



**SERBEST PİSTONLU DOĞRUSAL JENERATÖR
MOTORUNUN TASARIM VE ANALİZİ**

Burak DAŞKIN

**2022
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. M. Bahattin ÇELİK**

**SERBEST PİSTONLU DOĞRUSAL JENERATÖR MOTORUNUN
TASARIM VE ANALİZİ**

Burak DAŞKIN

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. M. Bahattin ÇELİK**

**KARABÜK
Ocak 2022**

Burak DAŞKIN tarafından hazırlanan “SERBEST PİSTONLU DOĞRUSAL JENERATÖR MOTORUNUN TASARIM VE ANALİZİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. M. Bahattin ÇELİK

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 31/01/2022

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Mehmet ŞEN (AİBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. M. Bahattin ÇELİK (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Samet USLU (KBÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Burak DAŞKIN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SERBEST PİSTONLU DOĞRUSAL JENERATÖR MOTORUNUN TASARIM VE ANALİZİ

Burak DAŞKIN

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. M. Bahattin ÇELİK

Ocak 2022, 70 sayfa

Gelişen otomotiv teknolojilerinde elektrikli araçlar ileri derece öneme sahip olmaktadır. Bunun sonucu olarak elektrik enerjisi ile çalışan motorlar, elektrik depolama teknolojileri, fosil yakıtları elektrik enerjisine çeviren sistemler (jeneratörler) büyük önem kazanmıştır. Bu bağlamda, serbest pistonlu doğrusal motor jeneratörleri oluşturulmuştur. Bu motor-jeneratör sistemleri, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine düşük kayıplarla çevirmektedir. Enerji dönüşümü, alışılmış jeneratör ve motorlardan farklı olarak, bakır bobin içerisinde doğrusal olarak hareket eden mıknatıslı piston yardımı ile mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirerek yapmaktadır. Sistemde krank-biyel gibi mekanizmaların yanı sıra birçok sistem elemanı kullanılmaya gerek duyulmadığından muadillerine göre daha hafif olmakla birlikte sürtünme sonucu ısı ile enerji kaybı daha az olmaktadır. Teorik olarak enerji dönüşümünde tasarruf sağlayan bu sistem çevreye salınan karbon monoksit (CO), karbondioksit (CO₂) ve diğer zararlı gazları en aza indirmeyi amaçlamaktadır.

Ayrıca içten yanmalı motorlar ve elektrikli motorlar arası geçişte kullanılan hibrit araçlar için enerji gereksinimini karşılamaktadır. Bu çalışmada serbest pistonlu bir doğrusal jeneratör motorunun tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan motorun bazı elemanlarının yapısal ve termal analizleri sonlu elemanlar metodu ile yapılmıştır. Analizler sonucunda yapısal ve termal bakımdan en uygun malzeme belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler : Serbest piston, içten yanmalı motor, doğrusal jeneratör, enerji dönüşümü, elektrikli ve hibrit araçlar.

Bilim Kodu : 91435

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

DESIGN AND ANALYSIS OF FREE PISTON LINEAR GENERATOR ENGINE

Burak DAŞKIN

**Karabuk University
Institute of Graduate Programs
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisor:

Prof. Dr. M. Bahattin ÇELİK

January 2022, 70 pages

In developing automotive technologies, electric vehicles have advanced importance. As a result of this, engines working with electrical energy, electricity storage technologies, convert fossil fuels to electrical energy systems (generators) have gained great importance. In this regard, free-piston linear engine-generators were created. These engine-generator systems convert mechanical energy into electrical energy with low losses. Unlike conventional generators and motors, energy conversion is done by converting mechanical energy into electrical energy with the help of a magnetic piston moving linearly in a copper coil. Since there is no need to use many system elements in addition to mechanisms such as crank-connecting rod in the system, it is lighter than its equivalents. Also, the loss of heat and energy as a result of friction is less than conventional generators. This system, which theoretically saves in energy conversion, aims to minimize carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO₂) and other harmful gases released into the environment. It also meets the energy requirement for hybrid

vehicles used in the transition between internal combustion engines and electric motors. In this study, a free piston linear generator engine was designed. Structural and thermal analyzes of some elements of the designed engine were made by the finite element method. As a result of the analysis, the most suitable material was determined in terms of structural and thermal aspects.

Keywords : Free piston, internal combustion engine, linear generator, energy conversion, electric and hybrid vehicles.

Science Code : 91435

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıŐmasının yűrűtűlmesinde ve oluŐumunda ilgi ve desteęini esirgemeyen, bilgi ve engin tecrűbelerinden yararlandıęım, yűnlendirmeler ve bilgilendirmeleriyle çalıŐmamı bilimsel temeller yolunda űkillendiren sayın hocam Prof. Dr. Mustafa Bahattin ÇELİK'e sonsuz teŐekkűrlerimi sunarım.

Desteklerini esirgemeyen aileme ve tecrűbelerinden faydalandıęım dostlarıma yanımda oldukları için tűm kalbimle teŐekkűr ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	3
BÖLÜM 3	6
İÇTEN YANMALI VE SERBEST PİSTONLU MOTORLAR	6
3.1. İÇTEN YANMALI MOTORLAR.....	6
3.1.1. İçten Yanmalı Motorların Silindir Tiplerine Göre Sınıflandırılması.....	7
3.2. SERBEST PİSTONLU MOTORLAR	9
3.3. SERBEST PİSTONLU MOTORLARIN TARİHSEL GELİŞİMİ	11
BÖLÜM 4	18
ELEKTRİKLİ VE HİBRİT ARAÇLAR.....	18
4.1. ELEKTRİKLİ OTOMOBİL TÜRLERİ.....	18
4.1.1. Tamamen Elektrikli Araçlar (BEV).....	18
4.1.2. Hibrit Araçlar (HEV).....	20
4.1.2.1. Hafif Hibrit Araçlar (MHEV)	20

	<u>Sayfa</u>
4.1.2.2. Şarj Edilebilir Hibrit Araçlar (PHEV)	21
4.1.3. Yakıt Hücreli Araçlar (FCEV).....	22
BÖLÜM 5	24
OTOMOBİL ÜRETİCİLERİNİN SERBEST PİSTONLU MOTOR ALANINDAKİ ÇALIŞMALARI	24
5.1. GENERAL MOTORS.....	24
5.2. TOYOTA.....	25
5.3. VOLVO	25
5.4. FORD	26
5.5. HONDA.....	26
5.6. MAZDA	27
BÖLÜM 6	29
SERBEST PİSTONLU DOĞRUSAL JENERATÖR MOTOR TASARIMI VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ.....	29
6.1. SERBEST PİSTONLU DOĞRUSAL JENERATÖR MOTOR TASARIMI 30	
6.1.1. Silindir (Ana Gövde)	30
6.1.2. Piston	32
6.1.3. Silindir Kapağı.....	36
6.2. JENERATÖR MOTOR PARÇALARININ TERMAL ANALİZİ	38
6.2.1. Analiz İçin Sınır Şartları Belirlenmesi	39
6.2.2. A390.0-T6 Malzeme İçin Termal Analiz Sonuçları.....	41
6.2.3. EN AC 47000 Malzeme İçin Termal Analiz Sonuçları.....	44
6.3. JENERATÖR MOTOR PARÇALARININ YAPISAL ANALİZİ.....	48
6.3.1. Analiz İçin Sınır Şartlarının Belirlenmesi	48
6.3.2. A390.0-T6 Malzeme İçin Yapısal Analiz Sonuçları	49
6.3.3. EN AC 47000 Malzeme İçin Yapısal Analiz Sonuçları	55
BÖLÜM 7	60
TASARIMSAL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	60

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 8	63
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	70

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Sallamalı el feneri.	3
Şekil 3.2. Çeşitli konfigürasyonlara sahip serbest pistonlu motorlar.	10
Şekil 3.4. Noack Freudenreich'in tasarımı.	11
Şekil 3.5. Pontus Ostenberg'in karşıt pistonlu tasarımı.	12
Şekil 3.6. Ralph James serbest pistonlu doğrusal jeneratör tasarımı.	13
Şekil 3.7. Stirling A. Colgate'in karşıt pistonlu serbest doğrusal alternatör.	14
Şekil 3.8. Galileo tasarımı doğrusal alternatörü.	14
Şekil 3.9. West Virginia Üniversitesi, çalışmayan prototipi.	15
Şekil 3.10. Sandia Ulusal Laboratuvarları 1998 tasarımı.	15
Şekil 3.11. Sandia Ulusal Laboratuvarları 2011 tasarımı.	16
Şekil 3.12. DLR'nin tek etkili geri tepmeli motor tasarımı.	16
Şekil 3.13. Volvo'nun 2004 dönüştürücü tasarımı.	17
Şekil 3.14. Volvo'nun 2011 dönüştürücü tasarımı.	17
Şekil 3.15. Toyota Araştırma Laboratuvarları tasarımı.	17
Şekil 4.1. Tamamen elektrikli aracın (BEV) temel elemanlarının gösterimi.	19
Şekil 4.2. Hafif hibrit aracın (MHEV) temel elemanlarının gösterimi.	21
Şekil 4.3. Şarj edilebilir hibrit aracın (PHEV) temel elemanlarının gösterimi.	22
Şekil 4.4. Yakıt hücreli aracın (FCEV) temel elemanlarının gösterimi.	23
Şekil 5.1. Karşıt ve serbest pistonlu doğrusal alternatör (FPLA).	24
Şekil 5.2. Serbest çift pistonlu motor jeneratörü.	25
Şekil 5.3. Deney düzeneğinin ana bölüm a) dikey kesit, b) yatay kesit.	26
Şekil 5.4. Tek silindiri, dört zamanlı serbest pistonlu jeneratör konsepti.	27
Şekil 5.5. Mazda tarafından tasarlanmış çift serbest pistonlu motor konsepti.	28
Şekil 6.1. Jeneratör motorunun parçaları.	30
Şekil 6.2. Silindirin üç boyutlu işlenmiş tasarımı.	31
Şekil 6.3. Silindirin üç boyutlu işlenmiş tasarımının kesit görünümü.	32
Şekil 6.4. Malzeme sıcaklığı ve gerilme dayanımı karşılaştırma grafiği.	33
Şekil 6.5. Dört zamanlı motorlarda hafif metal malzemeli piston sıcaklık dağılımı.	35
Şekil 6.6. Pistonun üç boyutlu işlenmiş tasarımı.	36

Şekil 6.7. Silindir kapağı üç boyutlu işlenmiş tasarımı.....	37
Şekil 6.8. Modelin mesh (çözüm ağı) yapısı.....	38
Şekil 6.9. Tanımlanan sınır şartı yüzeyleri.....	40
Şekil 6.10. Toplam sıcaklık dağılımı.	41
Şekil 6.11. Toplam ısı akısı dağılımı.	42
Şekil 6.12. Piston üst yüzeyine gelen sıcaklık dağılımı.	42
Şekil 6.13. Piston yanal yüzeyine gelen sıcaklık dağılımı.	43
Şekil 6.14. Silindir hacmi sıcaklık dağılımı.	43
Şekil 6.15. Silindir kapağı sıcaklık dağılımı.	44
Şekil 6.16. Toplam sıcaklık dağılımı.	45
Şekil 6.17. Toplam ısı akısı dağılımı.	45
Şekil 6.18. Piston üst yüzeyine gelen sıcaklık dağılımı.	46
Şekil 6.19. Piston yanal yüzeyine gelen sıcaklık dağılımı.	46
Şekil 6.20. Silindir hacmi sıcaklık dağılımı.	47
Şekil 6.21. Silindir kapağı sıcaklık dağılımı.	47
Şekil 6.22. Yapısal analiz için sınır şartları tanımlanan yüzeyler.	48
Şekil 6.23. Jeneratör motorunda meydana gelen eşdeğer gerilmeler.....	50
Şekil 6.24. Pistonda meydana gelen eşdeğer gerilmeler-1.....	50
Şekil 6.25. Pistonda meydana gelen eşdeğer gerilmeler-2.....	51
Şekil 6.26. Pistonda meydana gelen eşdeğer gerilmeler-3.....	51
Şekil 6.27. Silindirde meydana gelen maksimum temel gerilmeler.....	52
Şekil 6.28. Pistonda meydana gelen maksimum temel gerilmeler.....	52
Şekil 6.29. Eşdeğer elastik gerininin silindir için sonuçları.....	53
Şekil 6.30. Eşdeğer elastik gerininin piston için sonuçları.	53
Şekil 6.31. Silindir için maksimum temel elastik gerinim sonuçları.	54
Şekil 6.32. Piston için maksimum temel elastik gerinim sonuçları.	54
Şekil 6.33. Jeneratör motorunda meydana gelen eşdeğer gerilmeler.....	55
Şekil 6.34. Pistonda meydana gelen eşdeğer gerilmeler-1.....	55
Şekil 6.35. Pistonda meydana gelen eşdeğer gerilmeler-2.....	56
Şekil 6.36. Pistonda meydana gelen eşdeğer gerilmeler-3.....	56
Şekil 6.37. Silindirde meydana gelen maksimum temel gerilmeler.....	57
Şekil 6.38. Pistonda meydana gelen maksimum temel gerilmeler.....	57
Şekil 6.39. Eşdeğer elastik gerininin silindir için sonuçları.....	58

	<u>Sayfa</u>
Şekil 6.40. Eşdeğer elastik gerinimin piston için sonuçları.	58
Şekil 6.41. Silindir için maksimum temel elastik gerinim sonuçları.	59
Şekil 6.42. Piston için maksimum temel elastik gerinim sonuçları.	59
Şekil 7.1. Piston malzemeleri için sıcaklık kıyaslaması.	60
Şekil 7.2. Piston malzemeleri için gerilme grafiği.	62

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 6.1. Jeneratör motorunun teknik özellikleri.	29
Çizelge 6.2. Jeneratör motorunun parçaları ve malzemeleri.....	30
Çizelge 6.3. En yaygın kullanılan piston alaşım malzemeleri	33
Çizelge 6.4. A390.0-T6 ve EN AC 47000 malzemelerinin kimyasal bileşimi.	34
Çizelge 6.5. Modelin mesh (çözüm ağı) istatistikleri.	38
Çizelge 6.6. Kullanılacak malzeme özellikleri.	39
Çizelge 6.7. Jeneratör motor modeline tanımlanan sınır şartları.	40
Çizelge 6.8. Jeneratör motorunun ısı akısı ve sıcaklık analiz sonuçları.....	41
Çizelge 6.9. Jeneratör motorunun ısı akısı ve sıcaklık analiz sonuçları.....	44
Çizelge 7.1. A390.0-T6 ve EN AC 47000 termal değerleri.....	60
Çizelge 7.2. A390.0-T6 ve EN AC 47000 yapısal değerleri.....	61

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

CO₂ : karbondioksit

ZrO₂ : zirconia

AlSi : alüminyum-silisyum alaşımları

Al : alüminyum

Si : silisyum

Fe : demir

Cu : bakır

Mn : mangan

Mg : magnezyum

Zn : çinko

Ni : nikel

Ti : titanyum

σ_w : maksimum gerilme

σ_y : akma dayanımı

CO : karbon monoksit

σ : normal gerilme

KISALTMALAR

AR-GE: Araştırma ve Geliştirme

DLR : Alman Ulusal Havacılık ve Uzay Araştırmaları Merkezi

ÜÖN : Üst Ölü Nokta

SPLM : Serbest Pistonlu Lineer Motor

FPLA : Free Piston Linear Alternator (Serbest Pistonlu Doğrusal Alternatör)

BEV : Battery Electric Vehicles (Tamamen Elektrikli Araçlar)

HEV : Hybrid Electric Vehicles (Hibrit Elektrikli Araçlar)

MHEV: Mild-Hybrid Electric Vehicles (Hafif Hibrit Araçlar)

PHEV : Plug-In Hybrid Electric Vehicles (Şarj Edilebilir Hibrit Araçlar)

FCEV : Fuel-Cell Electric Vehicles (Yakıt Hücreli Araçlar)

GM : General Motors Şirketi

KTH : Kraliyet Teknoloji Enstitüsü

CAD : Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)

SAE : Society of Automotive Engineers (Amerikan Otomotiv Mühendisleri Birliği)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Fosil yakıtların hem deniz hem de kara taşımacılığı için önemli bir enerji kaynağı olarak yaygın kullanımı, ciddi miktarlarda CO₂ ve diğer kirleticilerin üretilmesine yol açmaktadır. Özellikle otomotiv endüstrisinde daha çevre dostu yakıt teknolojileri geliştirmek için pek çok araştırma yapılmaktadır. Gelecek için umut vaat edici bir teknoloji olarak öne çıkan yakıt hücreli araçlar, verimlilik konusunda üstün olmasına rağmen bu tür radikal teknoloji değişiklikleri uygulamaya geçirme konusunda büyük engellerle karşılaşmaktadır. Ve henüz geleneksel teknolojilerden üstün olmayan bir aşamadalardır [1]. Geleneksel içten yanmalı motorlarla çalışan hibrit elektrikli araçlar kısa zamanda önemli ölçüde emisyonların azaltılması potansiyeline sahiptir ve uygulama açısından oldukça verimlidir.

Serbest pistonlu motorlar 20. yüzyılın başlarında icat edilmeye başlanmıştır. Bu motorlar icat edildiği dönemde çok fazla ilgi görememiştir ve ancak yakın gelecekte elektrikli ve hibrit otomobillere olan ilginin artması, bu teknolojiyi geliştirmek için otomobil üreticileri ve araştırma gruplarını bu alana yöneltmiştir. Geleneksel içten yanmalı motorlara ve jeneratörlere kıyasla, bu sistemler daha az sistem bileşenine sahiptir. Bu sebeple sistemin hafif olması ve daha az sürtünme kayıpları gibi özellikleri öne çıkmaktadır. Silindir içinde hareket eden piston herhangi bir krank-biyel mekanizmasına bağlı olmadığı için “serbest piston” adını almaktadır.

Bu çalışmanın amacı, serbest pistonlu doğrusal jeneratör motorunun geçmişten günümüze gelişimi, çalışma mantığı, kullanım alanları, önde gelen otomotiv firmalarının ve Ar-Ge ekiplerinin bu alana katkıları ve bunlara uygun olarak tasarlanan bir sistemin Sonlu Elemanlar Metodu ile analizini gerçekleştirmektir.

Hazırlanan bu çalışma, genel itibarıyla literatür taraması ile elektrikli araçların türlerinin tanıtılması, serbest pistonlu motorlar ve önemli otomotiv üreticilerinin bu konudaki çalışmaları, nihai tasarımın analizi ve sonuçların değerlendirilmesi olmak üzere dört kısımdan oluşmaktadır. Bu kısımlar farklı bölümler ve başlıklar altında ele alınacaktır. Birinci bölüm “Giriş” bölümü olup burada kısa bir özete yer verilmiş ve konuya giriş yapılmıştır. İkinci bölümde, konunun literatür çalışması verilmiştir. Üçüncü bölümde, bu çalışmayı da içine alan içten yanmalı motorlar ve serbest pistonlu motorlar hakkında detaylı bir anlatım yapılmıştır. Dördüncü bölümde elektrikli ve hibrit araçların türleri hakkında bilgiler verilmiştir. Beşinci bölümde önde gelen otomobil üreticilerinin bu alana yaptıkları katkıları ve patentlerine değinilmiştir

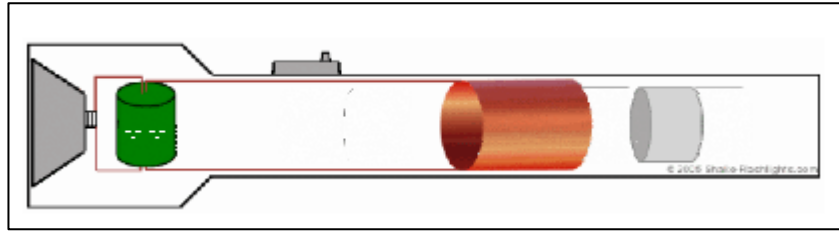
Altıncı bölümde, önceki yapılan çalışmalar da ele alınarak tasarlanan serbest pistonlu jeneratör motoru tanıtılmıştır. Yapılan tasarım için seçilen malzeme özellikleri verilmiş, tasarımın yapısal ve termal dayanımları literatürdeki verilere göre, sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Analiz sonuçları bu bölümde paylaşılmıştır.

Çalışmanın yedinci bölümünde, elde edilen tasarımsal analiz sonuçları literatüre uygun bir şekilde yorumlanmış ve kıyaslanmıştır. Sekizinci ve son bölümde, sonuçlar değerlendirilmiş, gelecekte bu konuyu çalışmak isteyen araştırmacılar için öneriler sunulmuş ve çalışma sonuçlandırılmıştır.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Serbest pistonlu doğrusal jeneratör motorları konusunda bazı çalışmalar yapılmıştır. En basit doğrusal jeneratör tipi sallamalı el feneridir (Şekil 2.1). Bu, bir bobin ve bir kalıcı mıknatıs içeren elektrikli el feneridir. Cihaz ileri geri sallandığında, mıknatıs bakır bobin boyunca salınım yapar ve bir elektrik akımı indükler. Bu akım, daha sonra bir LED lambayı daha uzun süre güçle besleyecek bir kapasitörü şarj etmek için kullanır.



Şekil 2.1. Sallamalı el feneri.

Serbest pistonlu motorun doğrusal bir alternatörle birlikteki basit yapısı, (teorik olarak) bir güç jeneratörünün mümkün olan en basit yapısını temsil etmektedir. İlk modern serbest pistonlu motor Pescara'nın 1922'de önerdiği tek pistonlu bir hava kompresörüdür ve o zamandan beri bir dizi serbest pistonlu tasarımlar önerilmiştir [2]. Bunların ortak özelliği, piston hareketinin, geleneksel motorlardan bilindiği gibi dönen bir krank milinin hareketi ile sınırlandırılmamasıdır. Ancak pistonun silindir içinde hareket etmekte serbest olması, sadece üzerine etki eden gaz ve yük kuvvetlerinden etkilenmesidir. Bu, serbest pistonlu motora bazı belirgin özellikler, en önemlisi değişken strok uzunluğu ve yüksek kontrol gereksinimleri vermektedir.

Alman şirketi Junkers tarafından geliştirilen serbest pistonlu hava kompresörleri, 2. Dünya Savaşı sırasında Alman donanması tarafından kullanılmış ve torpidoların fırlatılması için basınçlı hava sağlamıştır [3]. 1940'larda, serbest pistonlu motorlar, bir güç türbinine sıcak gaz pompalayan gaz jeneratörleri olarak kullanım yeri bulmuştur. Bu konsept deniz ve sabit güç santrallerinde kullanılmıştır.

Ford ve General Motors, daha sonra ana taşıyıcı olarak küçük ölçekli serbest pistonlu gaz jeneratörlerine sahip prototip araçlar geliştirmişlerdir, ancak bunların hiçbiri prototip aşamasını geçememiştir [4,5]. Hem geleneksel motorların hem de gaz türbinlerinin teknolojisi olgunlaştıkça, 1960'ların başında serbest pistonlu motora olan ilgi ortadan kalkmıştır.

Mikroişlemci tabanlı kontrol yöntemlerinin geliştirilmesi ile birlikte, serbest pistonlu motorlar, motor emisyonlarını azaltmak ve verimliliği artırmak isteyen günümüz mühendisleri arasında yeniden ilgi görmüştür.

2000 yılında, Hollandalı NOAX ve Innas BV şirketleri tarafından CHIRON isiminde, hidrolik serbest pistonlu bir motor geliştirilmiştir. CHIRON'da yanma sürecinin enerjisi neredeyse doğrudan hidrolik enerjiye dönüştürülür, enjeksiyon parametreleri, ve sıkıştırma oranı doğrudan elektronik kontrole sahiptir. Akış çıkışı, piston frekansının Darbe Duraklatma Modülasyonu aracılığıyla kontrol edilmiştir. CHIRON, ortak basınçlı ray sistemlerinde uygulama için tasarlanmıştır. Bu sistemlerde hidrolik enerji ortak bir ray üzerinden sağlanmaktadır. Bu çalışmada, hâlâ yapılması gereken çok iş olmasına rağmen, mevcut krank mili motorlarının ve hidrolik pompaların mekanik karmaşıklığından kaçınmanın ve ekstra elektronik kontrol olanaklarına sahip yeni bir hidrolik ünite inşa etmenin mümkün olduğu kanıtlanmıştır [6].

2001'de West Virginia Üniversitesi ve General Motors'dan bir grup araştırmacı, hibrit elektrikli araç için (HEV) yardımcı güç ünitesi olarak kullanılacak, serbest pistonlu bir motor ve lineer alternatör kombinasyonu tasarlamışlardır. Motor ve lineer alternatörün entegre modellerini geliştirmişler ve sistem parametrelerini değiştirirken elektrik güç çıkışını simüle etmişlerdir. Ayrıca çıkış voltajı ve güç gereksinimlerini en iyi karşılayan tasarımı seçmek için bir optimizasyon yöntemi sunmuşlardır [7].

2003'te Cosic vd. [8] geleneksel bir yanmalı motor ve bir serbest pistonlu doğrusal motor kullanan 12 tonluk bir HEV kamyonunun toplam verimliliğini karşılaştırmışlardır. Geleneksel yanmalı motorun, bir serbest pistonlu doğrusal motor ile değiştirilmesinin, sistemin toplam verimliliğini %25 oranında artırdığını bulmuşlardır.

2006'da Hansson vd. [9] geleneksel dizel jeneratöre kıyasla orta büyüklükteki bir hibrit elektrikli araçta (HEV) bir serbest pistonlu doğrusal motor kullanarak elde edilen performans kazancını araştırmışlardır. Araştırma sonucunda yakıt tüketiminde %19'a varan potansiyel bir düşüş tespit etmişlerdir.

2012'de bir simülasyon çalışmasında, Huang, hibrit elektrikli araçlar (HEV) için bir karşıt ve serbest pistonlu doğrusal motor geliştirmiştir. Simülasyon sonuçları, yeni tasarlanan serbest pistonlu motorun uygulanabilir olduğunu ve %42,5 üretim verimliliği ile 15 kW ortalama elektrik güç çıkışı elde edebileceğini göstermiştir [10].

BÖLÜM 3

İÇTEN YANMALI VE SERBEST PİSTONLU MOTORLAR

3.1. İÇTEN YANMALI MOTORLAR

Bir enerji türünü (kimyasal, elektrik, benzin, LPG, hidrojen vb.) mekanik enerjiye dönüştürmeye yarayan makinelere “motor” denilmektedir. Motorlar, yanma olayının gerçekleştiği konuma göre içten yanmalı veya dıştan yanmalı motorlar olarak ikiye ayrılır. İçten yanmalı motorlarda yanma olayı motorun içinde meydana gelmektedir. İçten yanmalı motorların bilinen ilk örneklerinden birisi, metalik silindir içerisinde sadece bir pistondan oluşan basit bir düzenektir. Bu düzenek Paris’te 1673 yılında Hollandalı fizikçi ve matematikçi olan Christiaan Huygens ve onun asistanı Fransız Denis Papin’in çalışmaları sonucu geliştirilmiştir. Daha sonraları Belçika asıllı mühendis J.J. Étienne Lenoir gaz yağı ile çalışan “Genleşmiş havalı ve gazlı motor” isminde içten yanmalı iki zamanlı bir motor patentini 1859 yılında almıştır. Bundan bir yıl sonra 1860 yılında ilk defa elektrik ateşlemeli ve su soğutmalı içten yanmalı motoru geliştirmiştir.

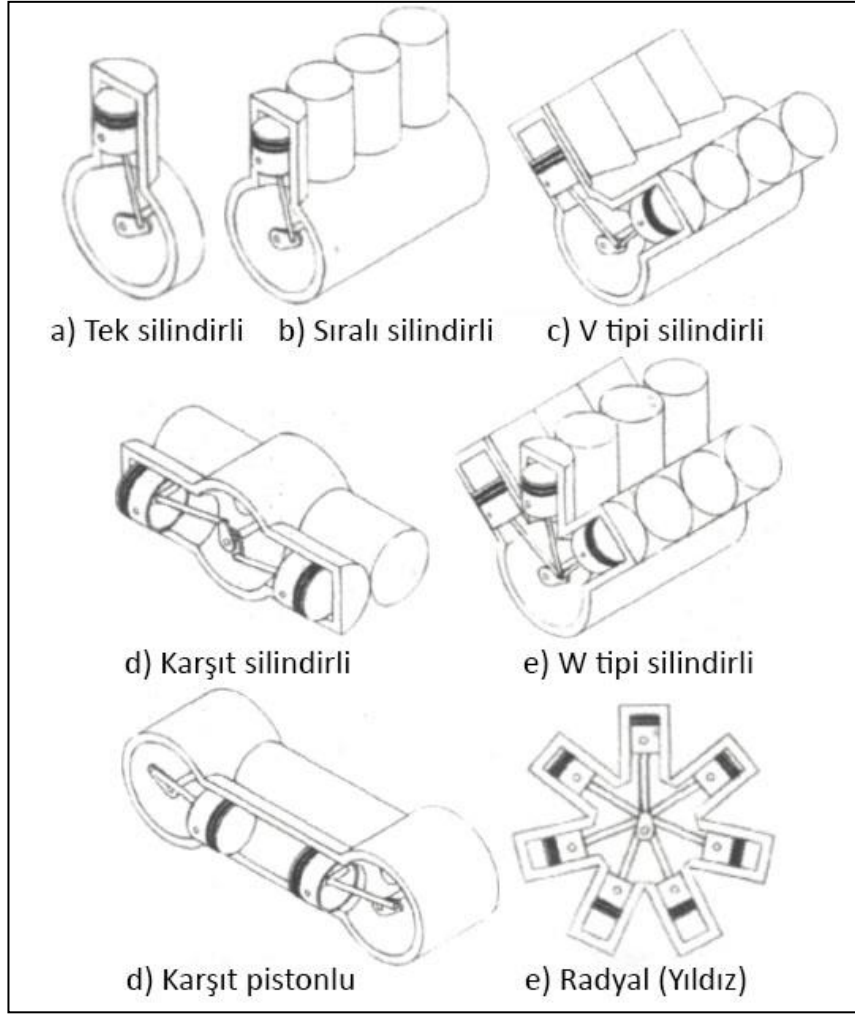
İçten yanmalı motorlar kullandığı yakıt türüne göre (benzinli, dizel vb.) adlandırılabilir. Belirli oranlarda yakıt ve hava, karbüratör adı verilen sistem yardımı ile karıştırılarak silindir içerisindeki yanma odasına gönderilir. Benzinli motorlarda karışım silindir içerisindeki piston tarafından sıkıştırılır ve buji ile ateşleme sağlanır. Dizel motorlarda ise buji yerine yüksek basınç ile ateşleme sağlanır. Reaksiyon sonucu karbonmonoksit (CO) ve karbondioksit (CO₂)’e dönüşen karışım silindir içerisinde ısı ve yüksek hacim oluşturur. Bunun sonucunda biyel ile krank miline bağlı olan pistonlarda tepki oluşur, bu tepki krank milini döndürerek mekanik bir enerji elde edilmiş olur.

Günümüzde, içten yanmalı motorların büyük kısmı dört zamanlıdır. Pistonun konum ve işlevine göre dört zamanlı ifadesini almaktadır. Bunlar, emme, sıkıştırma, yanma ve egzoz olarak adlandırılır.

1. Emme: Pistonun aşağı doğru hareketi ile silindir içerisinde bir vakum oluşur ve emme valfi açılarak yakıt (benzin)-hava karışımı bu vakum ile silindir içerisine çekilir ve valf kapanır. Buna “emme zamanı” denir.
2. Sıkıştırma: Pistonun yukarı doğru hareketi ile karışım sıkıştırılır. Sıcaklığı ve basıncı artan karışım küçük bir hacme hapsolür. Buna “sıkıştırma zamanı” denir.
3. Yanma: Sıkışan, sıcaklık ve basıncı artan yakıt-hava karışımı buji yardımı ile ateşlenerek “yanma zamanı” meydana gelir. Araca hareket yetisi veren güç yanma zamanında üretilir.
4. Egzoz: Yanma sonrası silindir içinde oluşan artık gazlar, pistonun yukarı doğru hareketi ve egzoz valfinin açılması ile dışarı atılır. Buradan sonra çevrim emme zamanından tekrar başlar.

3.1.1. İçten Yanmalı Motorların Silindir Tiplerine Göre Sınıflandırılması

İçten yanmalı motorlar silindir tiplerine göre, tek silindirli motorlar, sıralı silindir motorlar, V tipi motorlar, karşı silindirli motorlar, W tipi motorlar, karşıt pistonlu motorlar ve yıldız (radyal) motorlar olmak üzere sınıflandırılmaktadırlar (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Silindir tiplerine göre sınıflandırma.

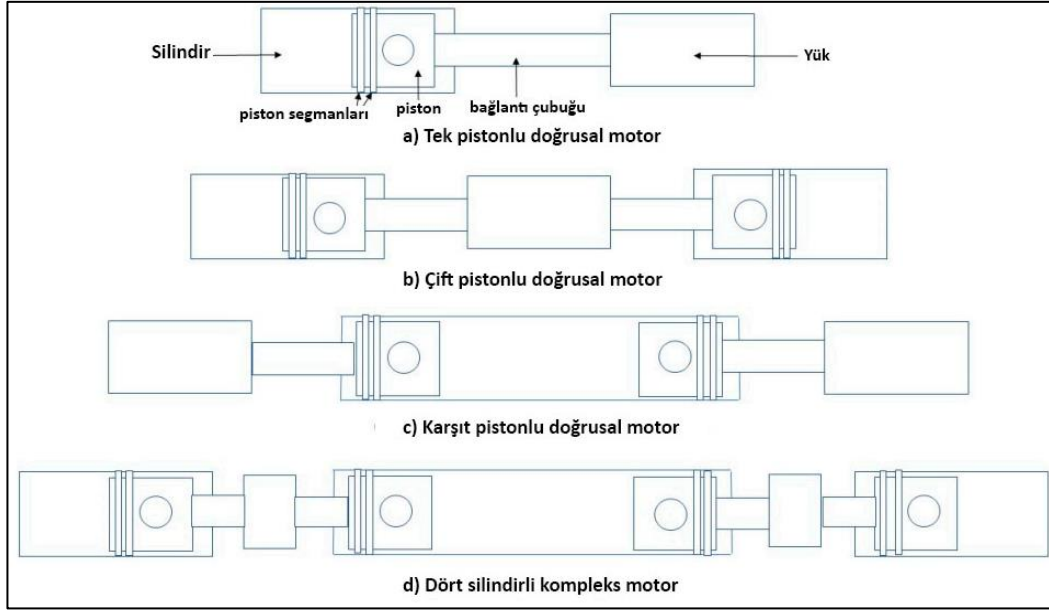
Taşımacılık, havacılık ve savunma sanayi gibi sektörlerde sık kullanılan bu çeşitler dışında bir de alışlagelmişin dışında serbest pistonlu motorlar geliştirilmiştir.

3.2. SERBEST PİSTONLU MOTORLAR

Genel olarak, krank mili mekanizmasına sahip bir içten yanmalı motorda, yanma işlemi üst ölü nokta (ÜÖN) konumuna yakın bir yerde gerçekleşir; bu sayede yüksek sıcaklık ve basınç nispeten uzun bir süre korunur. Bu nedenle ısı kaybı yüksek olur ve bu da motor verimini düşürür. Ayrıca krank mili mekanizmasına sahip içten yanmalı motorlar için sürtünme kayıpları da karmaşık motor yapısı nedeniyle bir problemdir. Piston segmanları ile silindir duvarı arasındaki sürtünme ve krank mili ile eksantrik mili yataklarındaki sürtünme sonucu enerji kayıpları meydana gelmektedir [11]. Bu dezavantajların üstesinden gelmek için araştırmacılar, serbest pistonlu motor adı verilen daha yeni bir tasarım geliştirdiler. Serbest pistonlu motor denmesinin sebebi ise krank-biyel gibi bir mekanizmaya gerek olmadan, pistonun silindir içerisinde serbest şekilde hareket etmesindedir.

İlk modern serbest pistonlu motor Pescara'nın önerdiği tek pistonlu bir hava kompresörüydü [12]. Pescara, 1922'de serbest pistonlu motorlar üzerinde çalışmaya başladı ve 1941'de çok kademeli bir serbest pistonlu hava kompresörü motorunun patentini aldı [13]. Bu çalışmalar üzerine birçok araştırmacı çeşitli teknolojilerde serbest pistonlu motorlar geliştirdi. Bunlardan birisi de geliştirme ve ticarileşme potansiyeli yüksek olan serbest pistonlu lineer motor (SPLM) teknolojisidir. Yapı açısından, SPLM'ler iki ana bileşen içerir: bir serbest pistonlu motor ve bir lineer alternatör. Lineer alternatör, kalıcı mıknatıslar ve sargılardan oluşur. Kalıcı mıknatıslar rotor veya statora tutturulabilir.

Bir elektrik jeneratörü olarak, serbest pistonlu motorun geleneksel krank mili motorlarına göre çeşitli potansiyel avantajları vardır. Mekanik olarak basittir, entegre jeneratör ve tek hareketli bileşen (serbest piston) nedeniyle kompakt bir tasarıma sahiptir. Şekil 3.2'de çeşitli konfigürasyonları gösterilmiştir.

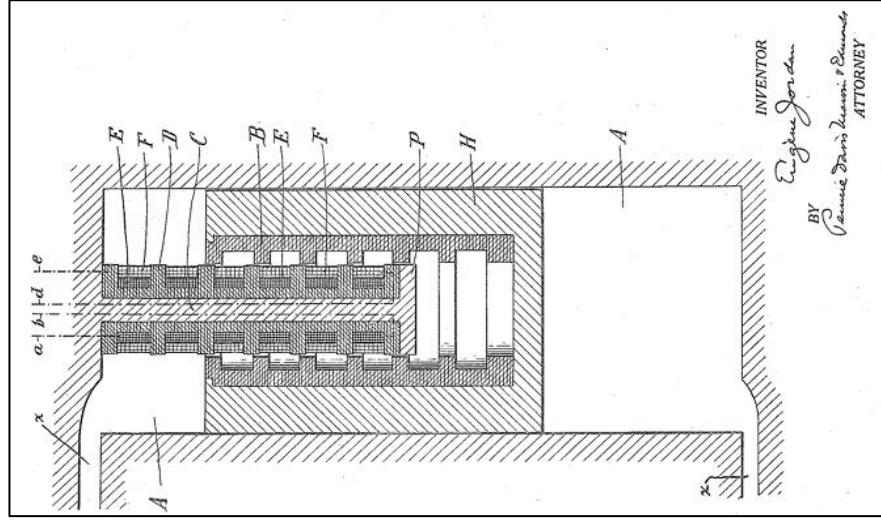


Şekil 3.2. Çeşitli konfigürasyonlara sahip serbest pistonlu motorlar [14].

Ayrıca, serbest pistonlu motorun optimum hız aralığında çalışmasını sağlayarak maksimum performans elde etmesine olanak veren değişken sıkıştırma oranları gerçekleştirilebilir. Bu avantajlar, hibrit elektrikli araç uygulamalarında emisyonları azaltmayı ve daha verimli güç üretimi sağlayan birincil motorlar geliştirilmesinin önünü açabilir [15]. Hibrit elektrikli araçlarda ve acil durumlar için elektrikli araçlarda menzil artırıcı görevi de görmektedir. Hibrit elektrikli araçlar, günümüzde içten yanmalı ve tamamen elektrikli araçlar arasında bir yere konumlandırılmaktadır.

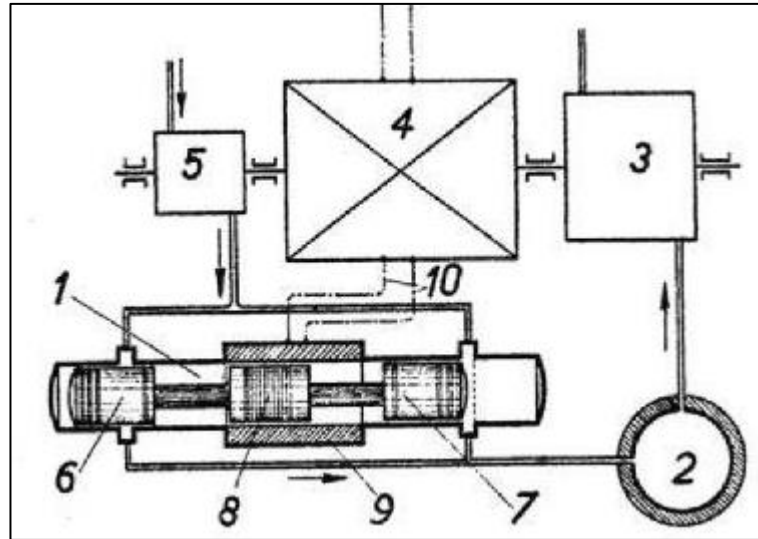
3.3. SERBEST PİSTONLU MOTORLARIN TARİHSEL GELİŞİMİ

1923'te Fransız Eugène Jordan, elektrik akım üreticini tasarladı (Şekil 3.3) [2].



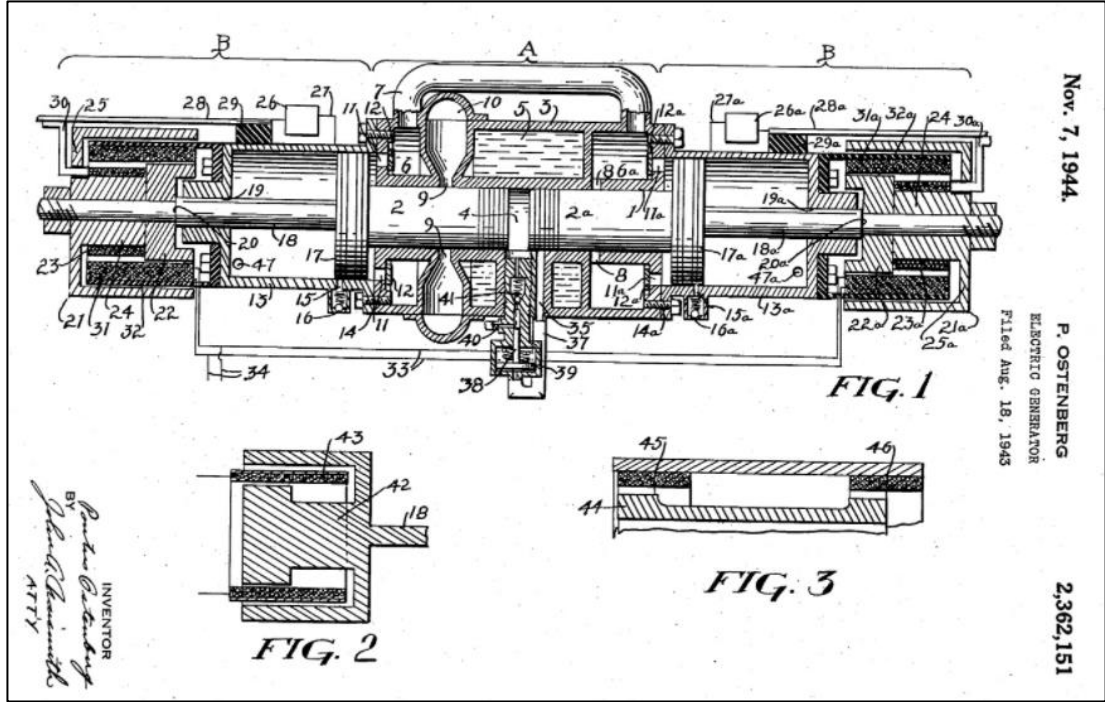
Şekil 3.3. Eugène Jordan'ın tasarladığı elektrik akım üretici [2].

1925'te İsviçreli Noack Freudenreich, doğrusal alternatörlü ve egzoz gazlarını tekrar kullanabilen bir motor önerisi sundu ancak bu asla gerçekleşmedi [2]. Şekil 3.4'te önerdiği sistem görülmektedir.



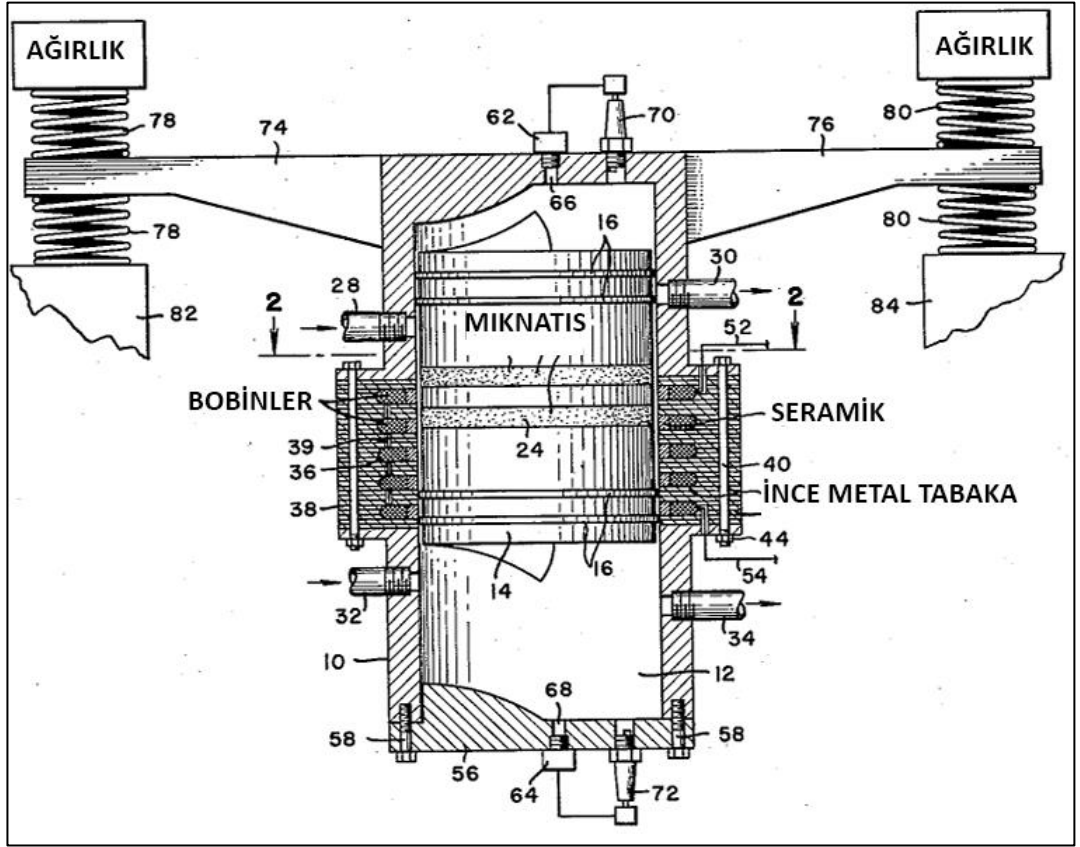
Şekil 3.4. Noack Freudenreich'in tasarımı [2].

1943'te Amerika'dan Pontus Ostenberg, doğrusal alternatörlere sahip, doğası gereği dengeli, bir karşıt pistonlu motor tasarımı gerçekleştirdi (Şekil 3.5) [2].



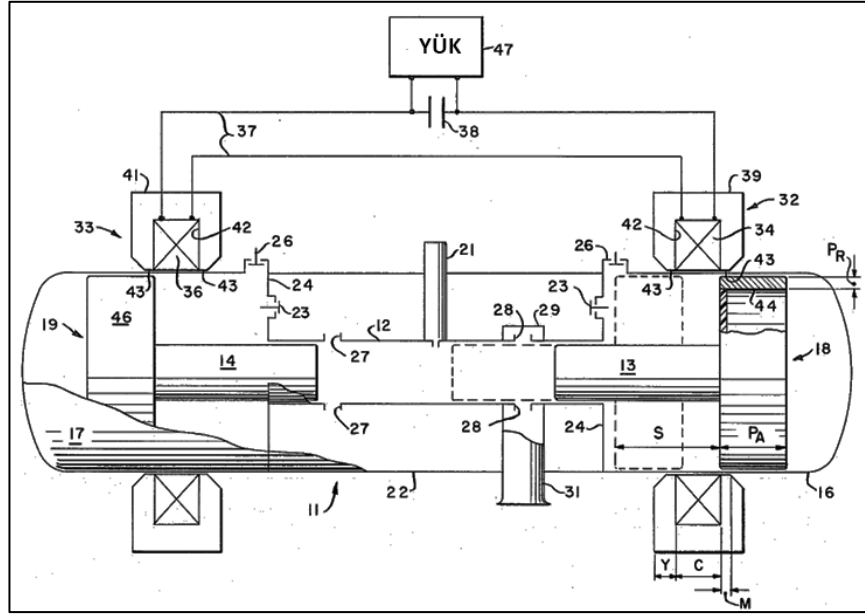
Şekil 3.5. Pontus Ostenberg'in karşıt pistonlu tasarımı [2].

1960'ta Amerikalı Ralph James, ESSO Araştırma ve Mühendislik Şirketi ile birlikte serbest pistonlu doğrusal jeneratör tasarladı ve patentini aldı (Şekil 3.6) [2]. Daha sonra Harold Kosoff, pistonların mekanik olarak değil pnömatik olarak senkronize edildiği karşıt bir pistonlu motor geliştirdi. 1964 gibi erken bir tarihte, arabaları çalıştıran ve evlere elektrik ve ısı sağlayan lineer bir jeneratör vizyonuna sahipti. Motor daha fazla geliştirilmedi.



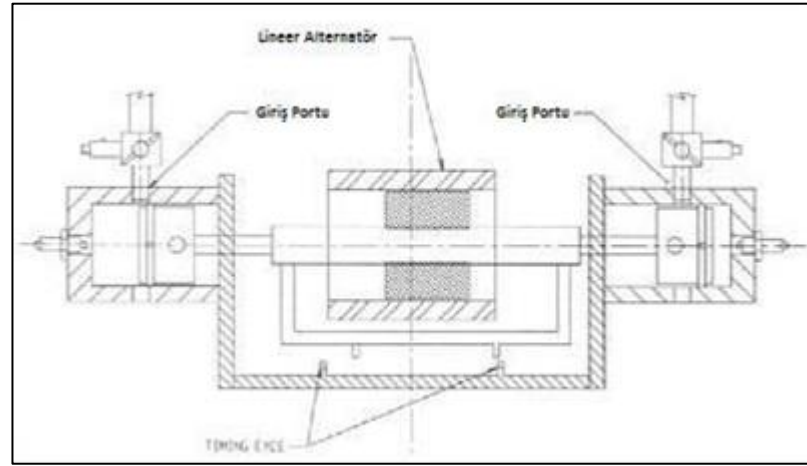
Şekil 3.6. Ralph James serbest pistonlu doğrusal jeneratör tasarımı [2].

1962’de Amerikalı Fizikçi Stirling Auchincloss Colgate, Pescara’nın tasarımından yola çıkarak Şekil 3.7’de ki karşıt pistonlu serbest doğrusal alternatörü tasarlamıştır [2].



Şekil 3.7. Stirling A. Colgate'in karışık pistonlu serbest doğrusal alternatörü [2].

1994'te Galileo, bir Stirling motor ve bir ot biçme makinesinden yaptığı doğrusal alternatör Şekil 3.8'de gösterilmiştir [2].



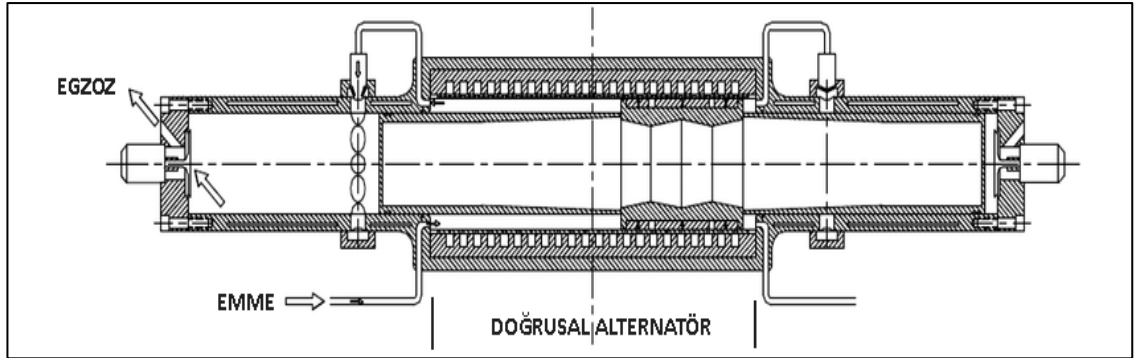
Şekil 3.8. Galileo tasarımı doğrusal alternatörü [2].

1998-1999 yıllarında Galileo'nun tasarımından yola çıkarak bir prototip geliştiren West Virginia Üniversitesi'nin prototipi çalışmadı (Şekil 3.9) [2].

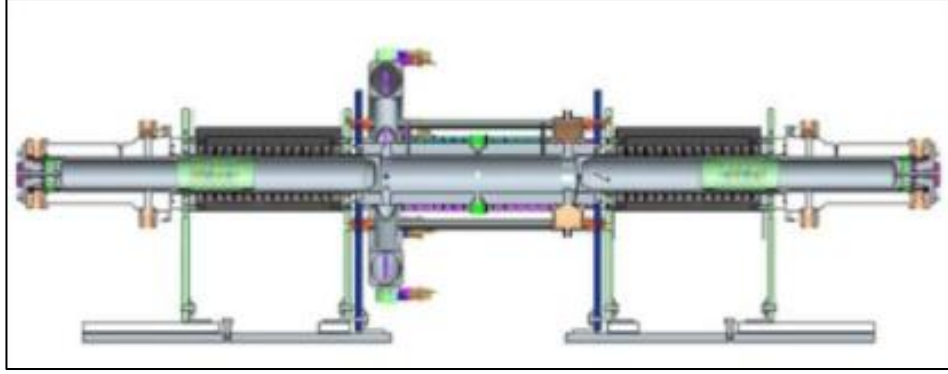


Şekil 3.9. West Virginia Üniversitesi, çalışmayan prototipi [2].

1998-2011 yıllarında Sandia Ulusal Laboratuvarları tarafından serbest pistonlu motor projesi geliştirilmiştir. Ancak sabit mıknatıslar termal olarak yetersiz kalmıştır. 1998 ve 2011 tasarımları sırasıyla Şekil 3.10 ve Şekil 3.12’de verilmiştir [2].

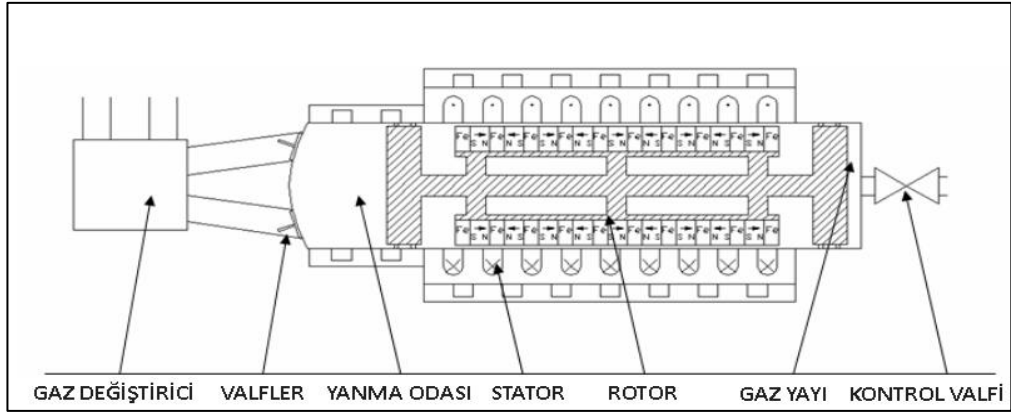


Şekil 3.10. Sandia Ulusal Laboratuvarları 1998 tasarımı [2].



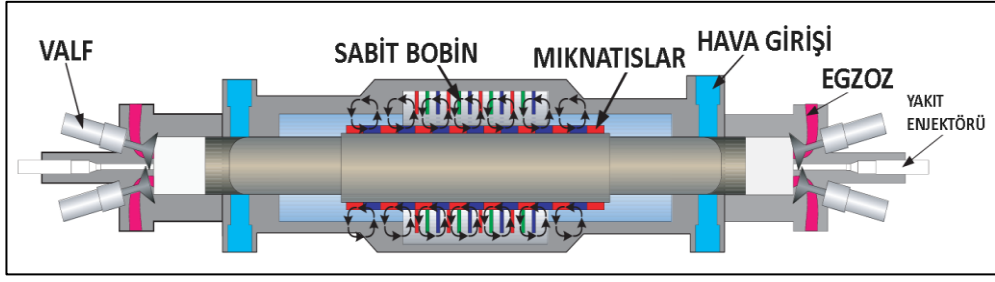
Şekil 3.11. Sandia Ulusal Laboratuvarları 2011 tasarımı [2].

2003’de Alman Ulusal Havacılık ve Uzay Araştırmaları Merkezi (DLR) tek etkili geri tepmeli bir motor tasarımı geliştirdi (Şekil 3.12) [2].

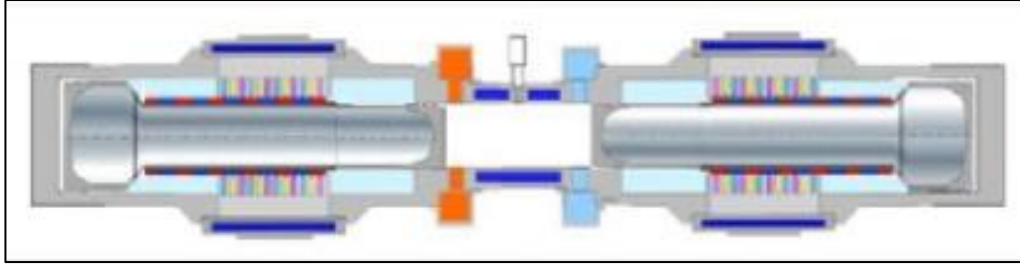


Şekil 3.12. DLR’nin tek etkili geri tepmeli motor tasarımı [2].

2004 ve 2011’de Volvo Şirketi, serbest pistonlu enerji dönüştürücü ismini verdiği projeler geliştirdi. 2004 tasarımı Şekil 3.13’de, 2011 tasarımı ise Şekil 3.14’te gösterilmiştir [2].

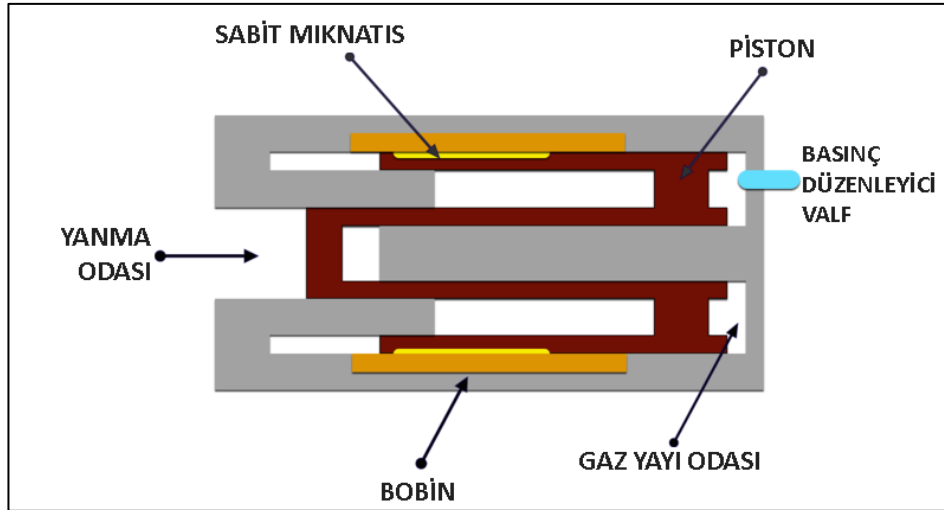


Şekil 3.13. Volvo'nun 2004 dönüştürücü tasarımı [2].



Şekil 3.14. Volvo'nun 2011 dönüştürücü tasarımı [2].

2014 yılında Yeşil Araçlar Kongresi'nde Toyota Araştırma Laboratuvarları tarafından serbest pistonlu bir motor tanıtılmıştır (Şekil 3.15) [2].



Şekil 3.15. Toyota Araştırma Laboratuvarları tasarımı [2].

BÖLÜM 4

ELEKTRİKLİ VE HİBRİT ARAÇLAR

4.1. ELEKTRİKLİ OTOMOBİL TÜRLERİ

Elektrikli ve hibrit taşıtların dünya çapında kullanımı hızla artmaktadır. Son zamanlarda otomotiv sektöründeki en önemli teknolojilerden biri olarak görülmektedir. Yakıtla çalışan emsallerine göre bakım maliyetleri, işletme giderlerinin düşük oluşu ve en önemlisi yerel kullanımlarda sıfır emisyon ile çevreye faydaları gibi önemli avantajlara sahiptir. Avrupa Birliği ülkeleri ve diğer birçok ülkenin yakın gelecekte içten yanmalı motorlara sahip araçları yasaklamayı planlaması ve elektrikli araç almak isteyenlere ciddi miktarlarda vergi indirimi ve teşvikler sağlaması ile önü açılan bu araçlar, sektörün büyük bölümünü egale etmektedir. Bu alandaki gelişmeler, otomotiv üreticilerinin ürün yelpazesini genişletmeye zorlamaktadır. Gelişen teknolojiyi yakından takip etmesi belirli alanlarda zorlaşabilmektedir. Kullanıcıların tercihlerine göre ürün yelpazesini geliştiren üreticiler elektrikli otomobillerin türlerinden hepsinde en az bir model bulundurmak istemektedir. Elektrikli otomobiller temel olarak şöyle sınıflandırılmaktadır:

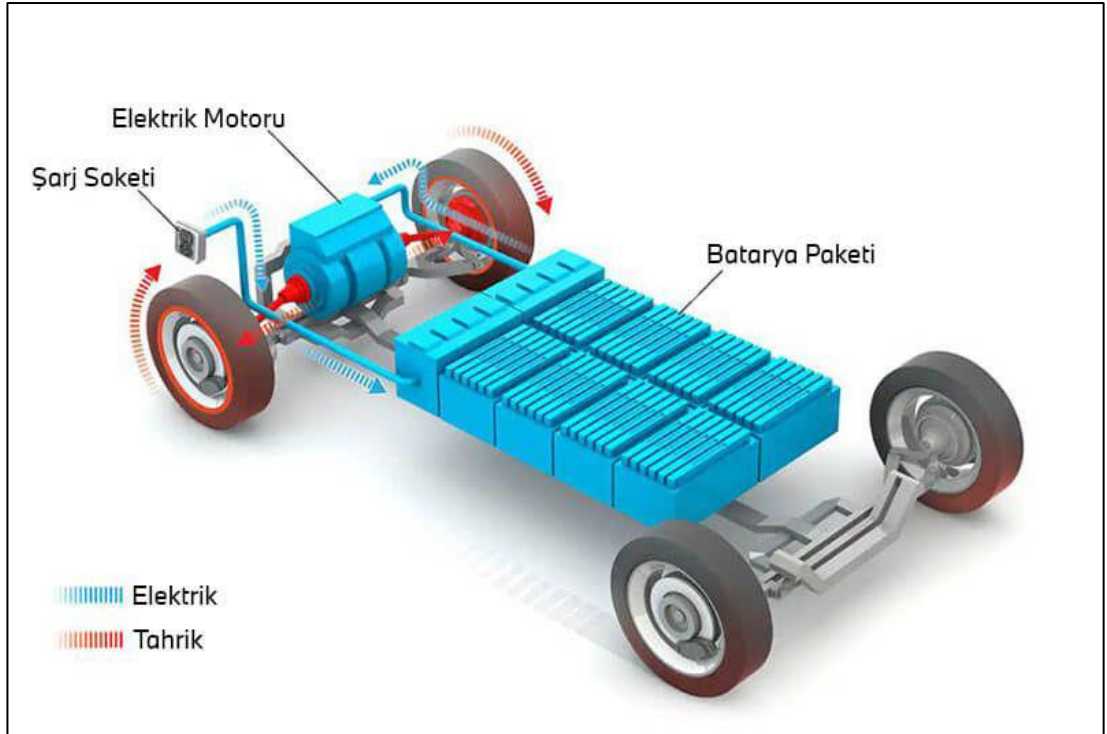
1. Tamamen elektrikli araçlar (BEV-Battery electric vehicles)
2. Hibrit araçlar (HEV-Hybrid electric vehicles)
3. Hafif hibrit araçlar (MHEV-Mild-hybrid electric vehicles)
4. Şarj edilebilir hibrit araçlar (PHEV-Plug-in hybrid electric vehicles)
5. Yakıt hücreli araçlar (FCEV-Fuel-cell electric vehicles)

4.1.1. Tamamen Elektrikli Araçlar (BEV)

İçten yanmalı motorun aksine, otomobilin çalışması için herhangi bir yakıtı ihtiyaç yoktur. Elektrikli otomobiller bunu bataryalarından aldıkları elektrik enerjisini motora

aktararak yapar. Bu sebeple elektrikli otomobillerin gidebileceği menzilleri belirleyen en önemli aktör bataryalarıdır. Batarya kapasiteleri bu araçların bir sefer şarj ile gidebileceği mesafeyi belirlemektedir.

Tamamen elektrikli bir araç yalnızca elektrikle çalışmaktadır. Elektrikli araçlarda yanmalı motor bulunmaz. Bu sebeple, yanmalı bir motorun üreteceği emisyon olmadığı için elektrikli araçlar sıfır emisyon salınımına sahiptir. Bugün elektrikli otomobillerin birçoğu 300 kilometre ve üzeri menzil imkanı sunmaktadır. Bu araçlara sahip kullanıcılar günlük ortalama 100 kilometre mesafe katetmektedir. 100 kilometre üzerinde mesafelerde kullanmak isteyen ve menzil konusunda endişe eden sürücüler ise menzil artırıcı iyi bir seçenektir. Şarjı bitmek üzereyken bataryayı besleyen ve yaygın olarak benzinle çalışan jeneratörlere menzil genişletici (artırıcı) denir. Tamamen elektriklielerde menzil artırıcılar doğrudan otomobile güç sağlamazlar, eğer doğrudan güç sağlarsa bu otomobil hibrit sınıfına girer. Şekil 4.1’de tam elektrikli bir aracın temel sistemler elemanları görülmektedir [16].



Şekil 4.1. Tamamen elektrikli aracın (BEV) temel elemanlarının gösterimi [16].

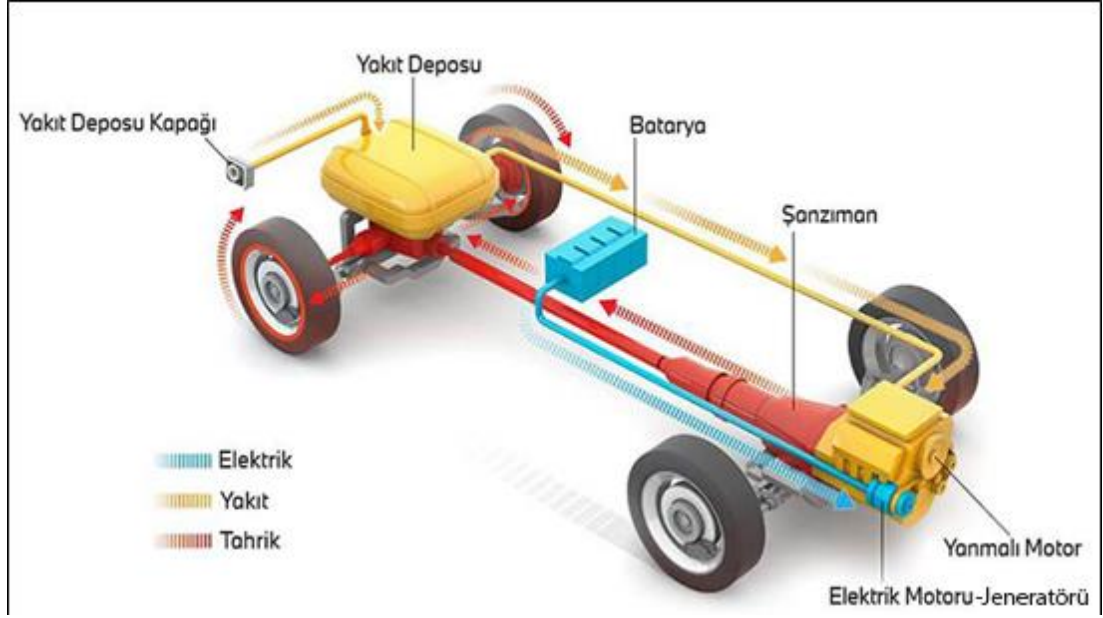
4.1.2. Hibrit Araçlar (HEV)

Tamamen elektrikli araçların aksine hem elektrikli hem de yanmalı motor bulunduran otomobillere hibrit denilmektedir. Modeline göre, her iki motor birlikte veya birbirinden bağımsız olarak çalışabilir. Hibrit otomobillerin performansları taşıdıkları yanmalı motor ve genelde buna yardımcı olan elektrikli motora, batarya gücüne veya varsa menzil artırıcıya bağlı olarak değişebilir. Birçok modelinde elektrik motoru sadece başlangıç çalıştırmasında, bekle modlarında ve ek güç talebinde devreye girer. Bu kategorideki araçlar; hafif hibrit (MHEV) ve şarjlı hibrit (PHEV) olarak iki sınıfta incelenebilir.

4.1.2.1. Hafif Hibrit Araçlar (MHEV)

Hafif hibrit araçlarda ana güç kaynağı yanmalı motordur. Elektrik motoru bu motoru destekler. Araç kalkış esnasında çok yakıt tükettiği zaman devreye giren elektrik motoru ayrıca hızlanma sırasında da ana motorun gücünü artırmaya yarar. Bunun amacı, aracın emisyonunu ve yakıt tüketimini azaltmaktır. Hafif hibritlerde batarya, sadece geri kazanımlı (rejeneratif) fren sistemi ile frenleme esnasında sürtünme ile otomatik şarj edilir. Bu nedenle hafif hibrit araçlarda başka kaynaktan şarj etme sistemi bulunmaz ve bu araçlar şarj istasyonlarını kullanmaz.

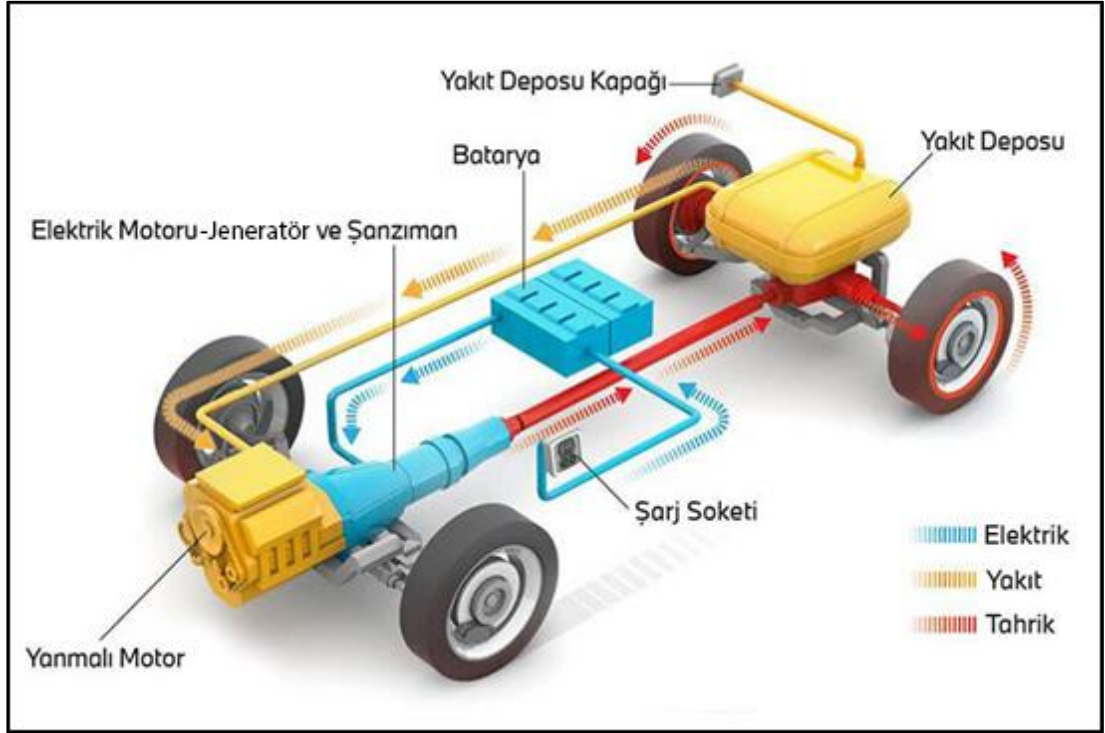
Hafif hibrit araçların en büyük avantajı ve amacı yakıt tüketimini düşürmek ve buna bağlı olarak emisyonu azaltmaktır. Bu araçlar, 100 kilometrede yaklaşık olarak 380 mililitre yakıt harcar. Sıradan yanmalı bir otomobile göre dolu depo ile çok daha uzun mesafe katedebilir, elektrikli otomobillere göre şarj istasyonu bulamama sıkıntısını ortadan kaldırır. Şekil 4.2’de hafif hibrit aracın temel elemanları gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Hafif hibrit aracın (MHEV) temel elemanlarının gösterimi [16].

4.1.2.2. Şarj Edilebilir Hibrit Araçlar (PHEV)

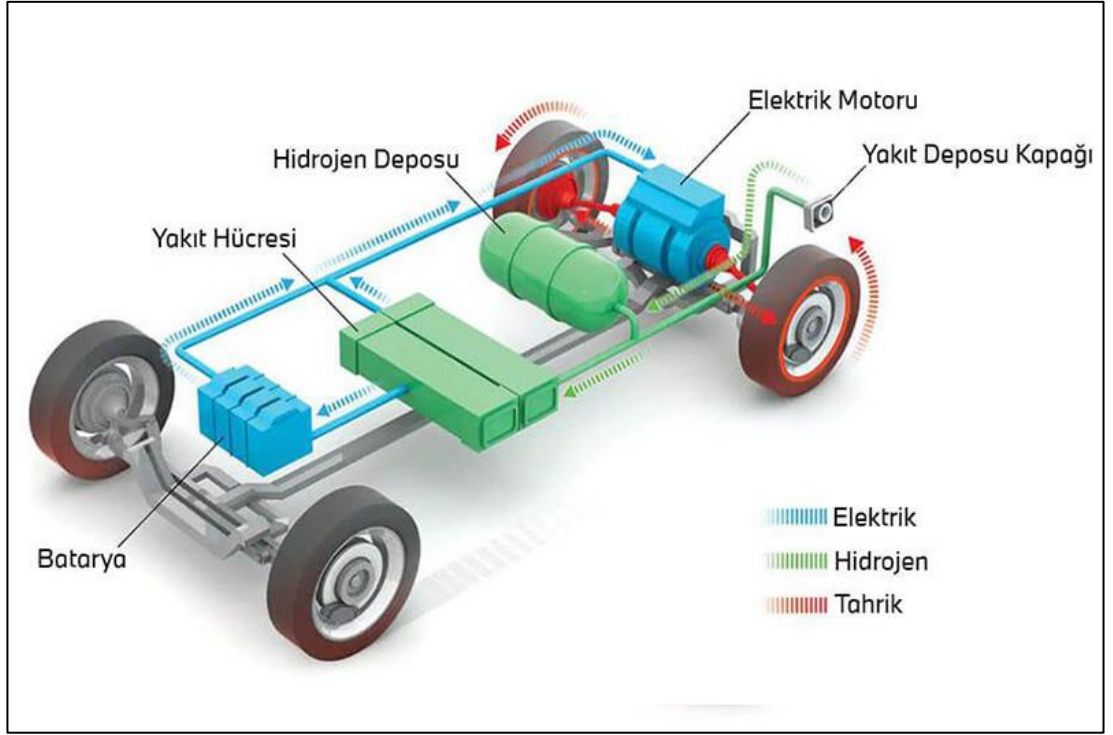
Şarj edilebilir, fişli veya plug-in hibrit olarak isimlendirilen bu araçlar da hafif hibritler gibi hem elektrikli hem de yanmalı motora sahiptir. Ancak plug-in hibritlerde her iki motorda ayrı olarak aracı çalıştırabilir. Bu araçlar doğrudan prize bağlanarak bataryayı şarj edebildiği gibi geri kazanımlı frenleme sistemi ile de bataryayı şarj edebilir. Sadece elektrik jeneratörü ile yaklaşık 45 kilometre menzil sunabilen araçlar, ev-iş arası kullanımlarda ciddi miktarda yakıt tasarrufu sağlamaktadır. Bataryanın şarjının bitmesi durumunda ise yanmalı motor devreye girer ve bu sayede şarj istasyonu aramak veya şarj için görece uzun süreler (5-30 dk) beklemek zorunda kalınmaz. Şehir içi kullanımlarda elektrikli, şehirler arası kullanımlarda ise yanmalı motor tercih ederek önemli miktarda yakıt tasarrufu sağlanabilmektedir. Şekil 4.3'de plug-in hibrit bir aracın temel elemanları gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Şarj edilebilir hibrit aracın (PHEV) temel elemanlarının gösterimi [16].

4.1.3. Yakıt Hücreli Araçlar (FCEV)

Yakıt hücreli araçlarda sadece elektrik motoru vardır. Ancak bu elektrikli motoru besleyen batarya, hidrojen ve oksijenin elektrik enerjisine dönüştürülmesiyle şarj edilmektedir. Yakıt hücresindeki hidrojen, havadaki oksijen ile tepkimeye girerek elektrik üretir, artık madde olarak ise sadece sıcak hava ve buhar salınımı gerçekleşir. Üretilen bu elektrik ile yakıt hücreli araç, tıpkı tamamen elektrikli araç gibi kullanılır. Geri kazanımlı frenleme sistemi ile de batarya şarj edilebilmektedir. Hidrojen, benzinli araçlar gibi çok hızlı doldurulabilir ancak hidrojen üretimi yüksek elektrik enerjisi ve maliyetli olması sebebiyle günümüzde pek yaygın değildir. Bu durumun değişmesi ile yakıt hücreli araçlar ciddi anlamda tercih edilebilir hale gelebilir. Şekil 4.4’de yakıt hücreli bir aracın temel elemanları gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Yakıt hücreli aracın (FCEV) temel elemanlarının gösterimi [16].

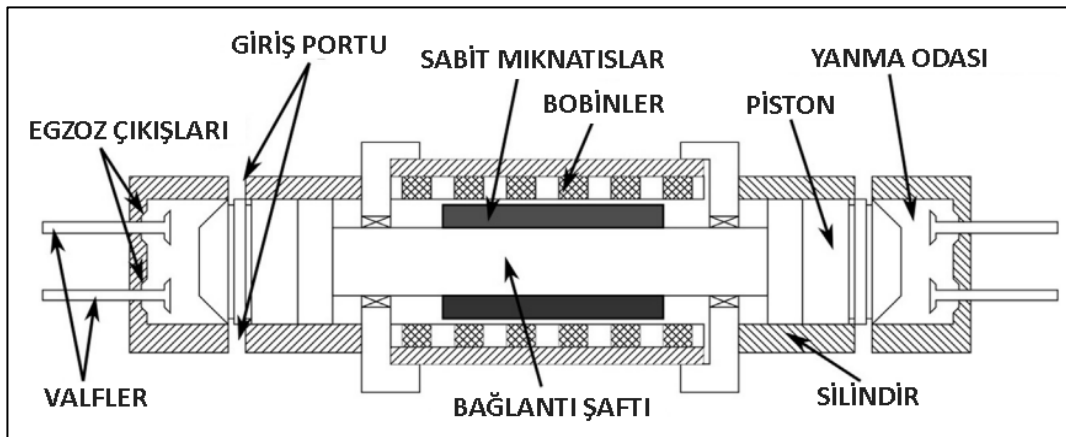
5.2. TOYOTA

Bir başka patent başvurusu ise Toyota Ar-Ge Laboratuvarları tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, pistondan kalıcı mıknatıslara ısı transfer hızını azaltmak, mıknatısın manyetik hale gelmesini ve aşırı ısınmayı önlemek için çeşitli mıknatıslar önerilmektedir. Ayrıca Toyota, serbest pistonlu motor tasarımında, mıknatısların etkileşimde olduğu silindirin içini Zirconia (ZrO_2) gibi özel bir seramik ile kaplamayı önermiştir [19,20].

5.3. VOLVO

Avrupa Komisyonu tarafından finanse edilen bir projede, Volvo Teknoloji Şirketi, Kraliyet Teknoloji Enstitüsü (KTH), ABB Şirketi ve Chalmers Üniversitesi birlikteliğinde bir konsorsiyum oluşturulmuştur. Bu konsorsiyum, serbest pistonlu motor teknolojisi üzerine bir araştırma yapmıştır. Bu işbirliği, ilgili kurumlarda alanında uzmanlaşmış kişilerin de (Arshad, Hansson, Fredriksson ve Denbratt ve Bergman [21–24]) katkıları sonucu Volvo Teknoloji Şirketi ile ABB Şirketi'nin bu konudaki patent başvurusu kabul edilmiştir [25,26].

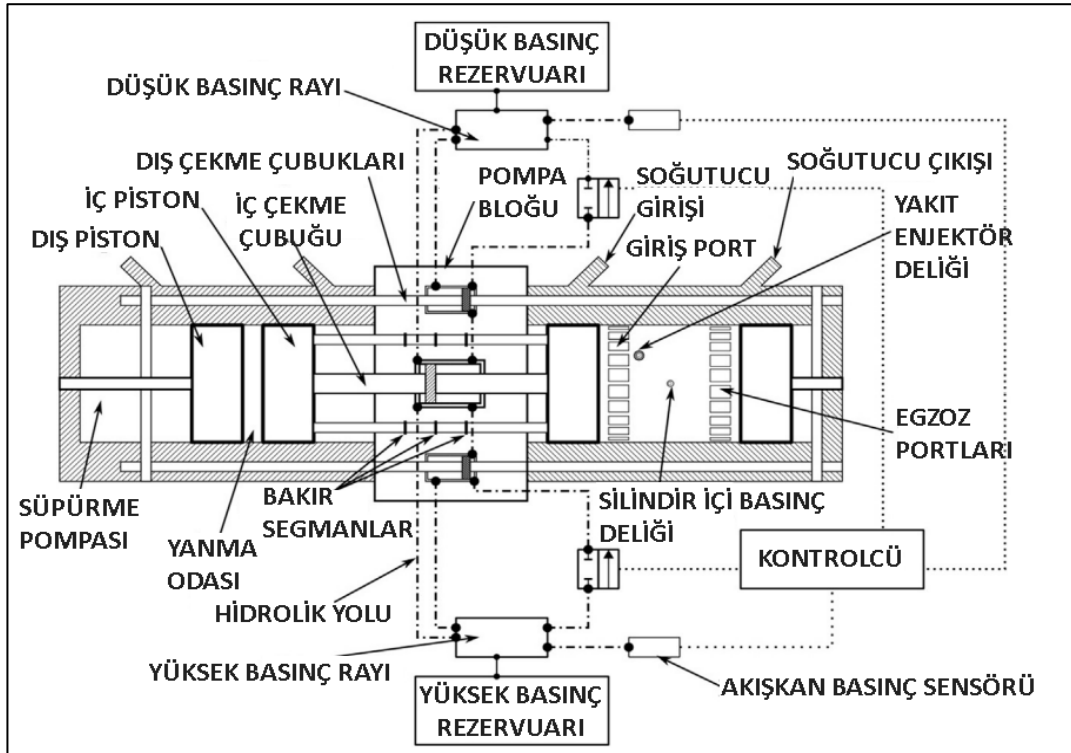
Bu patente, hareketli bir kütleye uygulanan elektromanyetik kuvvet ile serbest çift pistonlu motor jeneratörünü kontrol etme yöntemi tarif edilmiştir. Patente göre, bozulmalara karşı hassas olan çift pistonlu motor tasarımı Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Serbest çift pistonlu motor jeneratörü [25].

5.4. FORD

Ford, daha önce tasarlanmış serbest pistonlu motorlardan farklı olarak; iç pistonların çalışması çift serbest pistonlu motora benzer ancak her silindir senkronize ve hidrolik olarak dengelenmiş bir karşı piston ile çalışır. Piston hareket kontrolü ve serbest pistonlu motorların dengelenmesi için bir hidrolik devrenin kullanımına ilişkin çalışmalar yapan Hibi ve Ito [27] karşıt hidrolik serbest pistonlu motoru araştırmış ve Şekil 5.3'te ki piston senkronizasyonunun özelliklerini tartışmıştır. Ayrıca, Innas [6] tarafından üretilen tek pistonlu hidrolik serbest motor, kontrolü sağlamak için hidrolik kullanır. Innas ayrıca bu sistemi hidrolik hibrit taşıtlarda ("Hidrit") kullanılmak üzere de önermiştir [28].

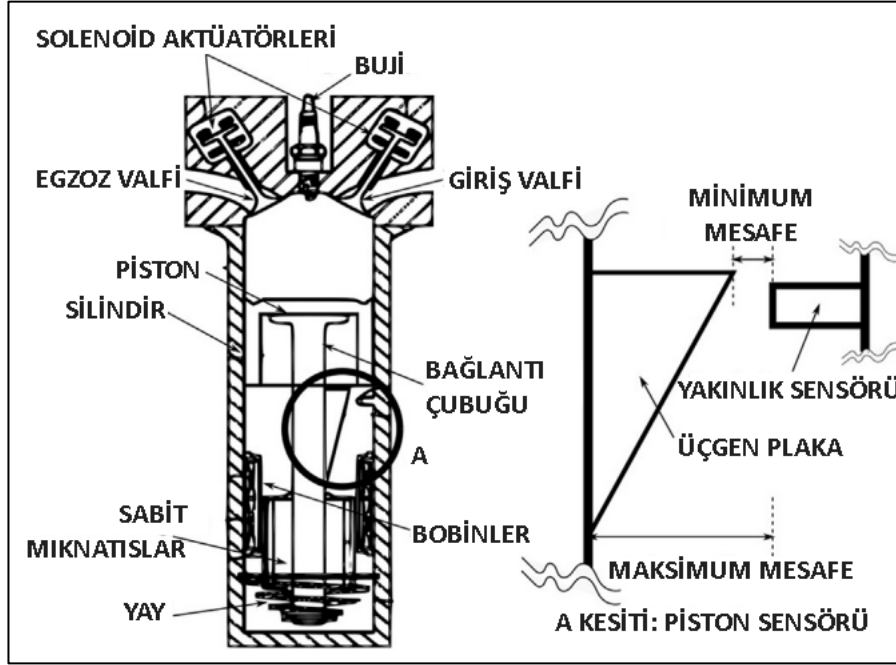


Şekil 5.3. Deneysel düzeneğin ana bölümü a) dikey kesit, b) yatay kesit [27].

5.5. HONDA

Honda tarafından yapılan kapsamlı bir patent başvurusu [29], Şekil 5.4'te gösterilen mekanik yaylı, dört zamanlı, kıvılcım ateşlemeli, tek silindri, serbest pistonlu motor jeneratörünü tarif etmektedir. Güç stroğu, sırasıyla egzoz ve sıkıştırma darbeleri

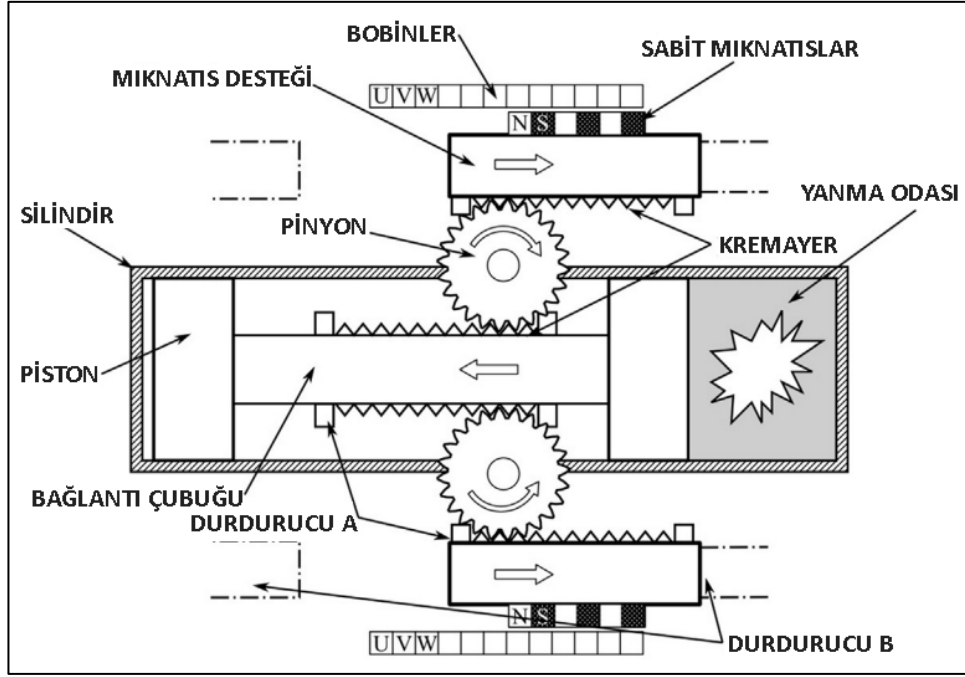
sırasında yararlanılacak olan mekanik kuvveti, yayda potansiyel olarak depolanan enerjiyi kinetik enerjiye dönüştürerek sağlar. Endüksiyon işlemi açıklanmamıştır, ancak lineer motorun yardımı ile başarılabilir.



Şekil 5.4. Tek silindirli, dört zamanlı serbest pistonlu jeneratör konsepti [29].

5.6. MAZDA

Serbest çift pistonlu motora dışarıdan bağlanmış kremayer-pinyon mekanizmasının bir lineer jeneratöre bağlantısı Şekil 5.5'te gösterilmiştir. Her ne kadar bu tasarım tam anlamıyla serbest olmasa da, krank-biyel mekanizmasının bulunmayışı sebebiyle serbest pistonlu motora benzetilmiş ve bu sınıfta tanımlanmıştır. Tasarımda jeneratör, sistemin dış tarafında bulunmakta ve bunu kremayer-pinyon mekanizması ile sağlamaktadır [30].



Şekil 5.5. Mazda tarafından tasarlanmış çift serbest pistonlu motor konsepti [30].

Burada incelenen patentler ve akademik araştırmalar, otomotiv alanında öncü olan şirketlerin bu alana yaptıkları katkıları göstermektedir. Kronolojik olarak sırasıyla, patentler ve araştırmalar Volvo Teknoloji Şirketi ve ABB Şirketi Konsorsiyumu, Ford Global Technologies, Mazda, Honda, General Motors ve Toyota tarafından yapılmıştır.

BÖLÜM 6

SERBEST PİSTONLU DOĞRUSAL JENERATÖR MOTOR TASARIMI VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

Gelişen bilgisayar destekli mühendislik uygulamaları (tasarım, analiz vb.) ile birlikte motor yanma odalarının yapısal ve termal analizlerinin yapımında sonlu elemanlar yöntemi yaygınlaşmıştır.

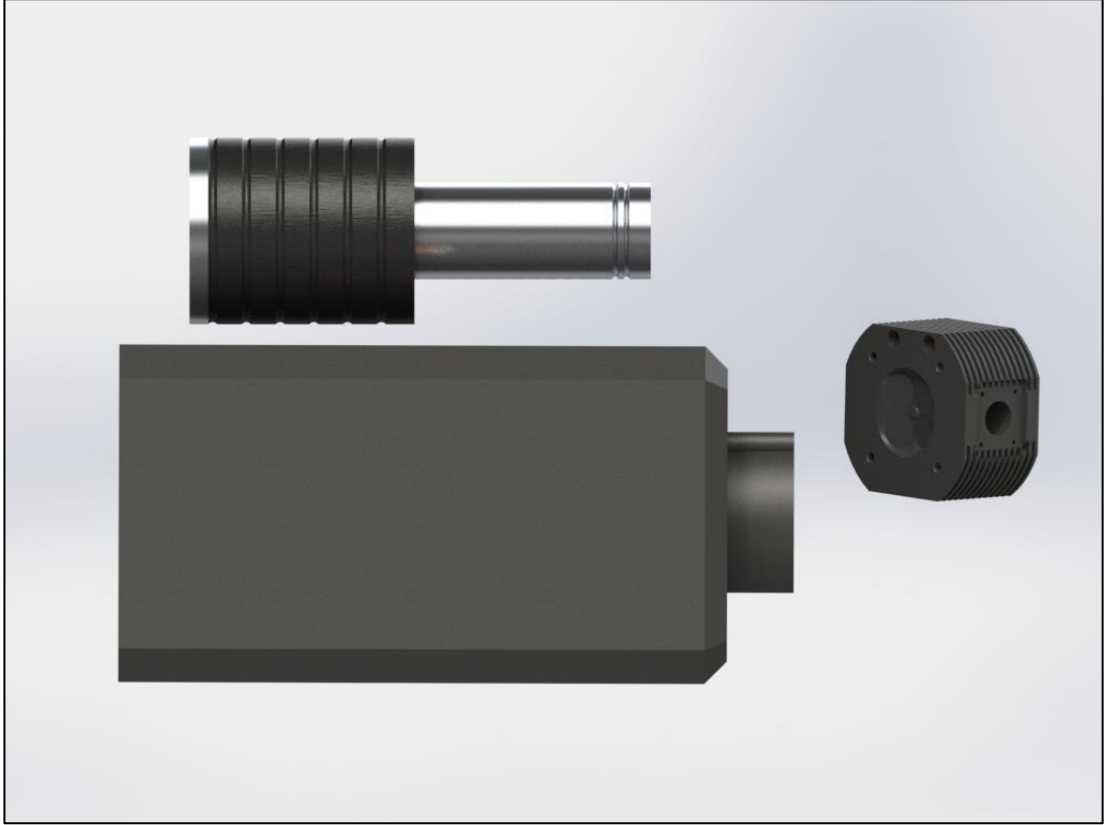
Bu bölümde, hibrit elektrikli otomobillerde yeni gelişen bir menzil artırma teknolojisi olan serbest pistonlu doğrusal jeneratör motoru, bilgisayar destekli tasarım uygulaması (CAD) ile modellenerek sonlu elemanlar metodu vasıtası ile yapısal ve termal analizleri yapılmıştır. Jeneratör motorunun başlıca teknik özellikleri Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Jeneratör motorunun teknik özellikleri.

Motor tipi	Serbest Pistonlu Doğrusal
Silindir çapı (mm)	86
Strok uzunluğu (mm)	86
Sıkıştırma oranı	10:1
Toplam hacim (cm³)	499,3
Kullanılan yakıt	Benzin

6.1. SERBEST PİSTONLU DOĞRUSAL JENERATÖR MOTOR TASARIMI

İlk olarak, tek pistonlu motorun üç boyutlu modellemesi SOLIDWORKS programı vasıtası ile yapılmıştır. Piston, silindir ve silindir kapağı literatürdeki veriler ve benzer tasarımlar temel alınarak yapılmıştır [19, 20]. Parçalar, Şekil 6.1’de gösterilmiş ve Çizelge 6.2’de özellikleri verilmiştir.



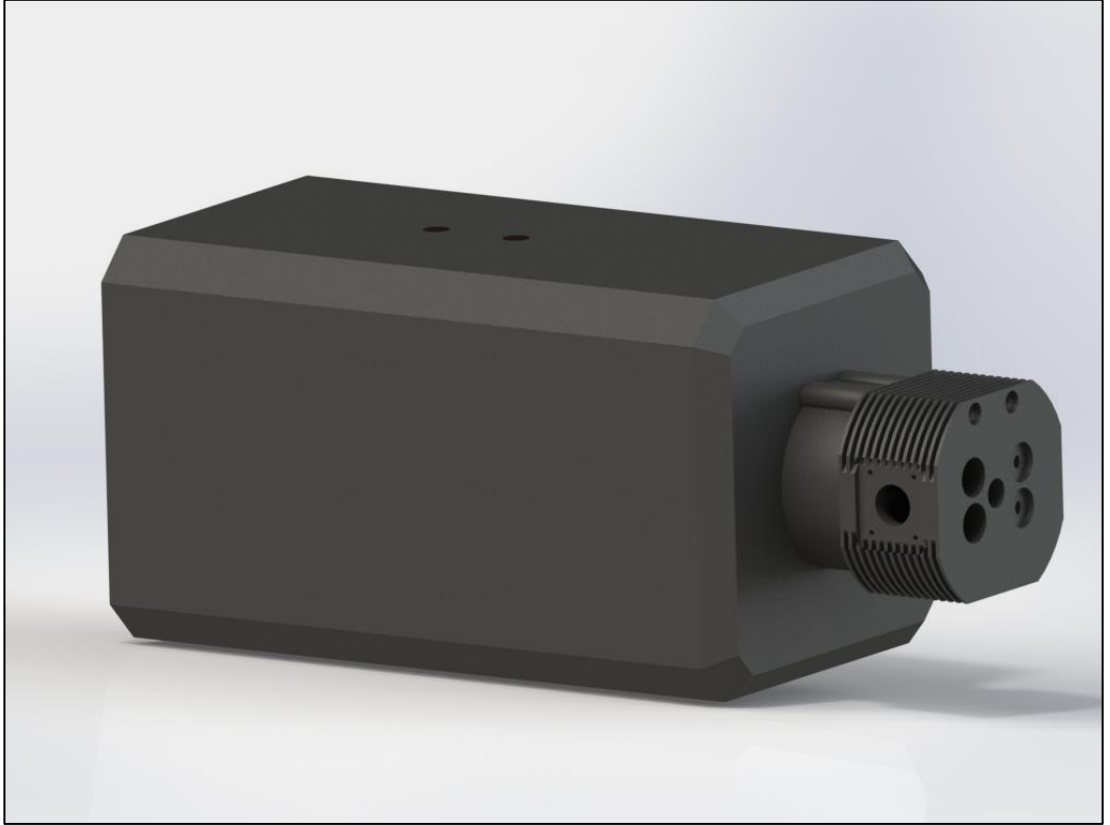
Şekil 6.1. Jeneratör motorunun parçaları.

Çizelge 6.2. Jeneratör motorunun parçaları ve malzemeleri.

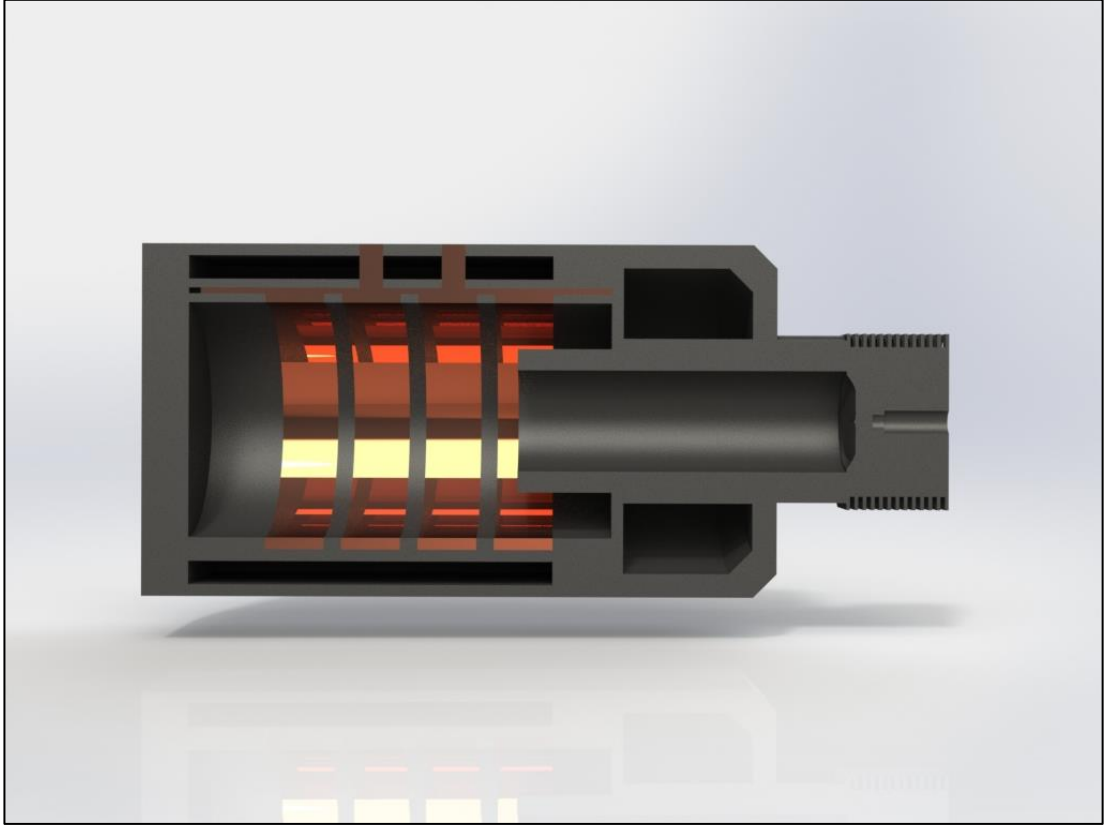
	Parça Adı	1.Sistem Malzemeleri	2.Sistem Malzemeleri
1	Piston	EN AC 47000	A390.0-T6
2	Silindir kapağı	EN AC 47000	A390.0-T6
3	Silindir (Ana gövde)	Gri Dökme Demir	Gri Dökme Demir

6.1.1. Silindir (Ana Gövde)

Silindirlerde meydana gelen sıcaklık 100 °C ile 2500 °C aralığında, basınç değeri ise 0,8 ile 70 bar (80 kPa – 7 MPa) aralığında değişebilmektedir. Bu değerler arasındaki şartlara dayanaklı bir biçimde çalışabilmeleri için silindirler çoğunluklar gri dökme demirden imal edilmektedir [31]. Jeneratör motorun silindirinde, bu kriterler de göz önüne alınarak gri dökme demir malzeme kullanılması uygun görülmüştür. Bilgisayar destekli üç boyutlu tasarımdan, silindirinin tamamı Şekil 6.2’de ve silindirinin kesit görüntüsü ise Şekil 6.3’te verilmiştir.



Şekil 6.2. Silindirinin üç boyutlu işlenmiş tasarımı.



Şekil 6.3. Silindirin üç boyutlu işlenmiş tasarımının kesit görünümü.

6.1.2. Piston

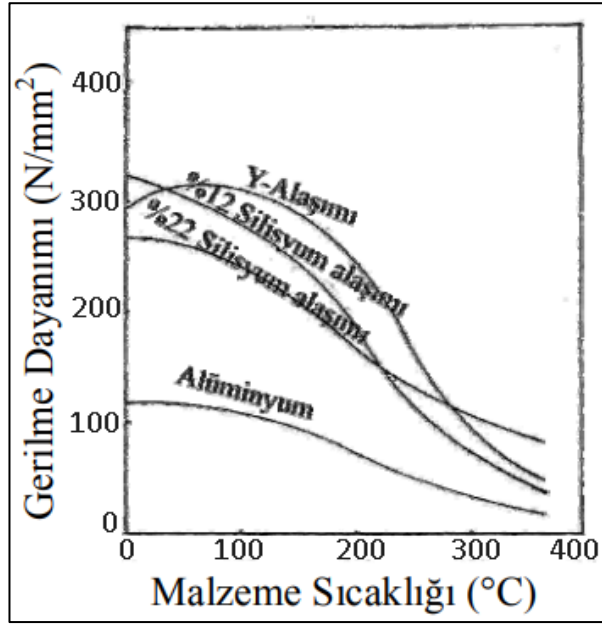
Tasarımın en önemli parçası olan piston, silindir içerisinde değişik hızlarda hareket edebilmek için hafif ve oluşacak basınca dayanıklı malzemeden yapılmalıdır. Ayrıca, silindir içi yüksek sıcaklıklar oluşacağı için seçilen malzemenin ısı dayanımı ve ısı iletimi yüksek olmalıdır.

Genellikle benzinli motorlarda alüminyum esaslı alaşımlar tercih edilmektedir. En çok kullanılanları ise 3 gruba ayrılır. İlk grup: %10 silisyum, bakır ve diğer alaşım elementlerini içermektedir. İkinci grup: %12 silisyum ötektik ve diğer elementleri içerir. Üçüncü grup: Ötektik üstü alüminyum-silisyum alaşımı %17 ile %22 arası silisyum içerir [32]. SAE 390 ötektik üstü, SAE 356 alaşımı ötektik altı alaşımı ve EN AC 47000 ötektik AlSi alaşımıdır. En çok tercih edilen alaşım türleri ise SAE 390 ve EN AC 47000 alaşımlarıdır. Çizelge 6.3'te, SAE 390, 356 ve EN AC 47000 piston alaşımlarının element yüzdeleri gösterilmektedir.

Çizelge 6.3. En yaygın kullanılan piston alaşım malzemeleri [32].

Kod	Kimyasal Bileşim (%)							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti
SAE390	16-18	1,3	4-5	0,1	0,4-0,6	0,1	0,1	0,20
EN AC 47000	10,5-13,5	0,8	1,0	0,55	0-0,35	0,3	0,55	0,20
SAE356	6-7	0,6	0,25	0,35	0,2-0,5	0,5	0,35	0,25

Şekil 6.4'te farklı piston malzemelerinin sıcaklıkla gerilme dayanımları karşılaştırılmıştır.



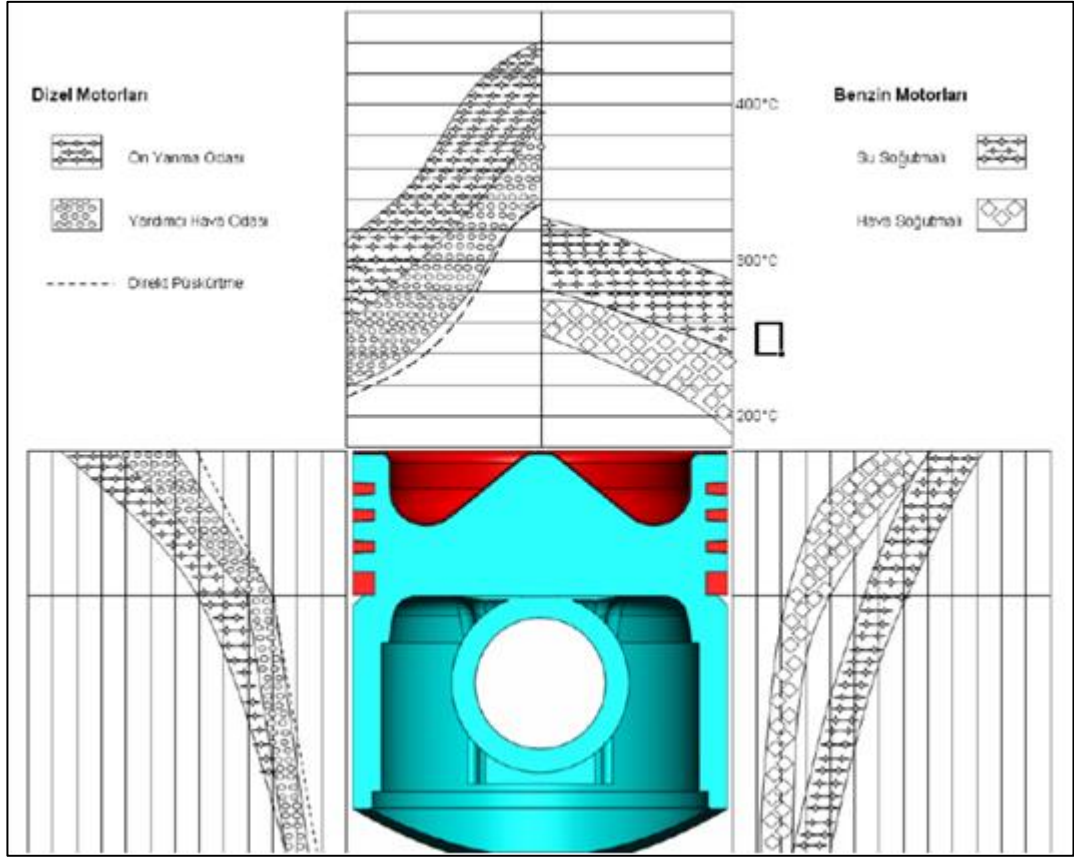
Şekil 6.4. Malzeme sıcaklığı ve gerilme dayanımı karşılaştırma grafiği [32].

Elde edilen bilgilere dayanarak, yapılan piston tasarımında %16-18 silisyum içeren A390.0 (SAE390) alüminyum alaşımı ve %12 silisyum içeren EN AC 47000 alüminyum alaşımları kullanılmıştır. A390.0-T6 malzemesi ısıl işlem görmüş ve yapay olarak yaşlandırılmıştır. Çizelge 6.4'te A390.0-T6 ve EN AC 47000 malzemelerinin kimyasal bileşim oranları verilmiştir.

Çizelge 6.4. A390.0-T6 ve EN AC 47000 malzemelerinin kimyasal bileşimi [33].

Element adı ve Simgesi	Oran (%)	
	A390.0-T6	EN AC 47000
Alüminyum (Al)	75,3 – 79,6	82,1 – 89,5
Silisyum (Si)	16 - 18	10,5 – 13,5
Bakır (Cu)	4,0 – 5,0	≤ 1,0
Magnezyum (Mg)	0,45 – 0,65	≤ 0,35
Demir (Fe)	≤ 0,5	≤ 0,8
Titanyum (Ti)	≤ 0,2	≤ 0,2
Mangan (Mn)	≤ 0,1	≤ 0,55
Çinko (Zn)	≤ 0,1	≤ 0,55
Nikel (Ni)	≤ 0,1	≤ 0,3
Diğer	≤ 0,2	≤ 0,25

Pistonun herhangi bir noktasında, maksimum sıcaklık, kullanılan alaşımın ergime noktası sıcaklığının %66'sını asla geçmemelidir. Kullandığımız piston alaşımları için bu sıcaklık limiti A390.0-T6 için 334 °C ve EN AC 47000 alaşımları için 376,2 °C'dir. Alüminyum alaşımlı pistonlarda ısı iletiminin diğerlerine göre daha iyi olması sebebi ile bunlarda sıcaklık dağılımı daha müsterektir. Dört zamanlı bir benzin motoru ve bir dizel motorunun, hafif metal alaşımlı pistonu için sıcaklık dağılımı Şekil 6.5'te görülmektedir [34].



Şekil 6.5. Dört zamanlı motorlarda hafif metal malzemeli piston sıcaklık dağılımı.

Pistonlarda yoğun sıcaklıklar, genellikle piston üst yüzeyinin ortasında görülür. Benzinli motorlarda ise en yüksek sıcaklık egzoz supabına yakın olan kısımlarda ve buji çevresinde oluşur. Benzinli motorlarda 230 °C sıcaklık kritik olarak nitelendirilir ve 250 °C ise uzun süre devam etmemelidir [32].

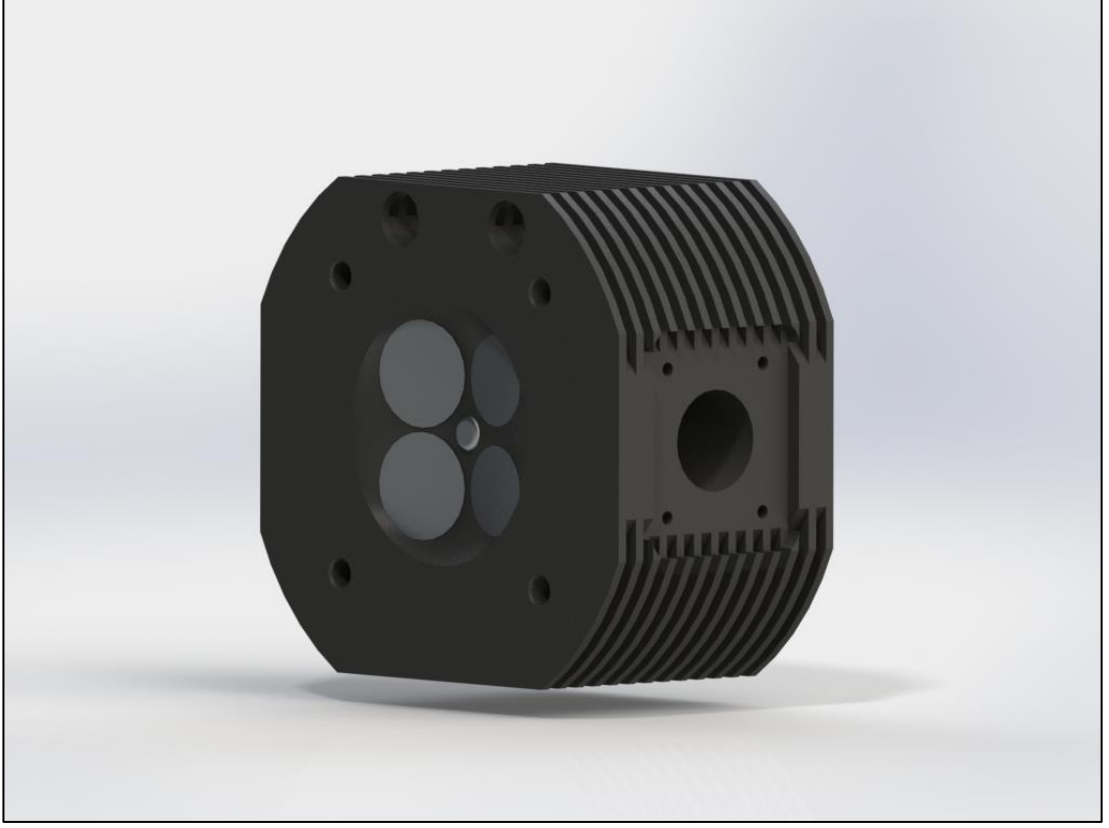
Kararlı halde çalışmakta olan bir içten yanmalı motorda en yüksek sıcaklıklar şu üç noktada görülür; egzoz valfi, buji çevresi ve piston yüzeyi. Yanma gazlarının oluşturduğu yüksek sıcaklıklara maruz kalan bölgeler yalnız bunlar değildir. Fakat bu bölgelerin soğutulması diğer bölgelerin soğutulmasından çok daha güçtür. Piston tasarımı malzemenin bu özellikleri göz önüne alınarak oluşturulmuş ve tasarımın işlenmiş görüntüsü Şekil 6.6'da verilmiştir.



Şekil 6.6. Pistonun üç boyutlu işlenmiş tasarımı.

6.1.3. Silindir Kapağı

Silindir kapağında, üzerinde birçok kanal bulunması ve görece karmaşık bir yapıya sahip olması sebebi ile yine piston malzemesi ile aynı malzemeler (A390.0-T6 ve EN AC 47000 alaşımları) tercih edilmiştir. Silindir kapağı tasarımı Şekil 6.7'de verilmiştir.

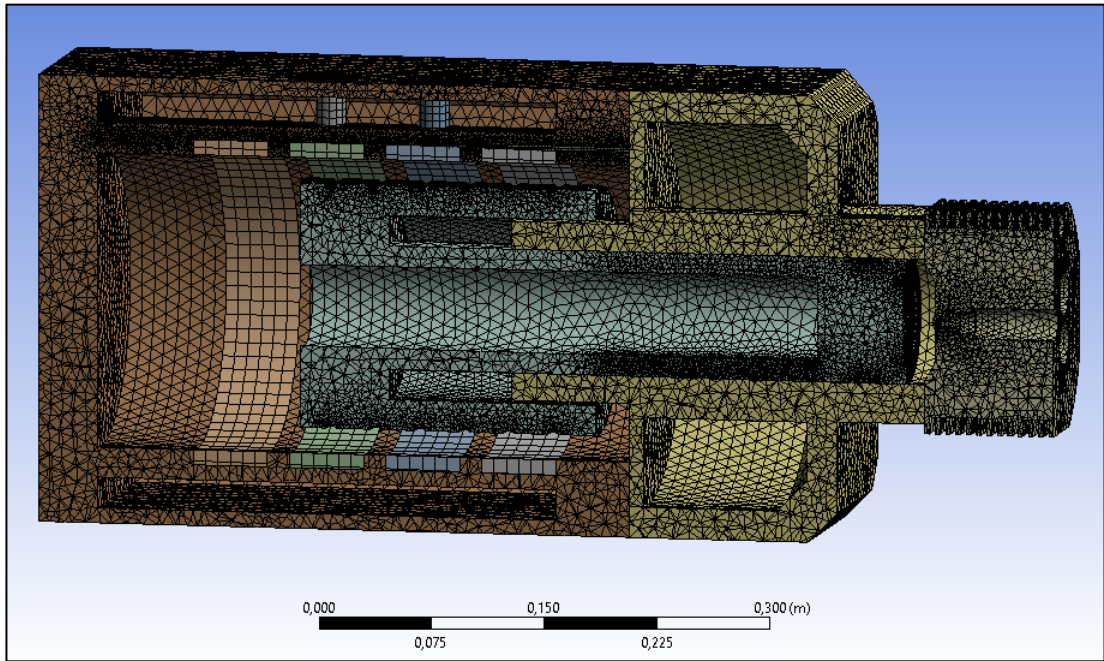


Şekil 6.7. Silindir kapağı üç boyutlu işlenmiş tasarımı.

Piston, silindir ve silindir kapağı parçaları, eldeki verilere göre tasarlanmış, tasarlanan sistemin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılmıştır. Sistemin termal ve yapısal yükler altındaki tepkileri ölçülmüştür.

6.2. JENERATÖR MOTOR PARÇALARININ TERMAL ANALİZİ

Tasarımın üç boyutlu modellemesi için SOLIDWORKS programı, sonlu elemanlar analizini gerçekleştirmek için ise ANSYS programı kullanılmıştır. ANSYS programına aktarılan modellere malzemelerinin özellikleri tanımlanmıştır. Devamında, model üzerinde Mesh (çözüm ağı) yapısı oluşturulmuş ve modelin sınır şartları tanımlanmıştır. Yanma odası ısı akıları ve sıcaklıkları analiz edilmiştir. Şekil 6.8’da modelin mesh yapısı, Çizelge 6.5’te ise mesh istatistikleri verilmiştir.



Şekil 6.8. Modelin mesh (çözüm ağı) yapısı.

Çizelge 6.5. Modelin mesh (çözüm ağı) istatistikleri.

İstatistikler	Değer
Düğüm noktası	1350529
Eleman sayısı	882785
Mesh geometrisi	Tetrahedrons (Dört yüzlü üçgenler)

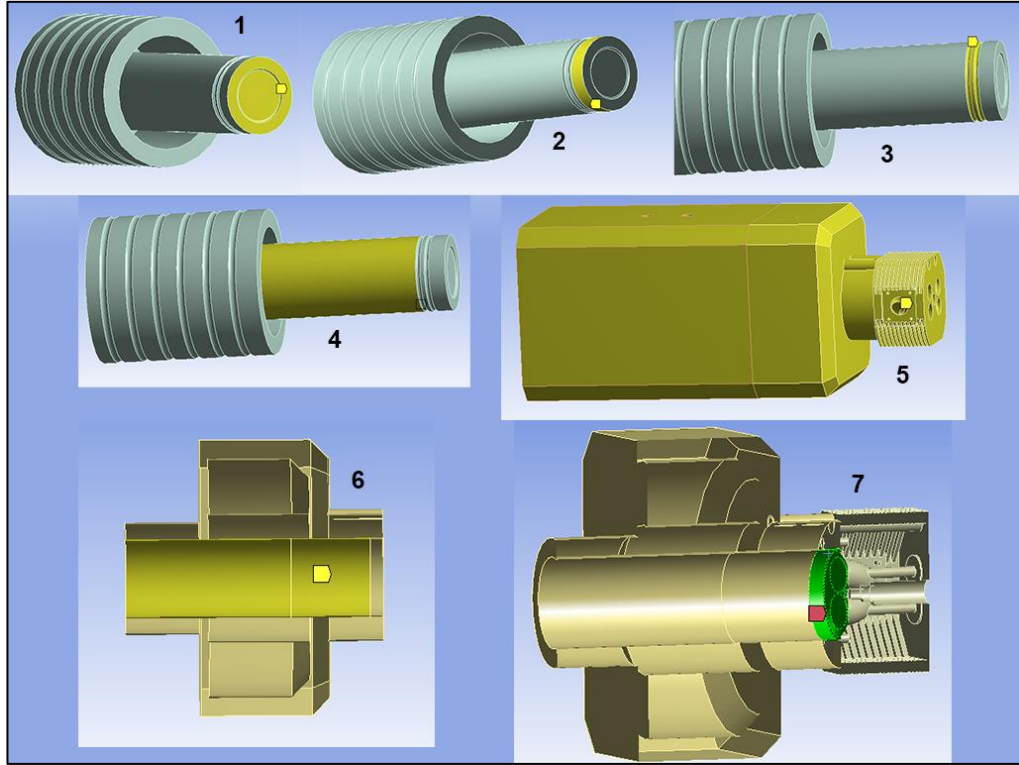
Termal analizde kullanılacak olan malzemelerin özellikleri Çizelge 6.6’te verilmiştir.

Çizelge 6.6. Kullanılacak malzeme özellikleri [33, 35].

Özellikler	A390.0-T6 (SAE 390)	EN AC 47000	Gri Dökme Demir
Yoğunluk (kg/m ³)	2703	2660	7200
Isı İletim Katsayısı (W/m °C)	130	121	52
Isıl Genleşme Katsayısı (1/ °C)	2,1*10 ⁻⁵	2,2*10 ⁻⁵	1,1*10 ⁻⁵
Özgül Isı (J/kg °C)	880	900	447
Elastisite Modülü (MPa)	7,5*10 ⁴	7,3*10 ⁴	1,1*10 ⁵
Poisson Oranı	0,33	0,33	0,28

6.2.1. Analiz İçin Sınır Şartları Belirlenmesi

ANSYS programında, yanma odası için kararlı durum koşullarındaki termal yük değerleri girilmiştir. Benzer çalışmalardan elde edilen veriler ışığında model için kullanılacak sınır şartları belirlenmiş olup, termal analizler çıktısında bu verilere yakın değerler bulunmuştur [36, 37]. Şekil 6.9 ve Çizelge 6.7’de kullanılan sınır şartları ve türleri verilmiştir.



Şekil 6.9. Tanımlanan sınır şartı yüzeyleri.

Çizelge 6.7. Jeneratör motor modeline tanımlanan sınır şartları [36, 37].

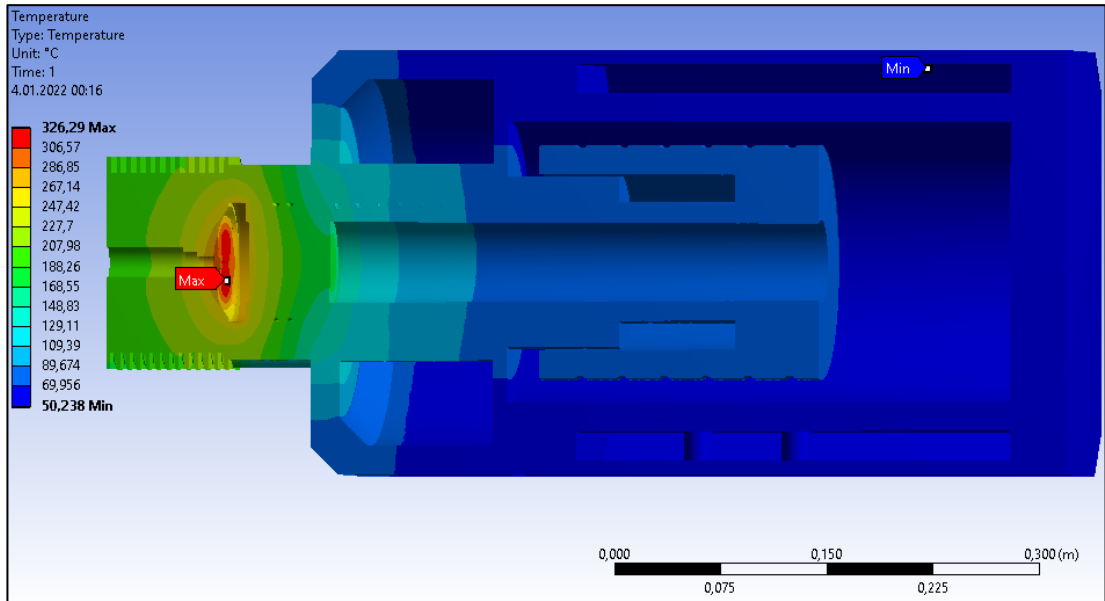
Sıra	Taşınım ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	Sıcaklık ($^\circ C$)
1	800	650
2	230	300
3	200	110
4	400	85
5	60	50
6	400	85
7	800	650

6.2.2. A390.0-T6 Malzeme İçin Termal Analiz Sonuçları

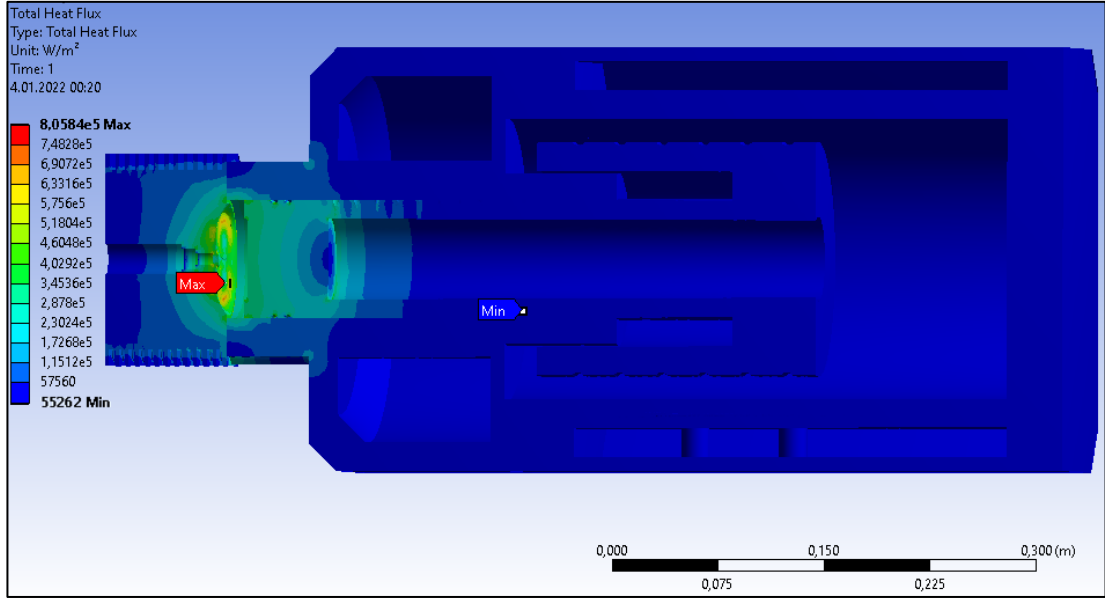
Termal analiz çıktıları sonucu, en yüksek-en düşük ısı akısı ve sıcaklık değerleri Çizelge 6.8’de verilmiş olup, toplam sıcaklık dağılımı Şekil 6.10’da, toplam ısı akısı dağılımı ise Şekil 6.11’de verilmiştir. Termal analiz sonucunda yanma odasındaki en yüksek sıcaklık 326,29 °C ile silindir kapağının egzoz valflerinde tespit edilmiş, en yüksek ısı akısı $8,06 \cdot 10^5$ W/m², en düşük ısı akısı ise $5,5 \cdot 10^4$ W/m² olarak bulunmuştur.

Çizelge 6.8. Jeneratör motorunun ısı akısı ve sıcaklık analiz sonuçları.

Bölge	En yüksek sıcaklık (°C)	En düşük sıcaklık (°C)	En yüksek ısı akısı (W/m ²)	En düşük ısı akısı (W/m ²)
Piston	262,54	209,45	$6,8 \cdot 10^5$	$2,4 \cdot 10^5$
Silindir	276,19	117,86	$3,2 \cdot 10^5$	$2,9 \cdot 10^4$
Silindir kapağı	326,29	180,98	$8,1 \cdot 10^5$	$0,5 \cdot 10^3$
Yanma odası	326,29	252,3	$7,1 \cdot 10^5$	$2,3 \cdot 10^5$
Genel	326,29	50,2	$8,1 \cdot 10^5$	$5,5 \cdot 10^4$

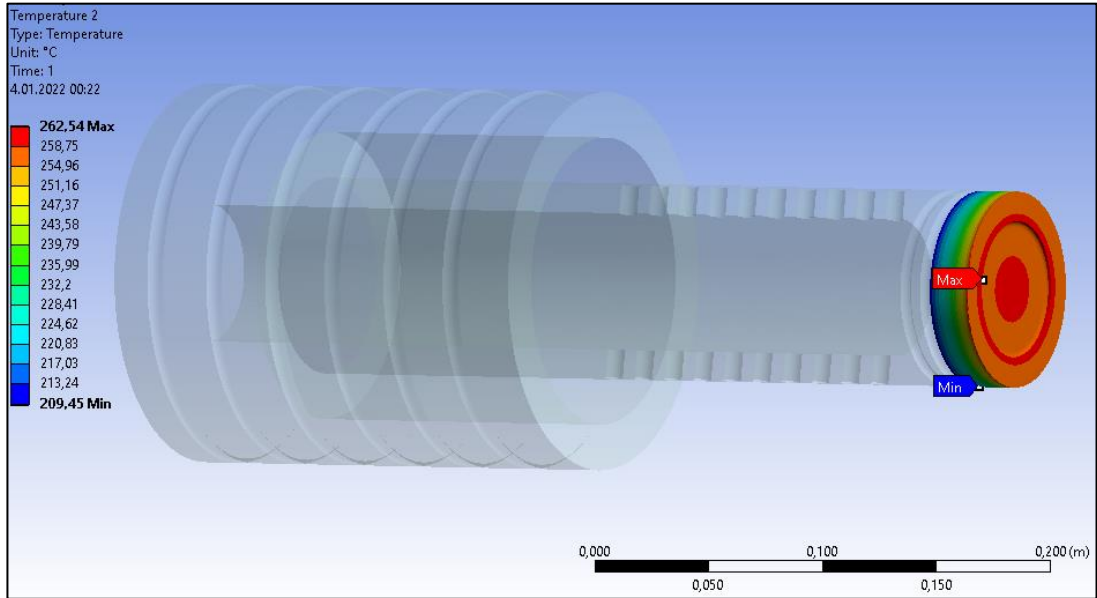


Şekil 6.10. Toplam sıcaklık dağılımı.

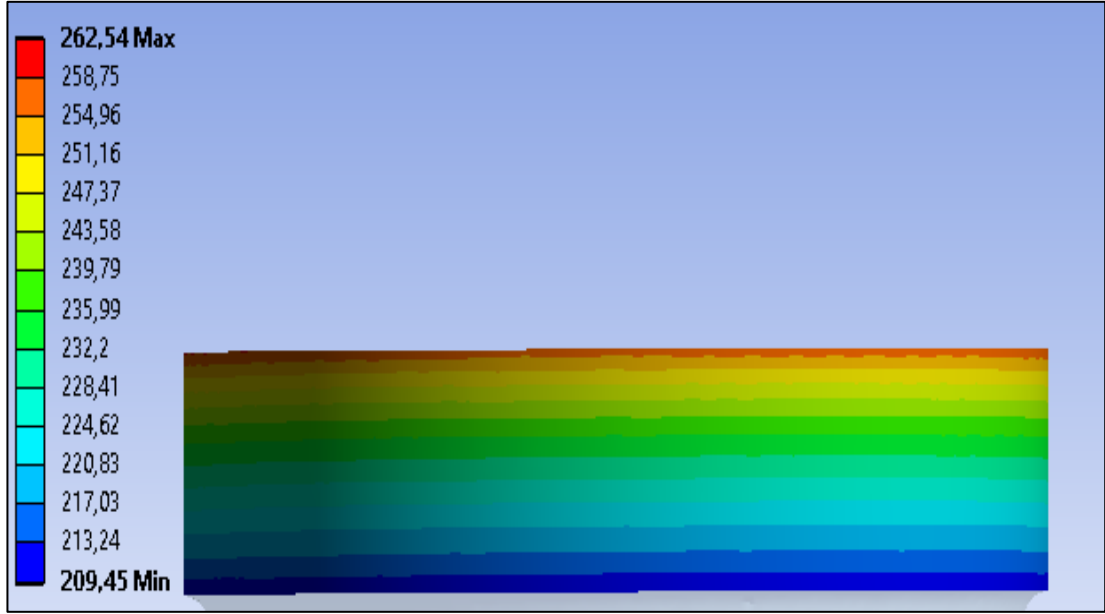


Şekil 6.11. Toplam ısı akısı dağılımı.

Piston üst yüzeyine gelen sıcaklık dağılımı Şekil 6.12’de, yanal yüzeyine gelen sıcaklık dağılımı ise Şekil 6.13’te verilmiştir.

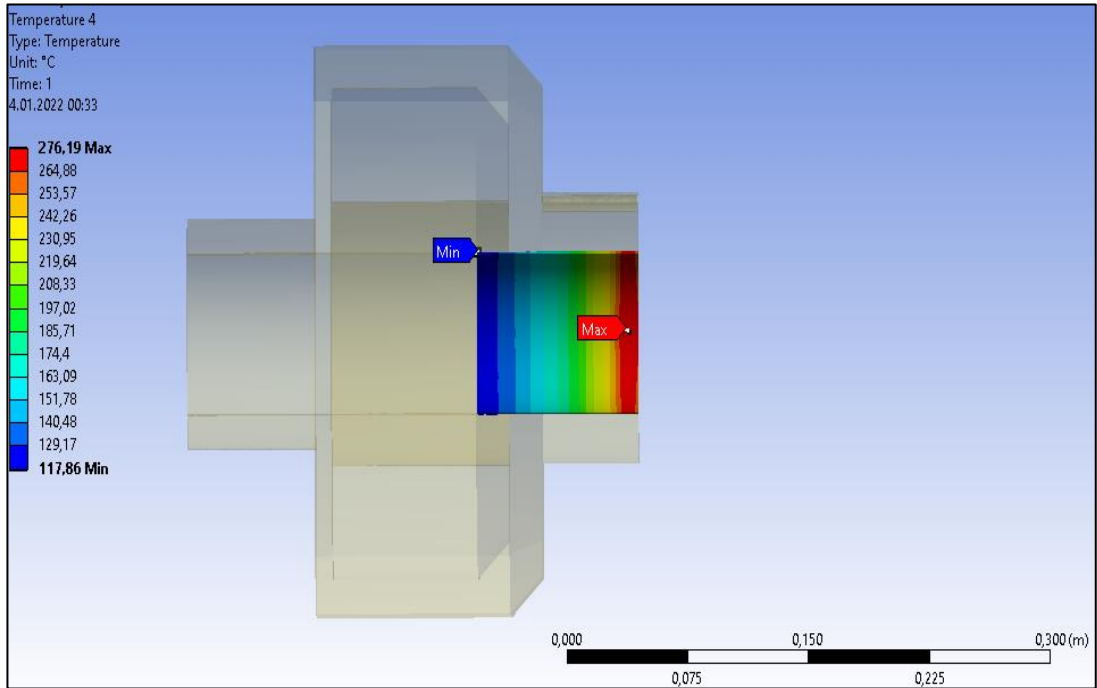


Şekil 6.12. Piston üst yüzeyine gelen sıcaklık dağılımı.



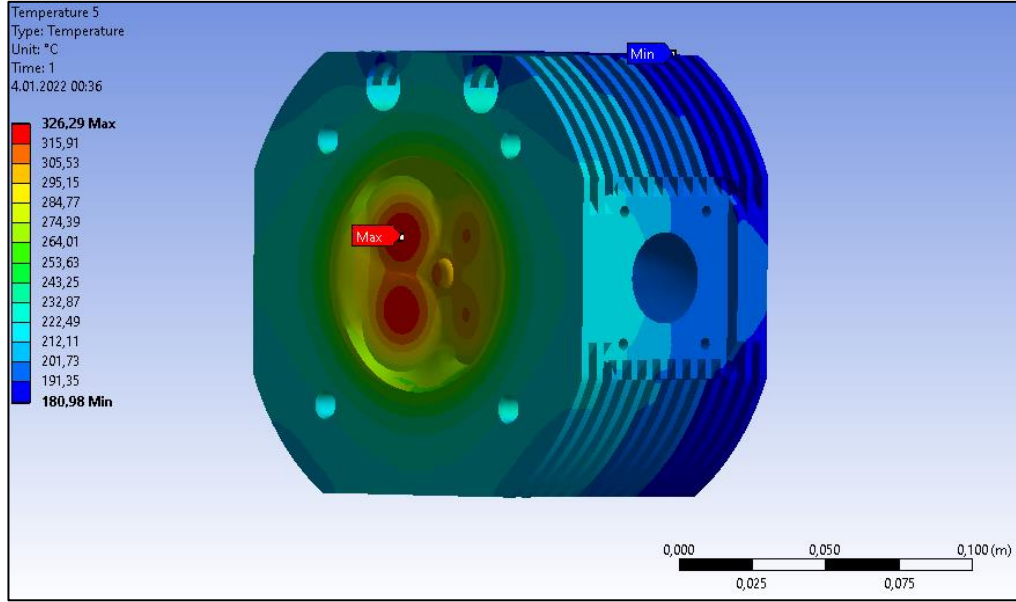
Şekil 6.13. Piston yanal yüzeyine gelen sıcaklık dağılımı.

Toplam silindir hacmindeki sıcaklık dağılımı Şekil 6.14’te verilmiştir.



Şekil 6.14. Silindir hacmi sıcaklık dağılımı.

Silindir kapağında oluşan sıcaklık dağılımı ise Şekil 6.15’te verilmiştir.



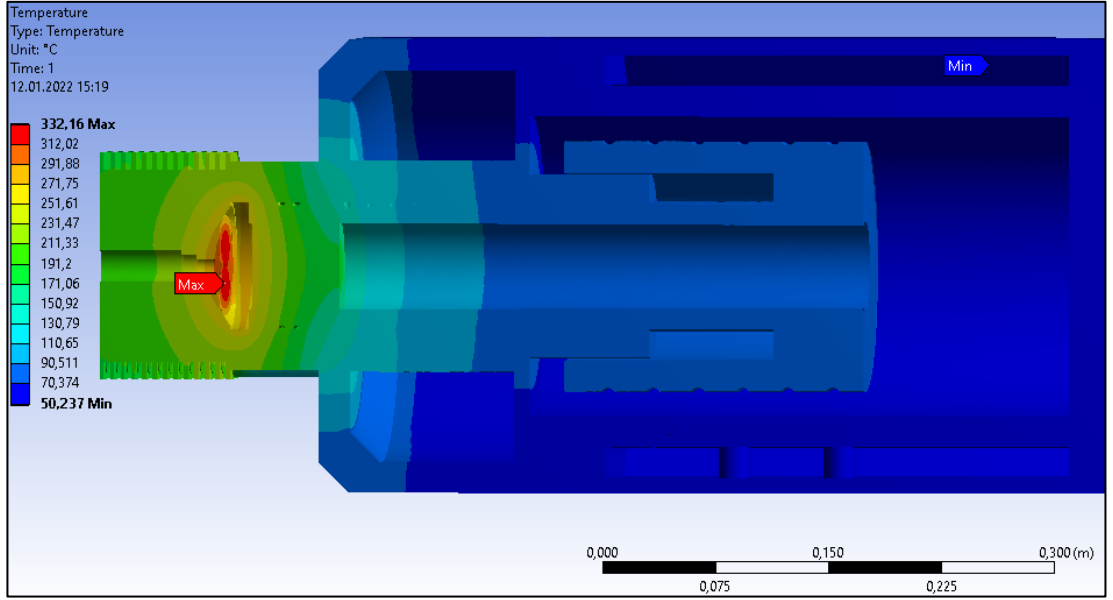
Şekil 6.15. Silindir kapağı sıcaklık dağılımı.

6.2.3. EN AC 47000 Malzeme İçin Termal Analiz Sonuçları

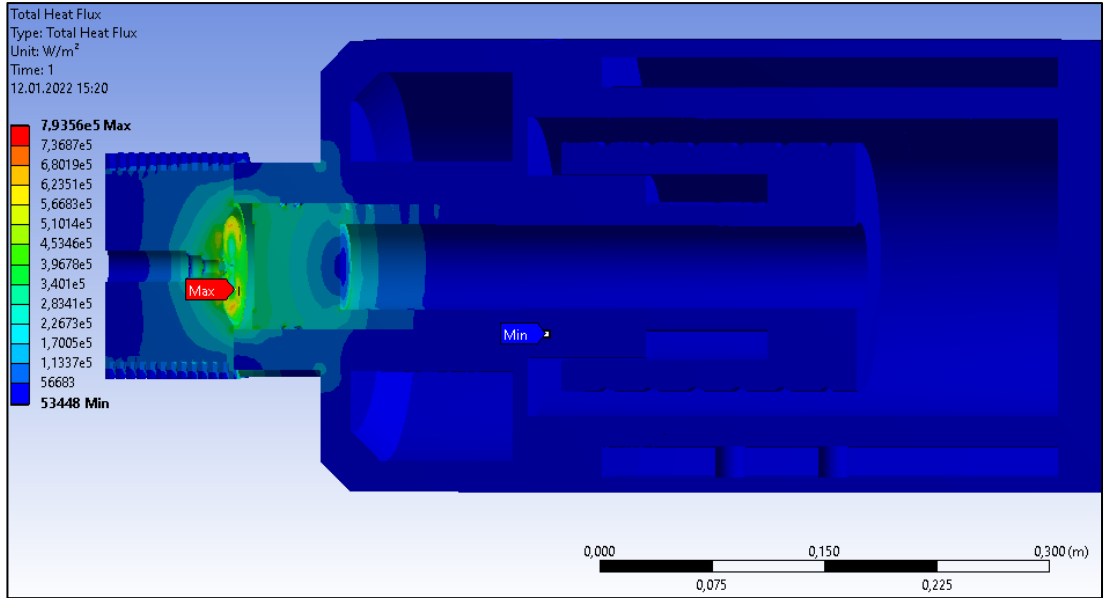
Termal analiz çıktıları sonucu, en yüksek-en düşük ısı akısı ve sıcaklık değerleri Çizelge 6.9’da verilmiş olup, toplam sıcaklık dağılımı Şekil 6.16’da, toplam ısı akısı dağılımı ise Şekil 6.17’de verilmiştir. Termal analiz sonucunda yanma odasındaki en yüksek sıcaklık 332,16 °C ile silindir kapağının egzoz valflerinde tespit edilmiş, en yüksek ısı akısı $7,94 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$, en düşük ısı akısı ise $5,3 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2$ olarak bulunmuştur.

Çizelge 6.9. Jeneratör motorunun ısı akısı ve sıcaklık analiz sonuçları.

Bölge	En yüksek sıcaklık (°C)	En düşük sıcaklık (°C)	En yüksek ısı akısı (W/m ²)	En düşük ısı akısı (W/m ²)
Piston	266,18	210,03	$6,6 \cdot 10^5$	$2,3 \cdot 10^5$
Silindir	277,62	117,05	$3,2 \cdot 10^5$	$2,9 \cdot 10^4$
Silindir kapağı	332,16	178,48	$7,9 \cdot 10^5$	$0,7 \cdot 10^3$
Yanma odası	332,16	254,42	$6,9 \cdot 10^5$	$2,4 \cdot 10^5$
Genel	332,16	50,2	$7,9 \cdot 10^5$	$5,3 \cdot 10^4$

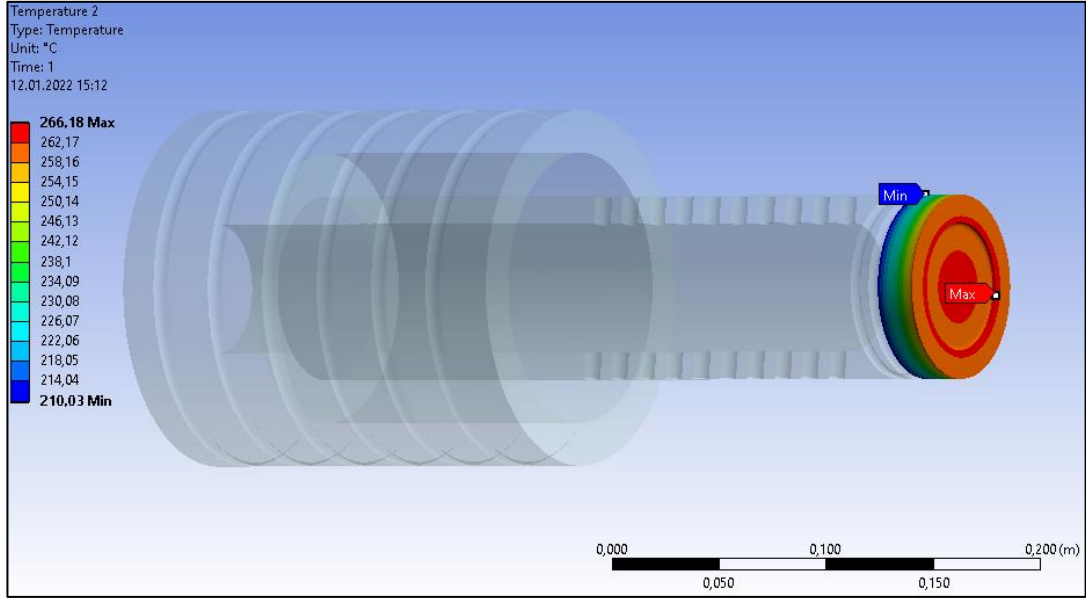


Şekil 6.16. Toplam sıcaklık dağılımı.

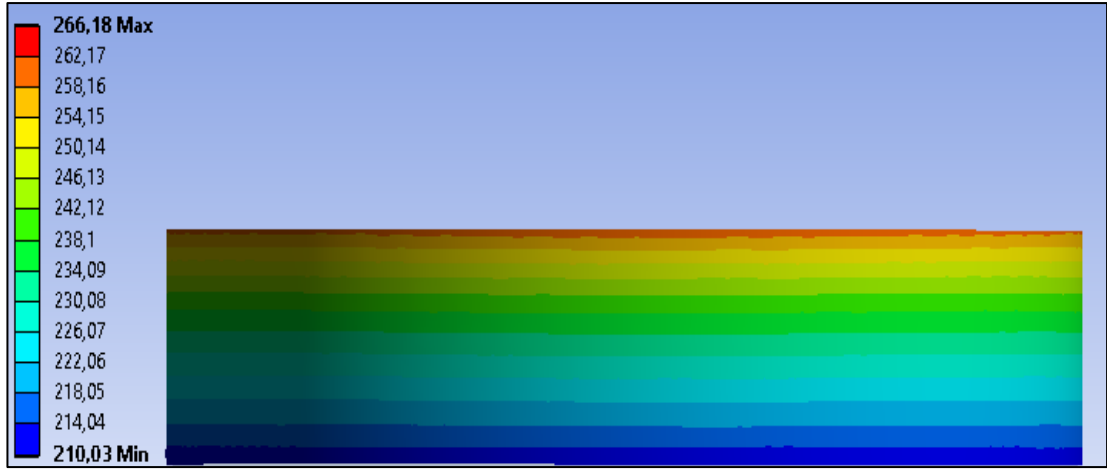


Şekil 6.17. Toplam ısı akısı dağılımı.

Piston üst yüzeyine gelen sıcaklık dağılımı Şekil 6.18’de, yanal yüzeyine gelen sıcaklık dağılımı ise Şekil 6.19’te verilmiştir.

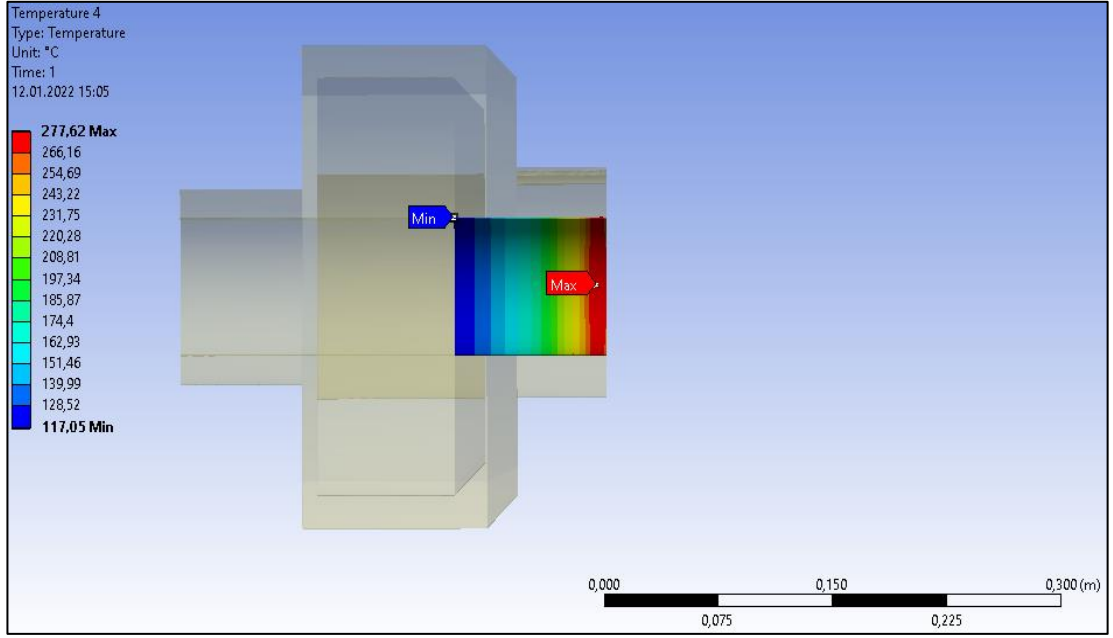


Şekil 6.18. Piston üst yüzeyine gelen sıcaklık dağılımı.



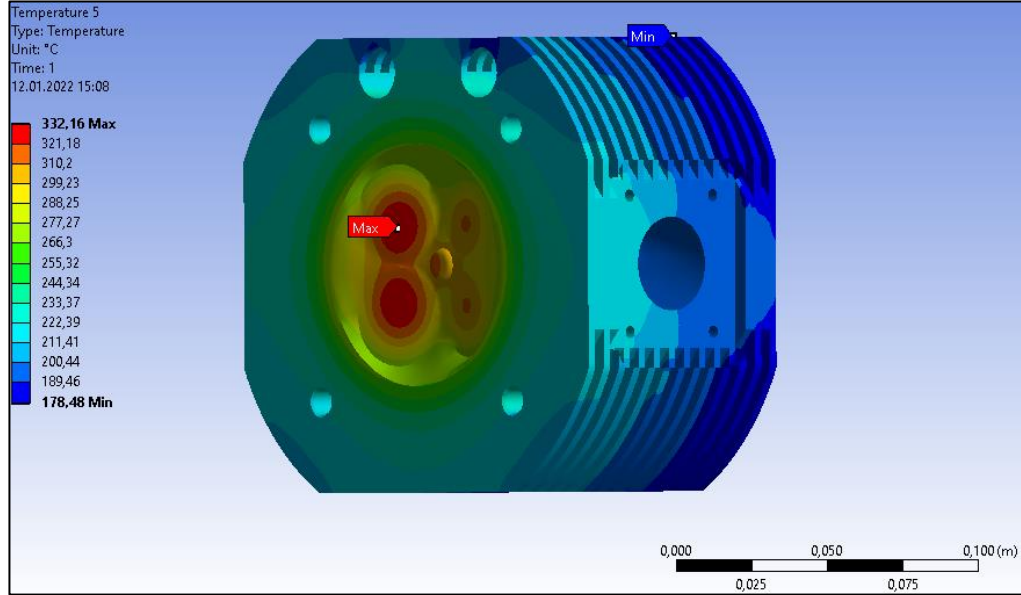
Şekil 6.19. Piston yanal yüzeyine gelen sıcaklık dağılımı.

Toplam silindir hacmindeki sıcaklık dağılımı Şekil 6.20’te verilmiştir.



Şekil 6.20. Silindir hacmi sıcaklık dağılımı.

Silindir kapağında oluşan sıcaklık dağılımı ise Şekil 6.21’te verilmiştir.



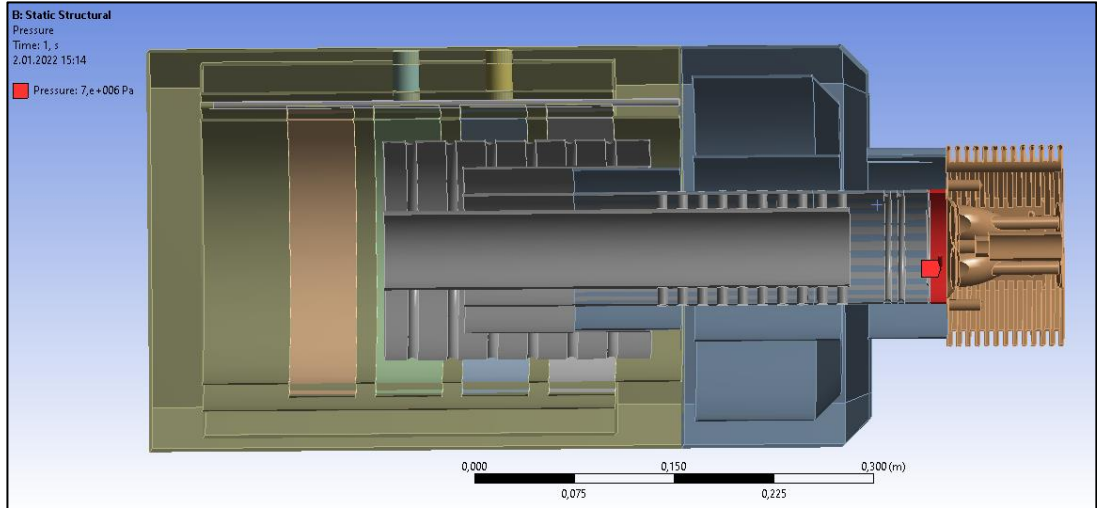
Şekil 6.21. Silindir kapağı sıcaklık dağılımı.

6.3. JENERATÖR MOTOR PARÇALARININ YAPISAL ANALİZİ

Tasarıma etki eden yapısal yükler yine ANSYS program ile analiz edilmiştir. Değerler, literatürdeki maksimum yüklere göre verilmiş ve sistemin bu yükler altında işlevlerini yerine getirip getiremeyeceği irdelenmiştir. Mesh (çözüm ağı) yapısı, model değişmediği için yine termal analiz çözüm ağı ile aynı değerlerde alınmıştır.

6.3.1. Analiz İçin Sınır Şartlarının Belirlenmesi

Yanma odası silindir çeperine, silindir kapağına ve pistonu gelen basınç, eldeki verilere bakılarak, en yüksek değer olan, 7 MPa alınmıştır [31]. Yapısal analiz için sınır şartları ise Şekil 6.22’de verilmiştir.



Şekil 6.22. Yapısal analiz için sınır şartları tanımlanan yüzeyler.

$$\sigma_w = \frac{\sigma_y}{N} \quad (6.1)$$

Eşitlik 6.1’e göre malzemelerin maksimum gerilme (σ_w) değerleri bulunur. Burada A390.0-T6 alaşım malzemesi için akma dayanımı (σ_y) 290 MPa [33], EN AC 47000 alaşım malzemesi için akma dayanımı (σ_y) 131 MPa [33], Gri Dökme Demir malzemesi için akma dayanımı ise 265 MPa [35] olarak alınmıştır. Emniyet katsayısı (N) ise 2 olarak aldığımızda;

A390.0-T6 piston ve silindir kapağı malzemesi için;

$$\sigma_w = \frac{\sigma_y}{N} = \frac{290}{2} = 145 \text{ MPa} \quad (6.2)$$

EN AC 47000 piston ve silindir kapağı malzemesi için;

$$\sigma_w = \frac{\sigma_y}{N} = \frac{131}{2} = 65,5 \text{ MPa} \quad (6.3)$$

Gri Dökme Demir silindir malzemesi için;

$$\sigma_w = \frac{\sigma_y}{N} = \frac{265}{2} = 132,5 \text{ MPa} \quad (6.4)$$

olarak bulunmaktadır.

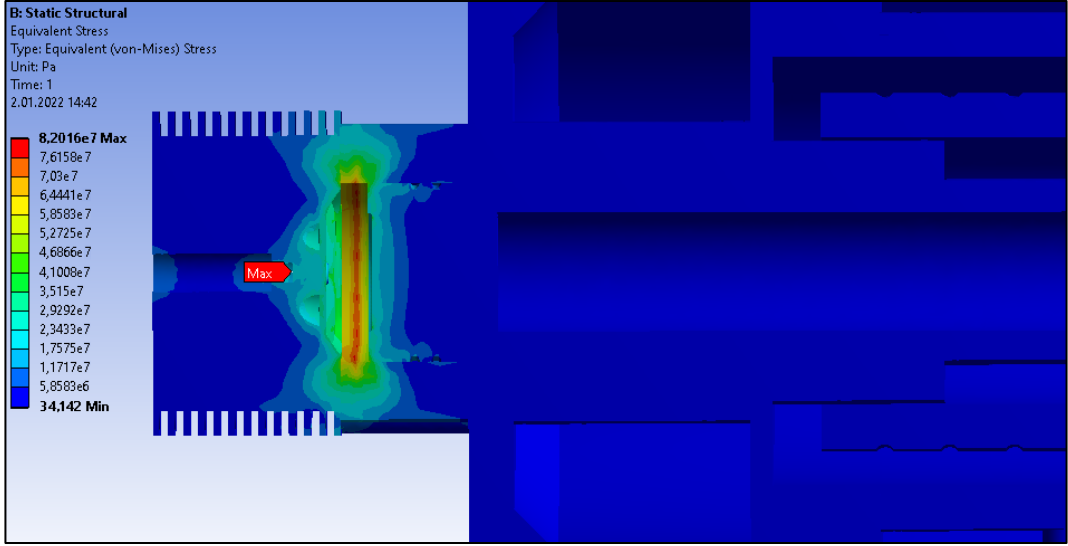
Buna göre maksimum gerilme, A390.0-T6 malzemesi için 145 MPa, EN AC 47000 malzemesi için 65,5 MPa ve Gri Dökme Demir malzemesi için 132,5 MPa'dır. Yapısal analiz sonucu bu değerleri aşmamalıdır.

Yapısal analiz sonucunda elde edilen çıktılar şu türler altında ele alınmıştır:

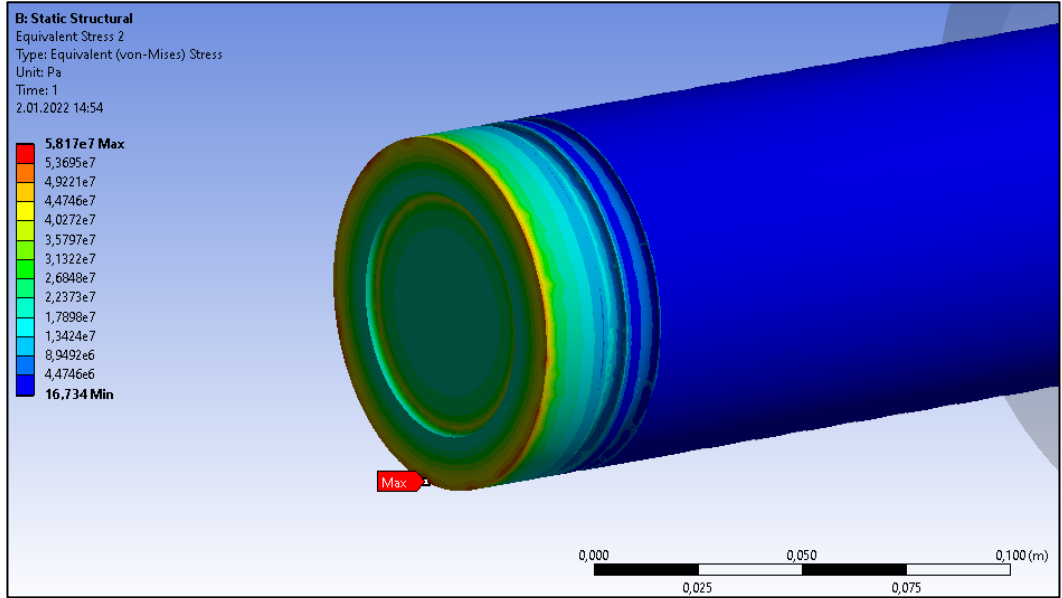
1. Eşdeğer gerilmeler (Equivalent von-Mises Stress)
2. Maksimum temel gerilmeler (Maximum Principal Stress)
3. Eşdeğer elastik gerinim (Equivalent Elastic Strain)
4. Maksimum temel elastik gerinim (Maximum Principal Elastic Strain)

6.3.2. A390.0-T6 Malzeme İçin Yapısal Analiz Sonuçları

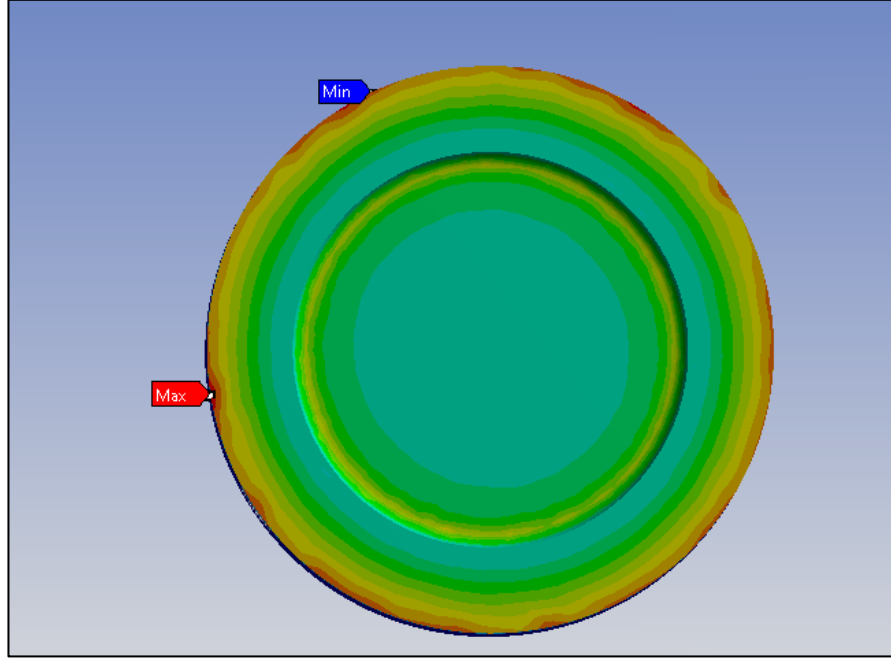
Dört çeşit analiz türü için sonuçlara bakacak olursak; jeneratör motorunda meydana gelen eşdeğer gerilmeler Şekil 6.23'te, pistonda meydana gelen eşdeğer gerilmeler Şekil 6.24, Şekil 6.25 ve Şekil 6.26'da verilmiştir.



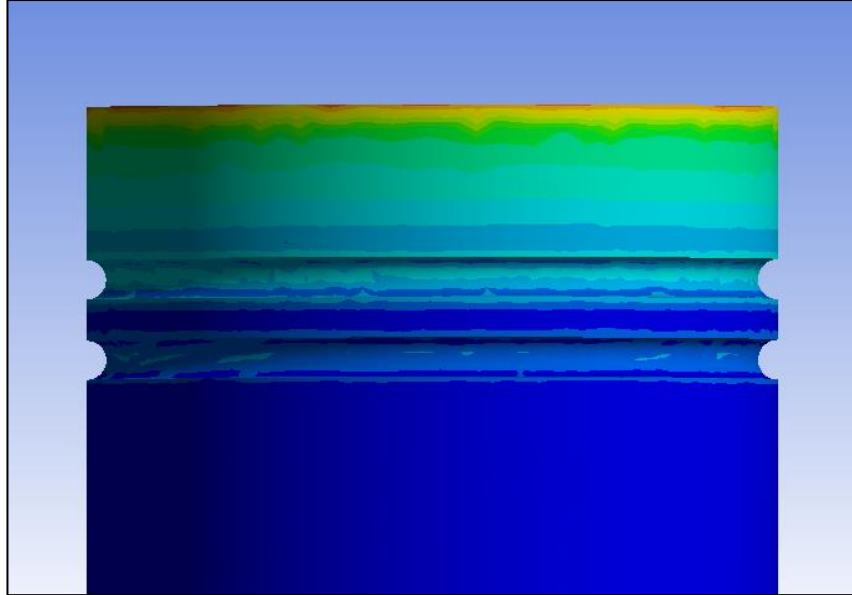
Şekil 6.23. Jeneratör motorunda meydana gelen eşdeğer gerilmeler.



Şekil 6.24. Pistonda meydana gelen eşdeğer gerilmeler-1.



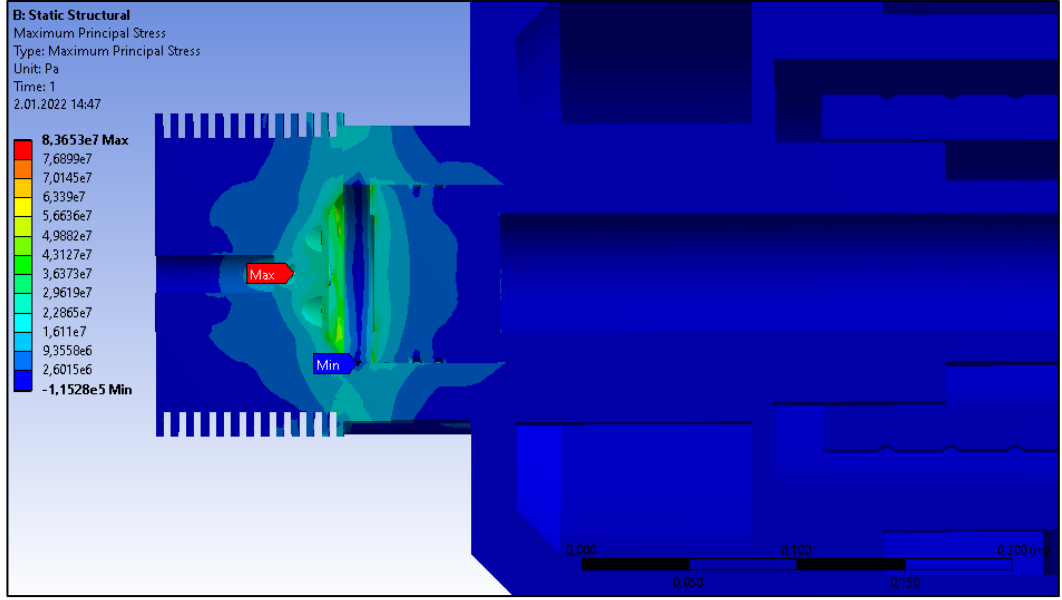
Şekil 6.25. Pistonda meydana gelen eşdeğer gerilmeler-2.



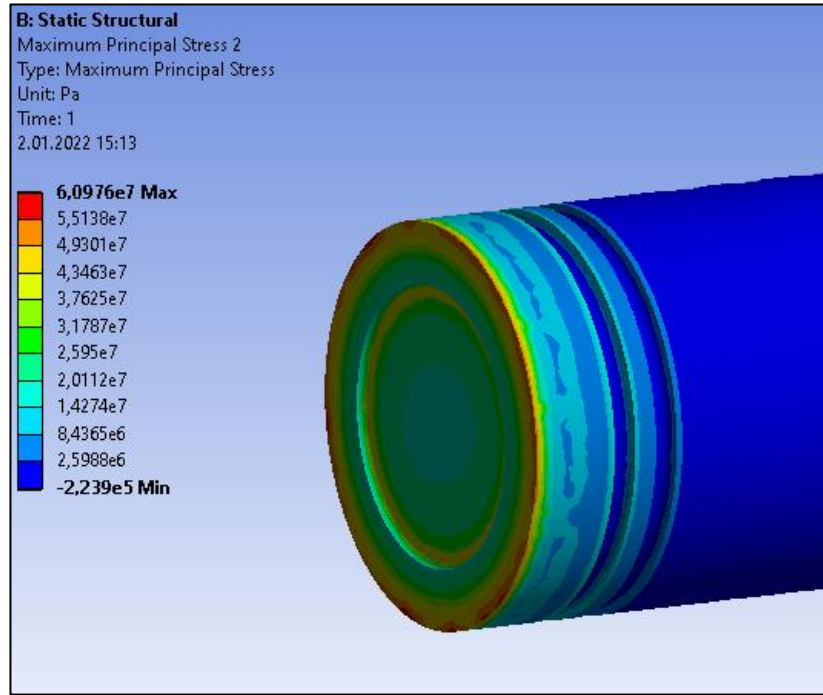
Şekil 6.26. Pistonda meydana gelen eşdeğer gerilmeler-3.

Bu sonuçlara göre silindirde maksimum 82,02 MPa ve minimum 34,1 Pa, pistonda ise maksimum 58,17 MPa ve minimum 16,7 Pa eşdeğer gerilim meydana gelmiştir.

Silindirde meydana gelen maksimum temel gerilmeler Şekil 6.27’de, pistonda meydana gelen maksimum temel gerilmeler ise Şekil 6.28’de verilmiştir.



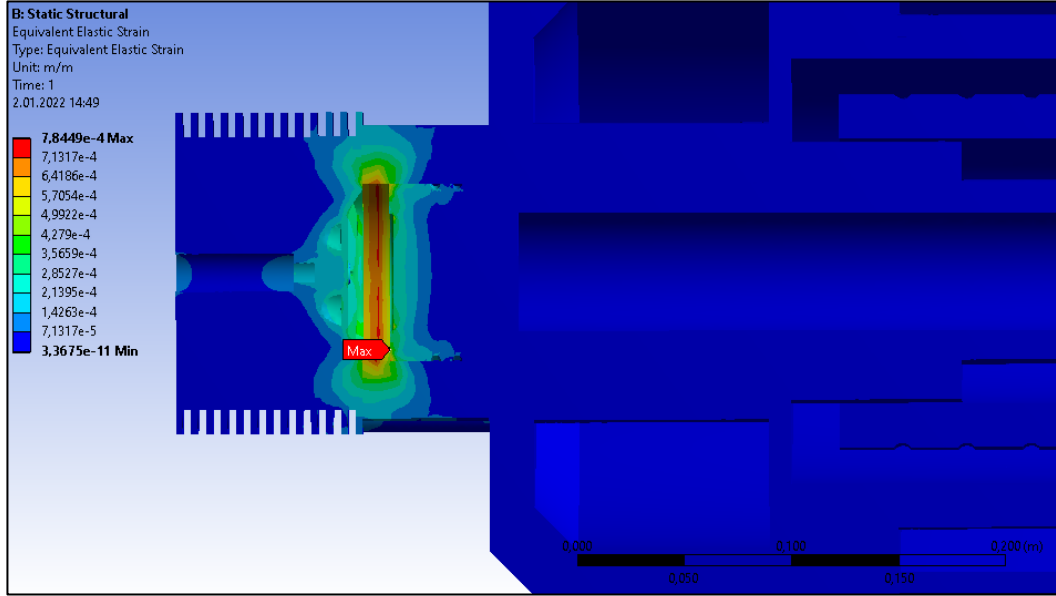
Şekil 6.27. Silindirde meydana gelen maksimum temel gerilmeler.



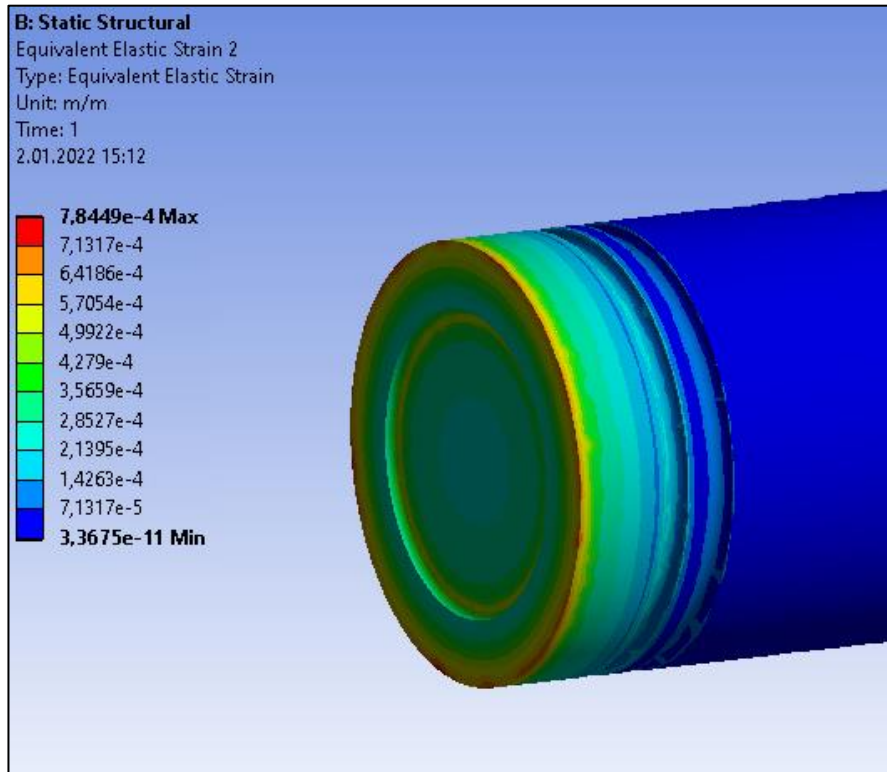
Şekil 6.28. Pistonda meydana gelen maksimum temel gerilmeler.

Bu sonuçlara göre silindirde 83,7 MPa, pistonda ise 61 MPa maksimum temel gerilmeler meydana gelmiştir.

Eşdeğer elastik gerinim sonuçları, silindir için Şekil 6.29’da, piston için Şekil 6.30’da verilmiştir.



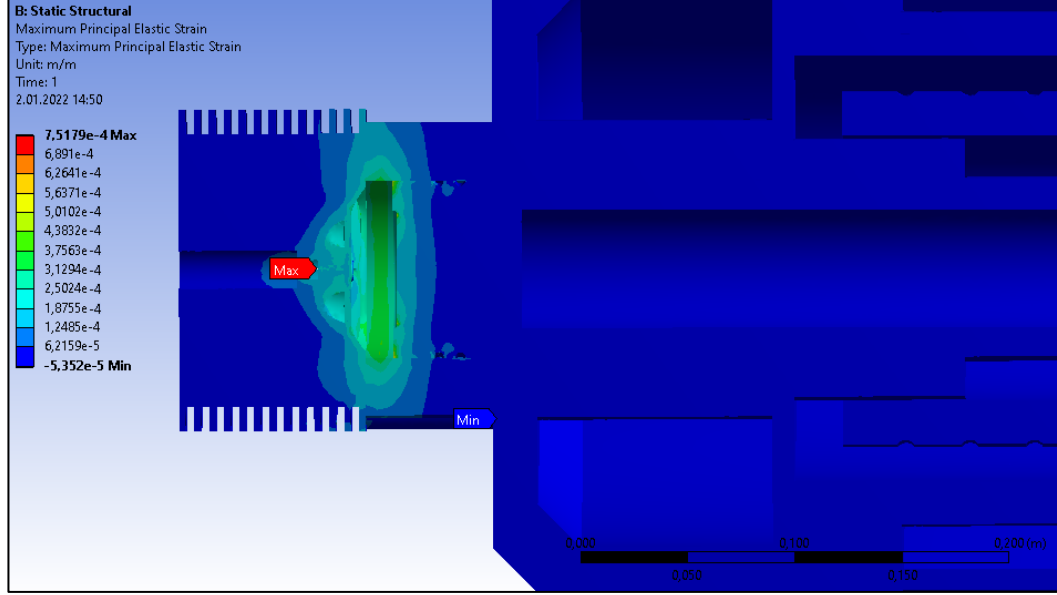
Şekil 6.29. Eşdeğer elastik gerinimin silindir için sonuçları.



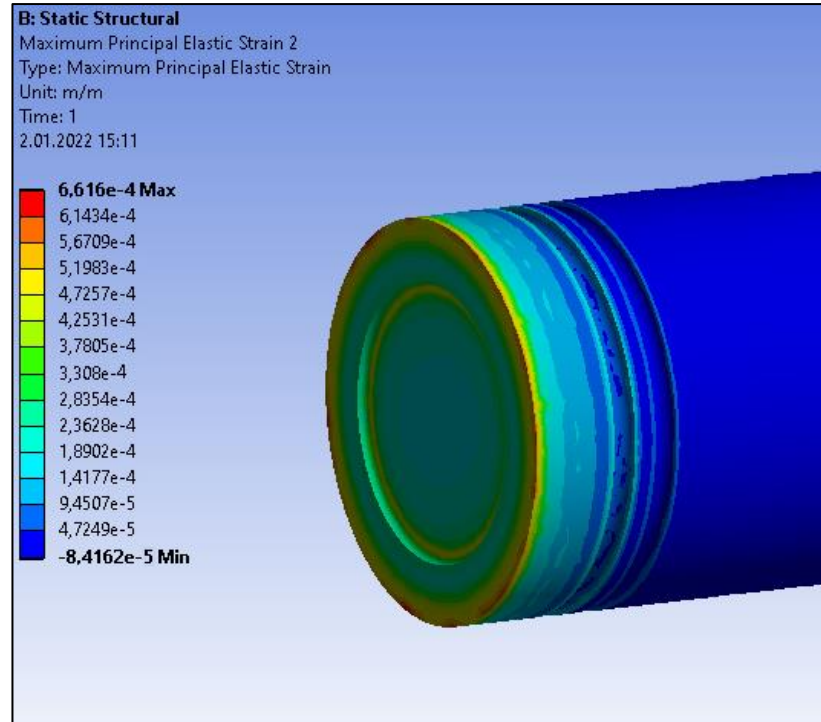
Şekil 6.30. Eşdeğer elastik gerinimin piston için sonuçları.

Buradaki sonuçlardan hareketle eşdeğer elastik gerinim maksimum 0,00078'dir.

Silindirde meydana gelen maksimum temel elastik gerinim sonuçları Şekil 6.31'de, piston için Şekil 6.32'de verilmiştir.



Şekil 6.31. Silindir için maksimum temel elastik gerinim sonuçları.

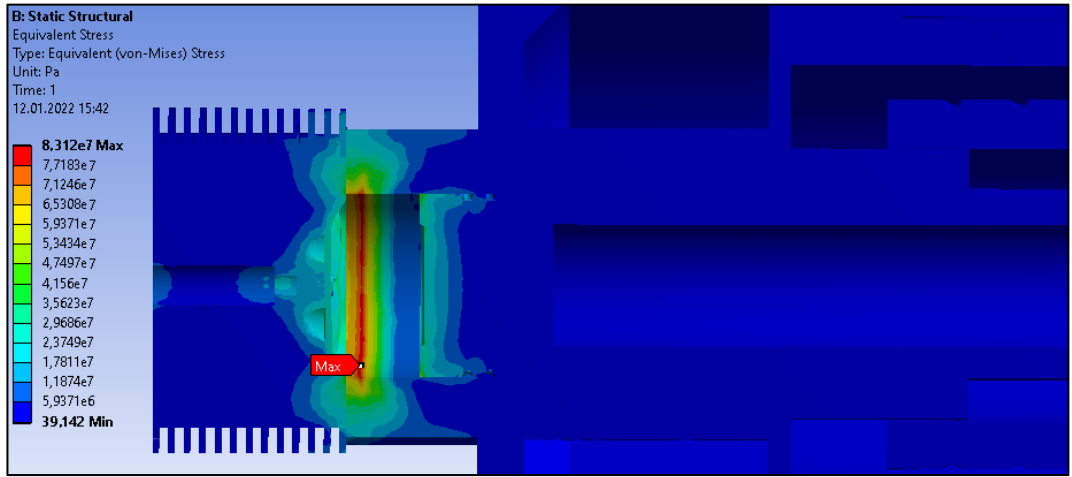


Şekil 6.32. Piston için maksimum temel elastik gerinim sonuçları.

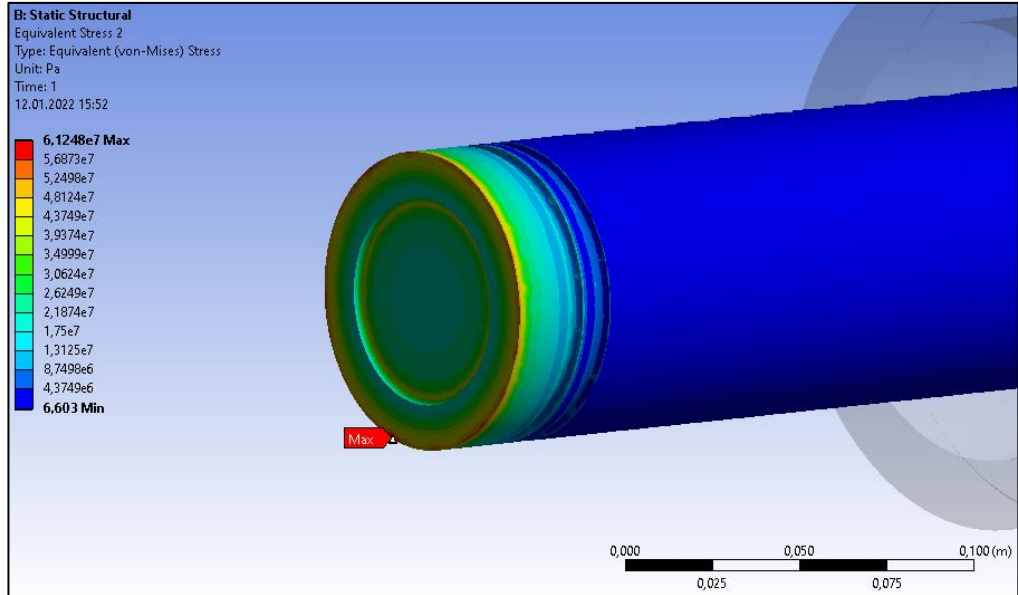
Bu sonuçlara göre maksimum temel elastik gerinim, silindir için 0,00075 ve piston için 0,00066'dır.

6.3.3. EN AC 47000 Malzeme İçin Yapısal Analiz Sonuçları

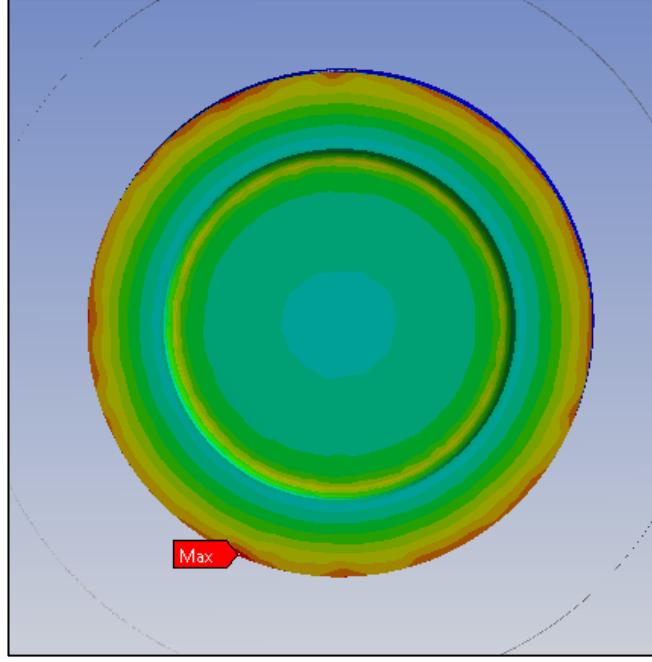
Dört çeşit analiz türü için sonuçlara bakacak olursak; jeneratör motorunda meydana gelen eşdeğer gerilmeler Şekil 6.33'te, pistonda meydana gelen eşdeğer gerilmeler Şekil 6.34, Şekil 6.35 ve Şekil 6.36'da verilmiştir.



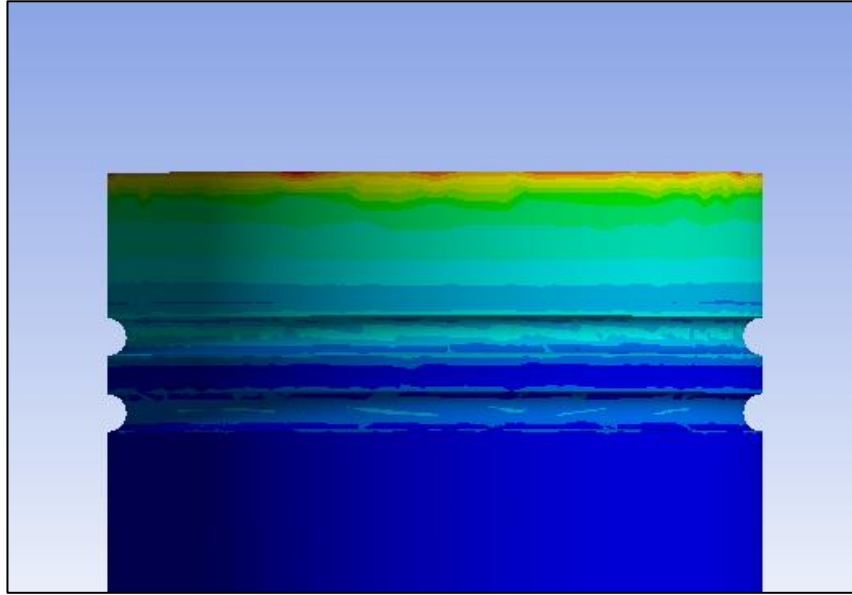
Şekil 6.33. Jeneratör motorunda meydana gelen eşdeğer gerilmeler.



Şekil 6.34. Pistonda meydana gelen eşdeğer gerilmeler-1.



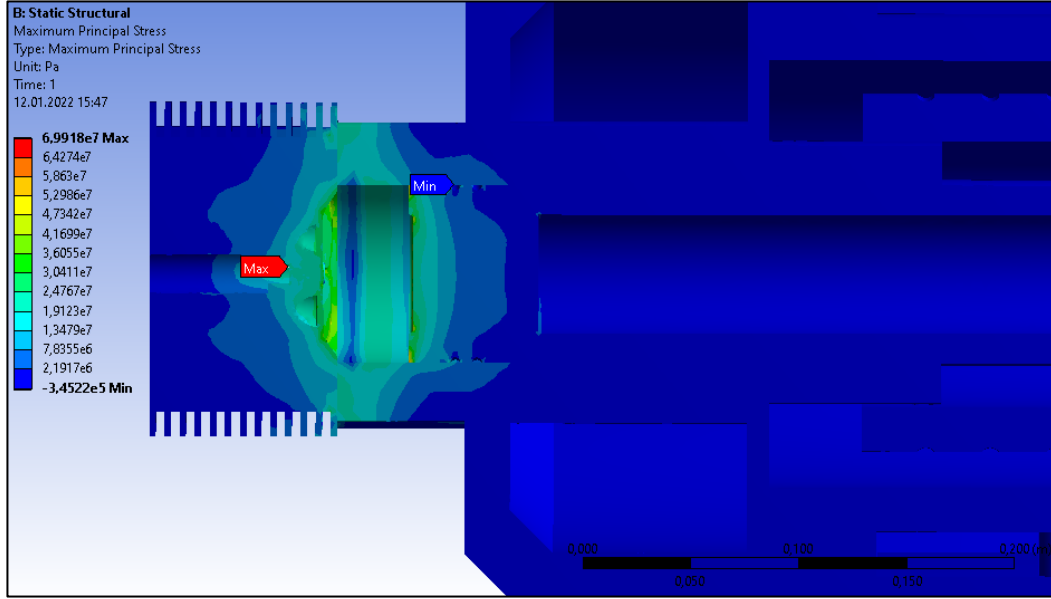
Şekil 6.35. Pistonda meydana gelen eşdeğer gerilmeler-2.



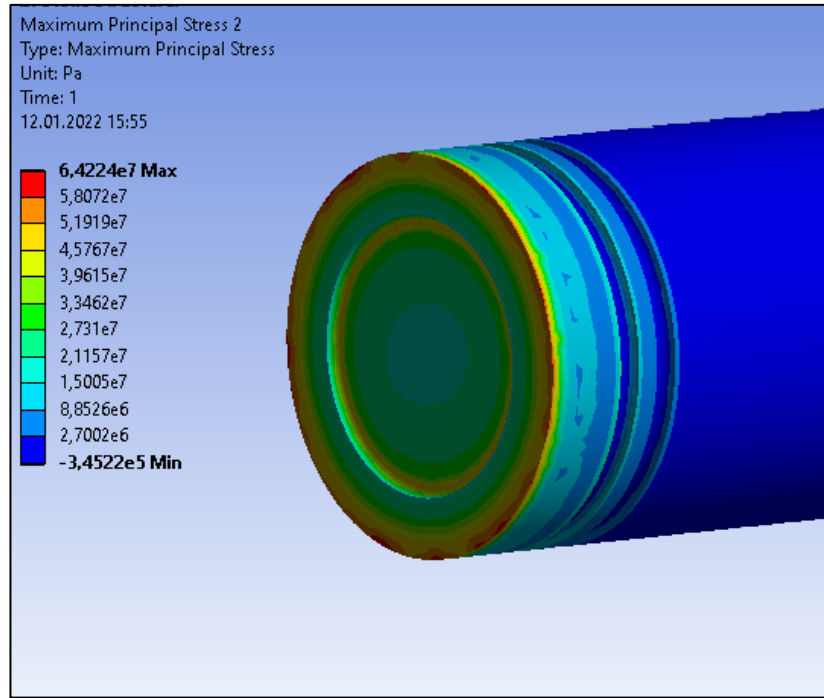
Şekil 6.36. Pistonda meydana gelen eşdeğer gerilmeler-3.

Bu sonuçlara göre silindirde maksimum 83,13 MPa ve minimum 39,1 Pa, pistonda ise maksimum 61,25 MPa ve minimum 6,6 Pa eşdeğer gerilim meydana gelmiştir.

Silindirde meydana gelen maksimum temel gerilmeler Şekil 6.37’de, pistonda meydana gelen maksimum temel gerilmeler ise Şekil 6.38’de verilmiştir.



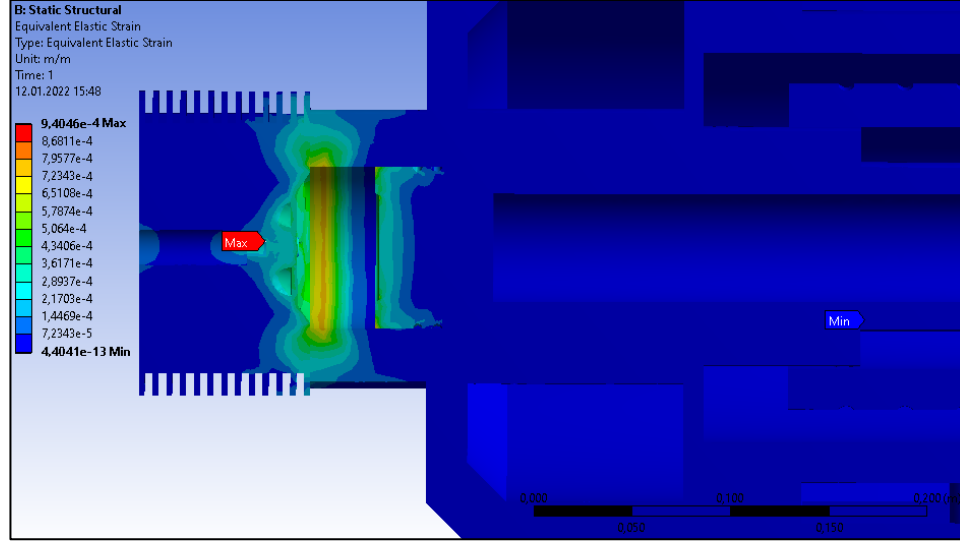
Şekil 6.37. Silindirde meydana gelen maksimum temel gerilmeler.



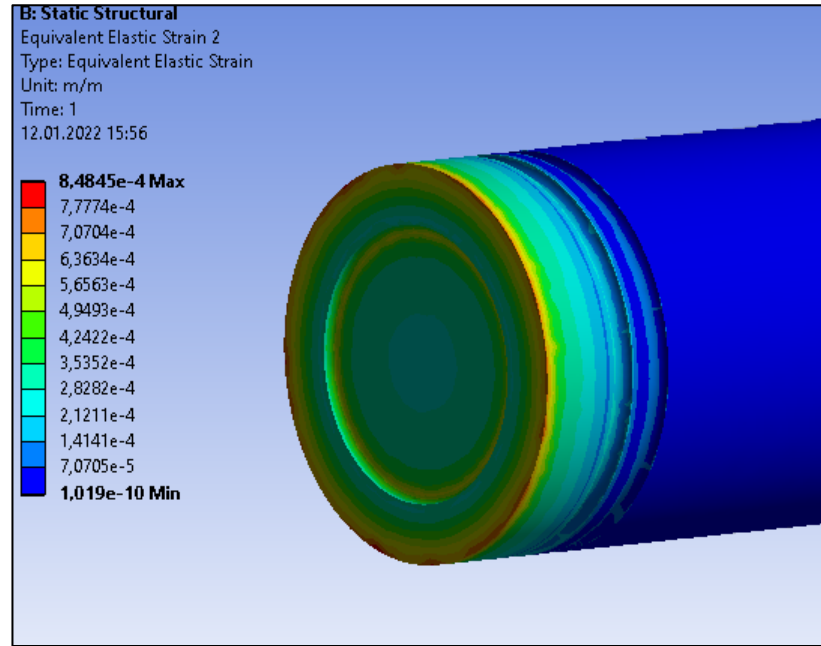
Şekil 6.38. Pistonda meydana gelen maksimum temel gerilmeler.

Bu sonuçlara göre silindirde 69,9 MPa, pistonda ise 64,2 MPa maksimum temel gerilmeler meydana gelmiştir.

Eşdeğer elastik gerinim sonuçları, silindir için Şekil 6.39’da, piston için Şekil 6.40’ta verilmiştir.

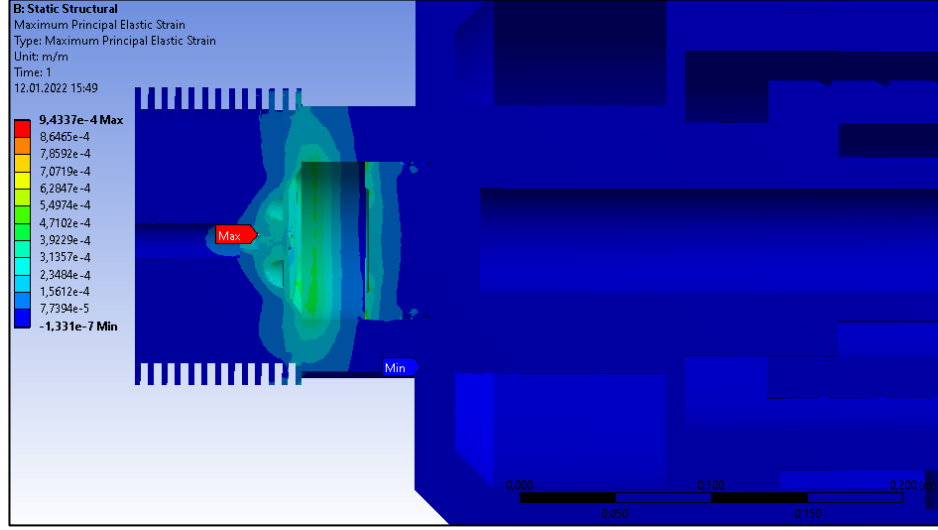


Şekil 6.39. Eşdeğer elastik gerinimin silindir için sonuçları.

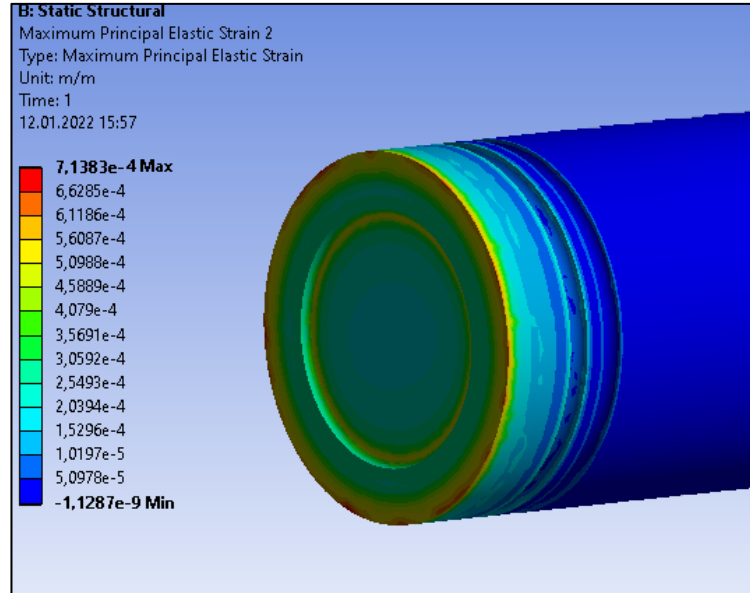


Şekil 6.40. Eşdeğer elastik gerinimin piston için sonuçları.

Buradaki sonuçlardan hareketle eşdeğer elastik gerinim silindirde maksimum 0,00094, pistonda ise 0,00085'dir. Silindirde meydana gelen maksimum temel elastik gerinim sonuçları Şekil 6.41'te, piston için Şekil 6.42'da verilmiştir.



Şekil 6.41. Silindir için maksimum temel elastik gerinim sonuçları.



Şekil 6.42. Piston için maksimum temel elastik gerinim sonuçları.

Bu sonuçlara göre maksimum temel elastik gerinim, silindir için 0,00094 ve piston için 0,00071'dir.

BÖLÜM 7

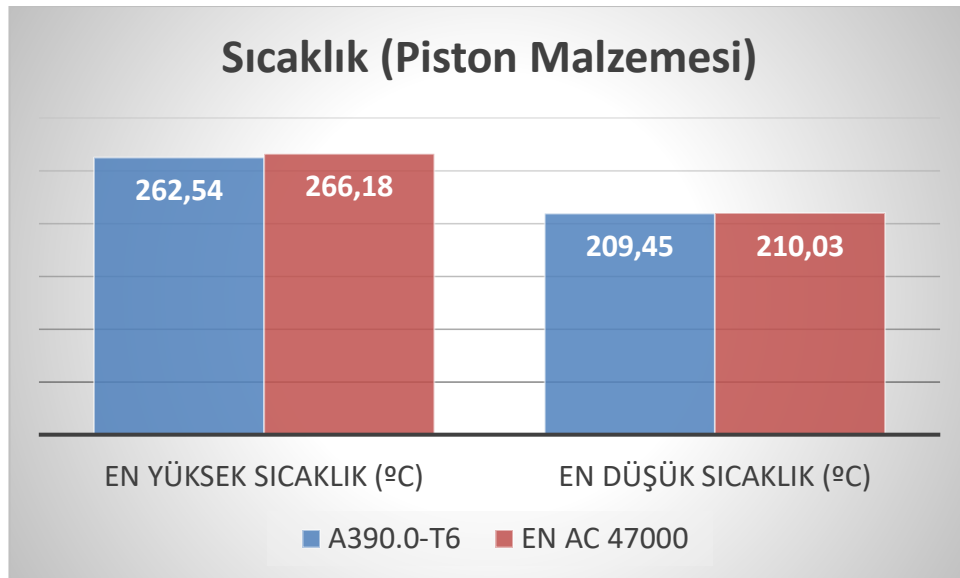
TASARIMSAL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Termal analiz sonuçlarında piston için, A390.0-T6 ve EN AC 47000 alüminyum alaşımı malzeme arasındaki farkların karşılaştırılması Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7.1. A390.0-T6 ve EN AC 47000 termal değerleri.

Sonuç Türü	A390.0-T6	EN AC 47000
En yüksek sıcaklık (°C)	262,54	266,18
En düşük sıcaklık (°C)	209,45	210,03
En yüksek ısı akısı (W/m ²)	6,8*10 ⁵	6,6*10 ⁵
En düşük ısı akısı (W/m ²)	2,4*10 ⁵	2,3*10 ⁵

Sonuçlarda görüldüğü üzere, A390.0-T6 malzemesi belirlenen sınır şartları altında EN AC 47000 malzemesine göre daha iyi sıcaklık dayanımı sonuçları vermektedir. Piston malzemeleri sıcaklık kıyaslaması grafik olarak Şekil 7.1’de gösterilmiştir.



Şekil 7.1. Piston malzemeleri için sıcaklık kıyaslaması.

A390.0-T6 malzeme için piston üst yüzeyi maksimum sıcaklığının 262 °C'ye ulaştığı görülmüştür. Piston alaşım malzemesi bu sıcaklığı tolere edebilir ancak pistonun uzun ömürlü olabilmesi için piston üst yüzey sıcaklığının 250 °C'yi geçmemesi daha sağlıklı olmaktadır. Bu konuda, piston malzemesi alaşımına mangan ve nikel ilavesi etkili olabilir. Mn ve Ni elementleri AlSi alaşımlarında sıcaklık dayanımını artırmaktadır.

EN AC 47000 malzeme için piston üst yüzeyi maksimum sıcaklığının 266 °C'ye ulaştığı görülmüştür. EN AC 47000 alaşım malzemesi sıcaklık konusunda A390.0-T6 malzemesine göre +4 °C daha sıcak çıkmaktadır. Bu fark düşürülmek istenirse alüminyum alaşımına nikel ilavesi yapılabilir.

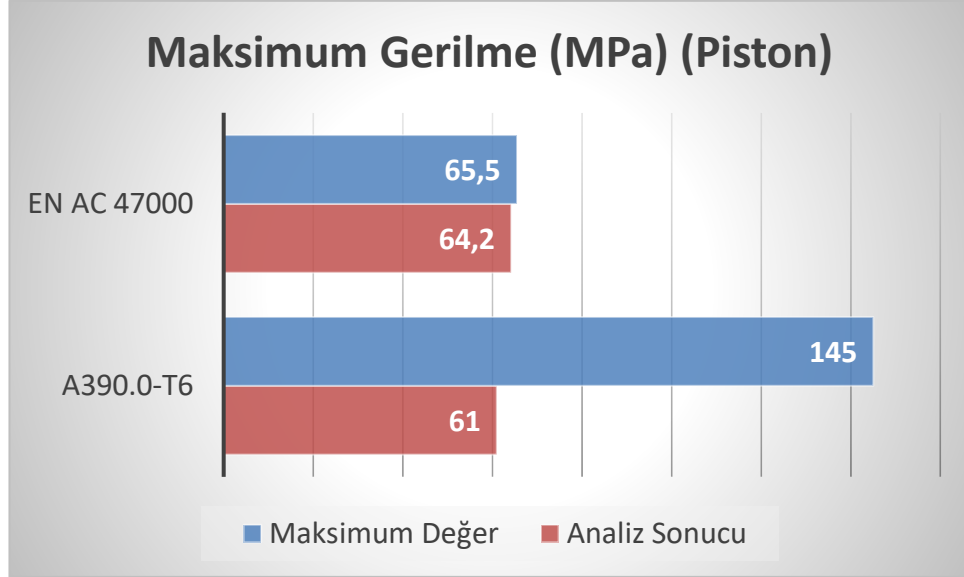
Piston malzemelerinin yapısal analiz sonuç değerleri Çizelge 7.2'de verilmiştir.

Çizelge 7.2. A390.0-T6 ve EN AC 47000 yapısal değerleri.

Sonuç Türü	A390.0-T6	EN AC 47000
Eşdeğer Gerilme (En Yüksek) (MPa)	58,17	61,25
Eşdeğer Gerilme (En Düşük) (Pa)	16,7	6,6
Maksimum Temel Gerilme (MPa)	61	64,2
Eşdeğer Elastik Gerinim (m/m)	0,00078	0,00085
Maksimum Temel Elastik Gerinim (m/m)	0,00066	0,00071

A390.0-T6 alaşım malzeme için gerinim, gerilim, dayanım, basınç ve elastikiyet değerleri, literatürdeki nominal değerleri karşılamaktadır. Ancak EN AC 47000 alaşım malzemesi için maksimum gerilme (σ_w) 65,5 MPa iken analizler sonucu pistonda maksimum gerilme 64,2 MPa çıkmıştır. Sınıra yakın bir değer çıksa da, piston emniyetli bölgede kalmıştır. A390.0-T6 malzemesi için maksimum gerilme (σ_w) 145 MPa'dır ve analiz sonucunda maksimum gerilme 61 MPa çıkmıştır.

Tasarımın yapısal analiz sonuçlarında, piston malzemeleri için maksimum gerilme değerleri ve analiz sonucu elde edilen değerler Şekil 7.2'de kıyaslanmıştır.



Şekil 7.2. Piston malzemeleri için gerilme grafiği.

Değişken sıkıştırma oranlarında yakıtlar kullanılması durumunda bu değerler değişiklik gösterecektir. Sıkıştırma oranı arttıkça yanma odası içi basınç artacağı için A390.0-T6 alaşım malzemesi yapısal olarak daha dayanıklı konumda olacakken EN AC 47000 alaşım malzemesi, güvenli değerlerin üzerine çıkacaktır.

BÖLÜM 8

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Elektrikli ve hibrit araçlar, yanmalı motorlu araçlara göre birçok avantajı olmasına rağmen, batarya kapasitelerine bağlı sınırlı mesafe kat etmeleri ve yanmalılara oranla uzun sürelerde şarj olmaları, bu araçları dezavantajlı konuma getirmektedir. Hibrit araçlarda ise bu durumları düzeltmek, menzil genişletme teknolojileri ile daha mümkündür. Menzil genişletme teknolojilerinden biri olan serbest pistonlu doğrusal jeneratör motoru, az sayıda elemanı ve görece küçük boyutları ile bu alanda geliştirmeye açık bir teknoloji olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmada, özellikle hibrit elektrikli araçlarda menzil artırmaya yarayan serbest pistonlu doğrusal jeneratör motorunun piston, silindir ve silindir kapağı tasarımı yapılmıştır. Hafifliği, dayanımı ve yüksek ısı iletimi sebebiyle, otomotiv sektöründe genel olarak piston yapımında AlSi alüminyum alaşımları tercih edilmektedir. Bu bilgilerden yola çıkarak bu çalışmada A390.0-T6 ve EN AC 47000 alüminyum alaşımı malzemelerinin kullanımı uygun görülmüştür.

Bilgisayar destekli tasarlanan jeneratör motorunun, kritik motor parametrelerine göre analizleri yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan termal ve yapısal analizler istenilen sonuçlara yakın sonuçlar vermiştir. Ayrıca her iki alaşım malzemesinin yapısal ve termal bakımdan benzer özellikler gösterdiği tespit edilmiştir. Piston malzemesi olarak, ısı iletiminin ve maksimum dayanımının daha iyi olması sebebiyle A390.0-T6 alaşım malzemesinin daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Motorun tasarlanan parçaları ile birlikte diğer yardımcı sistem elemanları (ateşleme, yakıt enjeksiyon sistemi vb.) tasarlanarak veya uygun sistemler seçilerek serbest pistonlu doğrusal jeneratör motoru, araçlarda veya akaryakıt istasyonlarında kullanılabilir duruma gelebilecektir. Hibrit elektrikli araçlarda menzil artırıcı, elektrikli araçlarda yedek güç ünitesi olarak birçok farklı kullanım alanına sahip olabilir.

Serbest pistonlu doğrusal jeneratör motorunun prototip imalatı yapılarak motor performans ve emisyon ölçümleri yapılabilir.

Çalışmada kullanılan alaşımların mekanik ve termal özellikleri, çeşitli elementler eklenerek daha iyi hale getirilebilir.

Alışlagelmişin dışında bir piston tasarımına sahip olmasını daha avantajlı duruma çevirebilmek adına özel bir stator geliştirilebilir.

Sistem, doğası gereği farklı sıkıştırma oranlarına uyum sağlayabileceği için oktan sayısı yüksek alternatif yakıtların kullanımı ile performans artırılabilir.

Silindir kapağı olarak adlandırılan ve yakıt enjeksiyon elemanlarını da içinde bulunduran sistem, geleneksel içten yanmalı motorlardan farklı olarak yeniden tasarlanabilir veya tasarım üzerinde iyileştirmeler yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Hekkert, M. P., Hendriks, F. H. J. F., Faaij, A. P. C., and Neelis, M. L., "Natural gas as an alternative to crude oil in automotive fuel chains well-to-wheel analysis and transition strategy development", *Energy Policy*, 33 (5): 579–594 (2005).
2. İnternet: Free Piston Engine, "Linear Alternator History", <https://freikolben.ch/en/linear-alternator> (01.01.2022).
3. Toutant, W. T., "The Worthington-Junkers free piston air compressor", *Journal Of The American Society For Naval Engineers*, 64 (3): 583–594 (1952).
4. Underwood, A. F., "The GMR 4-4 "Hyprex" engine a concept of the free-piston engine for automotive use", *SAE Technical Papers*, 65: 377–391 (1957).
5. Noren, O. B. and Erwin, R. L., "The future of the free-piston engine in commercial vehicles", *SAE Technical Papers*, 66: 305–314 (1958).
6. Achten, P., Oever, J. van den, Potma, J., and Vael, G., "Horsepower with brains: The design of the Chiron free piston engine", *International Off-Highway & Powerplant Congress & Exposition*, United States (2000).
7. Cawthorne, W., Famouri, P., and Clark, N., "Integrated design of linear alternator/engine system for HEV auxiliary power unit", *IEMDC 2001 - IEEE International Electric Machines And Drives Conference*, 267–274 (2001).
8. Cosic, A., Lindbäck, J., Arshad, W. M., Leksell, M., Thelin, P., and Nordlund, E., "Application of a free-piston generator in a series hybrid vehicle", 541–544 (2003).

9. Hansson, J. and Leksell, M., "Performance of a series hybrid electric vehicle with a free-piston energy converter", *2006 IEEE Vehicle Power And Propulsion Conference*, **VPPC** **2006**, (2006).
10. Huang, L. and Xu, Z., "An opposed-piston free-piston linear generator development for HEV", *SAE Technical Papers*, (2012).
11. Wakabayashi, R., Takiguchi, M., Shimada, T., Mizuno, Y., and Yamauchi, T., "The effects of crank ratio and crankshaft offset on piston friction losses", *SAE Technical Papers*, Detroit (2003).
12. Raul Pateras, P. "Motor-compressor apparatus", *Pescara & Raymond Corp.*, Patent No: US1657641A (1927).
13. Raul Pateras, P. "Motor compressor of the free piston type", *Es Energie SA*, Patent No: US2241957A (1941).
14. Tran, M. K., Bhatti, A., Vrolyk, R., Wong, D., Panchal, S., Fowler, M., and Fraser, R., "A review of range extenders in battery electric vehicles: current progress and future perspectives", *World Electric Vehicle Journal* **2021**, 12 (2): 54 (2021).
15. Rinderknecht, F., "A highly efficient energy converter for a hybrid vehicle concept - Focused on the linear generator of the next generation", *2013 8th International Conference And Exhibition On Ecological Vehicles And Renewable Energies*, Monte Carlo (2013).
16. İnternet: BMW Türkiye, "Elektrikli Otomobil Türleri Nelerdir?", <https://www.bmw.com.tr/tr/> (01.01.2022).
17. Durrett, R.P., Gopalakrishnan, V., and Najt, P., "Turbocompound free piston linear alternator", *GM Global Technology Operations LLC*, Patent No: US8729717B2 (2012).

18. Najt, P., Durrett, R.P., and Gopalakrishnan, V., "Opposed free piston linear alternator", *GM Global Technology Operations LLC*, Patent No: US8616162B2 (2013).

19. Hotta, Y., Nakakita, K., and Oteru, Y., "Free-piston engine-driven linear power generator", *Toyota Central R&D Labs Inc*, Patent No: JP2012021461A (2010).

20. Kosaka, H., Oteru, Y., Hotta, Y., Nakakita, K., and Aiki, K., "Free piston generator", *Toyota Central R&D Labs Inc*, Patent No: JP2012202385A (2011).

21. Arshad, W., "A low-leakage linear transverse-flux machine for a free-piston generator", Ph. D. Thesis, *KTH Superseded Departments Electrical Systems*, Stockholm, 58-77 (2003).

22. Hansson, J., "Analysis and control of a hybrid vehicle powered by free-piston energy converter", M. Sc. Thesis, *KTH School of Electrical Engineering*, Stockholm, 81-93 (2006).

23. Fredriksson, J. and Denbratt, I., "Simulation of a two-stroke free piston engine", *2004 SAE Fuels & Lubricants Meeting & Exhibition*, United States (2004).

24. Bergman, M., "CFD modelling of a free-piston engine using detailed chemistry", M. Sc. Thesis, *Chalmers University of Technology Applied Mechanics Combustion and Multiphase Flow*, Sweden (2006).

25. Lindgarde, O., "Method and system for controlling a free-piston energy converter", *Volvo Technology AB.*, Patent No: US7721686B2 (2005).

26. Arshad, W.M., and Sadarangani, C., "An electrical machine and use thereof", *Volvo Technology AB.*, Patent No: EP1556941A1 (2003).

27. Hibi, A. and Ito, T., "Fundamental test results of a hydraulic free piston internal combustion engine", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part D: Journal Of Automobile Engineering*, 218 (10): 1149–1157 (2004).
28. Achten, P. A. J., "The Hydrid Transmission", *Journal of Commercial Vehicles*, 116 (2): 162-170 (2007).
29. Takizawa, O., Senda, K., Tajiri, K., Kawada, K., and Yasui Y., "Control device for internal combustion engine", *Honda Motor Co Ltd.*, Patent No: JP2011202621A (2010).
30. Nakano, K., "Free-piston engine", *Mazda Motor Corp.*, Patent No: JP2008051059A (2006).
31. Okur, M., "Dört zamanlı, tek silindirli, buji ile ateşlemeli bir benzin motorunun sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak tasarımı ve imali", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 25-56 (2007).
32. Canvar, U., "Dizel motor pistonunun sonlu elamanlar yöntemi ile yapısal ve termal analizi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul 50-98 (2011).
33. İnternet: Material Properties Database, "A390.0-T6 and EN AC 47000 Cast Aluminum Alloy Properties", <https://www.makeitfrom.com/material-group/Aluminum-Alloy> (01.01.2022).
34. Engler-Pinto, C. C., Lasecki, J. V., Boileau, J. M., and Allison, J. E., "A comparative investigation on the high temperature fatigue of three cast aluminum alloys", *SAE 2004 World Congress & Exhibition*, United States (2004).

35. Internet: Online Material Information Resource, "Overview of Materials for Gray Cast Iron", <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=f3cd25980ab24fdaa5893252cd2bc192&ckck=1> (01.01.2022).
36. Cerit, M., "Thermo mechanical analysis of a partially ceramic coated piston used in an SI engine", *Surface And Coatings Technology*, 205 (11): 3499–3505 (2011).
37. Durat, M., Kapsiz, M., Nart, E., Ficici, F., and Parlak, A., "The effects of coating materials in spark ignition engine design", *Materials And Design*, 36: 540–545 (2012).

ÖZGEÇMİŞ

Burak DAŞKIN, İbn-i Sina Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2013 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünü kazandı. Bir yıl İngilizce Hazırlık okudu. Makine Mühendisliği bölümünden 2018 yılında iyi ortalama ile mezun oldu. Takip eden dönemde Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans'a başladı ve halen eğitimine devam etmektedir.