cetveli oluşturur ve sıcaklıkların görsel olarak okunmasını kolaylaştırır. Noktasal olarak ölçüm yapılmak istenirse şekilde görüldüğü gibi ölçüm komutu ile istenilen yüzeyde sıcaklık değeri sayısal olarak görüntülenebilir. Bu analiz 8 farklı geometri için tekrarlanmıştır ve analizlerin sonuçları neticesinde elde edilen sıcaklık değerleri Şekil 3.37., Şekil 3.38., Şekil 3.39., Şekil 3.40., Şekil 3.41., Şekil 3.42. ve Şekil 3.43.'te gösterilmiştir. Yanma odası duvarlarına en çok ısı geçişi krank milinin 0° - 30° aralığındaki süreçte gerçekleşmiştir. Elde edilen ısı ve sıcaklık verileri, final analizinde kullanılmak üzere programda kayıt altına alınmıştır. Programa girilen ısıl veriler EK 2' de verilmiştir.



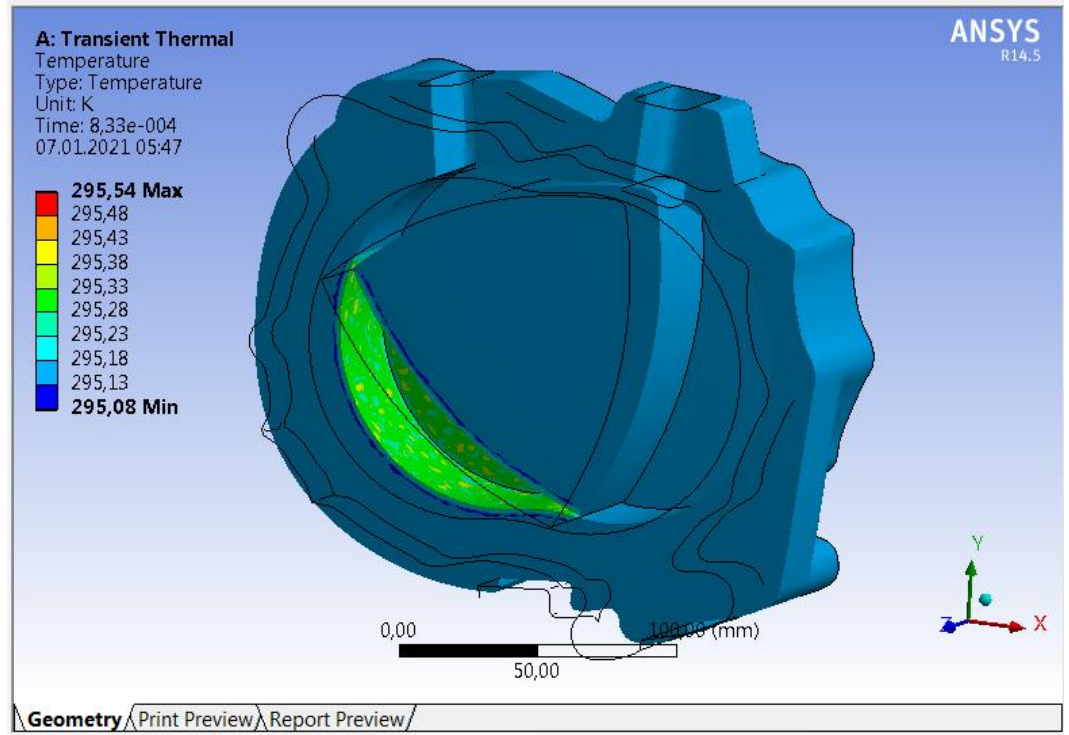
Şekil 3.37. 0° - 30° aralığındaki analizin sıcaklık değerleri



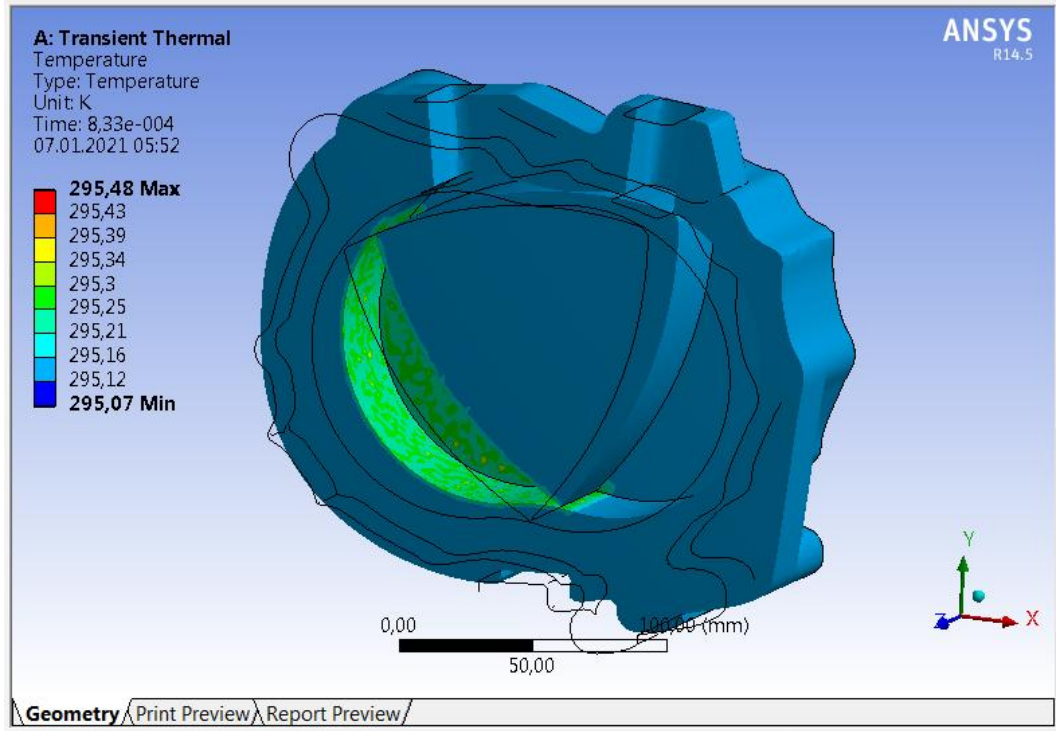
Şekil 3.38. 30° - 60° aralığındaki analizin sıcaklık değerleri



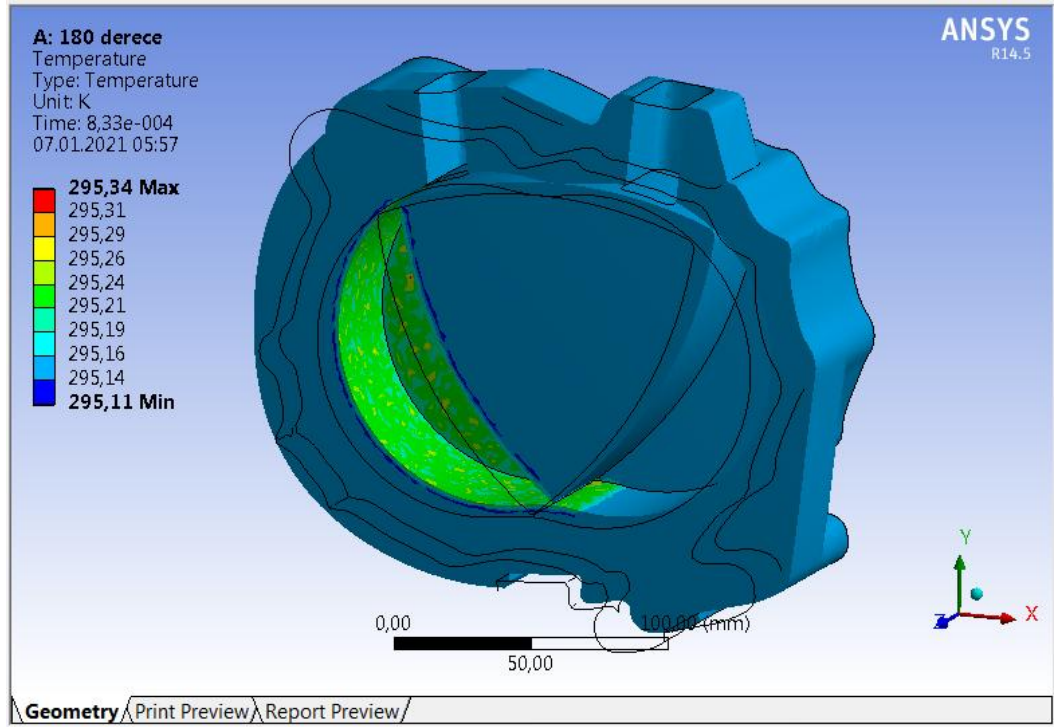
Şekil 3.39. 60° - 90° aralığındaki analizin sıcaklık değerleri



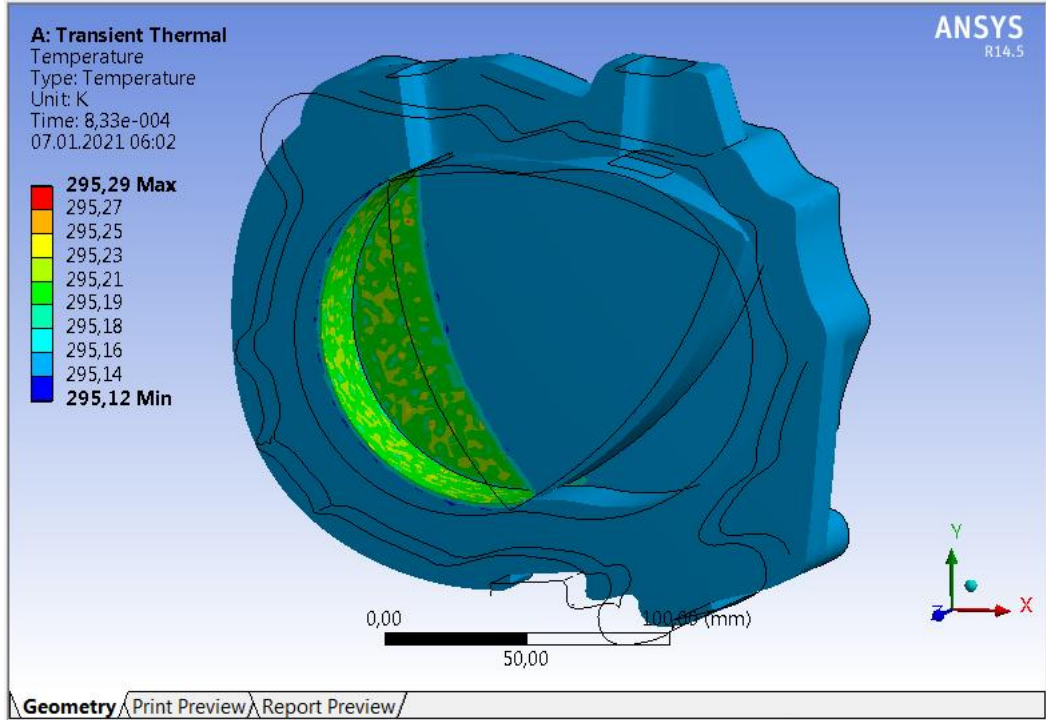
Şekil 3.40. 90° - 120° aralığındaki analizin sıcaklık değerleri



Şekil 3.41. 120° - 150° aralığındaki analiz sıcaklık değerleri



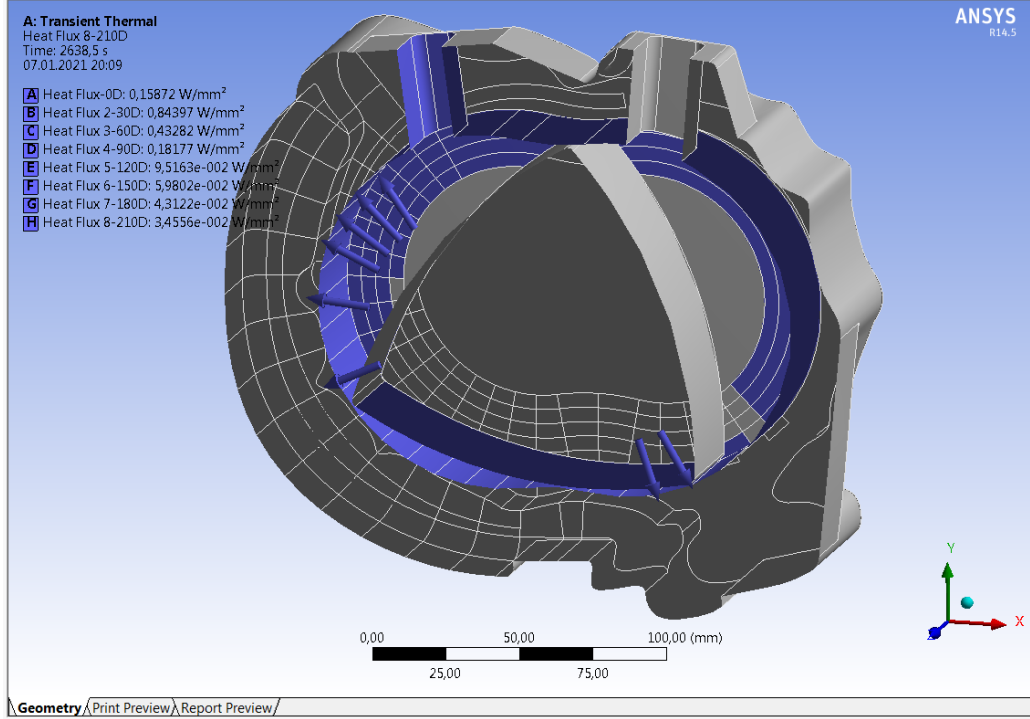
Şekil 3.42. 150° - 180° aralığındaki analiz sıcaklık değerleri



Şekil 3.43. 180° - 210° aralığındaki analizin sıcaklık değerleri

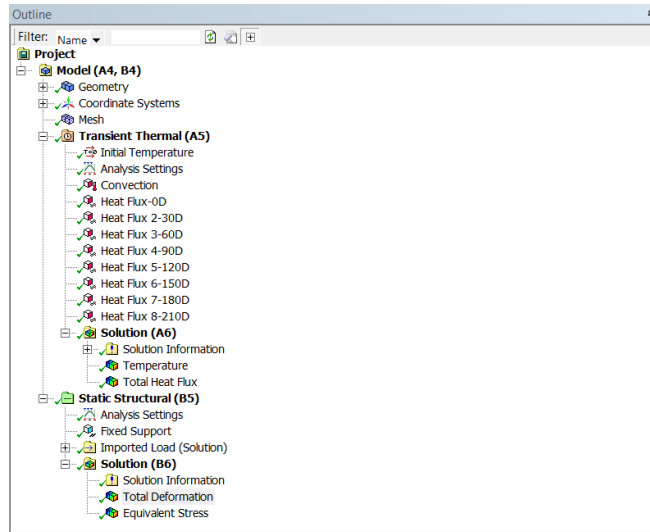
Oluşturulan modellerin 0,000833s zaman dilimi için gerçekleştirdiğimiz analiz sonuçları, zamana bağlı olarak birbirlerine bağlanacak ve aynı geometri üzerinde ısı akışları akuple edilecektir. Sonrasında bu akuple edilmiş veriler tekrarlı hale getirilecek ve program arayüzünde zaman değişkeni için daha büyük değerler girilecektir. Kullanılan yöntemin bundan sonraki kısmı tamamen deneysel analizlere dayanmaktadır. Analizde kullanılan motor geometrisi üzerinde soğutma sağlayacak ters yönlü bir ısı akışı tanımlanmadığı için sıcaklık artışı sürekli olacaktır. Bu beklenen bir sonuçtur ancak bizim için önemli olan nokta bu sıcaklık artışının gövde üzerindeki dağılım dengesidir. Wankel motor gövdelerinde meydana gelen dengesiz sıcaklık dağılımının, bu motorların temel problemlerinden biri olduğunu önceki bölümlerde belirtmiştik. Oluşan bu dengesizlik sebebiyle motor gövdesinin genleşmesi de farklı bölgelerde farklı değerlerde olacaktır. Bu durum Wankel motoru için büyük bir problemdir ve bu problemi öngörüp, tasarım aşamasında doğru soğutma yöntemlerini gövdeye uygulayabilmek büyük bir avantajdır. Final çözümlemesi için gövde üzerinde yapılan tanımlamalar Şekil 3.44'te gösterilmiştir. Bu çoklu tanımlama yönteminde model üzerine tanımladığımız ayrılmış yüzeylerin sağladığı avantaj görülmektedir. Planlanarak

ayrılmış yüzeyler sayesinde farklı bölgelere zamana bağlı ısı akışı tanımlamaları yapılmıştır.



Şekil 3.44. Çoklu ısı akışı tanımlama ekranı

Yapılan ısı akış tanımlamalarının arayüz ekranı Şekil 3.45'te listelenmiştir.



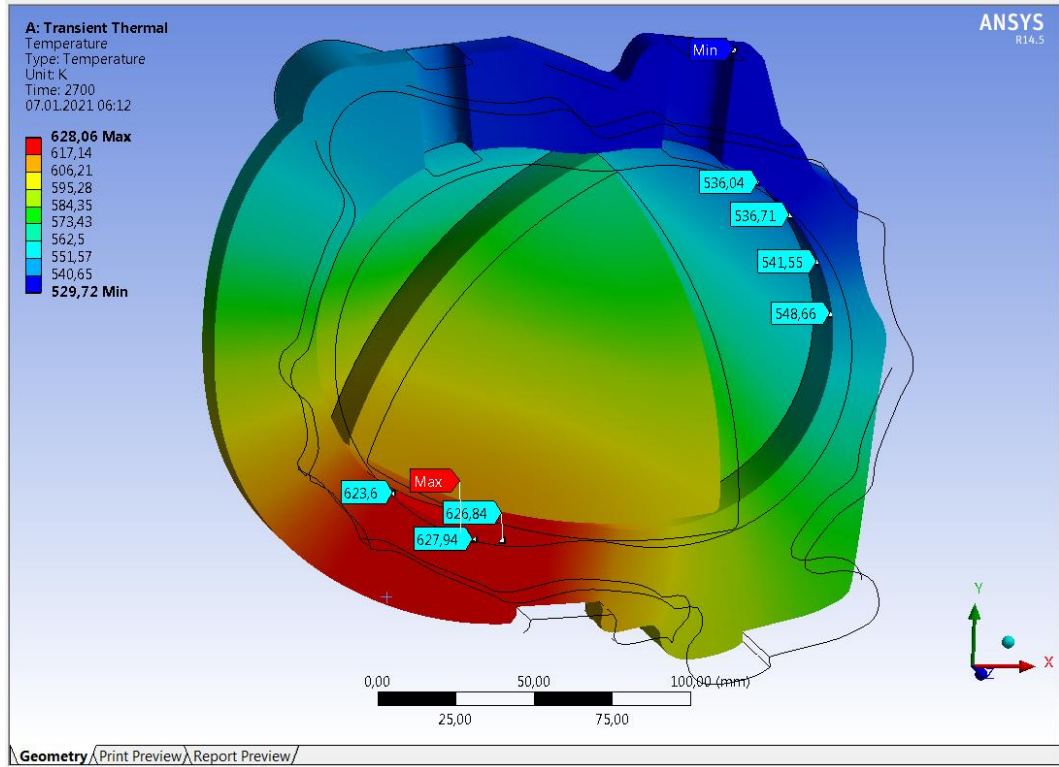
Şekil 3.45. Çoklu ısı akışı tanımlama arayüzü

Yapılacak olan son ısıl analizin en önemli parametresi zamandır. Bu noktada deneme yanılma metodu ile bir çok analiz analiz yapılmıştır. İlk deneme 16dk için gerçekleştirilmiştir ve motorun çalışmasını engelleyecek sıcaklık dağılımı ve genleşme kaynaklı şekil değişiklikleri görülmemiştir. Daha sonra 32dk , 45dk ve 60dk süreleri için tekrarlı ısı akışı analizleri gerçekleştirilmiştir. 45dk lık sürecin sonunda elde edilen bulgularda motorun dayanım toleranslarının üzerine çıkıldığı görülmüştür. Bir sonraki bölümde tüm bulgular detaylı olarak incelenecektir.

4. BULGULAR

4.1. Thermal Transient Süreç Analizi Sıcaklık Verileri

Yapılan çalışmanın ve kullanılan yöntemlerin çıktılarını alacağımız son süreç analizi Thermal Transien arayüzünde yapılmıştır. Zaman olarak 2700 saniyelik süreçte motor döngüsü tamamlandığında elde edilen sıcaklık dağılımı verileri Şekil 4.1’de görüldüğü gibidir.



Şekil 4.1. Thermal Transiens süreç analizi son sıcaklık dağılımları

Ölçüm noktalarından alınan sonuçlar okunduğunda ve sıcaklık renk cetveline göre görsel kontrol yapıldığında ısı akışının yönü ve etkilenen bölgeler açıkça görülmektedir. Başlangıçta 295,14 K sıcaklığına sahip olan Wankel motor gövdesi, 6000 devir/dk hızında 2700s boyunca çalıştırıldığında maksimum 628,06 K sıcaklığına ulaşmaktadır. Bu değer patlamanın olduğu bölgede okunmuştur. En düşük sıcaklık değeri 529,72 K olarak okunmaktadır ve hava giriş kanalının olduğu bölge, gövdenin en soğuk

bölgesidir. Sıcaklık değerlerini santigrat derece cinsine çevirdiğimizde değerler aşağıdaki gibidir.

$$628,06 \text{ K} = 355,06 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$529,72 \text{ K} = 256,72 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Geometri üzerindeki maksimum sıcaklık farkı = $355,06 \text{ }^{\circ}\text{C} - 256,72 \text{ }^{\circ}\text{C} = 98,34 \text{ }^{\circ}\text{C}$ dir. Bulunan bu sıcaklık farkı değeri beklenen bir sonuçtur ve soğutma önlemi alınmamış bir Wankel modeli için yüksek bir değerdir. Bu motorun ısıl performansı hakkında yorum yapabilmek için ulaşılmaması gereken sıcaklık farkı değerleri, analizin sonucunda bulunmuştur.

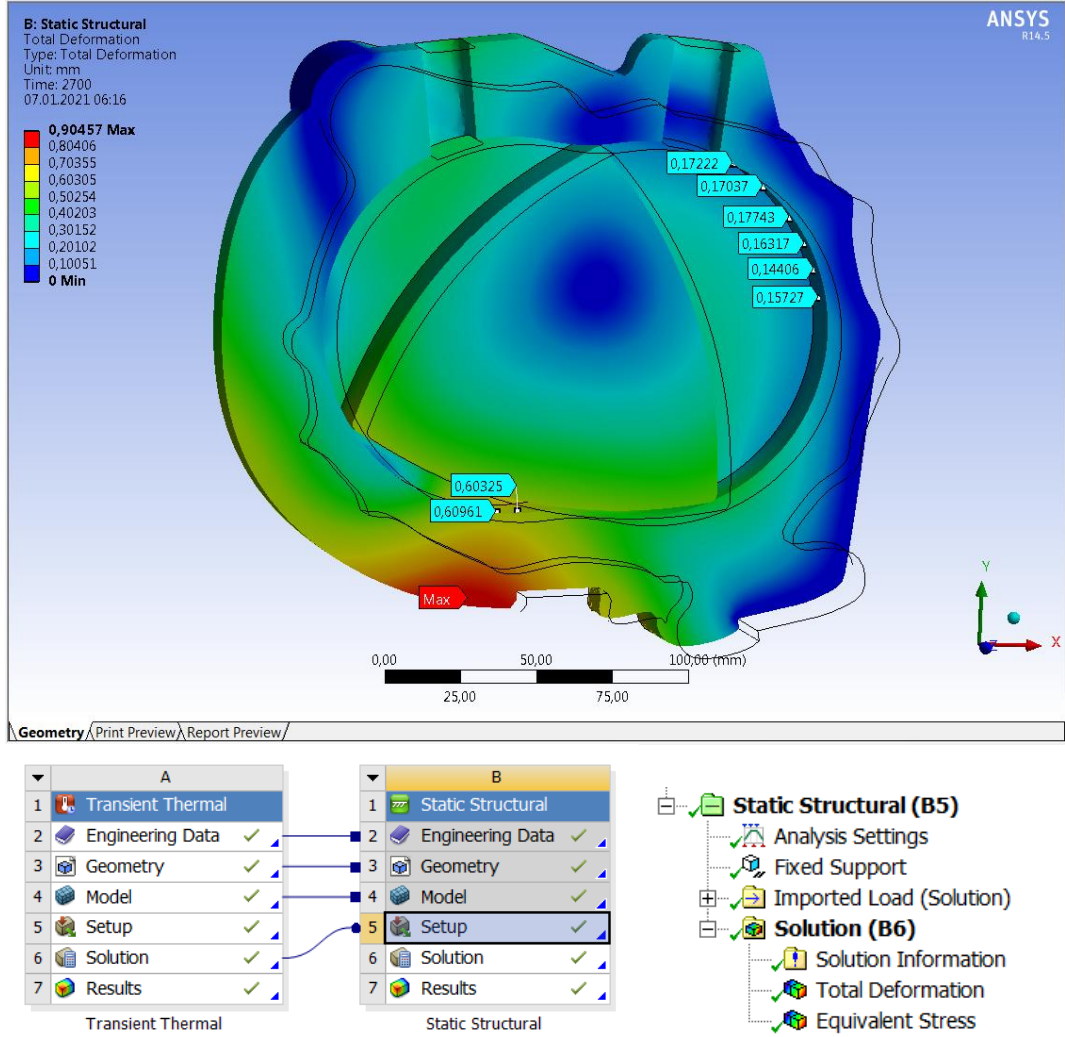
Motorun gövdesinde oluşan sıcaklık farkları nedeniyle meydana gelen genleşmeler sonucunda gövde ölçülerinde değişimler gözlenir. Bu ölçü değişikliği ve deformasyonların büyüklüğü, çalışmamızda motorun mekanik performansını gösterecektir. Wankel motor gövdesinin iç yüzey geometrisi, motorun çalışma prensibi sebebiyle eliptik yapıyı formunu korumak zorundadır. Sıcaklık etkisiyle genleşme olsa bile bu genleşme tüm yüzeylerde eşit miktarda olmalı ve segmanların izin verdiği tolerans değerlerini geçmemelidir.

Thermal Transient arayüzü zamana bağlı ısıl analizleri yapabilen alt programlara sahiptir. Mekanik analiz söz konusu olduğunda bu modül kullanılamaz. Ansys programı içerisinde sıcaklığa bağlı olarak mekanik deformasyonları analiz edebileceğimiz formül yapılarını içeren Static Structural arayüzü bulunmaktadır. Bu arayüzler program içerisinde birbirlerine bağlanarak aralarında veri aktarabilirler. Sıcaklığa bağlı olarak motor gövdesinde meydana gelen deformasyonları bulabilmek için arayüzler arasındaki bağlantı kullanıcılara ve sıcaklık verileri Static Structural arayüzüne aktarılacaktır.

4.2. Static Structural Arayüzünde Şekil Değiştirme Analizi Verileri

Static Structural arayüzü zamana bağlı çözümlene yapabilen fonksiyon yapısına sahip değildir ancak süreç analizlerinin istenilen bir anındaki verilere göre çözümlene

yapabilmektedir. Isıl analiz son anındaki sıcaklık verileri Static Structural arayüzüne tanımlanırsa, son sıcaklık dağılımında meydana gelen mekanik bozulmalar okunabilmektedir.



Şekil 4.2. Static Structural şekil değiştirme analizi verileri

Analiz sonucu incelendiğinde maksimum 0,904mm genişleme olduğu görülmektedir. Analiz geometrisi üzerinde noktasal ölçümler yapıldığında ise kenar segmanlarının temas ettiği iç yüzeylerde 0,609mm genişleme görülmektedir. Bu genişleme tüm geometride dengeli olarak gerçekleşmemiştir. Hava giriş kanalına yakın olan yüzeylerde ise 0,14mm - 0,17mm aralığında değerler okunmaktadır. Bu değerler motor için sorun teşkil etmeyecek düzeydedir ve segman toleranslarına uygundur ancak yanma bölgesinde oluşan genişleme miktarı kenar segmanlarının tolerans değerlerini

aşmaktadır. Gerçek model üzerinde yapılan segman yayı ölçümlerinde yayların 0,5mm değerinde esneme mesafeleri olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.1.' de gövde üzerinde ölçülen sıcaklık ve şekil değiştirme değerlerinin maksimum farkları verilmektedir.

Sıcaklık ve Şekil Değiştirmenin Maksimum Fark Değerleri	
Sıcaklık (° C)	98,34° C
Şekil Değiştirme(mm)	0,904mm

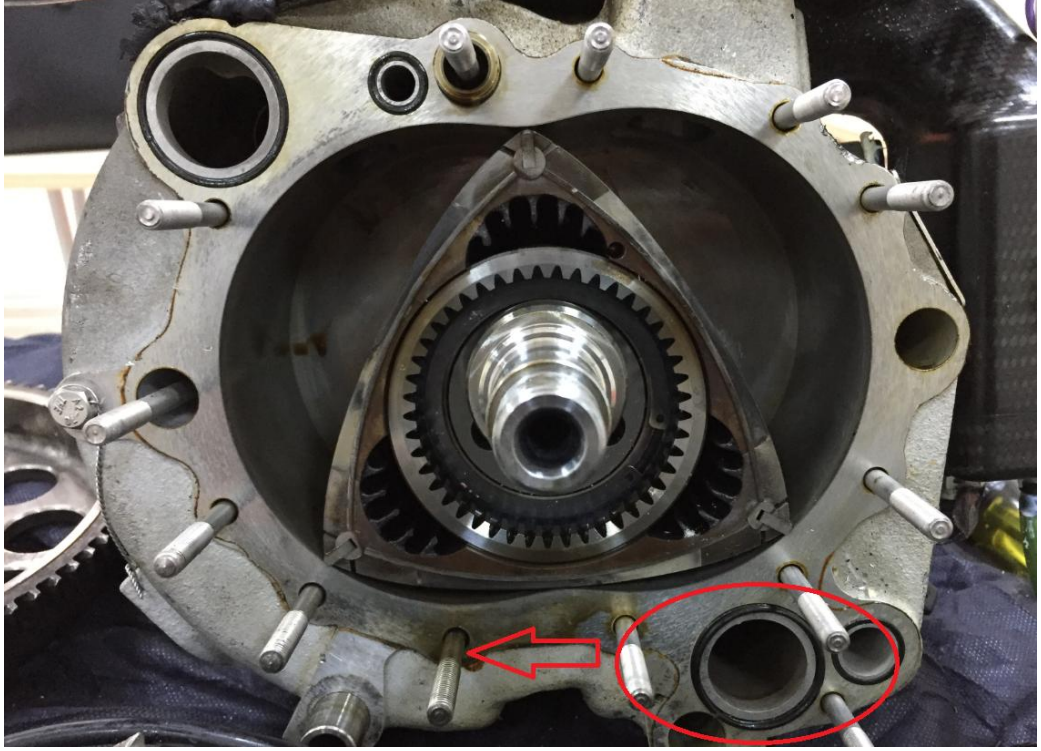
Çizelge 4.1. Sıcaklık ve şekil değiştirmenin maksimum fark değerleri

Çalışmamızda hedeflenen tüm analizler gerçekleştirilmiştir ve geliştirilen tüm özel metotlar bilgisayar ortamında ve bu belgede kayıt altına alınmıştır.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Gerçek bir Wankel motorunun ana gövdesi üzerinde gerçekleştirilen bu çalışmanın sonucunda bilgisayar modeli üzerinde 98,34 °C'sıcaklık farkı ve gövde iç yüzeyinde 0,609mm değerinde genleşme olduğu görülmüştür. Ulaşılan bu sonuçlar basit değerler gibi görünse de Wankel motorunun mekanizması ve çalışma sürekliliği için hayati önem taşır. Analiz denemelerinde motoru 60dk lık süreçte test ettiğimizde gövde sıcaklığı 500 °C değerinin üzerine çıkmaktadır. Gerçek motor üzerinde bu sıcaklık test edilmek istenirse daha bu değere ulaşmadan genleşme sebebiyle segmanlar işlevlerini yapamaz hale gelecek ve etkin yanma elde edilemediği için motor duracaktır. Bu çalışmada sürecin 45dk olarak kabul edilip, analizlerin bu süreçte gerçekleştirilmesinin temel nedeni elde edilen sonuçların tolerans sınırlarında olmasıdır.

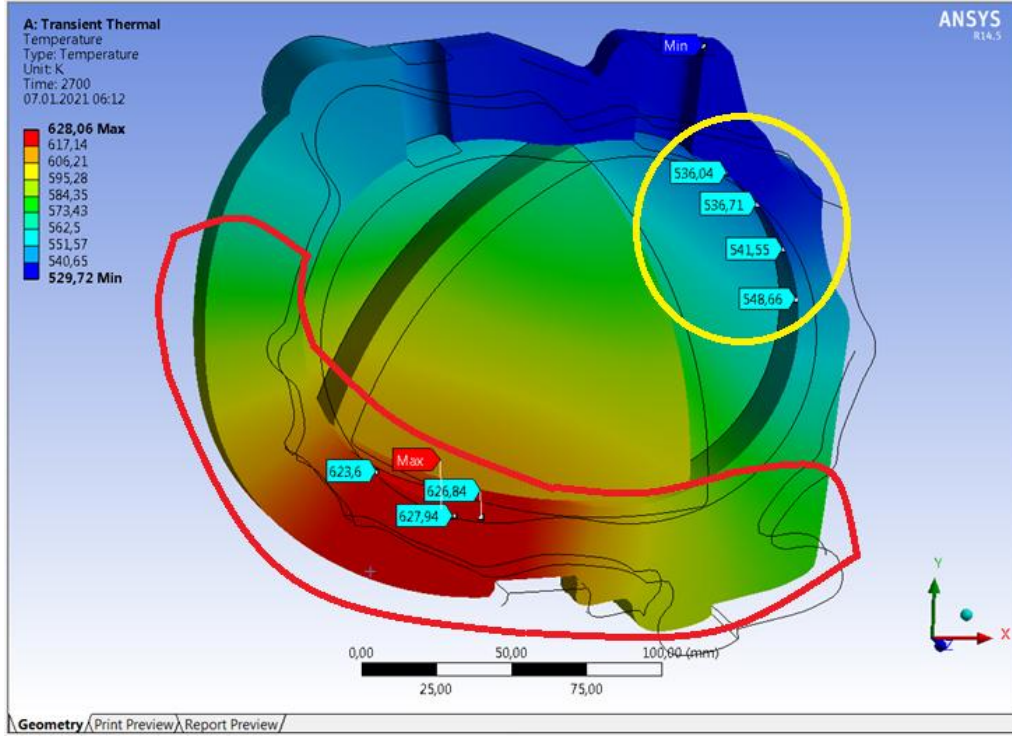
Bu çalışmada kullanılan tüm programlar ve geliştirilen metotlar, gerçekte var olan bir Wankel motorunun gövdesinin ısı ve mekanik verilerini okuyabilmek için hazırlanmıştır. Yine bu metotlar kullanılarak sıfırdan bir Wankel motor gövdesinin tasarlanması söz konusu olduğunda, kullanılan metot ve program yapıları tam esneklik gösterecek şekilde hazırlanmıştır. Yani bu çalışma hem yeni bir tasarım için kullanılabilir hem de var olan bir tasarımın geliştirilmesine kılavuzluk edebilir. Bu çalışmanın devamında farklı gövde modelleri için farklı malzemeler denenebilir ve bu malzemelerin ısı ve mekanik performansları belirlenebilir. Elde edilen sonuçlar ile daha hafif ve dayanıklı tasarım modelleri geliştirilebilir. Bir Wankel motoru gövdesi daha tasarım aşamasındayken gövde üzerindeki soğutulması gereken bölgeler belirlenebilir veya var olan bir soğutma mekanizmasının ısı akış değerleri bulunabilir. Bu durumu çalışmamızdaki veriler ile örneklendirelim.



Şekil 5.1. Soğutma sıvısı kanal detayı

Şekil 5.1.'de kırmızı ile işaretlenmiş soğutma kanalı girişi, ok yönünde gövde içerisinde ilerlemektedir. Radyatör mekanizmasında soğutulan sıvı ilk olarak analizlerimizde en yüksek sıcaklık değerini okuduğumuz yanma bölgesi altında kalan kısma pompalanmaktadır. Bu örnekleme yapılan analizlerin doğruluğunu kanıtlar niteliktedir.

Analiz sonuçlarında elde ettiğimiz veriler neticesinde model üzerinde yapılabilecek geliştirmelerde odaklanılacak bölge bellidir. Isıl ve mekanik performansı arttırmak için sıcaklık dağılımı dengelenmeli ve bunun sonucu olarak meydana gelecek olan genişleme miktarlarının ana gövde iç yüzeyinde eşit olması sağlanmalıdır. Bu çalışmadaki motor modeli için geliştirme önerisinde bulunurken dikkat edilmesi gereken en önemli değişken ağırlıktır. İHA larda kullanılmak üzere dizayn edilmiş olan bu motor için tasarım değişikliği içeren her çalışma, motorun ilk halindeki ağırlığından daha düşük bir ağırlığa sahip olmalıdır. Aksi halde yapılan geliştirmenin bir anlamı olmayacaktır. Modelimizde soğutma önlemi alınması gereken bölge Şekil 5.2.'de gösterilmiştir.

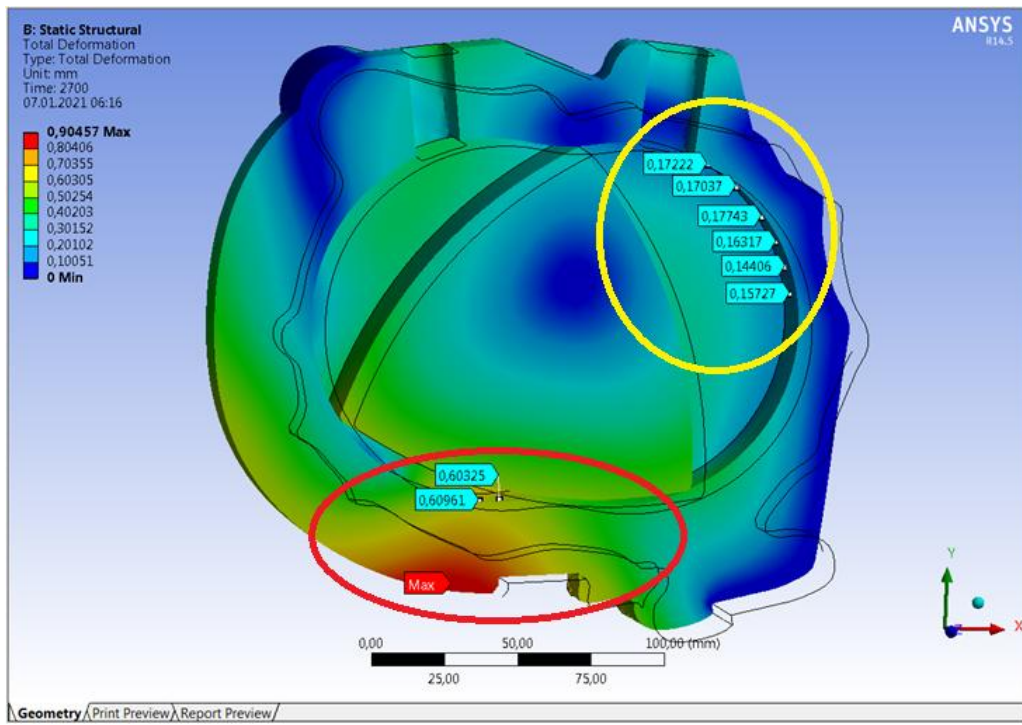


Şekil 5.2. Soğutma önlemi alınması gereken bölge

Önceki bölümlerde bu motorun gövdesinin sıvı soğutmalı yapıda tasarlandığını belirtmiştik. Soğutma ekipmanlarını ve kanallarını iptal ettiğimizde kırmızı ile işaretlenmiş yüksek sıcaklık bölgesinde et kalınlığı artmıştır. Bu durum motorun ağırlığının artması anlamına gelir ki uygulamada istenmeyen bir durumdur. GT-POST verilerine göre bu motorun belirlenen çalışma şartlarında maruz kaldığı maksimum basınç değeri bellidir. Yapılacak ilk geliştirme kütle optimizasyonu ile bu basınca direnç gösterebilecek et kalınlığı tayin edilmeli ve modele uygulanmalıdır. Gövdenin dayanımı ile ilgili çözüm üretildikten sonra dengesiz sıcaklık dağılımı için bir öneri getirilmelidir. Kırmızı ile işaretlenmiş bölgede okunan sıcaklık değerleri, sarı ile işaretlenmiş bölgedeki değerlere ya eşit ya da yakın olmalıdır. Burada ağırlık artışı da dikkate alınarak önerilebilecek en iyi yöntemin gövdeye ilave edilecek soğutma kanatçıkları olacağı öngörülmektedir. Kanatçıkların boyutları sıcaklık dağılımına göre değişkenlik gösterecek şekilde optimize edilmelidir. Bu kanatçıklar motor gövdesi için ek ağırlık anlamına gelir. Burada motorun ilk halindeki ağırlığına göre ağırlık karşılaştırılması yapılmalıdır. Sıvı soğutma sistemine dahil olan radyatör mekanizması ve aktarım borularının ağırlığı, gövdeye eklenen kanatçıkların ağırlığından fazla ise

önerilen yöntem avantajlıdır. İHA larda uçuş irtifası değişkenlik gösterdiği için gövde üzerinden akacak olan havanın hızı ve sıcaklığı da değişkenlik gösterir. Kanatçık modelinden sonra bu modele ek olarak, gövde üzerinden akacak havayı optimize edecek bir çalışma da yapılabilir. Sıcaklık sensörlerine bağlı olarak başka bir kanat mekanizması ile bu hava akışı düzenlenebilir.

Gövde için yapılan tüm bu öneriler ile amacımız gövde üzerindeki genleşmeleri düzene sokmaktır.



Şekil 5.3. Dengelenmesi gereken genleşme bölgeleri

Şekil 5.3.'te genleşme sonucu meydana gelen kritik ölçüler verilmiştir. Yapılan analizlerde bölgesel olarak meydana gelen ısı akış değerleri bellidir. Kanatçık yapısı optimize edilirken anlık olarak motor gövdesine akan ısıya karşı yönde ters akış oluşturacak şekilde bir tasarım önerilmelidir. Sonuç değerleri için yine bu çalışmadaki yöntemler kullanılarak şekil değişikliği analizi yapılmalı ve kırmızı ile işaretlenmiş bölgedeki genleşme değerleri, sarı ile işaretli bölgedeki değerlere yaklaştırılmalıdır. Rotor üzerindeki segmanların ve segman yaylarının genleşmeye karşı sağladığı uyum ise başlı başına ayrı bir araştırma konusudur.

Bu çalışma, yine danışmanım Prof. Dr. Ali Sürmen'in önderliğinde yürütülen daha büyük bir çalışmaya alt veri oluşturacak niteliktedir. Yazarlığımı Arş. Gör. Merve Küçük' ün üstlendiği doktora tezi çalışmasında, bu yöntemlerin ışığında yeni bulgular elde edilecektir. Arş. Gör. Merve Küçük, matematiksel modelin oluşturulması ve tek boyutlu analizlerin optimize edilmesi aşamalarındaki desteği büyüktür. Bu sebeple bu çalışmadaki verileri, kendi çalışmaları için kullanmasına izin verilmiştir.

Wankel motorlarının İHA larda kullanılmasıyla birlikte bu motorların geliştirilmesi tekrar gündeme gelmiştir. Bu çalışmada kullanılan metotlar geliştirilmeye açıktır ve bu yöntem hem bu motorlar üzerinde daha fazla bilgiye sahip olmamızı sağlayacak hem de başka çalışmalar için veri kaynağı olacaktır. İHA ların silahlı kuvvetlere taarruz ve savunma hatlarında sağladığı avantajlar göz ardı edilemez derecede büyüktür. Bu ve buna benzer çalışmalar sayesinde çok daha işlevsel İHA lar üretilebilecek ve elde edilen tüm bilgiler literatürde yerini alacaktır.

KAYNAKLAR

- Tartakovsky,L., Baibikov,V., Gutman,M., Veinblat,M. 2012.** Simulation of Wankel Engine Performance Using Commercial Software for Piston Engines. *SAE Technical Paper*, doi:10.4271/2012-32-0098.
- Spreitzer,J., Felix,Z., Geringer,B. 2015.** Implementation of a Rotary Engine (Wankel Engine) in a CFD Simulation Tool with Special Emphasis on Combustion and Flow Phenomena. *SAE Technical Paper*, doi:10.4271/2015-01-0382.
- Boretti,A. 2015.** CAD/CFD/CAE Modelling of Wankel Engines for UAV. *SAE Technical Paper*, doi:10.4271/2015-01-2466.
- Malkaz, F. 2011.** İki Zamanlı Wankel Tipi Döner Pistonlu Motorun Analizi. *Y. Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Farzadı, A. 2015.** Döner Pistonlu Wankel Motorunda Hava Akışının Analizi. *Y. Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Abraham,J., Ramoth,D., Mannisto,J., 1991.** 3-D Steady-State Wall Heat Fluxes and Thermal Analysis of a Stratified-Charge Rotary Engine. *SAE Technical Paper*, 910706.
- Wu,W., Lin,Y., Chow,L. 2014.** A Heat Pipe Assisted Air-Cooled Rotary Wankel Engine for Improved Durability, Power and Efficiency. *SAE Technical Paper*, doi:10.4271/2014-01-2160.
- Badglay,P.R., Doup,D., Kamo,R., 1989.** Analysis and Test of Insulated Components for Rotary Engine. *SAE Technical Paper*, 890326.
- Gkoutzamanis V., Mertzis D., Nikolaidis S., Savvakis S. 2015.** CFD Comparison for the SARM Rotary Engine With a Conventional Reciprocating Otto Cycle Engine. 6 th BETA CAE International Conference, 10-12 June, 2015, Thessaloniki, Greece.
- Ercan, T. 2005.** Thermodynamic and structural Design and Analysis of a Novel Turbo Rotary Engine. *MSc Thesis*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Arabacı, E. 2009.** Turbo Döngüsel Bir Motorun Performansının Arttırılması. *Y. Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Costa, T., Nickerson, M., Littera, D., Martins, J. 2016.** Measurement and Prediction of Heat Transfer Losses on the XMv3 Rotary Engine. *SAE International Journal Engines*, 9(4): 2368-2380.
- Leboeuf, M., Dufault, J. F., Nickerson, M., Becker, K. 2018.** Performance of a Low-Blowby Sealing System for a High Efficiency Rotary Engine. *SAE Technical Paper*, doi:10.4271/2018-01-0372.
- Pischinger, S. 2005.** Internal Combustion Engines: Lecture Notes, Rheinisch – Westfälische Technische Hochschule, Aachen, Vol 1.
- Norman, T.J. 1983.** A Performance Model of a Spark Ignition Wankel Engine. *MSc Thesis*, Massachusetts Institute of Technology, ABD.
- Bartrand, T.A., Willis E.A. 1993.** Rotary Engine Performance Computer Program (RCEMAP and .RCEMAPPC) User's Guide. NASA Contract Report-191192-N94-15192. Ohio.
- Gatowski, J.A., Balles, E.N., Chun, K.M., Nelson, F.E., Ekchian, J.A., Heywood, J.B. 1984.** Heat Release Analysis of Engine Pressure Data. *SAE Paper*, 841359.

- Stanton, R.A. 1987.** Heat Transfer and Performance Calculations in a Rotary Engine. *MSc Thesis*, Massachusetts Institute of Technology, ABD.
- Woschni, G. 1967.** A Universally Applicable Equation for Instantaneous Heat Transfer coefficient in Internal Combustion Engine. *SAE Paper*, 670931.
- Roberts., J.M. 1983.** Heat Release Estimation and Prediction of Wankel Stratified-Charge Combustion Engine. *MSc Thesis*, Massachusetts Institute of Technology, ABD.
- Daniellie, G.A., Keck, J.C., Heywood, J.B. 1978.** Experimental and Theoretical Analysis of Wankel Engine Performance. *SAE Paper*, 78416.

EKLER

EK 1: Motor modelinin toplam hacim ve yüzey alanı değerleri

EK 2: Birim zamandaki ısı akışı ve ısı transfer katsayısı tablosu

EK 1 Motor modelinin toplam hacim ve yüzey alanı değerleri

ALAN-HACİM SONUÇLARI TABLOSU			
KRANK AÇISI (°)	ROTOR AÇISI (°)	HACİM (cm ³)	ALAN (cm ²)
858	286	317,13	307,14
861	287	314,25	305,84
864	288	311,28	304,18
867	289	308,1	303,03
870	290	304,78	301,55
873	291	301,31	300,01
876	292	297,71	298,4
879	293	293,97	296,74
882	294	290,1	295,03
885	295	286,1	293,26
888	296	281,99	291,44
891	297	277,75	289,57
894	298	273,41	287,65
897	299	268,96	285,71
900	300	264,4	283,67
903	301	259,76	281,64
906	302	255,02	279,56
909	303	250,19	277,45
912	304	245,28	275,3
915	305	240,28	272,87
918	306	235,24	270,66
921	307	230,13	268,41
924	308	224,97	266,15
927	309	219,76	263,88
930	310	214,5	261,59
933	311	209,2	259,29
936	312	203,88	256,99
939	313	198,53	254,69
942	314	193,12	252,85
945	315	187,74	250,59
948	316	182,35	248,34
951	317	176,96	246,1
954	318	171,86	243,86
957	319	166,23	241,62
960	320	160,9	239,4

Motor modelinin toplam hacim ve yüzey alanı değerleri (devam)

KRANK AÇISI(°)	ROTOR AÇISI (°)	HACİM(cm ³)	ALAN(cm ²)
963	321	155,6	237,19
966	322	150,33	234,99
969	323	145,1	232,81
972	324	139,93	230,66
975	325	134,8	228,52
978	326	129,74	226,41
981	327	124,75	224,33
984	328	119,83	222,28
987	329	114,99	220,25
990	330	110,24	218,31
993	331	105,57	216,35
996	332	101,01	214,46
999	333	96,55	212,6
1002	334	92,19	210,8
1005	335	87,95	209,04
1008	336	83,83	207,33
1011	337	79,84	205,68
1014	338	75,97	204,08
1017	339	72,24	202,54
1020	340	68,65	201,05
1023	341	65,2	199,63
1026	342	61,9	198,27
1029	343	58,76	196,97
1032	344	55,77	195,74
1035	345	52,94	194,57
1038	346	50,28	193,48
1041	347	47,78	192,45
1044	348	45,46	191,49
1047	349	43,31	190,61
1050	350	41,34	189,8
1053	351	39,55	189,06
1056	352	37,94	188,4
1059	353	36,51	187,81
1062	354	35,28	187,3
1065	355	34,23	186,87

Motor modelinin toplam hacim ve yüzey alanı değerleri (devam)

KRANK AÇISI(°)	ROTOR AÇISI (°)	HACİM(cm ³)	ALAN(cm ²)
1068	356	33,37	186,51
1071	357	32,7	186,23
1074	358	32,2	186,02
1077	359	31,92	185,9
1080	360-0	31,85	185,84
3	1	31,92	185,9
6	2	32,2	186,02
9	3	32,7	186,23
12	4	33,37	186,51
15	5	34,23	186,87
18	6	35,28	187,3
21	7	36,51	187,81
24	8	37,94	188,4
27	9	39,55	189,06
30	10	41,34	189,8
33	11	43,31	190,61
36	12	45,46	191,49
39	13	47,78	192,45
42	14	50,28	193,48
45	15	52,94	194,57
48	16	55,77	195,74
51	17	58,76	196,97
54	18	61,9	198,27
57	19	65,2	199,63
60	20	68,65	201,05
63	21	72,24	202,54
66	22	75,97	204,08
69	23	79,84	205,68
72	24	83,83	207,33
75	25	87,95	209,04
78	26	92,19	210,8
81	27	96,55	212,6
84	28	101,01	214,46
87	29	105,57	216,35
90	30	110,24	218,31

Motor modelinin toplam hacim ve yüzey alanı değerleri (devam)

KRANK AÇISI(°)	ROTOR AÇISI (°)	HACİM(cm ³)	ALAN(cm ²)
93	31	114,99	220,25
96	32	119,83	222,28
99	33	124,75	224,33
102	34	129,74	226,41
105	35	134,8	228,52
108	36	139,93	230,66
111	37	145,1	232,81
114	38	150,33	234,99
117	39	155,6	237,19
120	40	160,9	239,4
123	41	166,23	241,62
126	42	171,86	243,86
129	43	176,96	246,1
132	44	182,35	248,34
135	45	187,74	250,59
138	46	193,12	252,85
141	47	198,53	254,69
144	48	203,88	256,99
147	49	209,2	259,29
150	50	214,5	261,59
153	51	219,76	263,88
156	52	224,97	266,15
159	53	230,13	268,41
162	54	235,24	270,66
165	55	240,28	272,87
168	56	245,28	275,3
171	57	250,19	277,45
174	58	255,02	279,56
177	59	259,76	281,64
180	60	264,4	283,67
183	61	268,96	285,71
186	62	273,41	287,65
189	63	277,75	289,57
192	64	281,99	291,44
195	65	286,1	293,26

Motor modelinin toplam hacim ve yüzey alanı değerleri (devam)

KRANK AÇISI(°)	ROTOR AÇISI (°)	HACİM(cm ³)	ALAN(cm ²)
198	66	290,1	295,03
201	67	293,97	296,74
204	68	297,71	298,4
207	69	301,31	300,01
210	70	304,78	301,55
213	71	308,1	303,03
216	72	311,28	304,18
219	73	314,31	305,81

EK 2 Birim zamandaki ısı akışı ve ısı transfer katsayısı tablosu

Krank pozisyon aralığı (°) 1050 - 0		
Zaman(t)	Isı akışı (W/mm2)	Isı transfer katsayısı (W/mm2K)
8,31E-05	5,23E+04	4,34E+02
1,66E-04	5,61E+04	4,45E+02
2,49E-04	6,19E+04	4,69E+02
3,32E-04	7,49E+04	4,89E+02
4,16E-04	8,92E+04	5,16E+02
4,99E-04	1,25E+05	5,74E+02
5,82E-04	1,63E+05	6,28E+02
6,65E-04	2,52E+05	7,36E+02
7,48E-04	3,38E+05	8,28E+02
8,33E-04	5,16E+05	9,90E+02
Krank pozisyon aralığı (°) 0 - 30		
Zaman(t)	Isı akışı (W/mm2)	Isı transfer katsayısı (W/mm2K)
8,31E-05	6,71E+05	1,11E+03
1,66E-04	9,50E+05	1,30E+03
2,49E-04	1,16E+06	1,43E+03
3,32E-04	1,50E+06	1,60E+03
4,16E-04	1,85E+06	1,74E+03
4,99E-04	2,07E+06	1,81E+03
5,82E-04	2,36E+06	1,87E+03
6,65E-04	2,52E+06	1,89E+03
7,48E-04	2,68E+06	1,87E+03
8,33E-04	2,75E+06	1,84E+03
Krank pozisyon aralığı (°) 30 - 60		
Zaman(t)	Isı akışı (W/mm2)	Isı transfer katsayısı (W/mm2K)
8,31E-05	2,76E+06	1,75E+03
1,66E-04	2,68E+06	1,69E+03
2,49E-04	2,59E+06	1,58E+03
3,32E-04	2,42E+06	1,46E+03
4,16E-04	2,29E+06	1,38E+03
4,99E-04	2,08E+06	1,27E+03
5,82E-04	1,88E+06	1,16E+03
6,65E-04	1,75E+06	1,09E+03
7,48E-04	1,57E+06	1,00E+03
8,33E-04	1,41E+06	9,16E+02

Birim zamandaki ısı akışı ve ısı transfer katsayısı tablosu (devam)

Krank pozisyon aralığı (°) 60 - 90		
Zaman(t)	Isı akışı (W/mm2)	Isı transfer katsayısı (W/mm2K)
8,31E-05	1,27E+06	8,41E+02
1,66E-04	1,18E+06	7,95E+02
2,49E-04	1,06E+06	7,33E+02
3,32E-04	9,62E+05	6,77E+02
4,16E-04	9,01E+05	6,43E+02
4,99E-04	8,19E+05	5,96E+02
5,82E-04	7,46E+05	5,55E+02
6,65E-04	7,03E+05	5,29E+02
7,48E-04	6,44E+05	4,94E+02
8,33E-04	5,91E+05	4,63E+02
Krank pozisyon aralığı (°) 90 - 120		
Zaman(t)	Isı akışı (W/mm2)	Isı transfer katsayısı (W/mm2K)
8,31E-05	5,45E+05	4,35E+02
1,66E-04	5,17E+05	4,17E+02
2,49E-04	4,78E+05	3,93E+02
3,32E-04	4,44E+05	3,17E+02
4,16E-04	4,13E+05	3,51E+02
4,99E-04	3,94E+05	3,39E+02
5,82E-04	3,68E+05	3,22E+02
6,65E-04	3,52E+05	3,11E+02
7,48E-04	3,30E+05	2,96E+02
8,33E-04	3,10E+05	2,83E+02
Krank pozisyon aralığı (°) 120 - 150		
Zaman(t)	Isı akışı (W/mm2)	Isı transfer katsayısı (W/mm2K)
8,31E-05	2,91E+05	2,74E+02
1,66E-04	2,80E+05	2,62E+02
2,49E-04	2,65E+05	2,51E+02
3,32E-04	2,55E+05	2,45E+02
4,16E-04	2,41E+05	2,35E+02
4,99E-04	2,33E+05	2,29E+02
5,82E-04	2,21E+05	2,21E+02
6,65E-04	2,11E+05	2,13E+02
7,48E-04	2,04E+05	2,08E+02
8,33E-04	1,95E+05	2,01E+02

Birim zamandaki ısı akışı ve ısı transfer katsayısı tablosu (devam)

Krank pozisyon aralığı (°) 150 - 180		
Zaman (t)	Isı akışı (W/mm2)	Isı transfer katsayısı (W/mm2K)
8,31E-05	1,89E+05	1,96E+02
1,66E-04	1,81E+05	1,90E+02
2,49E-04	1,76E+05	1,86E+02
3,32E-04	1,68E+05	1,81E+02
4,16E-04	1,64E+05	1,78E+02
4,99E-04	1,58E+05	1,73E+02
5,82E-04	1,54E+05	1,70E+02
6,65E-04	1,48E+05	1,65E+02
7,48E-04	1,45E+05	1,63E+02
8,33E-04	1,40E+05	1,59E+02
Krank pozisyon aralığı (°) 180 - 210		
Zaman (t)	Isı akışı (W/mm2)	Isı transfer katsayısı (W/mm2K)
8,31E-05	1,36E+05	1,56E+02
1,66E-04	1,33E+05	1,53E+02
2,49E-04	1,31E+05	1,51E+02
3,32E-04	1,27E+05	1,48E+02
4,16E-04	1,24E+05	1,46E+02
4,99E-04	1,22E+05	1,44E+02
5,82E-04	1,19E+05	1,42E+02
6,65E-04	1,17E+05	1,40E+02
7,48E-04	1,15E+05	1,38E+02
8,33E-04	1,12E+05	1,37E+02

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Bekir Tolga ALTIPARMAK
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa – 12.01.1993
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Meriç Anadolu Lisesi
Lisans : Manisa Celal Bayar Üniversitesi Makine Mühendisliği
Bölümü

Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği
A.B.D.

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : BAYKAL MAKİNE SANAYİ VE TİCARET A.Ş.

İletişim (e-posta) : btaltiparmak@gmail.com