



**HAVA ALIKLI KONTROL TAHRİK SİSTEMİ TASARIMI VE
MODELLEMESİ**

Orhan Fatih ERCİS

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2021

Orhan Fatih ERCİS tarafından hazırlanan “HAVA ALIKLI KONTROL TAHRİK SİSTEMİ TASARIMI VE MODELLEMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Ömer KELEŞ

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Mehmet Arif ADLI

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Sinan KILIÇASLAN

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Yiğit YAZICIOĞLU

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Özgür Uğraş BARAN

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 01/01/2021

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Cevriye GENCER
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Orhan Fatih ERCİS

01/01/2021

HAVA ALIKLI KONTROL TAHRİK SİSTEMİ TASARIMI VE MODELLEMESİ

(Doktora Tezi)

Orhan Fatih ERCİS

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2021

ÖZET

Kontrol Tahrik Sistemleri (KTS) güdümlü mühimmatları kontrol etmek için kullanılmaktadır. Çoğu füze tahrik sistemi elektro-hidrolik veya elektro-mekanik servo eyleyicilere sahiptir. Bu tez çalışmasında, hava alığına sahip ucuz ve basit yapıdaki bir elektro-pnömatik tahrik sistemin katı modellenmesi, simülasyonu, akış analizleri ve testleri ele alınmıştır. Bu yapıda hava, burundaki bir açıklıktan içeri girerek radyal orifisler sayesinde izole edilmiş iki hava odasına dolmaktadır. Hava odaları bu hacimler içerisinde oluşan basınçları manipüle etmek için değişken çıkış orifislerine sahiptir. Bu orifisler sayesinde odalar arasında bir basınç farkı yaratılır. Bu basınç farkı mühimmatın aerodinamik kanatlarına bir şaft ile bağlı hava kanatçığı üzerinde net tork ve hareket oluşturur. Bahsedilen manipülasyon sayesinde aerodinamik kanatlar kontrol edilir. Manipülasyon Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) ile sürülen iki solenoid eyleyici tarafından sağlanır. Sistemin doğrusal olmayan matematiksel eşitlikleri literatür esas alınarak türetilmiştir. Kritik parametrelerin çıktılar üzerindeki etkisini anlamak ve 5 Hz' de frekans cevabını irdelemek için bir simülasyon modeli (Amesim) oluşturulmuştur. Kritik parametrelerin optimizasyonu sayesinde yüksek prototip sayısı ve işçilik maliyeti düşürülmüştür. Ayrıca, işleme operasyonlarının bazıları simülasyonlar yardımıyla tasarım ve imalat sürecinden kaldırılmıştır. Akış analizleri yapıldıktan sonra performans testleri gerçekleştirilmiştir. Test verileri simülasyon ve akış analizleri ile kıyaslanmıştır. Sonuçlar arasında anlamlı bir farklılık bulunmamıştır. Oluşturulan mimari için simülasyon ve akış model altyapısı oluşturulmuştur. Çalışma sonunda ucuz ve basit yapıya sahip bir elektro-pnömatik KTS geliştirilmiş ve testlerle doğrulanmıştır.

Bilim Kodu : 91418
Anahtar Kelimeler : pnömatik, kontrol, solenoid, HAD, test, modelleme
Sayfa Adedi : 83
Danışman : Prof. Dr. Ömer KELEŞ

DESIGN AND MODELLING OF CONTROL ACTUATION SYSTEM WITH AIR INTAKE

(Ph. D. Thesis)

Orhan Fatih ERCİS

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2021

ABSTRACT

Control Actuation Systems (CAS) are used to control guided munitions. Most of actuation systems have electro-hydraulic or electro-mechanical servo actuators. This thesis presents solid modelling, simulation, fluid analysis, testing of a simple and low cost electro-pneumatic actuation system. In the system, air passes through a hole at nose and enters two isolated chambers via radial orifices. The chambers have variable outlet orifices to manipulate pressure in the volumes. A pressure difference is generated between the chambers by the orifices. The difference creates a net torque and it moves air vane connected to aerodynamic fins of the missile. The aerodynamic fins are controlled thanks to this manipulation. The manipulation is provided by two solenoid actuators which are driven by Pulse Width Modulation (PWM). Nonlinear mathematical equations of the actuation system are derived based on literature studies. A simulation model (Amesim) is also created to understand the effect of the critical parameters on outputs and investigate frequency response at 5 Hz. The number of prototypes and labor cost are reduced by the optimization of the parameters. Besides, some machining operations are eliminated with the help of simulation results during design and manufacturing. Performance testing is performed after fluid analysis. The test results are compared with the simulation and fluid analysis results. There isn't any meaningful difference between the results. Foundation of simulation and fluid analysis modelling is built for the created architecture. At the end of the study, a simple and low cost electro-pneumatic CAS is developed and verified by tests.

Science Code : 91418

Key Words : pneumatic, control, solenoid, CFD, test, modelling

Page Number : 83

Supervisor : Prof. Dr. Ömer KELEŞ

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmalarım boyunca değerli bilgi ve birikimleri ile beni yönlendiren saygıdeğer Prof. Dr. Ömer KELEŞ' e teşekkür ederim. Akışkanlar dinamiği ve kontrol konularında görüşlerini aldığım kıymetli Prof. Dr. Haluk AKSEL, Prof. Dr. Nuri YÜCEL, Dr. Öğr. Üyesi Özgür Uğraş BARAN ve Prof. Dr. Bülent PLATİN, Doç. Dr. Sinan KILIÇASLAN' a katkıları için minnettarım. Tez çalışmalarına maddi ve manevi olarak katkı sağlayan Roketsan A.Ş.' ye teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım esnasında destek ve sabır gösteren kıymetli eşim Özge Büşra ERCİS' e, sevgili annem Nimet ERCİS' e, beni motive eden rahmetli babam Mehmet Özkan ERCİS' e, saygıdeğer kardeşim Yavuz Selim ERCİS ve Mustafa ÇÖKMEZOĞLU' na teşekkürlerimi sunmayı borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
3. ELEKTRO-PNÖMATİK SİSTEM VE TEORİK ALT YAPI	11
3.1. Sistem Mimarisi	11
3.2. Teorik Altyapı ve Matematiksel Eşitlikler	13
4. DİNAMİK SİSTEM MODELLEMESİ VE SİMÜLASYON	23
4.1. Amesim ve Simulink ile Modelleme	23
4.2. Simülasyon Parametrelerinin Değerlendirilmesi	32
4.3. Modelin Frekans Cevabının İrdelenmesi	41
5. AKIŞ MODELLEMESİ VE HESAPLAMALI AKIŞKAN DİNAMİĞİ ANALİZLERİ	49
6. ÜRETİM VE TESTLER	57
7. SİMÜLASYON, AKIŞKAN ANALİZİ VE TEST SONUÇLARININ KIYASI	69
8. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME	77
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	83

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. Çözüm ağı sayısı ve kuvvet değerleri.....	51



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Elektro-mekanik KTS.....	3
Şekil 2.2. Elektro-hidrolik KTS	4
Şekil 2.3. Elektro-pnömatik KTS.....	4
Şekil 2.4. Konvansiyonel sistemlere ait kompleks alt komponent örnekleri	5
Şekil 2.5. Basınç kaynağı esaslı pnömatik servo kontrol tahrik sistemi	7
Şekil 2.6. Orbital ATK firmasına ait güdüm kiti	8
Şekil 2.7. Patente ait mekanizmanın iç yapısının gösterimi	9
Şekil 2.8. Patente ait mekanizmanın dış yapısının gösterimi.....	9
Şekil 2.9. Kornet Füzesi	10
Şekil 3.1. Ön katı model tasarımı yapılan elektro-pnömatik hava alıklı kontrol tahrik sistemi	11
Şekil 3.2. Elektro-pnömatik sisteme ait sistem mimarisi	12
Şekil 3.3. Burun ilk giriş orifisinin gösterimi	13
Şekil 3.4. İlk burun hacminin gösterimi	16
Şekil 3.5. İlk burun hacminin gösterimi	18
Şekil 3.6. Döner kanatçık üzerine etkileyen kuvvetler.....	21
Şekil 3.7. Kapakçık üzerine etkileyen dış kuvvetler	22
Şekil 4.1. Burundan hava giriş kısmının Amesim modellemesi.....	23
Şekil 4.2. Döner kanatçık kısmının Amesim modellemesi.....	24
Şekil 4.3. Kapakçık ve çıkış kısmının Amesim ile modeli	24
Şekil 4.4. Hava alıklı KTS Amesim komple modeli	25
Şekil 4.5. Hava alıklı KTS Simulink Komple Modeli	26
Şekil 4.6. Sisteme verilen 5 Hz frekanstaki solenoid kuvvet girdisi	27

Şekil	Sayfa
Şekil 4.7. Amesim modellemesi kanatçık açı çıktısı	28
Şekil 4.8. Amesim modellemesi kanatçık tork çıktısı	29
Şekil 4.9. Simulink modellemesi kanatçık açı çıktısı	29
Şekil 4.10. Simulink modellemesi kanatçık tork çıktısı	30
Şekil 4.11. Amesim modellemesi oda basınç değerleri	30
Şekil 4.12. Simulink modellemesi oda basınç değerleri	31
Şekil 4.13. İki modellemedeki basınç farklarının kıyası	32
Şekil 4.14. Kanatçık-gövde arası radyal orifis alanının 270 mm^2 olduğunda oda basınç ve basınç farkları.....	33
Şekil 4.15. Kanatçık-gövde arası radyal orifis alanının 200 mm^2 olduğunda oda basınç ve basınç farkları.....	34
Şekil 4.16. Kanatçık-gövde arası radyal orifis alanının 100 mm^2 olduğunda oda basınç ve basınç farkları.....	35
Şekil 4.17. Farklı kapakçık dairesel alanlarında oluşan oda basınç ve basınç farkları-1	36
Şekil 4.18. Farklı kapakçık dairesel alanlarında oluşan oda basınç ve basınç farkları-2	37
Şekil 4.19. Farklı burun ilk hacim değerlerine göre basınç ve basınç farkları	38
Şekil 4.20. Farklı kanatçık altı oda hacim değerlerine göre basınç ve basınç farkları	39
Şekil 4.21. Kanatçık tork/ kütleli debi oranının giriş kütleli hava debisini farklı değerlerine göre değişimi.....	40
Şekil 4.22. Farklı solenoid kuvvetlerinin tork çıktısına etkisi	41
Şekil 4.23. 5 Hz hedef frekanstaki solenoid komut girdisine karşılık elde edilen kanatçık açı çıktısı.....	42
Şekil 4.24. 5 Hz hedef frekanstaki solenoid komut girdisine karşılık elde edilen kanatçık tork çıktısı	43
Şekil 4.25. Açık çevrim frekans cevabı ve Bode eğrileri.....	44
Şekil 4.26. 180° faz kaymasının gerçekleştiği 13,5 Hz frekans cevabı	45

Şekil	Sayfa
Şekil 4.27. Kanatçık açılı genliklerinin bozulmaya başladığı 15 Hz frekans cevabı.....	45
Şekil 4.28. Debi artırıldıktan sonra açılı çevrim frekans cevabı ve bode eğrileri.....	46
Şekil 4.29. Farklı radyal orifis alanlarına (A_r) bağlı olarak kanatçık açılı (θ) çıktıları	47
Şekil 5.1: Çözüm ağı yapısı ve sınır koşullarının görünümü	50
Şekil 5.2. Burun içi havanın hız dağılımı.....	52
Şekil 5.3. Yüksek basınç odasına ait statik basınç dağılımı	53
Şekil 5.4. Düşük basınç odasına ait statik basınç dağılımı	54
Şekil 5.5. Toplam basınç dağılımı	55
Şekil 6.1. Tasarımı optimize edilmiş katı model	57
Şekil 6.2. Eklenen sensörlerle beraber mekanik yerleşim.....	58
Şekil 6.3. Hava alımlı KTS test düzeneği	59
Şekil 6.4. Hava alımlı KTS ve test düzeneği	59
Şekil 6.5. Test esnasında Labview kontrolcü ve veri toplama arayüzü	60
Şekil 6.6. Performans testi sonucu elde edilen açılı ve komut grafiği.....	61
Şekil 6.7. Kanat açısının komutu takip etmeyi bıraktığı bölge.....	61
Şekil 6.8. Kanat açısının 90°' lik faz kaymasını yaşadığı bölge	62
Şekil 6.9. Kanatçık açısının 5 Hz hedef frekansındaki cevabı.....	62
Şekil 6.10. Performans testleri boyunca oda basınç değerleri	63
Şekil 6.11. Düşük frekans bölgesindeki oda basınç değerleri	64
Şekil 6.12. Testler esnasında kapakçık komut ve deplasman verileri	64
Şekil 6.13. Kapakçık deplasmanın azaldığı bölge	65
Şekil 6.14. Amesim ve test basınç verilerinin 12,5 Hz' deki kıyası.....	66
Şekil 6.15. Amesim ve test basınç verilerinin 25 Hz' deki kıyası	67

Şekil	Sayfa
Şekil 7.1. Amesim modeli basınç değerlerinin HAD analizi ve test sonuçları ile kıyası	70
Şekil 7.2. Test debisi senaryosunda Amesim modeli kanatçık normal kuvvetlerinin HAD analizi ile kıyası.....	71
Şekil 7.3. Kapakçık kuvvetlerinin Amesim modeli ve HAD analizinde kıyası	72
Şekil 7.4. Test debisi senaryosunda frekans cevabı faz açısı değerlerinin simülasyon ve test sonuçlarına göre kıyası.....	73
Şekil 7.5. Genliğin bozulduğu frekans değerlerinin simülasyon ve test sonuçlarına göre kıyası.....	74
Şekil 7.6. 5 Hz hedef frekans cevabı faz açısının simülasyon ve test sonuçlarına göre kıyası.....	75
Şekil 7.7. Düşük frekans değerlerinde (1-1,5 Hz) Komut-Kanat Açısı grafiği	76

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

A_a	Kanatçık alt alanı (m^2)
A_f	Füze tahliye alanı (m^3)
A_g	Burun giriş alanı (m^2)
A_k	Kapakçık alanı (m^2)
A_r	Kanatçık radyal alanı (m^2)
b	Sönüm oranı
c	Ses hızı (m/s)
C_{ff}	Füze içi akış katsayısı
C_{fg}	Burun giriş akış katsayısı
C_{fk}	Kapakçık akış katsayısı
C_{fr}	Kanatçık radyal akış katsayısı
C_m	Burun kütleli debi katsayısı
C_{mk1}	Kapakçık sol oda kütleli debi katsayısı
C_{mk2}	Kapakçık sağ oda kütleli debi katsayısı
C_{mr2}	Kanatçık sol oda kütleli debi katsayısı
C_{mr3}	Kanatçık sağ oda kütleli debi katsayısı
C_{mf}	Füze içi kütleli debi katsayısı
C_p	Sabit basınçtaki özgül ısı katsayısı
C_v	Sabit hacimdeki özgül ısı kapasitesi (kJ/kg.K)
F_s	Solenoid Kuvveti (N)
J	Kanatçık döner ataleti (kgm^2)
k	Özgöl ısı oranı
L	Kanatçık basınç uygulama mesafesi (mm)
L_1	Sol kanatçık basınç uygulama mesafesi (mm)
L_2	Sağ kanatçık basınç uygulama mesafesi (mm)

Simgeler

Açıklamalar

M	Mach sayısı
m	Kontrol hacmi kütlesi (kg)
m_k	Kanatçık kütlesi (kg)
$\dot{m}$	Burun giriş hava kütleli debisi (kg/s)
$\dot{m}_1$	Sol oda giriş kütleli debisi (kg/s)
$\dot{m}_2$	Sağ oda giriş kütleli debisi (kg/s)
$\dot{m}_{10}$	Sol oda çıkış kütleli debisi (kg/s)
$\dot{m}_{20}$	Sağ oda çıkış kütleli debisi (kg/s)
P_{atm}	Atmosfer basıncı (bar)
P_{cr}	Kritik basınç oranı (0,528)
P_2	Sol oda basıncı (bar)
P_3	Sağ oda basıncı (bar)
P_g	Burun ilk giriş basıncı (bar)
P_i	Burun ilk oda basıncı (bar)
P_{in}	Burun giriş statik basıncı (bar)
P_k	Kaynak basıncı (bar)
P_g	Burun giriş basıncı (bar)
P_f	Füze içi basıncı (bar)
$P_{o,in}$	Burun giriş toplam basıncı (bar)
R	İdeal gaz sabiti (8,314 J/mol K)
$\dot{q}_{in}$	Kontrol hacmine giren ısı oranı (J/s)
$\dot{q}_{out}$	Kontrol hacminden çıkan ısı oranı (J/s)
θ	Kanatçık açısı (°)
ρ	Hava yoğunluğu (kg/m^3)
ρ_g	Giriş hava yoğunluğu (kg/m^3)
x_0	Kapakçık ilk konum (mm)
W	Kapakçık alanı
$\dot{W}_{cv}$	Kontrol hacminde yapılan iş (J/s)
x	Kapakçık deplasmanı (mm)
r	Kanatçık yarı çapı (mm)
R	İdeal gaz sabiti (kJ/kg.K)

Simgeler**Açıklamalar**

t	Zaman (s)
T	Burun hava sıcaklığı (K)
T_1	Sol oda sıcaklığı (K)
T_2	Sağ Oda Sıcaklığı (K)
T_g	Kaynak basınç sıcaklığı (K)
T_k	Kaynak basınç sıcaklığı (K)
$\dot{U}$	Kontrol hacmi iç enerji değişimi (J/s)
V_o	Burun ilk hacmi (m^3)
V_2	Sol oda hacmi (m^3)
V_3	Sağ oda hacmi (m^3)
V_g	Giriş hava hızı (m/s)
V_f	Füze içi hacmi (m^3)
V_{20}	Sol oda ilk hacmi (m^3)
V_{30}	Sol oda ilk hacmi (m^3)

Kısaltmalar**Açıklamalar**

CAS	Control Actuation Systems
CFD	Computational Fluid Dynamics
DGM	Darbe Genişlik Modülasyonu
HAD	Hesaplama Akışkanlar Dinamiği
KTS	Kontrol Tahrik Sistemi
PWM	Pulse Width Modulation

1. GİRİŞ

Füze sistemlerinde yönelim amaçlı kullanılan aerodinamik kanatların tahriğinde elektro-mekanik, elektro-hidrolik ve elektro-pnömatik eyleyici sistemleri kullanılabilmektedir. Elektro-mekanik tahrik sistemleri günümüzde elektro-hidrolik ve elektro-pnömatik sistemlerin giderek yerini alsa da bazı durumlarda hidrolik sistemler güç yoğunluğu açısından zorunlu olabilmektedir.

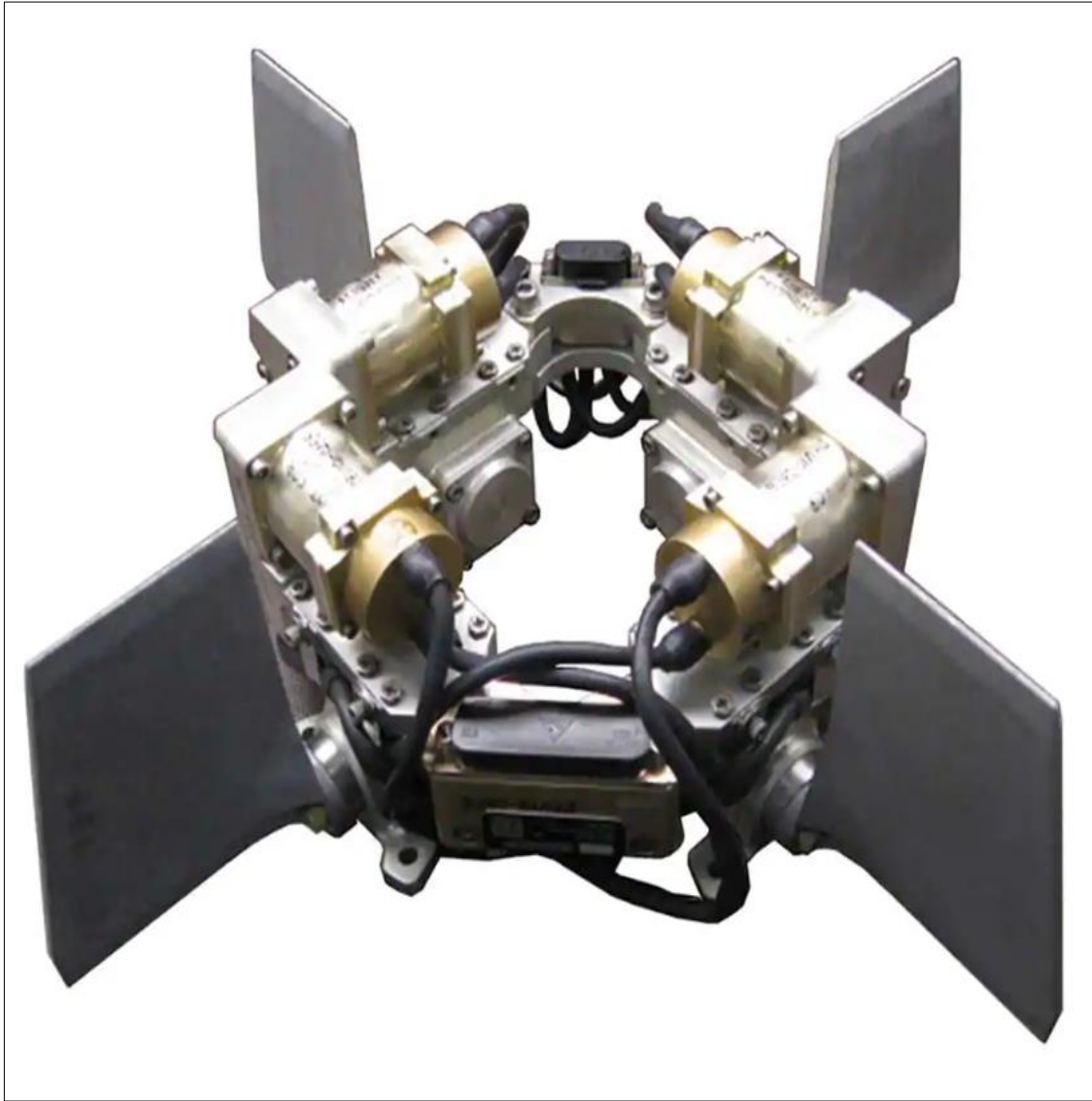
Elektro-pnömatik sistemler genellikle yüksek hız ve maliyet etkin uygulamalarda tercih edilmektedir. Güdümlü mühimmatlarda güvenilirlik sebebiyle genellikle elektro-mekanik tahrik sistemler yüksek tercih edilmektedir. Ancak küçük çaplardaki konvansiyonel mühimmatlarda eyleyici sistemlerine ait alt komponent maliyetlerinin (servo motor, bilyalı vida, servo valf vb.) yüksek olması ve alt sistemlerin tedarikinin-üretiminin zor olması bu yönelim sistemlerine alternatif bulma ihtiyacı doğurmuştur.

Bu sebeple literatürdeki elektro-pnömatik yapıya sahip kontrol tahrik sistemleri incelenerek basit ve ucuz yapıdaki sistemler araştırmalarda temel alınmıştır. Literatürde genellikle elektro-pnömatik sistemler bir basınç kaynağına sahip olmakta ve bu durum güvenilirlik sorunu yaratmaktadır. Dolayısıyla güdümlü mühimmatın uçuşu esnasında akan havanın kullanılarak tahrik sistemi geliştirilmesi ana motivasyon olmuştur. Mühimmat üzerinden akan havanın içeri alındıktan sonra maniple edilmesi ve kanatçık tahrik mekanizmasının oluşturulması çalışmaların ana kısmını oluşturmaktadır. Elektro-pnömatik sistemlerin dinamik performansını belirleyen konuların başında gaz dinamiği gelmektedir. Dolayısıyla çalışmaların büyük bölümü gaz dinamiğinin sistem çıktılarına etkisi üzerinedir. Bu inceleme esnasında simülasyon ve modelleme araçlarından yararlanılmıştır.

Bu tez çalışmasında ufak çaptaki (107 mm, 122 mm, 155 mm gibi) roketlerin ve füzelerin hava akışını kullanarak daha ucuz ve basit yarı veya tam güdümlü füzeler haline getirilmesi amaçlanmaktadır. Bu sayede füzelerin yönelim performansından bir miktar ödün verilse dahi, kompakt (füze gövdesine kit halinde takılarak) ve operasyonel yeteneği yüksek olan mühimmatlar elde edilecektir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

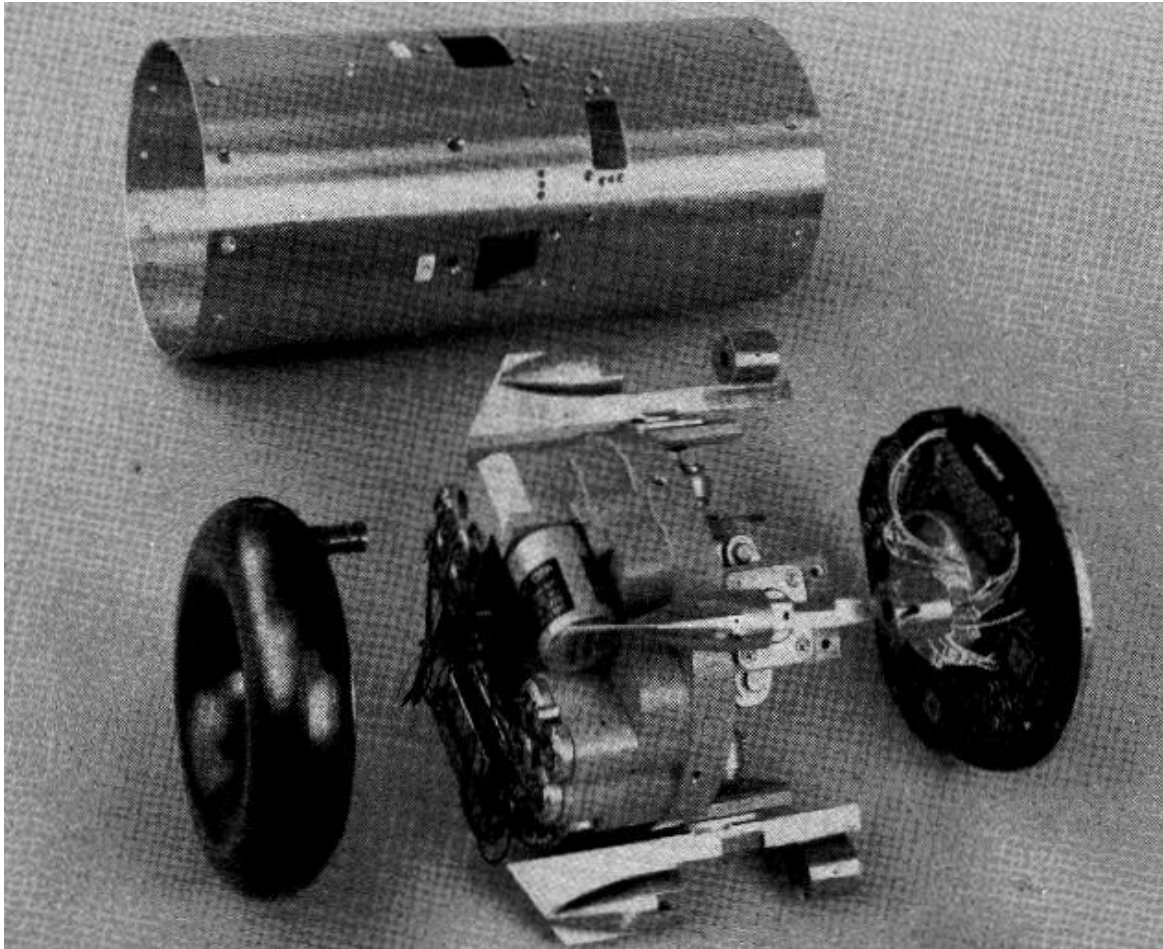
Füze ve güdümlü mühimmatlara ait aerodinamik kanat/kanatçık yönelimini sağlayan birimler kontrol tahrik sistemleridir (KTS). Literatürde genellikle elektro-mekanik, elektro-hidrolik, elektro-pnömatik ve bunların kombinasyonu (elektro-hidro-pnömatik gibi) servo kontrol tahrik sistemleri bulunmaktadır. Bu sistemler güç ve performans ihtiyaçlarına bağlı olarak mühimmatlara paketlenmektedir (Honeywell, 2019; Parker, 2011; Thayer, W. J., 1988).



Şekil 2.1. Elektro-mekanik KTS (Parker, 2011)



Şekil 2.2. Elektro-hidrolik KTS (Fluidpowerjournal, 2017)



Şekil 2.3. Elektro-pnömatik KTS (Thayer, W. J., 1988)

Ne var ki, servo KTS' lere ait tasarımlarda kullanılan yüksek maliyetli alt bileşenlerin üretiminde ve tedariginde zorluklar yaşanmaktadır. Servo valf, servo motor, motor sürücü, kontrolcü vb. gibi tedarik ve üretim zorluğuna sahip parçalar savunma sanayinde ciddi maliyet/problem yaratmaktadır. Bunun yanı sıra küçük çaplarda bu alt sistemlerin paketlenmesi oldukça zorlaşmakta veya mümkün olmamaktadır (Moog, 2018; Qiao, G., vd., 2018).



Şekil 2.4. Konvansiyonel sistemlere ait kompleks alt komponent örnekleri (Maxongroup 2015; Maxongroup 2020; Moog 2020)

Servo elektro-mekanik KTS' ler yaygın bir biçimde çok çeşitli güdümlü mühimmatlarda bulunmaktadır. Özellikle fırçasız motorları sürmek için karmaşık elektronik donanımlara ihtiyaç vardır. Üretimi ve tedarigi kısıtlı olan bilyalı vida, fırçasız motor ve sürücü kartı gibi alt bileşenler problem yaratmaktadır. Elektro-mekanik KTS' lerin elektro-manyetik girişim yaratması da bir diğer sorundur (Davis, M.A., 1984; Qiao, vd., 2018; Zhou, vd., 2018).

Yüksek güç ihtiyacı olduğunda genellikle servo elektro-hidrolik KTS' ler tercih edilmektedir. Yüksek güç aralığında servo elektro-hidrolik KTS' ler elektro-mekanik yapılara göre daha hafif ve daha küçük boyutlara sahip olabilmektedir. Elektro-mekanik sistemlere kıyasla daha basit elektronik devreler gerektirirler. Ancak hidrolik eyleyicilerde servo valf yüksek maliyete sahiptir ve ayrıca hassas üretim teknolojileri gerektirmektedir. Hidrolik akışkanın kirlilik seviyesinin belirli bir düzeyin altında tutulması da dezavantaj (ince örgülü filtre, basınç düşümü vb.) yaratmaktadır (Thayer, W. J., 1988).

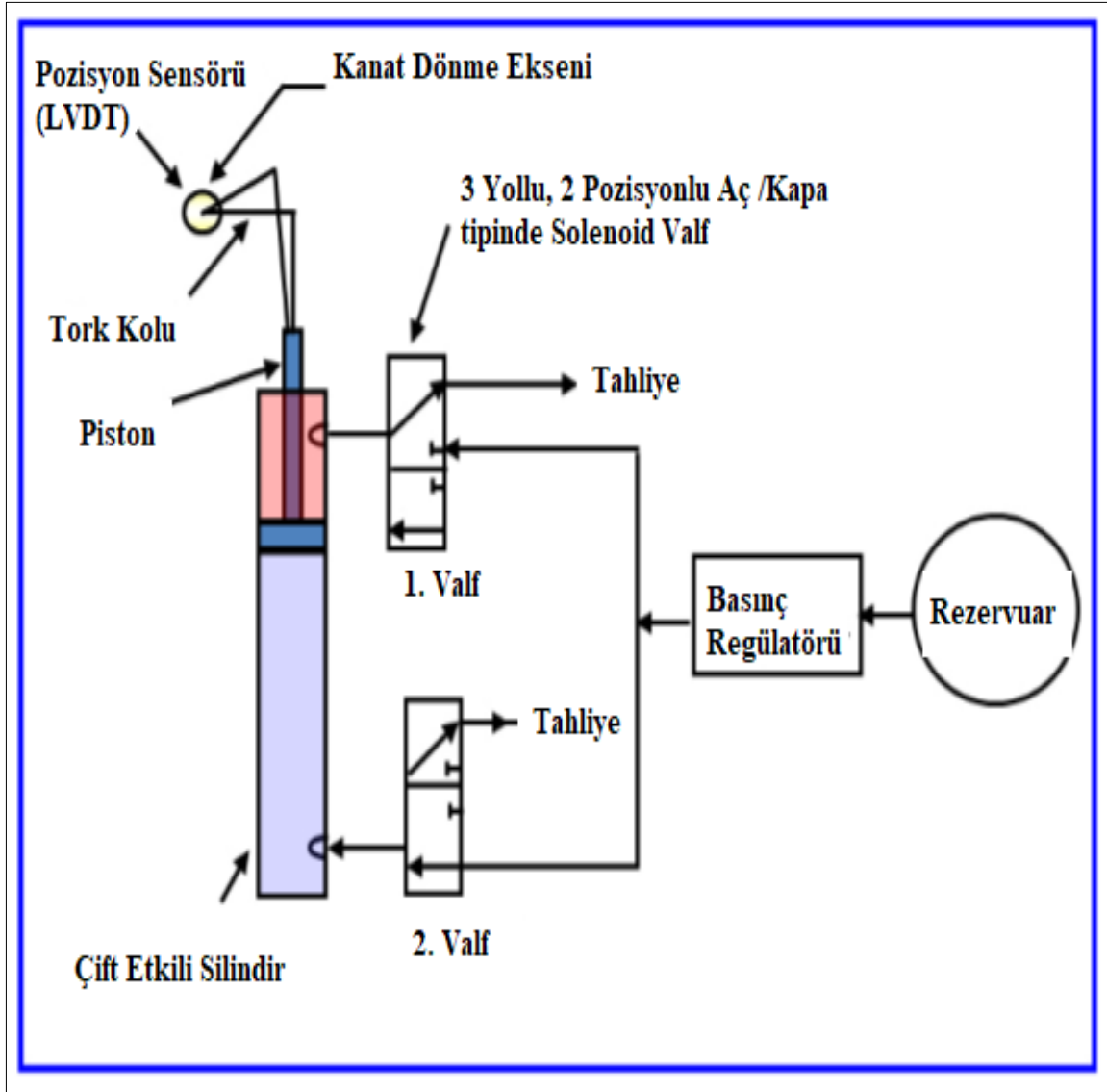
Literatürde pnömatik servo valf ve oransal valf tasarımları bulunsa da yüksek maliyet ve gazın sıkıştırılabilirliği sebebiyle bu valfler savunma sanayinde nadir olarak tercih

edilmektedir (Hurmuzlu, Y., 2000; Krivts, I. L., 2004 ve Richer, E.). Servo kontrollü elektro-pnömatik eyleyiciler yoğunlukla taktik füze sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu eyleyicilerin birim maliyetleri genellikle elektro-mekanik ve elektro-hidrolik eyleyicilere oranla daha düşük düzeydedir. Ancak belirli bir çaptaki mühimmat için elektro-pnömatik eyleyicilerde üretilen güç bahsedilen diğer iki eyleyici mimarisine kıyasla daha düşük mertebede kalmaktadır. Ayrıca akışkan gazın yüksek oranda sıkıştırılabilir olması dinamik performansta sorunlar yaratmaktadır. Söz konusu yüksek sıkıştırılabilirlik statik doğruluğu da kötü yönde etkilemektedir. Eyleyici hareketi esnasında, büyük basınç dalgalanmalarının sistemin rijitliğinde değişiklik yaratması diğer bir problemidir (Thayer, W. J., 1988)

Özellikle küçük çaplardaki mühimmatlarda (çap: 107-155 mm) KTS birimlerine ait alt komponent maliyetlerinin (servo motor, sürücü, bilyalı vida, servo valf v.b.) yüksek olması ve alt sistemlerin tedarikinin-üretiminin zor olması bu yönelim birimlerine alternatif bulma ihtiyacını doğurmuştur.

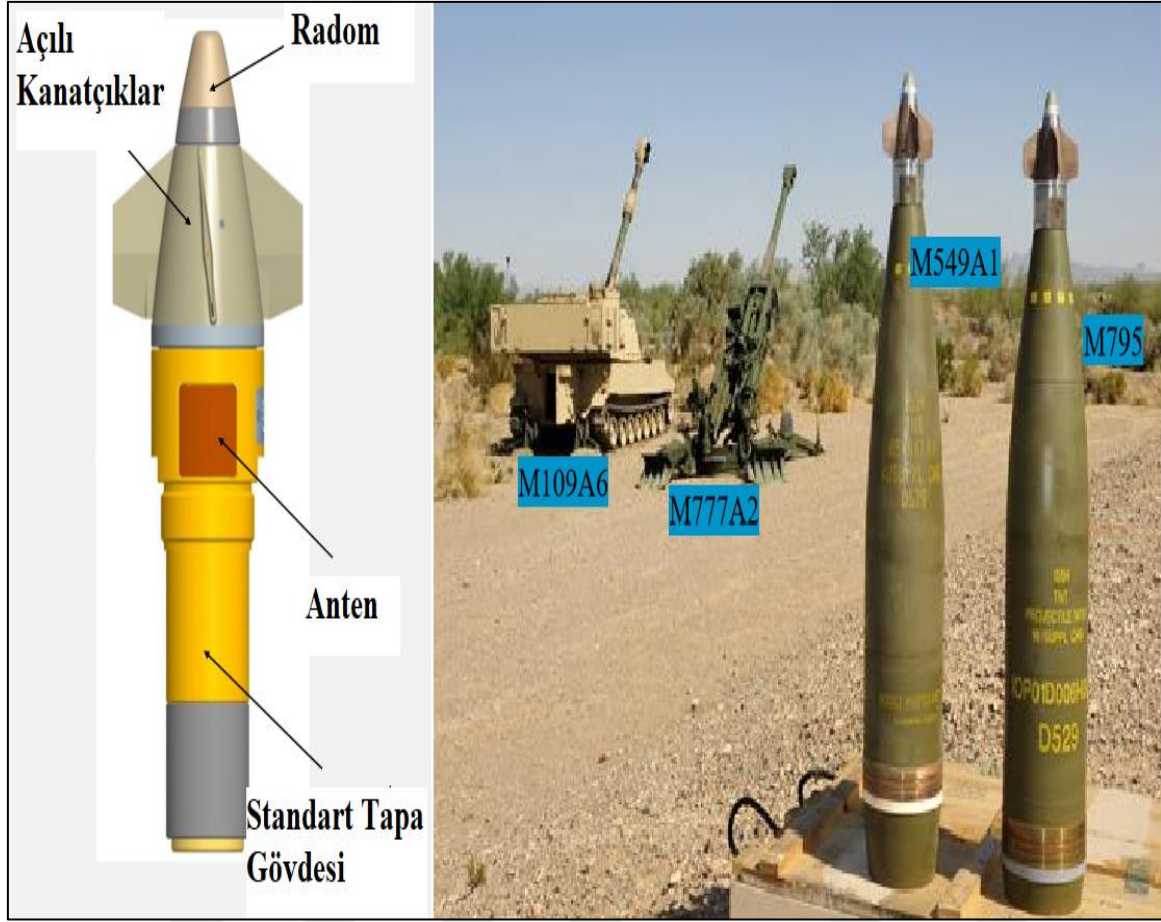
Bu çalışmada ana motivasyon ucuz, üretimi kolay ve basit yapıda kontrol tahrik sistemi geliştirmek ve KTS' ye ait dinamik performansı irdelemektir. Bu amaçla literatür çalışmalarında basit yapıdaki elektro-pnömatik tahrik mekanizmaları veya kitleri temel alınmıştır. Bu sayede füzelerin yönelim performansından bir miktar ödün verilse dahi kompakt (füze/roket gövdesine kit halinde takılarak) ve operasyonel yeteneği yüksek olan mühimmatlar elde edilecektir.

Ucuz ve basit yapıda olmaları nedeniyle, aç-kapa solenoidlerle füze kanadının pozisyon kontrolü popülerliğini giderek artırmaktadır. Literatürdeki bir yayında servo kontrollü elektro-pnömatik KTS' den bahsedilmiştir. Ancak bu yayındaki KTS, konvansiyonel servo sistemlerden farklı olarak servo valf veya oransal valf barındırmamaktadır. Servo valf/oransal valf yerine iki adet aç-kapa solenoid valften yararlanılarak pozisyon kontrolü yapılmaktadır. Kapalı çevrim pozisyon kontrolünü sağlamak için darbe genişlik modülasyonu (DGM) kullanılmıştır. Tahrik sistemine ait enerji rezervuardaki basınçlı gaz ile sağlanmaktadır (Abd-Altief, vd., 2006; Cobham, 2009; Gade, M.M., Mangrulkar, K.K., 2018).



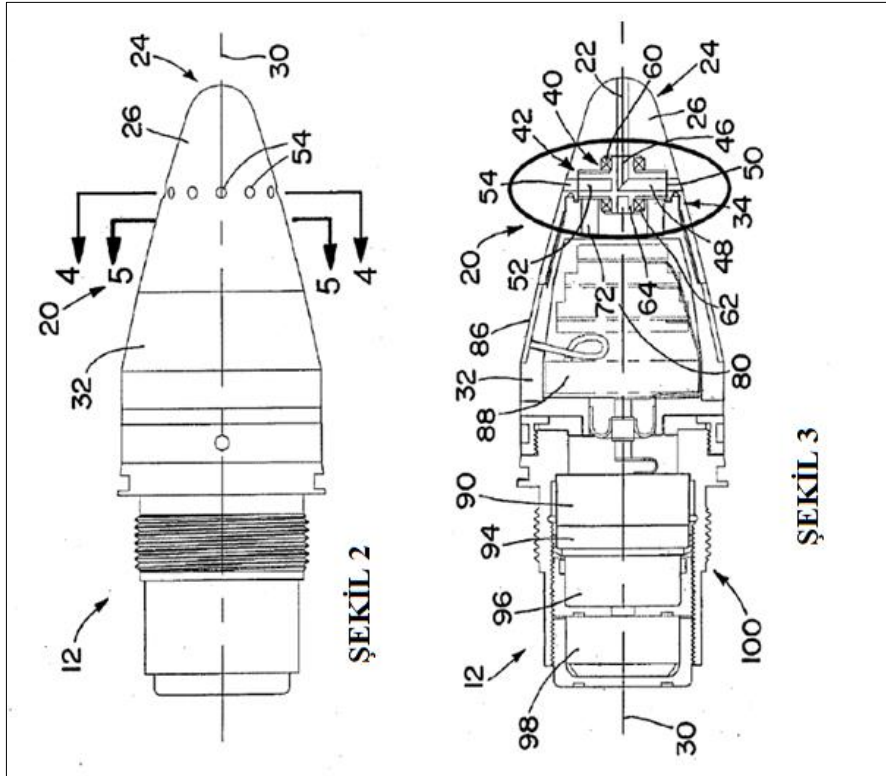
Şekil 2.5. Basınç kaynağı esaslı pnömatrik servo kontrol tahrik sistemi (Gade, M.M., Mangrulkar, K.K., 2018)

Servo KTS' lere alternatif olması amacıyla daha ucuz maliyetli ve basit yapıdaki güdüm kitleri geliştirilmiştir. Bu güdüm kitlerinden biri, Orbital ATK firması tarafından geliştirilmiş ve faal olarak kullanılmaktadır. Güdüm kitine ait burun üzerinde dört adet kanatçık bulunmaktadır. Mühimmat fırlatıldıktan sonra zıt yönde kıvrık olan iki kanatçık burunda yuvarlanma momenti yaratmaktadır. Dönmeye başlayan bağımsız burun gövdesi fren komutu geldiği anda durdurulmaktadır. Böylece burundaki aynı yönde kıvrık diğer iki kanatçık sayesinde mühimmata manevra (durdurulan açiya bağlı olarak) sağlanmaktadır (Orbital ATK, 2015).

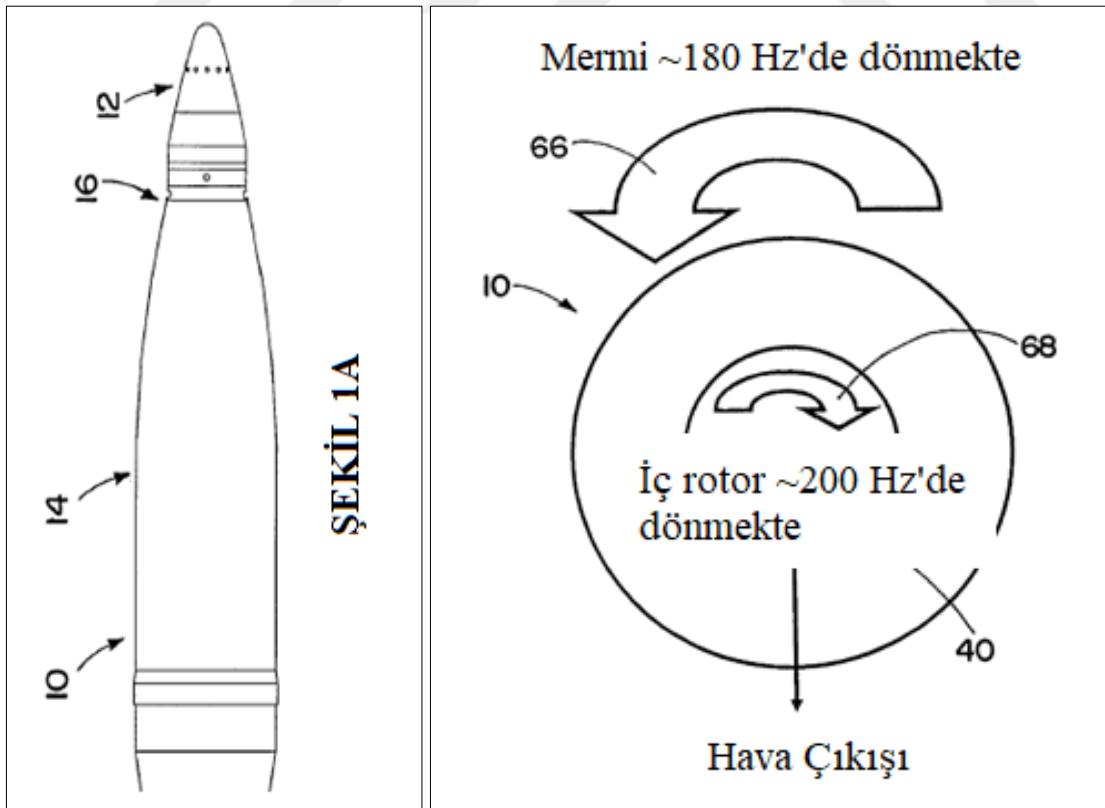


Şekil 2.6. Orbital ATK firmasına ait güdümlü kiti (Orbital ATK, 2015)

U.S Patent No. 20,100,237,185A1 (2010) nolu elektro-pnömatik eyleyiciye sahip bir patent çalışmasında, mühimmatın üzerinden akan hava, burun kısmındaki açıklıktan geçerek radyal bir çıkışı olan rotoru döndürmekte ve böylece içeri alınan hava rotor üzerinden radyal olarak tahliye edilmektedir. Rotorun pozisyonu bir fren veya motor vasıtasıyla kontrol edilmektedir. Rotor istenen manevra yönünün ters konumundayken (180°) frenlenerek mühimmat üzerinde reaksiyon kuvveti yaratılmaktadır Bu sisteme ait güdümlü kitinin iç ve dış yapısı Şekil 2.7 ve Şekil 2.8’ de gösterilmiştir (U.S Patent No. 20,100,237,185A1, 2010).

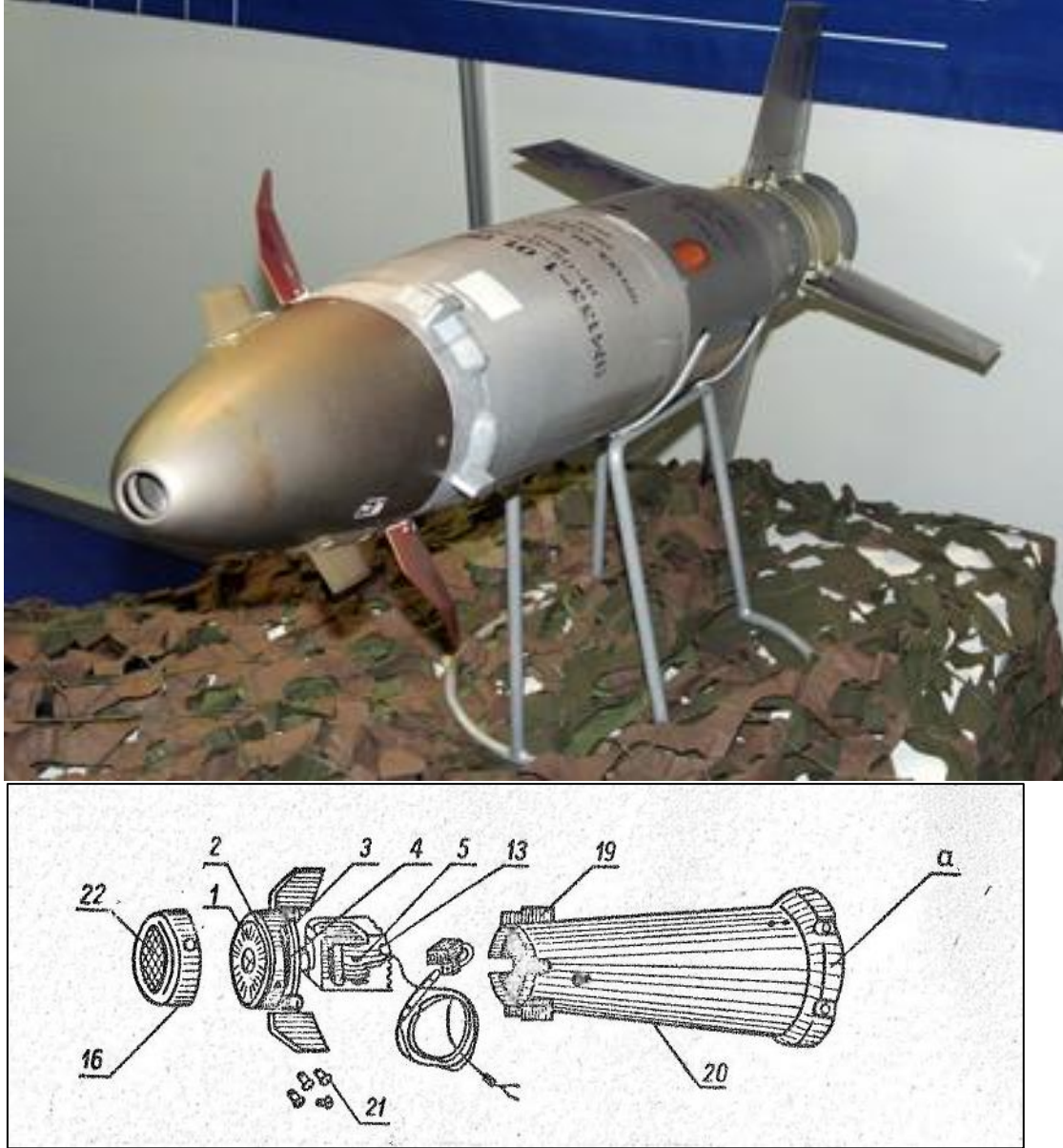


Şekil 2.7. Patente ait mekanizmanın iç yapısının gösterimi (U.S Patent No. 20,100,237,185A1, 2010)



Şekil 2.8. Patente ait mekanizmanın dış yapısının gösterimi (U.S Patent No. 20,100,237,185A1, 2010)

Şekil 2.9’ da gösterilen anti-tank Kornet füzesinin burun kısmında bir delik bulunmaktadır. Bu delik sayesinde içeri alınan hava, elektro-manyetik anahtarların (solenoid) açılıp kapanması ile bir aerodinamik kanadı hareket ettirmektedir. Bu sayede füzenin yönlendirilmesi sağlanmaktadır. Füzeyle ilgili bilgiler gizli tutulduğu için literatürde fazla bilgi bulunmamaktadır (Armed Conflicts, 2010; Laodong, 2014; MBT, 2012).



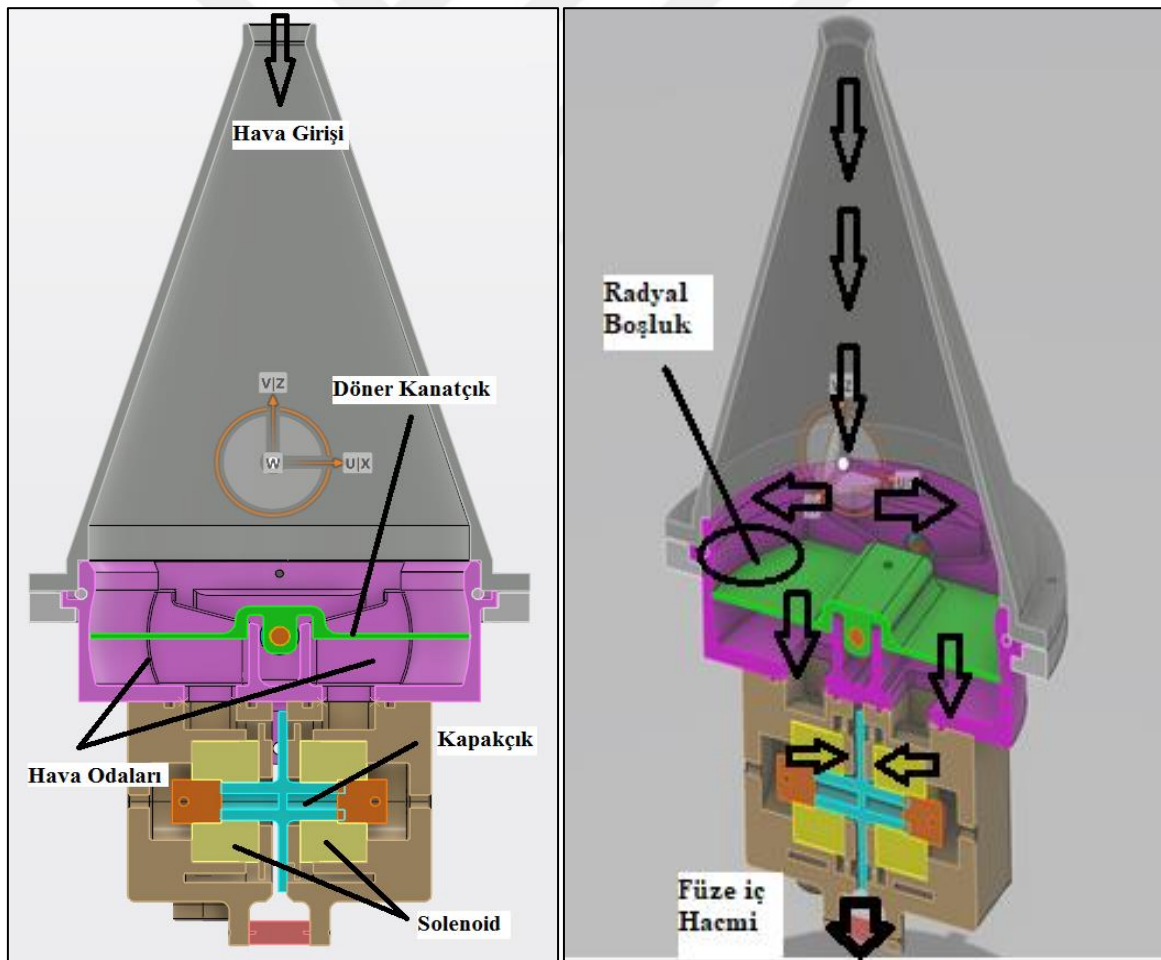
Şekil 2.9. Kornet Füzesi (Armed Conflicts, 2010; MBT, 2012)

Literatür çalışmalarının sonunda MBT (2012) kaynağında bahsedilen, basınç kaynağı esaslı olmayan anti-tank füzesinden esinlenilerek tasarım ve modelleme çalışmalarının yapılmasına karar verilmiştir.

3. ELEKTRO-PNÖMATİK SİSTEM VE TEORİK ALTYAPI

3.1. Sistem Mimarisi

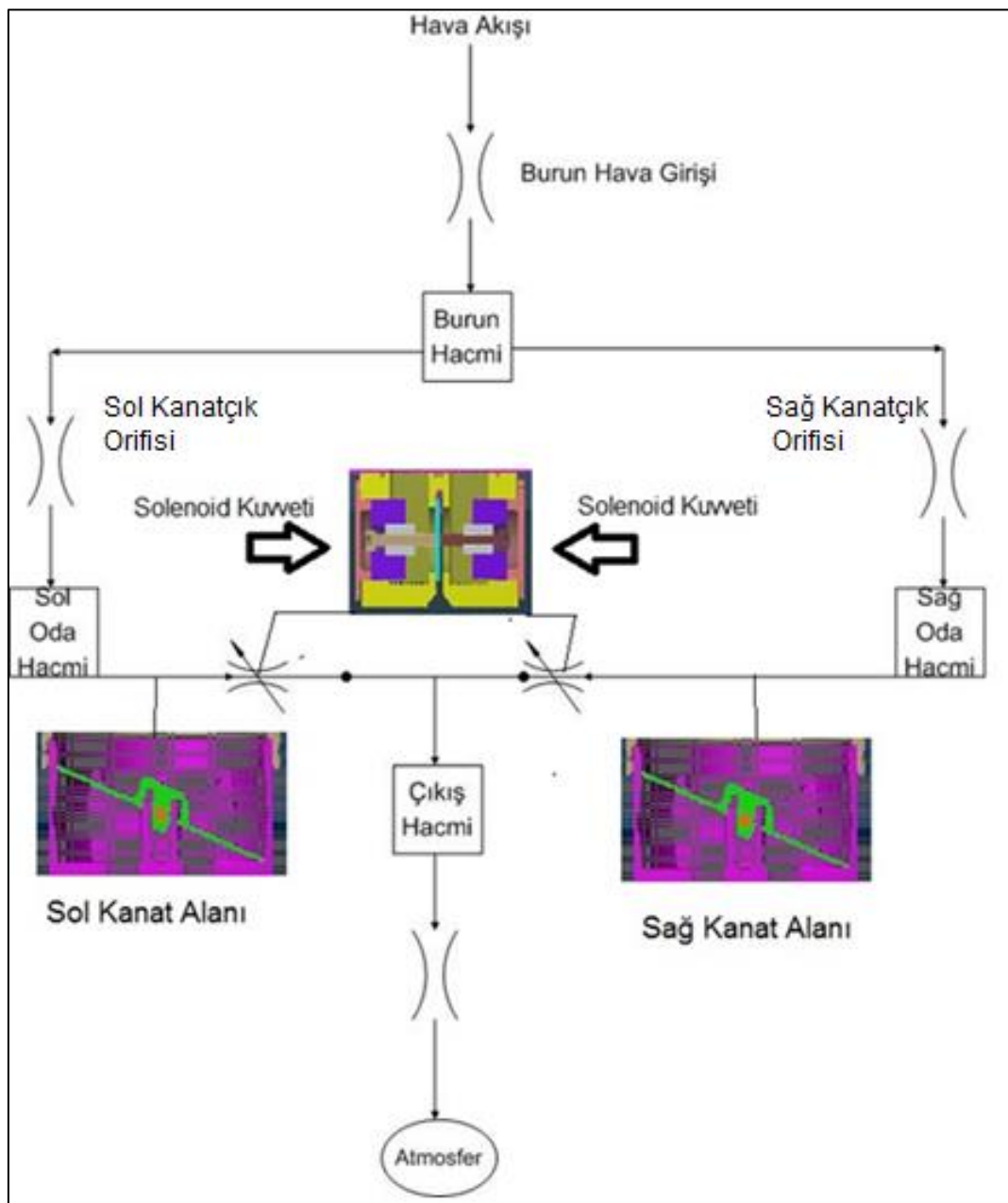
Kontrol tahrik sistemi olarak kullanılan elektro-pnömatik sistemde, havanın burun kısmında bulunan bir açıklık üzerinden füze içindeki birbirinden izole iki odaya (dinamik olarak) doldurulması ve elektro-mekanik eyleyiciler ile odalar arasında basınç farklılığı yaratılması amaçlanmaktadır. Oda basınçları bir döner kanatçık yapısına basınç uygulamaktadır. Ayrıca bu döner kanatçığa füze aerodinamik kontrol yüzeyleri bağlı bulunmaktadır. Dolayısıyla izole odalar arasında yaratılan basınç farklılığı sayesinde füzeye güdüm kabiliyeti kazandırılması hedeflenmiştir. Şekil 3.1’ de ön tasarımı yapılan sistemin kesit görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.1. Ön katı model tasarımı yapılan elektro-pnömatik hava alıklı kontrol tahrik sistemi

Şekil 3.1' den de anlaşıldığı gibi güdümlü mühimmat uçarken burun kısmından içeri hava girişi bir delik/açıklık yardımı ile sağlanmaktadır. Elde edilen hava debisi döner kanatçığın radyal boşluklarından geçerek birbirinden duvarla ayrılmış iki odaya dolmaktadır. Hava odalarının çıkışları füze gövdesi vasıtasıyla atmosfere açıktır. Bu sayede komut verilmediğinde iki odanın çıkışından dışarı doğru akışa izin verilmektedir.

Yukarda anlatılan elektro-pnömatik yapının sistem mimarisi oluşturulduğunda Şekil 3.2’deki şematik gösterim elde edilir.



Şekil 3.2. Elektro-pnömatik sisteme ait sistem mimarisi

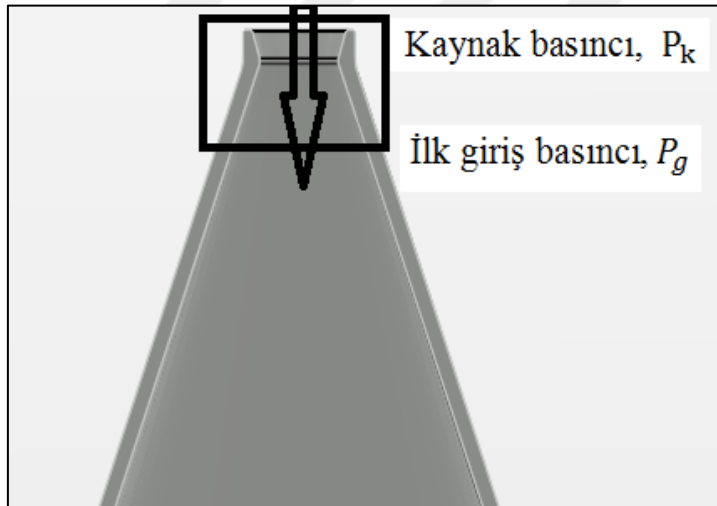
Şekil 3.2’ deki mimaride sistemin hareketi solenoid eyleyiciler sayesinde sağlanmaktadır. Solenoid eyleyiciler oda çıkış orifislerini aç-kapa komutları sayesinde manipüle ederek odalar arasında dinamik basınç farklılığı yaratmaktadır. Bu sayede döner kanatçığa hareket verilmektedir.

3.2. Teorik Altyapı ve Matematiksel Eşitlikler

Mimari yapısı Şekil 3.2’ de verilen elektro-pnömatik sistemin matematiksel eşitlikleri; akışkanın aktığı hat üzerindeki her alt bileşen için türetilmiştir. Eşitliklerde literatürde yer alan benzer çalışmalar esas alınmıştır.

Hava ilk olarak füze gövdesine bir açıklıktan (orifisten) geçerek girmektedir (Şekil 3.3). Füzenin yüksek ses altı hızlarda ($\sim 0,8$ Mach) uçtuğu, sistemin izentropik ve havanın gazın ideal gaz olduğu kabul edilerek eşitlikler yazılırsa;

$$C_p * T_k = C_p * T_g + \frac{V_g^2}{2} \quad (3.1)$$



Şekil 3.3. Burun ilk giriş orifisinin gösterimi

$$T_k = T_g + \frac{V_g^2}{2C_p} \quad (3.2)$$

elde edilir.

Giriş koşullarına bağlı olarak (3.3) nolu ve (3.4) nolu eşitliklerde sırasıyla ses hızı ve Mach sayısı hesaplanır.

$$c = \sqrt{kRT_g} \quad (3.3)$$

$$M = \frac{V_g}{c} \quad (3.4)$$

(3.2) nolu eşitlik içine (3.4) nolu bağıntı koyulursa eşitlik (3.5) elde edilir.

$$T_k = T_g + \frac{M^2 c^2}{2C_p} \quad (3.5)$$

Eşitlik (3.5)' de c yerine (3.3) nolu eşitlik yazılır ve $C_p = \frac{kR}{k-1}$ bağıntısı kullanılırsa (3.6) nolu eşitlik elde edilir.

$$T_k = T_g \left[1 + \left(\frac{k-1}{2} \right) * M^2 \right] \quad (3.6)$$

İzentropik akış olduğu için (3.7) nolu eşitliği kullanarak (3.8) nolu eşitlikteki gibi Mach sayısına bağlı basınç bağlantısını elde ederiz.

$$\left(\frac{P_k}{P_g} \right) = \left(\frac{T_k}{T_g} \right)^{k/(k-1)} \quad (3.7)$$

$$\frac{P_k}{P_g} = \left[1 + \left(\frac{k-1}{2} \right) * M^2 \right]^{k/(k-1)} \quad (3.8)$$

Burundan giren kütleli debiyi yazarsak;

$$\dot{m} = C_{fg} * \rho_g * A_g * V_g \quad (3.9)$$

V_g yerine $M\sqrt{kRT_g}$, ρ_g yerine $\frac{P_g}{RT_g}$ bağıntıları yazılırsa (3.10) nolu eşitlik elde edilir.

$$\dot{m} = C_{fg} * A_g * P_g \frac{\sqrt{k}}{\sqrt{RT_g}} * M \quad (3.10)$$

(3.8) nolu eşitlik kullanılarak P_g yok edilirse (3.11) nolu eşitlik yazılır.

$$\dot{m} = C_{fg} * A_g * P_k \sqrt{\frac{k}{RT_g}} * M \left[1 + \left(\frac{k-1}{2} \right) * M^2 \right]^{-(k+1)/2(k-1)} \quad (3.11)$$

(3.6) ve (3.8) nolu eşitlikten T_g , M ve M^2 çekilip gerekli düzenlemeler yapılırsa (3.12) nolu eşitliğe ulaşılır.

$$\dot{m} = C_{fg} * A_g \sqrt{\frac{k}{RT_k}} * P_k \sqrt{\frac{2}{k-1} \left(\left(\frac{P_g}{P_k} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_g}{P_k} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right)}, \left(\frac{P_g}{P_k} \right) > \frac{P_{cr}}{P_k} \quad (3.12)$$

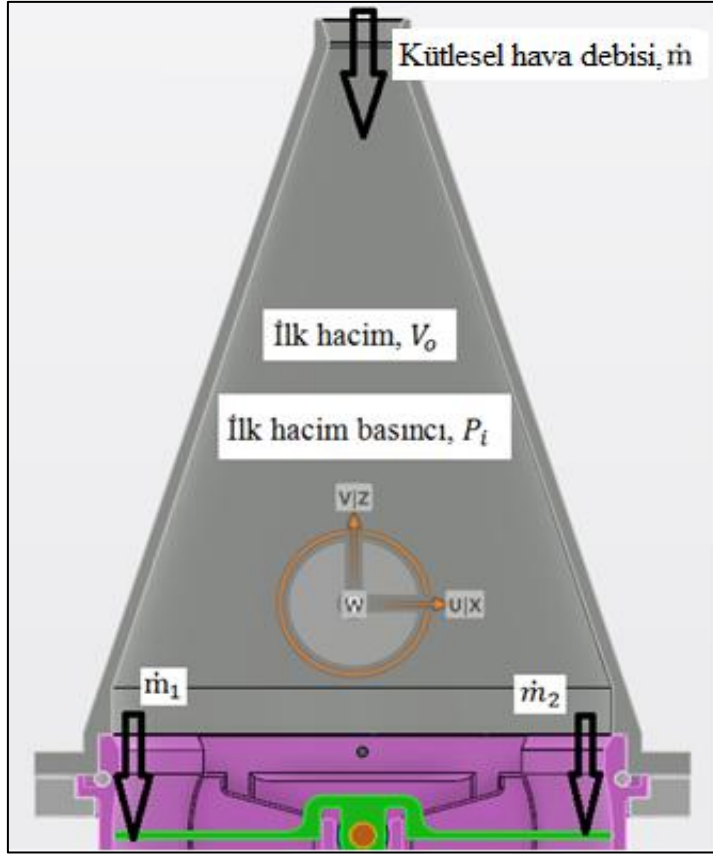
Maksimum kütleli debi boğulmanın gerçekleştiği kritik basınçta (P_{cr}), yani $M = 1$ iken elde edilmektedir. Dolayısıyla (3.11) nolu eşitlikte $M = 1$ yazılıp gerekli düzenlemeler yapıldığında maksimum kütleli debi (3.13) nolu eşitlik ile ifade edilir (Aksel ve Eralp, 1994: 142).

$$\dot{m} = C_{fg} * A_g \sqrt{\frac{k}{RT_k}} * P_k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}, \left(\frac{P_g}{P_k} \right) \leq \frac{P_{cr}}{P_k} \quad (3.13)$$

(3.12) ve (3.13) nolu eşitlikleri tekrar düzenlersek eşitlik (3.14) ve (3.15)' i elde ederiz.

$$\dot{m} = C_{fg} * A_g * C_m * \frac{P_k}{\sqrt{T_k}} \quad (3.14)$$

$$C_m = \begin{cases} \sqrt{\frac{k}{R}} \sqrt{\frac{2}{k-1} \left(\left(\frac{P_g}{P_k} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_g}{P_k} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right)}, \left(\frac{P_g}{P_k} \right) > \frac{P_{cr}}{P_k} \\ \sqrt{\frac{k}{R}} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}, \left(\frac{P_g}{P_k} \right) \leq \frac{P_{cr}}{P_k} \end{cases} \quad (3.15)$$



Şekil 3.4. İlk burun hacminin gösterimi

Burundaki açıklıktan giren hava, burun gövdesindeki ilk hacme (V_o) dolmaktadır (Şekil 3.4). İlk hacme dolan havanın ideal gaz olduğu, hacmin homojen olduğu, kinetik-potansiyel enerjilerin ise önemsiz olduğu ve gövdeden kaçağın olmadığı kabul edilir ve kütle ile enerji korunumu kanununa göre hacim değişiklikleri de göz önüne alınarak eşitlikler yazılırsa; (Hejrati, B., Najafi, F., 2012; Medenica, M., 2011).

$$\dot{q}_{in} - \dot{q}_{out} - \dot{W}_{CV} = kC_v(\dot{m}_1T_1 + \dot{m}_2T_2 - \dot{m}T) + \dot{U} \quad (3.16)$$

elde edilir. Burada;

$$\dot{W}_{CV} = P_i \dot{V}_o, \dot{U} = \frac{d}{dt}(C_v m T) \quad (3.17)$$

m yerine $P_i V_o = mRT \rightarrow m = \frac{P_i V}{RT}$, C_v yerine $C_v = \frac{R}{k-1}$ yazarsak;

$$\dot{U} = \frac{d}{dt} \left(\frac{P_i V}{k-1} \right) = \frac{1}{k-1} (\dot{P}_i V_o + P_i \dot{V}_o) \quad (3.18)$$

elde edilir.(3.18) nolu eşitliği (3.16) nolu eşitlik içine yazarsak;

$$\dot{q}_{in} - \dot{q}_{out} - P_i \dot{V}_o = k \frac{R}{k-1} (\dot{m}_1 T_1 + \dot{m}_2 T_2 - \dot{m} T) + \frac{1}{k-1} (\dot{P}_i V_o + P_i \dot{V}_o) \quad (3.19)$$

$$P_i = \rho R T \rightarrow R = \frac{P_i}{\rho T} \text{ dersek;}$$

$$\dot{q}_{in} - \dot{q}_{out} - P_i \dot{V}_o = \frac{k}{k-1} \frac{P_i}{\rho T} (\dot{m}_1 T_1 + \dot{m}_2 T_2 - \dot{m} T) + \frac{1}{k-1} (\dot{P}_i V_o + P_i \dot{V}_o) \quad (3.20)$$

Oda içindeki sıcaklıkları eşit alarak ($T_1 = T_2 = T$) düzenlersek;

$$\dot{q}_{in} - \dot{q}_{out} - \frac{k}{k-1} (P_i \dot{V}_o) = \frac{k}{k-1} \frac{P_i}{\rho} (\dot{m}_1 + \dot{m}_2 - \dot{m}) + \frac{1}{k-1} (\dot{P}_i V_o) \quad (3.21)$$

elde edilir. Sistemin adiyabatik olduğunu kabul edersek $\dot{q}_{in} - \dot{q}_{out} = 0$ olur. Ayrıca (3.20) nolu eşitliğin her iki tarafını da $\frac{kP_i}{k-1}$ ile sadeleştirirsek;

$$\dot{P}_i = \frac{kP_i}{V_o \rho} (\dot{m} - \dot{m}_1 - \dot{m}_2) - \frac{kP_i}{V_o} \dot{V}_o \quad (3.22)$$

$\frac{P}{\rho} = RT$ 'yi yerine yazarsak (3.23) nolu eşitliği elde ederiz.

$$\dot{P}_i = \frac{kRT}{V_o} (\dot{m} - \dot{m}_1 - \dot{m}_2) - \frac{kP_i}{V_o} \dot{V}_o \quad (3.23)$$

V_o hacmi sabit olduğu için $\dot{V}_o$ terimi sadeleşmekte ve eşitlik (3.23) nolu halini almaktadır.

$$\dot{P}_i = \frac{kRT}{V_o} (\dot{m} - \dot{m}_1 - \dot{m}_2) \quad (3.24)$$

İlk burun hacminden geçen hava her iki döner kanatçığın etrafındaki radyal boşluklardan geçerek sol ve sağ odalara dağılmakta ve akan hacmin bir kısmı alt kademede bulunan kapakçıktan (Şekil 3.1 ve Şekil 3.5) radyal olarak dışarı çıkmaktadır.

İlk olarak (3.14) nolu eşitliği kullanarak bahsedilen döner kanatçığa ait radyal orifis için akış katsayılarının (C_{fr}) ve orifis öncesi basıncın (P_i) eşit olduğunu kabul ederek eşitlikleri yazarsak (3.25), (3.26), (3.27) ve (3.28) nolu eşitlikleri elde ederiz.

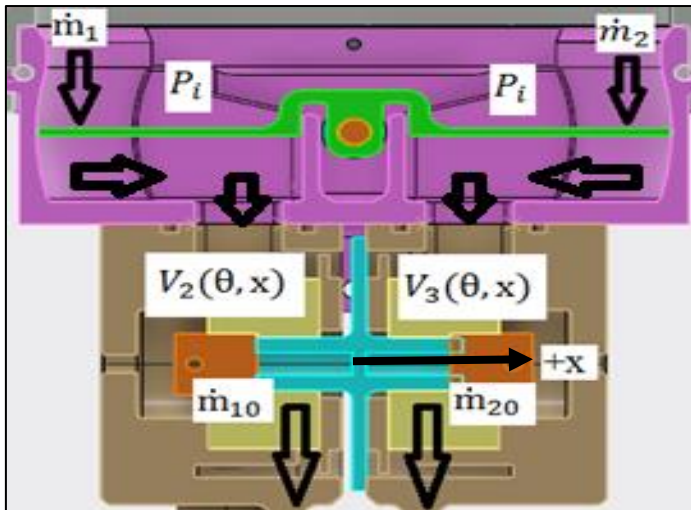
$$\dot{m}_1 = C_{fr} * A_r * C_{mr2} * \frac{P_k}{\sqrt{T_k}} \quad (3.25)$$

$$C_{mr2} = \begin{cases} \sqrt{\frac{k}{R} \sqrt{\frac{2}{k-1} \left(\frac{P_2}{P_k}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_k}\right)^{\frac{k+1}{k}}}}, \left(\frac{P_2}{P_k}\right) > \frac{P_{cr}}{P_k} \\ \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}}, \left(\frac{P_2}{P_k}\right) \leq \frac{P_{cr}}{P_k} \end{cases} \quad (3.26)$$

$$\dot{m}_2 = C_{fr} * A_r * C_{mr3} * \frac{P_k}{\sqrt{T_k}} \quad (3.27)$$

$$C_{mr3} = \begin{cases} \sqrt{\frac{k}{R} \sqrt{\frac{2}{k-1} \left(\frac{P_3}{P_k}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_3}{P_k}\right)^{\frac{k+1}{k}}}}, \left(\frac{P_3}{P_k}\right) > \frac{P_{cr}}{P_k} \\ \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}}, \left(\frac{P_3}{P_k}\right) \leq \frac{P_{cr}}{P_k} \end{cases} \quad (3.28)$$

Şekil 3.5' te gösterilen döner kanatçık altında kalan her iki oda için benzer olarak eşitlik (3.23)' ü kullanarak enerji korunumu eşitliklerini yazarsak eşitlik (3.29) ve (3.30)' u elde ederiz (odalarda izentropik ve adiabatik işlemler olduğu kabul edilmiştir).



Şekil 3.5. İlk burun hacminin gösterimi

$$\dot{P}_2 = \frac{kRT}{V_2} (\dot{m}_1 - \dot{m}_{10}) - \frac{kP_2}{V_2} \dot{V}_2 \quad (3.29)$$

$$\dot{P}_3 = \frac{kRT}{V_3}(\dot{m}_2 - \dot{m}_{20}) - \frac{kP_3}{V_3} \dot{V}_3 \quad (3.30)$$

Burada V_2, V_3 oda hacimlerini ifade etmektedir.

$$V_2 = V_{20} \pm \frac{4}{3}\pi r^3 \frac{\theta}{360}, V_3 = V_{30} \pm \frac{4}{3}\pi r^3 \frac{\theta}{360}, \dot{V}_2 = \dot{V}_3 = \frac{4}{3}\pi r^3 \frac{\dot{\theta}}{360} \quad (3.31)$$

Oda hacimlerinden kısmen veya tamamen debinin bir kısmı kapakçıklardan radyal olarak füze içindeki hacme akmaktadır. Şekil 3.5' teki kapakçığın sol ve sağ tarafından çıkan havaya ait orifis eşitlikleri (3.14) nolu yardımı ile kurulursa eşitlik (3.32) ve (3.34) elde edilir.

Kapakçık için akış katsayılarının (C_{fk}) ve kapakçık radyal orifis çaplarının eşit olduğu varsayılmıştır.

$$\dot{m}_{10} = C_{fk} * W * (x_0 \pm x) * C_{mk1} * \frac{P_k}{\sqrt{T_k}} \quad (3.32)$$

$$C_{mk1} = \begin{cases} \sqrt{\frac{k}{R}} \sqrt{\frac{2}{k-1} \left(\frac{P_f}{P_k}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_f}{P_k}\right)^{\frac{k+1}{k}}}, \left(\frac{P_f}{P_k}\right) > \frac{P_{cr}}{P_k} \\ \sqrt{\frac{k}{R}} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}, \left(\frac{P_f}{P_k}\right) \leq \frac{P_{cr}}{P_k} \end{cases} \quad (3.33)$$

$$\dot{m}_{20} = C_{fk} * W * (x_0 \pm x) * C_{mk2} * \frac{P_k}{\sqrt{T_k}} \quad (3.34)$$

$$C_{mk2} = \begin{cases} \sqrt{\frac{k}{R}} \sqrt{\frac{2}{k-1} \left(\frac{P_f}{P_k}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_f}{P_k}\right)^{\frac{k+1}{k}}}, \left(\frac{P_f}{P_k}\right) > \frac{P_{cr}}{P_k} \\ \sqrt{\frac{k}{R}} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}, \left(\frac{P_f}{P_k}\right) \leq \frac{P_{cr}}{P_k} \end{cases} \quad (3.35)$$

Kapakçığın solundan ve sağından geçen hava füze içindeki sabit bir hacme dolmaktadır. Bu hacmin sabit olduğu kabul edilip ($V_f = \text{sabit}$) (3.23) nolu eşitlikteki gibi enerji korunumu eşitlikleri uygulanırsa (3.36) nolu eşitlik elde edilir.

$$\dot{P}_f = \frac{kRT}{V_f} (\dot{m}_{10} + \dot{m}_{20}) \quad (3.36)$$

Hava son olarak füze içindeki hacimden atmosfere füze üzerindeki delikler vasıtasıyla atılmaktadır. Burada yine eşitlik (3.14) yardımı ile orifis eşitlikleri yazılırsa (3.37) nolu eşitlik elde edilir.

$$(\dot{m}_{10} + \dot{m}_{20}) = C_{ff} * A_f * C_{mf} * \frac{P_k}{\sqrt{T_k}} \quad (3.37)$$

$$C_{mf} = \begin{cases} \sqrt{\frac{k}{R} \sqrt{\frac{2}{k-1} \left(\frac{P_{atm}}{P_k}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_{atm}}{P_k}\right)^{\frac{k+1}{k}}}}, \left(\frac{P_{atm}}{P_k}\right) > \frac{P_{cr}}{P_k} \\ \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}}, \left(\frac{P_{atm}}{P_k}\right) \leq \frac{P_{cr}}{P_k} \end{cases} \quad (3.38)$$

(3.29) ve (3.30) nolu eşitliklerin içine (3.25), (3.27), (3.31), (3.32) ve (3.34) nolu eşitlikleri yazarsak (3.39) ve (3.40) nolu eşitlikleri elde ederiz.

$$\begin{aligned} \dot{P}_2 = & \frac{kRT}{V_{20} \pm \frac{4}{3}\pi r^3 \frac{\theta}{360}} \left(C_{fr} * A_r * C_{mr2} * \frac{P_k}{\sqrt{T_k}} - C_{fk} * W * (x_0 \pm x) * C_{mk1} \frac{P_k}{\sqrt{T_k}} \right) \\ & - \frac{kP_2}{V_{20} \pm \frac{4}{3}\pi r^3 \frac{\theta}{360}} \left(\frac{4}{3}\pi r^3 \frac{\dot{\theta}}{360} \right) \end{aligned} \quad (3.39)$$

$$\begin{aligned} \dot{P}_3 = & \frac{kRT}{V_{30} \pm \frac{4}{3}\pi r^3 \frac{\theta}{360}} \left(C_{fr} * A_r * C_{mr3} * \frac{P_k}{\sqrt{T_k}} - C_{fk} * W * (x_0 \pm x) * C_{mk2} \frac{P_k}{\sqrt{T_k}} \right) \\ & - \frac{kP_3}{V_{30} \pm \frac{4}{3}\pi r^3 \frac{\theta}{360}} \left(\frac{4}{3}\pi r^3 \frac{\dot{\theta}}{360} \right) \end{aligned} \quad (3.40)$$

(3.39) ve (3.40) nolu eşitlikler incelendiğinde lineer olmayan eşitlikler olduğu gözlenmektedir. Bu eşitlikler teorik yöntemlerle çözülememektedir.

Kapakçığın solenoid ile sol tarafa dayatıldığı veya kanatçığın maksimum limite (15,3°) geldiği durumda akış durağan hale gelmektedir. Ayrıca sisteme komut verilmediği durumda da kapakçık orta konumda iken sistem durağan hale gelmektedir.

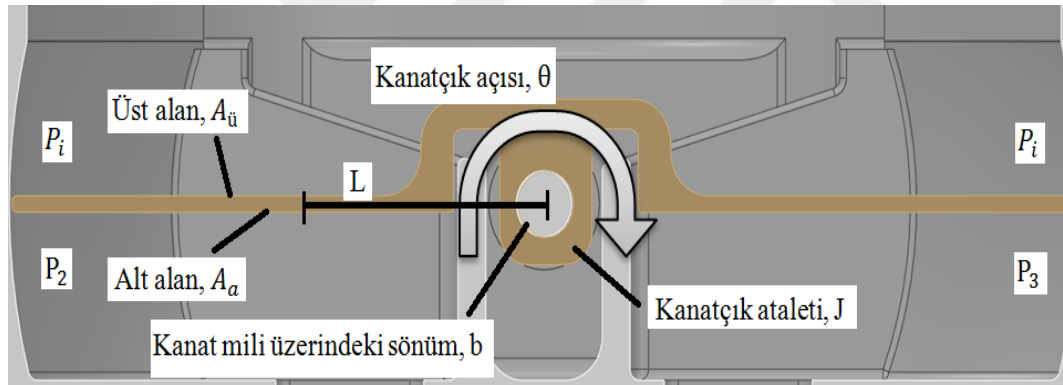
Bahsedilen ilk durağan durumda sola dayatılan kapakçık tarafındaki sol odaya ait kapakçık açıklığı sıfıra inerek ($x_0 - x = 0$) $\dot{m}_1$ sıfırlanmaktadır. Bu durumda sol taraftaki P_2 ve P_i basıncı eşitlenmekte ve $\dot{m}_{10}$ debisi de sıfırlanmaktadır. Ayrıca kanatçık hızı ($\dot{\theta}$) da sıfır olmaktadır. Bu durumda (3.39) ve (3.40) nolu eşitlikler aşağıdaki formu almaktadır.

$$\dot{P}_2 = 0, P_2 = C(\text{sabit}); \quad \dot{P}_3 = 0, P_3 = C(\text{sabit}) \quad (3.41)$$

bulunur.

Dolayısıyla (3.39) ve (3.40) nolu eşitliklerin durağan halinden de herhangi bir çözüm elde edilememektedir.

Akış eşitlikleri çıkartılan sistemin hareket eşitlikleri döner kanatçık ve kapakçık için ayrı ayrı yazılarak elde edilmiştir.



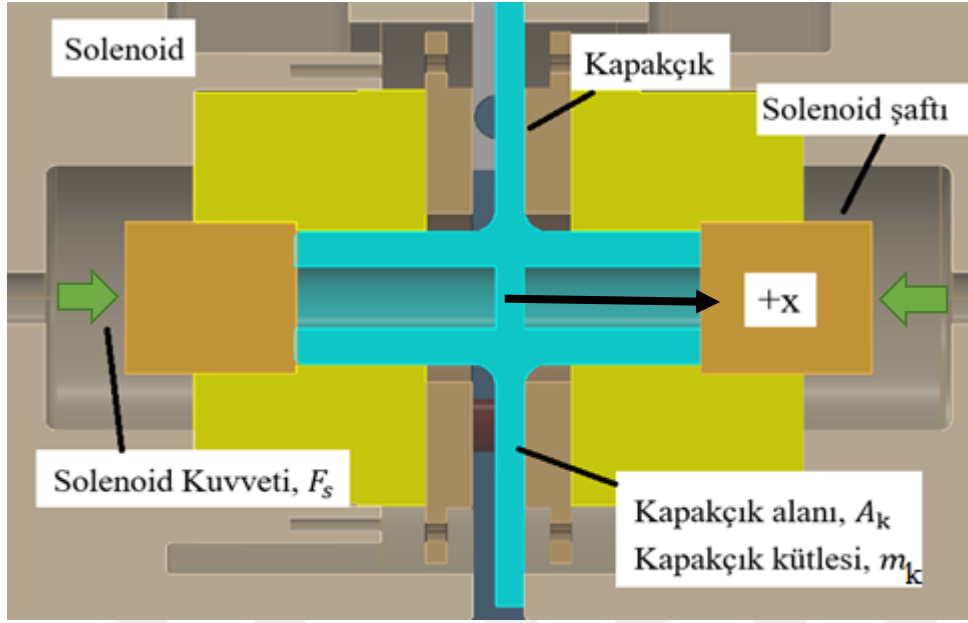
Şekil 3.6. Döner kanatçık üzerine etkiyen kuvvetler

Şekil 3.6' ya göre kanadın üstüne etki eden basınçların ve kanat alt yüzeyine ait basınç etkiye mesafeleri ($L_1 = L_2 = L$)) eşit kabul edilerek kanat için hareket eşitliği yazılırsa (3.42) nolu eşitlik elde edilir.

$$J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} = L * A_a * (P_2(\theta, x) - P_3(\theta, x)) \quad (3.42)$$

Şekil 3.7' ye göre kapakçık için sürtünmenin önemsiz olduğu kabul edilerek kapakçığa ait hareket eşitliği yazılırsa (3.43) nolu eşitlik türetilir.

$$m_k \ddot{x} = \pm F_s + A_k (P_2(\theta, x) - P_3(\theta, x)) \quad (3.43)$$



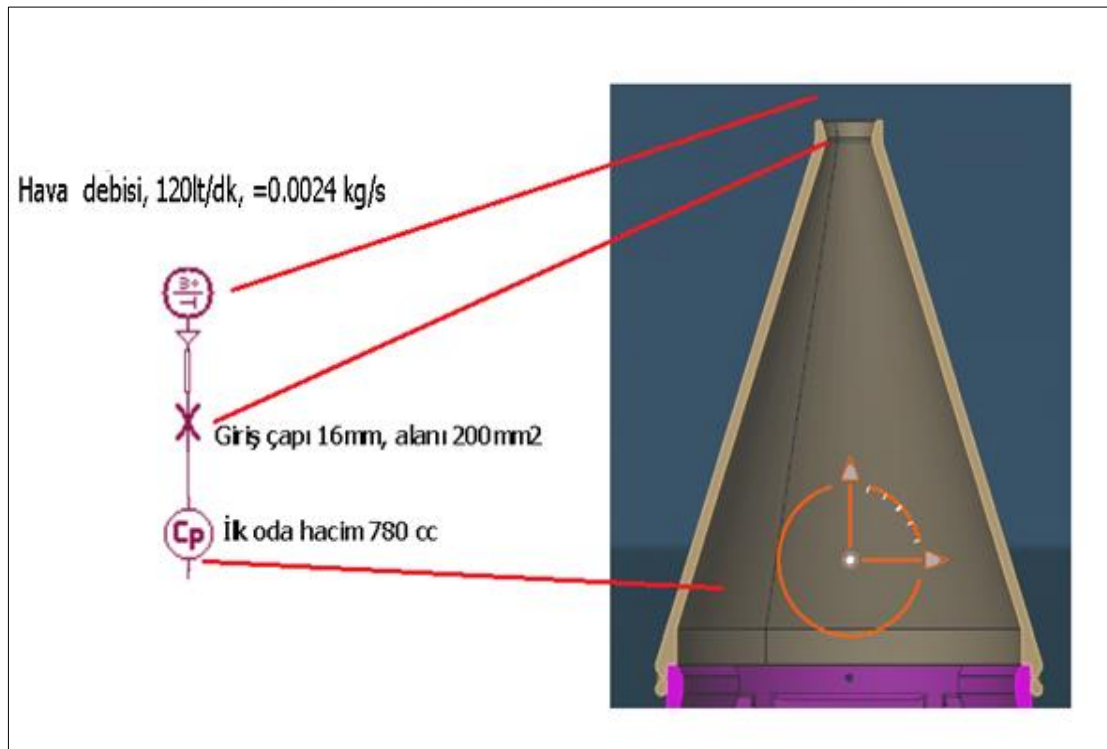
Şekil 3.7. Kapakçık üzerine etkiyen dış kuvvetler

4. DİNAMİK SİSTEM MODELLEMESİ VE SİMÜLASYON

4.1. Amesim ve Simulink ile Modelleme

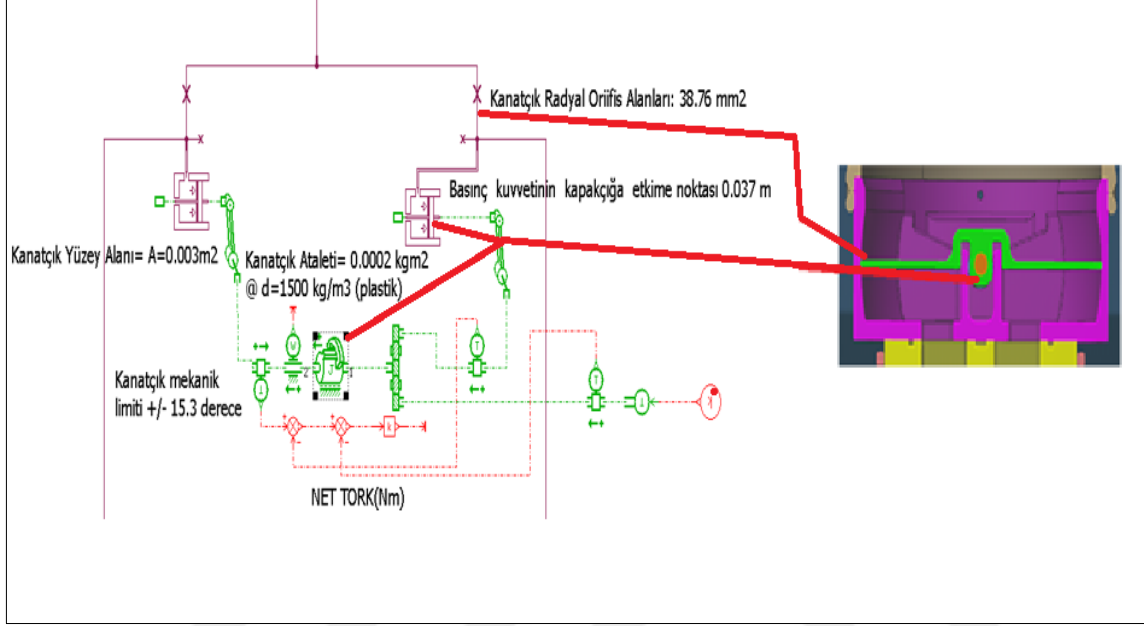
3. bölümde türetilen eşitliklerin teorik olarak çözilemeyen lineer olmayan eşitliklere sahip olması ve sistemdeki parametrelerin etkisinin kolay anlaşılabilmesi amacıyla sistemin Amesim ve Simulink (Matlab) yazılımları kullanılarak sistem modellemesi yapılmıştır. Amesim ve Simulink yazılımları ile yapılan modellemeler kıyaslanarak model doğruluğu artırılacaktır. Ayrıca bu modellemeler sayesinde deneysel testler ve modelleme sonuçları karşılaştırılabilecektir.

İlk olarak modellemeler Amesim yazılımında yapılmıştır. Modelleme çalışmalarında sistem alt parçalara bölünerek modellenmiştir. Bu sayede sistemin alt birimleri ortaya konmuş ve modellemede hata yapma ihtimali azalmıştır. Sistemde ilk olarak havanın burundan girerek burun içerisine dolduğu alt kısım modellenmiştir. Amesim ile modellenen alt birim Şekil 4.1’ de gösterilmektedir. Bu kısımda giren havanın debisi, burundan giriş orifisi ve ilk hacim modellenmiştir.



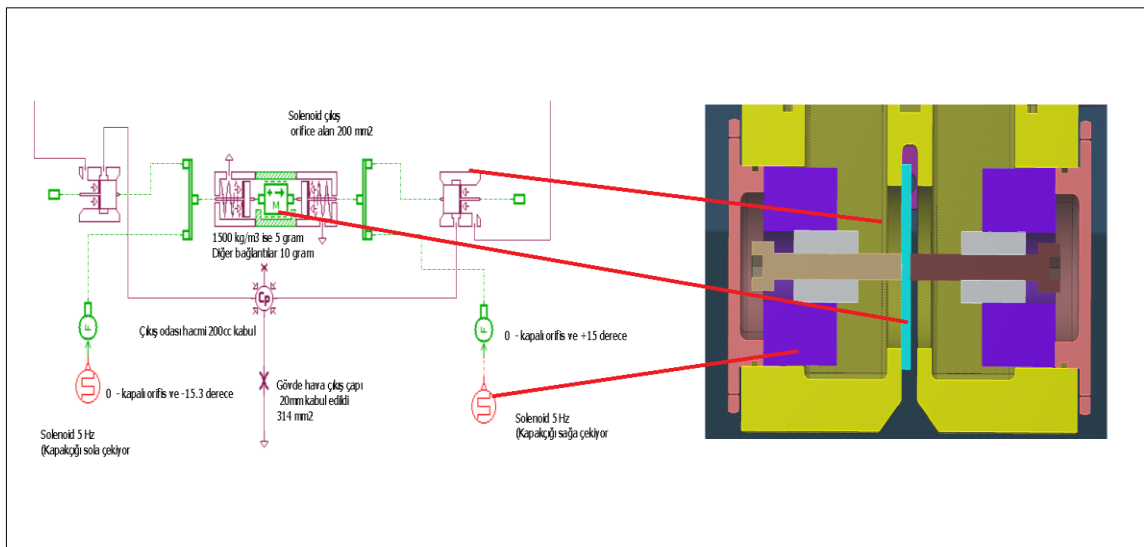
Şekil 4.1. Burundan hava giriş kısmının Amesim modellemesi

İkinci kısımda döner kanatçığın sol ve sağındaki orifisler ve altındaki oda hacimleri modellenmiştir. Modellenen ikinci kısım Şekil 4.2 'de gösterilmiştir. İkinci model kısmında kanatçığın sol ve sağındaki orifis, kanatçık ataleti, kanatçığa etkiyen basınç, kanatçık alanı, kanatçık moment kolu modellenmiş ve kanatçık hava yükü simule edilmiştir.



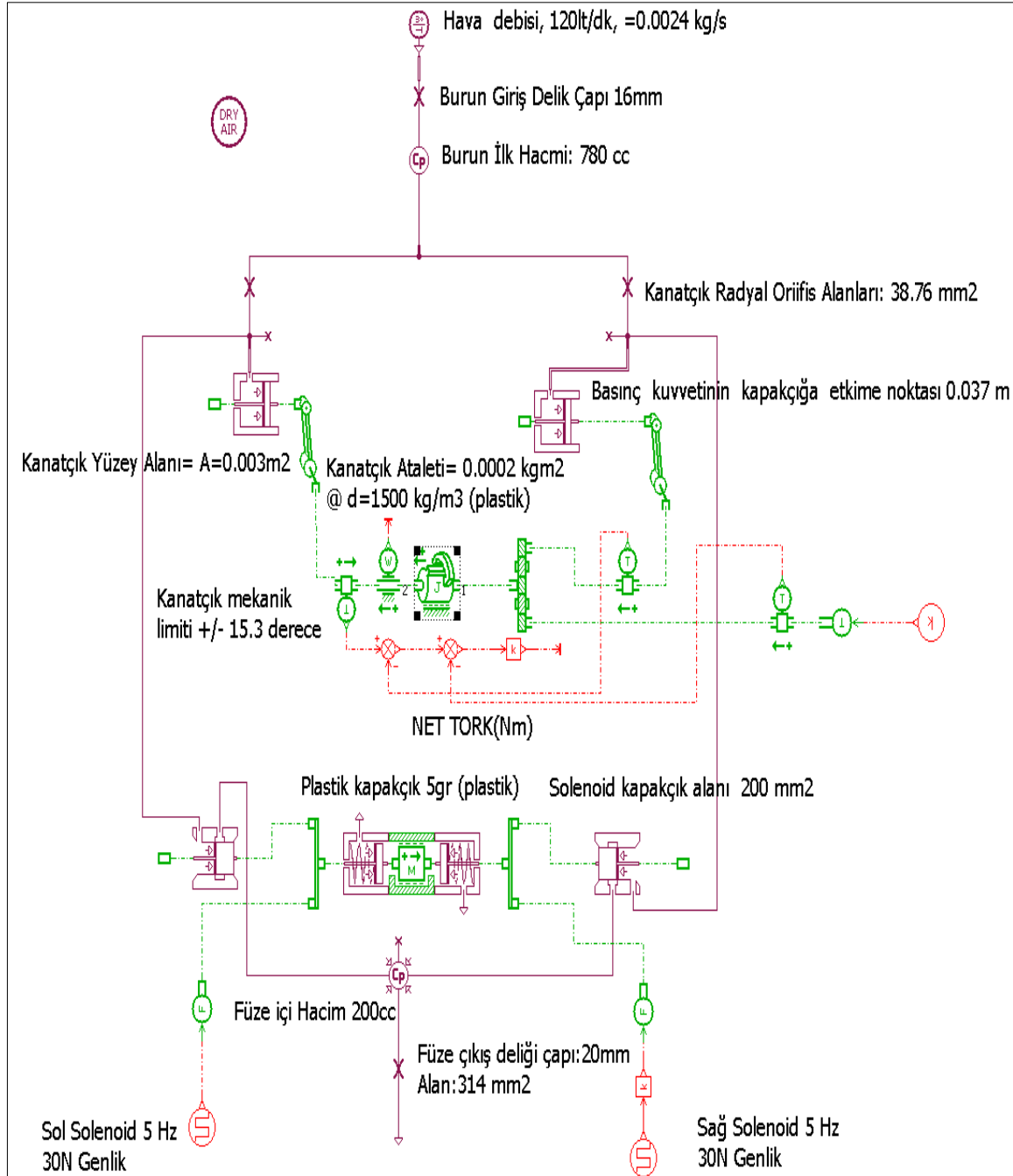
Şekil 4.2. Döner kanatçık kısmının Amesim modellemesi

Son kısım olarak kapakçık ve füzeden çıkış kısmı modellenmiştir. Modellenen bu kısımda kapakçıga etkiyen basınç alanı, kapakçık ağırlığı, çıkış hacmi ve orifisi modellenmiştir. Modellenen 3. Kısım Şekil 4.3' te gösterilmiştir.



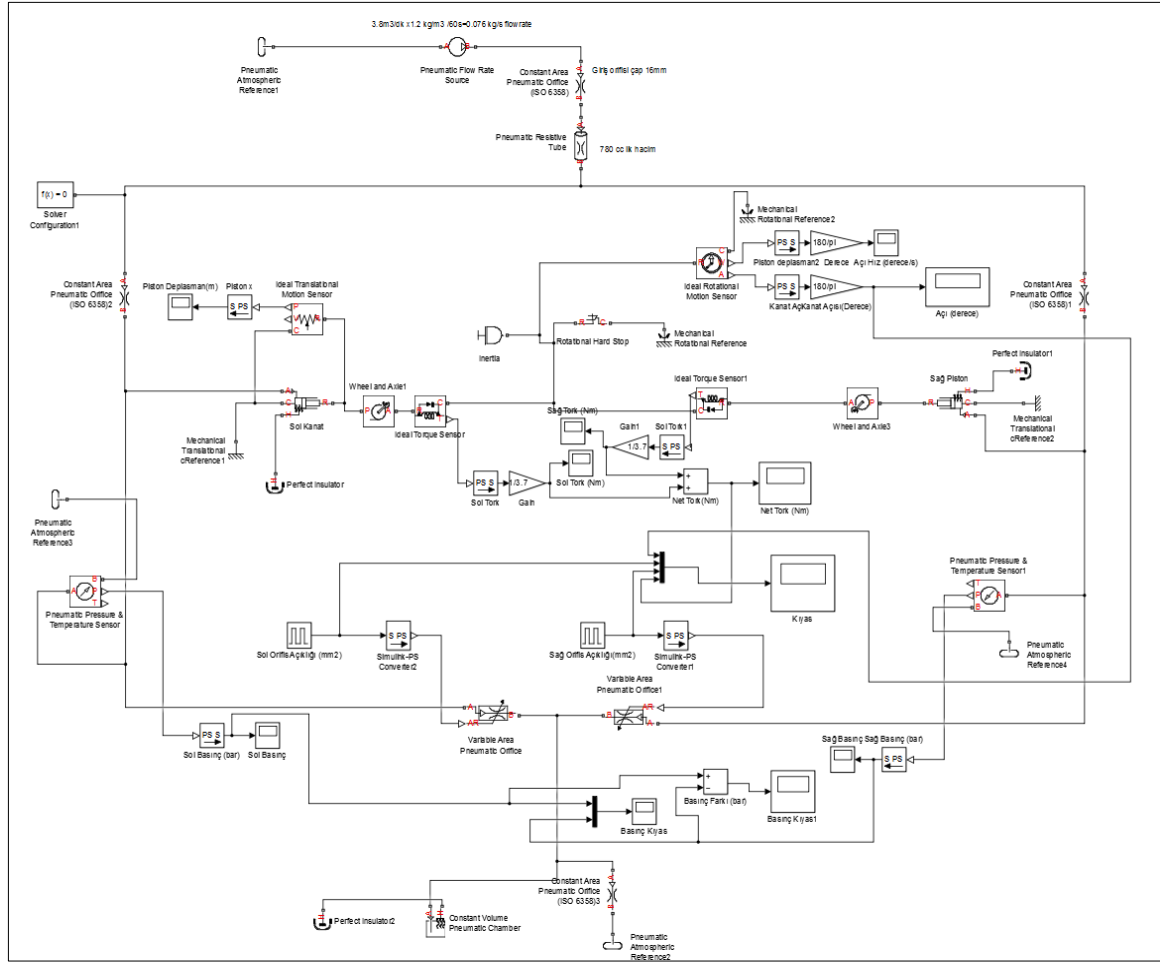
Şekil 4.3. Kapakçık ve çıkış kısmının Amesim ile modeli

Alt model birimlerin birleştirilmesi ile oluşturulan iki boyutlu Amesim modeli Şekil 4.4’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Hava alıklı KTS Amesim komple modeli

Amesim modellemesi yapılan sistemin benzer olarak Matlab-Simulink’ te de sistem modellemesi yapılmıştır. Oluşturulan model Şekil 4.5’ de gösterilmiştir. Yapılan her iki modellemenin sonuçları kıyaslanacak ve ilk kısımda yapılan Amesim modellemesi kısmen doğrulanacaktır.



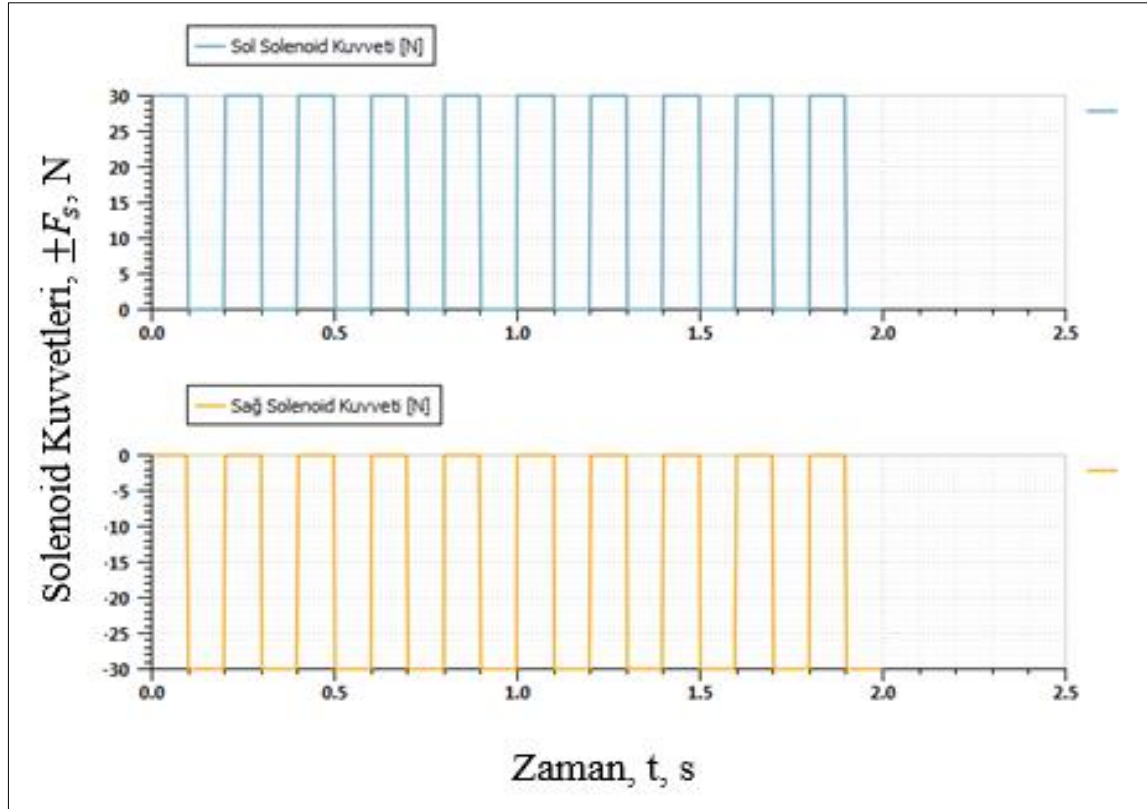
Şekil 4.5. Hava alıklı KTS Simulink Komple Modeli

Her iki modellemeye girdi olması için, 6 bar ‘a regüle edilmiş fabrika havasına ait kütleli debi (0,0024 kg/s) ve hali hazırda bulunan bir solenoid (30 N) eyleyici seçilmiştir. Fabrika havasına ait debinin seçilmesiyle ilk prototipin testlerde değerlendirilmesi kolaylaşmıştır.

Ek olarak modelleme çalışmalarının devamında, kütleli hava debisinin miktarı füze uçuş hızında (0,8 Mach) hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD / ing. CFD) yazılımında analiz edilerek tekrar güncellenecektir.

Kapakçığı hareket ettiren sol veya sağ solenoidlerden biri çalışırken diğerinin enerjisiz kalması gerekmektedir. Bu sebeple iki solenoidi besleyen elektrik voltajının 180° faz farkı ile verilmesi gerekmektedir. Bu sayede solenoid kuvvetleri birbirleriyle çakışmadan sırasıyla kapakçığa aktarılacaktır. Her iki modelde de solenoid kuvvetleri KTS’ye darbe genişlik modülasyonu (DGM) komutu ile sabit 5 Hz hedef frekansında verilmiştir. Sisteme verilen girdi kuvvetleri Şekil 4.6’ da gösterilmiştir. Akışkan dinamiğini daha rahat gözlemlemek

için simülasyonlarda solenoidlerin yüksek frekans cevabına (>100 Hz) sahip olduğu varsayılmıştır.



Şekil 4.6. Sisteme verilen 5 Hz frekanstaki solenoid kuvvet girdisi

Burun hava giriş delik çapı 122 mm çapa sahip referans füze için 16 mm olarak varsayılmıştır. Bu çap değeri mühimmatın çapına ve geometrisine göre değiştirilebilir. Burun giriş çapı büyüdükçe debi miktarı artmakta ancak füze üzerinde yaratılan sürüklenme kuvveti de artmaktadır. Dolayısıyla füze sistem modellemesi tarafında bu çap değeri optimize edilmelidir.

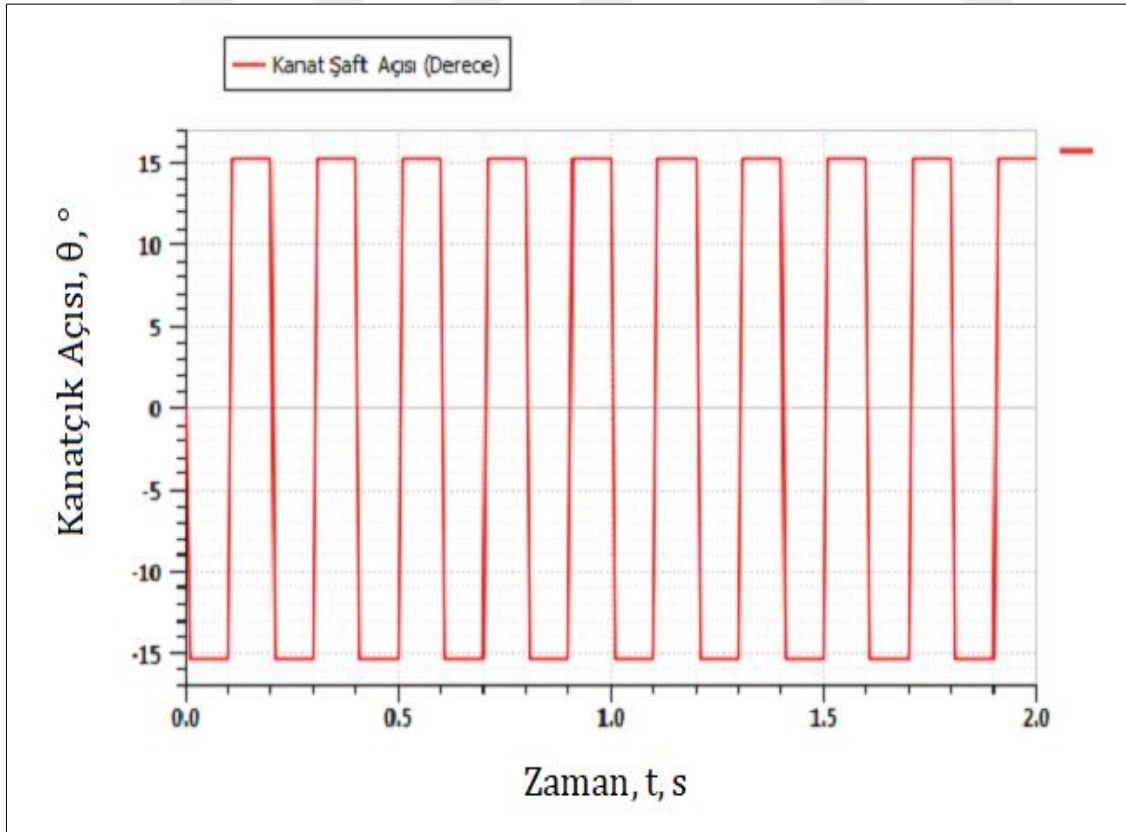
Modelde belirtilen ilk hacim değeri Şekil 3.4' teki katı model üzerinden hesaplanmıştır. Döner kanatçık radyal boşluğunun varsayılan değeri 0,1 mm olarak belirlenmiştir. Buna göre hesaplanan iki tarafa ait her bir radyal alan $38,76 \text{ mm}^2$ dir. Kanatçığın hafif olması için plastik malzeme seçilmiş, kanatçık ataleti, sol-sağ oda içi basıncın etkidiği simetrik kanatçık alanları ve katı modelden hesaplatılmıştır. Hava basıncının döner kanatçığa etkidiği nokta geometrik merkez olarak varsayılmıştır. Kapakçık malzemesi hafif olması maksadıyla plastik seçilmiştir. Kapakçığın çıkış alanı ($W * (x_o \pm x)$), çevre ölçüsü (W) ve solenoid yer değiştirmesi (x) ile sınırlandırılmaktadır.

122 mm çapa sahip mühimmat diğer benzer mühimmatlarla kıyaslanarak döner kanatçık açısı limitleri $\pm 15,3^\circ$ olarak seçilmiştir. Stoklarda bulunann solenoid ürüne ait katalog verilerine bakılarak modeldeki yer değiştirmesi ± 1 mm ile sınırlandırılmıştır. Füze çıkış orifisi, burun giriş orifisinden büyük olacak şekilde (çapta 20 mm) modele girilmiştir.

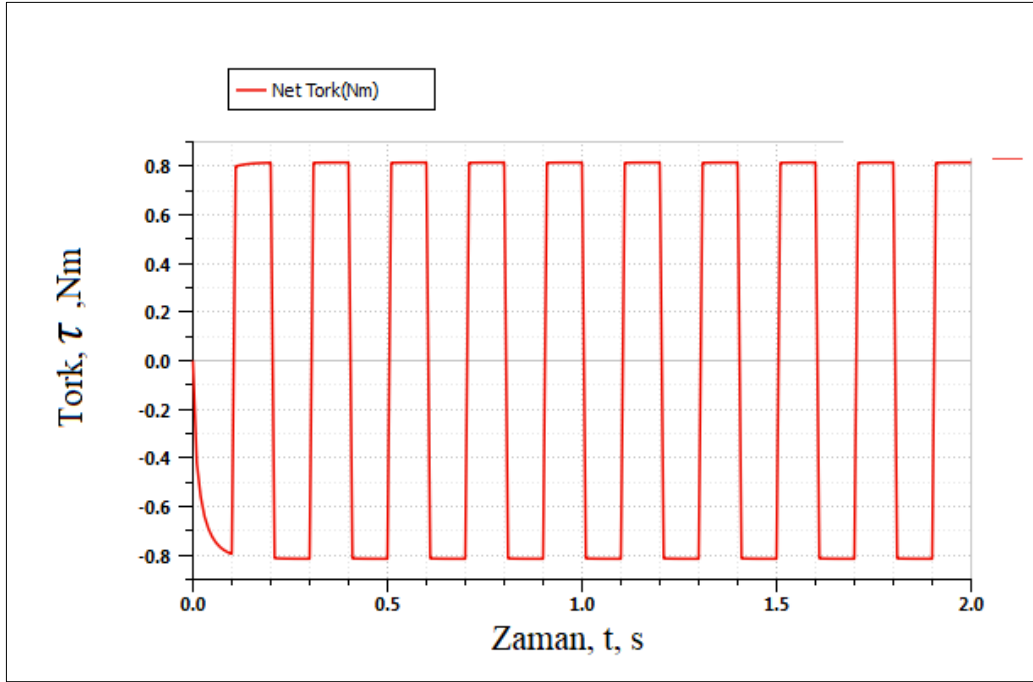
Füze içi hacmin basıncı atmosfer basıncına yakındır. Dolayısıyla füze için hacminin sistem dinamiğine etkisinin fark edilir olmayacağı düşünülmektedir. Füze içi hacmi 200 cc (0,2 lt) olarak kabul edilmiştir.

Bu iki girdiye karşılık sistemin kanatçık açısı ve üretilen kanatçık torku olmak üzere iki çıktısı vardır. Ayrıca sistem çıktısı üzerinde önemli etkisi olan kapakçık pozisyonunun durumu gözlenecektir.

Amesim ve Simulink modelleme çalışmaları sonuçları elde edilmiştir. Kanatçık açısı ve tork çıktıları her iki modelde kıyaslanmıştır. İlk olarak Amesim modelinden elde edilen çıktılar Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de verilmiştir.

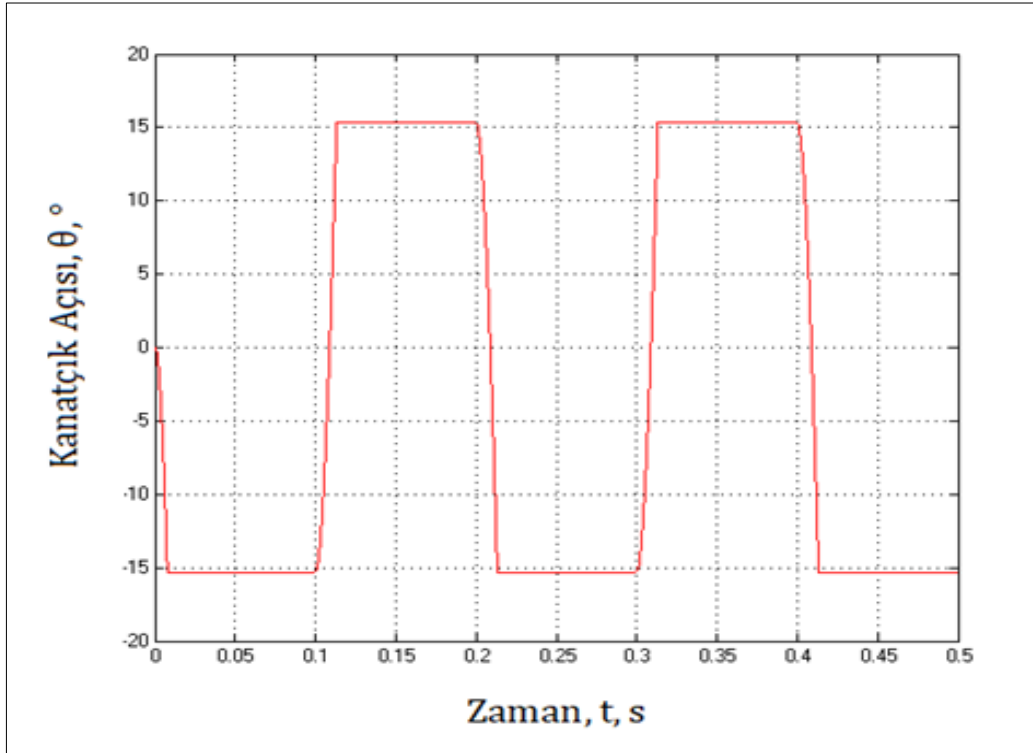


Şekil 4.7. Amesim modellemesi kanatçık açısı çıktısı

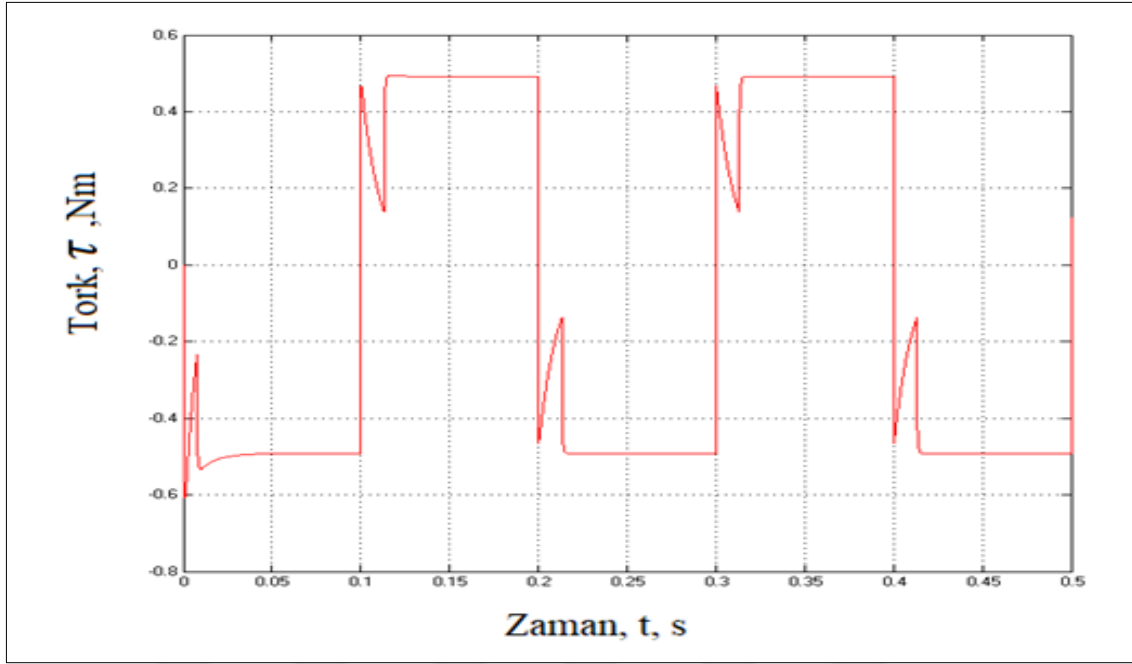


Şekil 4.8. Amesim modellemesi kanatçık tork çıktısı

Simulink modellemesi ile elde edilen çıktılar ise Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’ da verilmiştir. Modellemede aynı girdi değerleri kullanılmıştır. Ancak alt elemanların (örn. kapacık orifisi kesiti) detaylı modellemesi Amesim’ deki kadar detaylı yapılamamıştır.

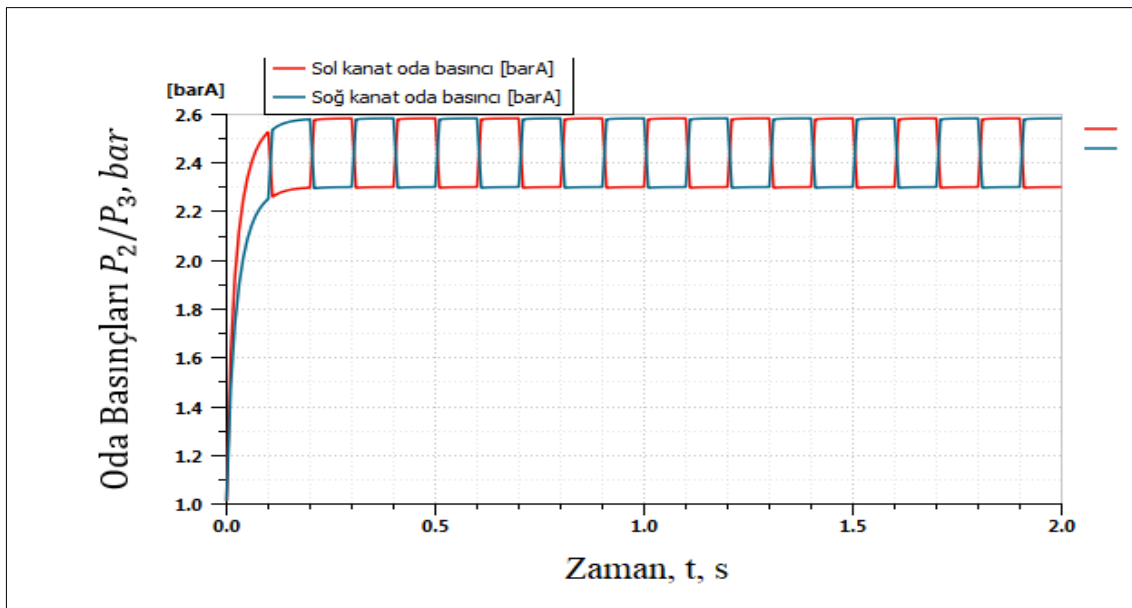


Şekil 4.9. Simulink modellemesi kanatçık açı çıktısı

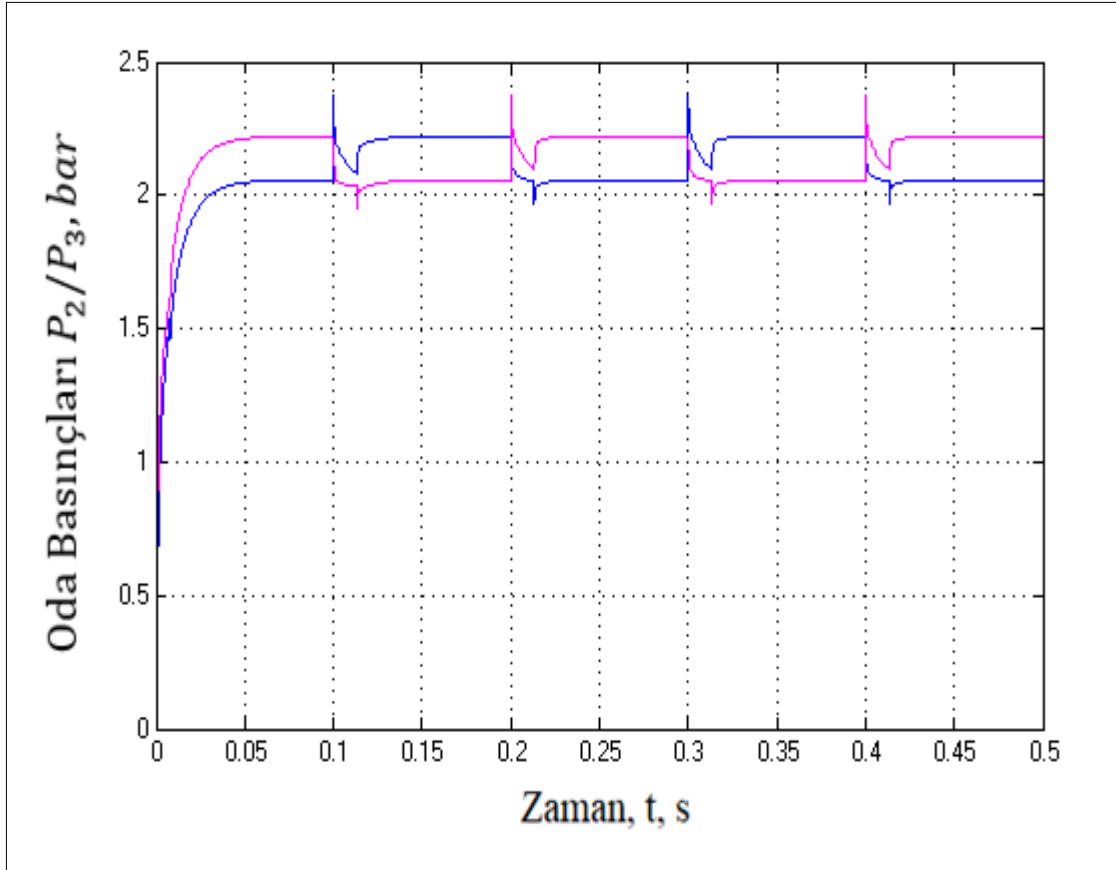


Şekil 4.10. Simulink modellemesi kanatçık tork çıktısı

Amesim ve Simulink modelleme çıktıları incelendiğinde kanatçık pozisyonları benzer olarak hareket etmiştir. Ancak kanat tork çıktıları incelendiğinde nominal tork değerleri yaklaşık olarak Amesim modellemesinde 0,815 Nm iken Simulink modellemesinde 0,5 Nm çıkmıştır. Bu durumun sebebi araştırıldığında kanatçığın her iki tarafında etkiyen basınçların farklı olmasına bağlanmıştır. Sırasıyla Amesim ve Simulink'ten elde edilen kanatçık basınç değerleri Şekil 4.11 ve Şekil 4.12' de verilmiştir.



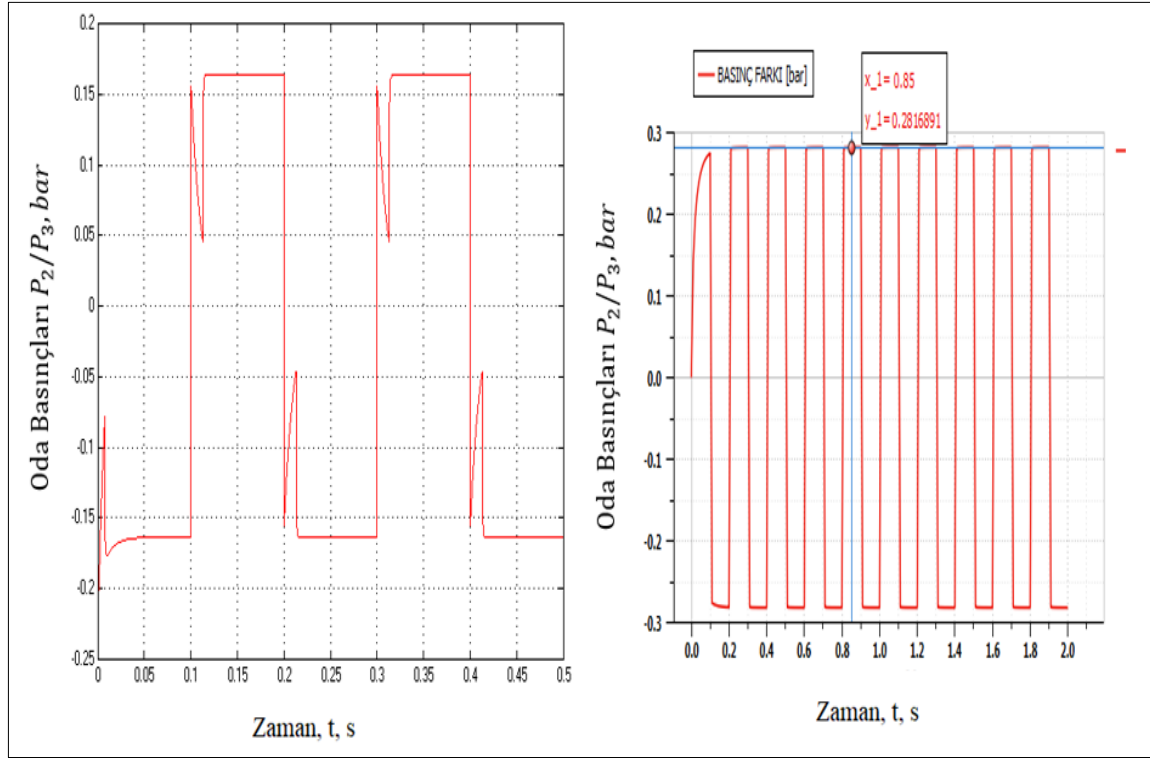
Şekil 4.11. Amesim modellemesi oda basınç değerleri



Şekil 4.12. Simulink modellemesi oda basınç değerleri

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 incelendiğinde kanatçık altındaki odalarda oluşan basınç değerlerinin belirli bir orada farklı olduğu gözlenmektedir. Bu durumun temel sebebi kapakçık bölgesindeki radyal (annular) orifisin Simulink'te normal bir orifis olarak modellenmesi ve nümerik hatalar olarak görülmektedir. Ayrıca kanatçık altındaki odalar ve kapakçıklar arasında ısı transferinin Simulinkte modellenememesi (ing. perfect isolation) basınçların farklı olmasına sebep olabileceği düşünülmektedir.

Her iki model için odalar arası arasındaki net basınç farkı ortaya konduğunda Şekil 4.13 elde edilmiştir.



Şekil 4.13. İki modellemedeki basınç farklarının kıyası

Şekil 4.13 incelendiğinde odalar arası basınç farkı Amesim modelinde 0,165 bar, Simulink modelinde ise basınç farkı 0,28 bar olarak tespit edilmektedir. Şekil 4.7 ve Şekil 4.9’da belirtilen tork oranı alındığında (0,815/0,5) yaklaşık 1,63 değerini elde ederiz. Şekil 4.12’deki basınç fark oranları oranladığında ise 1,69 değerini hesaplarız. Bu iki oranın birbirine yakın çıkması tork değerlerindeki farklılığın odacıklarda oluşan basınç farkından kaynaklandığının göstergesidir. Bu durumda hangi modellemenin daha doğru olduğu deneysel testlerle kıyaslanarak değerlendirilecektir. Ayrıca elde edilen basınç değerleri HAD analizleri ile kıyaslanacaktır.

Sistem modellemesinin daha gerçekçi ve daha fazla uygun eleman kullanılarak yapıldığı Amesim modellemesi ile çalışmalara devam edilmiştir. Simulink modellemesi sayesinde Amesim modellemesi kısmen doğrulanmıştır ve bu sayede ön tasarım çalışmaları yapılmıştır.

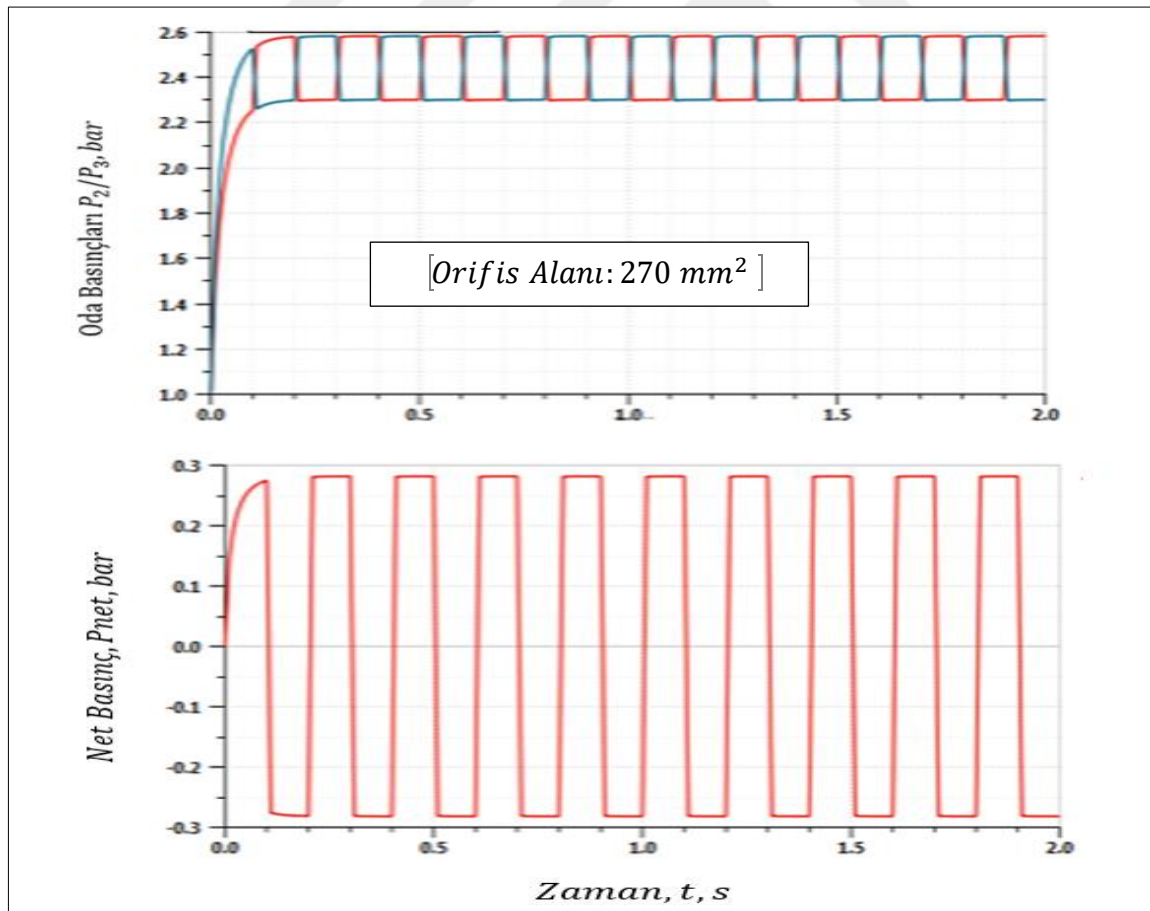
4.2. Simülasyon Parametrelerinin Değerlendirilmesi

Simülasyonlar sayesinde sistem girdilerine göre çıktılar elde edilmiştir. Bu çıktılara etki eden baskın olan parametrelerin belirlenmesi için değerlendirmeler yapılmış ve bu kısımda

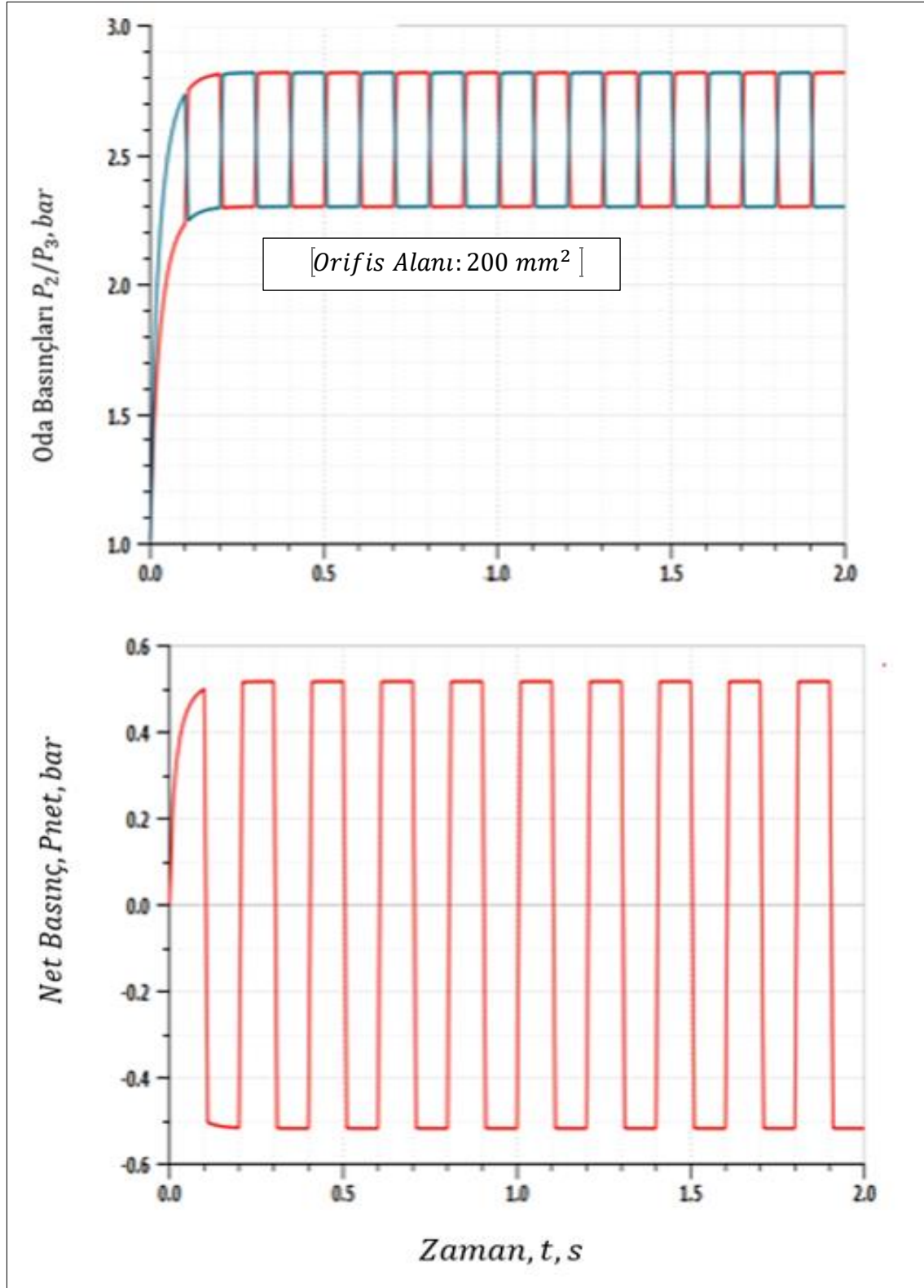
parametrelerin optimize edilmesi amaçlanmıştır. Kritik parametrelerin belirlenmesinde (3.39) ve (3.40) nolu eşitlikler göz önüne alınmıştır.

(3.39) ve (3.40) nolu eşitlikler incelendiğinde oda basınç türevini oluşturan parametrelerin ilk hacim (V_1), odacık hacimleri (V_2, V_3) kanatçık ve burun gövdesi arasındaki radyal orifis alan, oda basınçları (P_2, P_3), kapakçık dairesel çıkış orifisi ve ilk oda basıncı (P_i) olduğu gözlenmektedir. Bu parametreler doğrudan oda basınçlarını karakterize etmese de basınç değerleri hakkında fikir vermektedir.

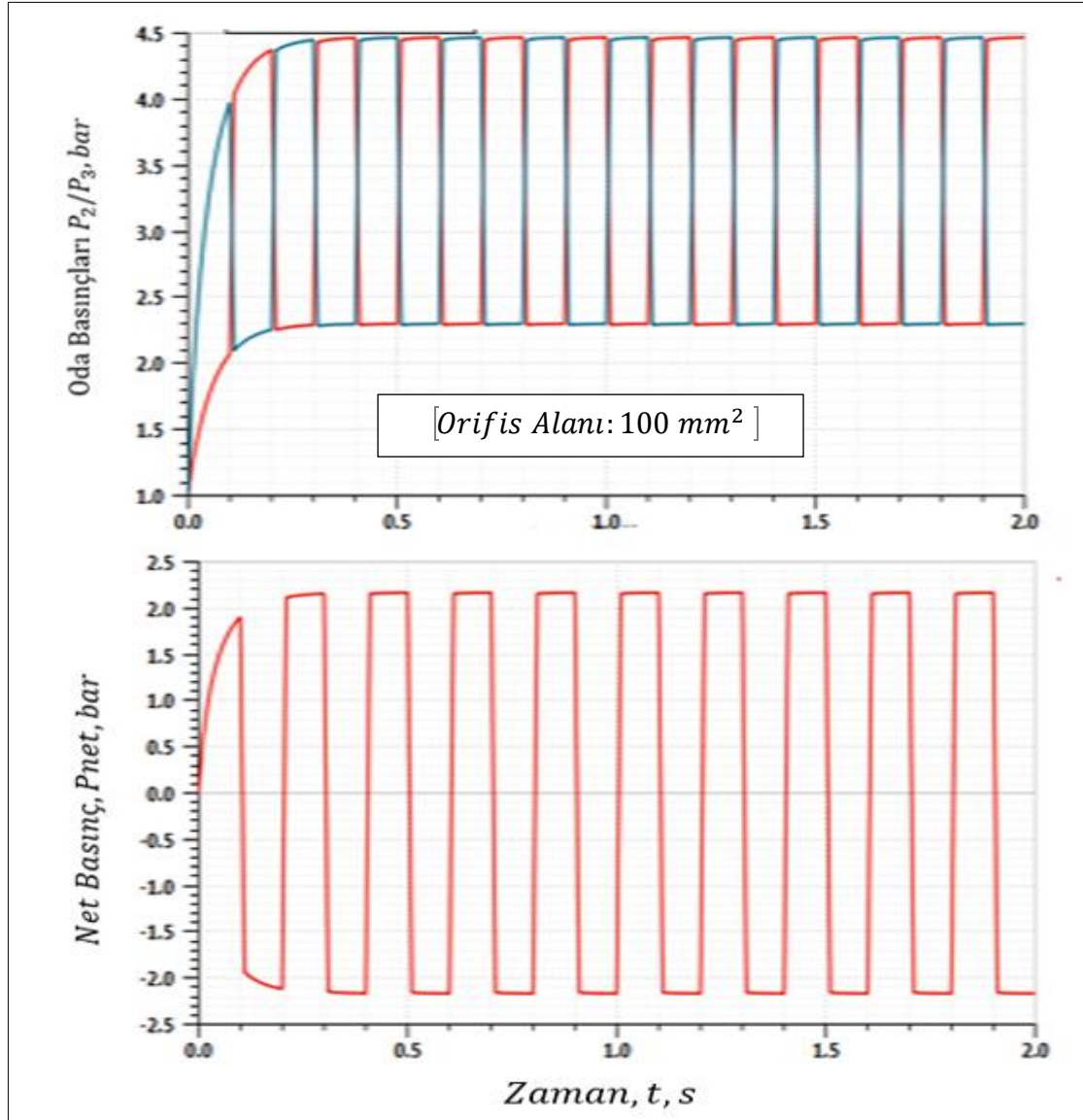
Dolayısıyla ilk olarak kanatçık ve gövde arasındaki radyal orifisin etkisi gözlenmiştir. Eşitliklere göre basınç artışının miktarı oda basıncının ilk oda basıncına olan oranı düştükçe artmaktadır. Bahsedilen bu oranı düşürmek için orifis alanı küçültülerek oda basınçları ve basınç farkları gözlenmiştir. Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16' ya göre farklı orifis alanlarına göre basınç verileri gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Kanatçık-gövde arası radyal orifis alanının 270 mm^2 olduğunda oda basınç ve basınç farkları



Şekil 4.15. Kanatçık-gövde arası radyal orifis alanının 200 mm^2 olduğunda oda basınç ve basınç farkları

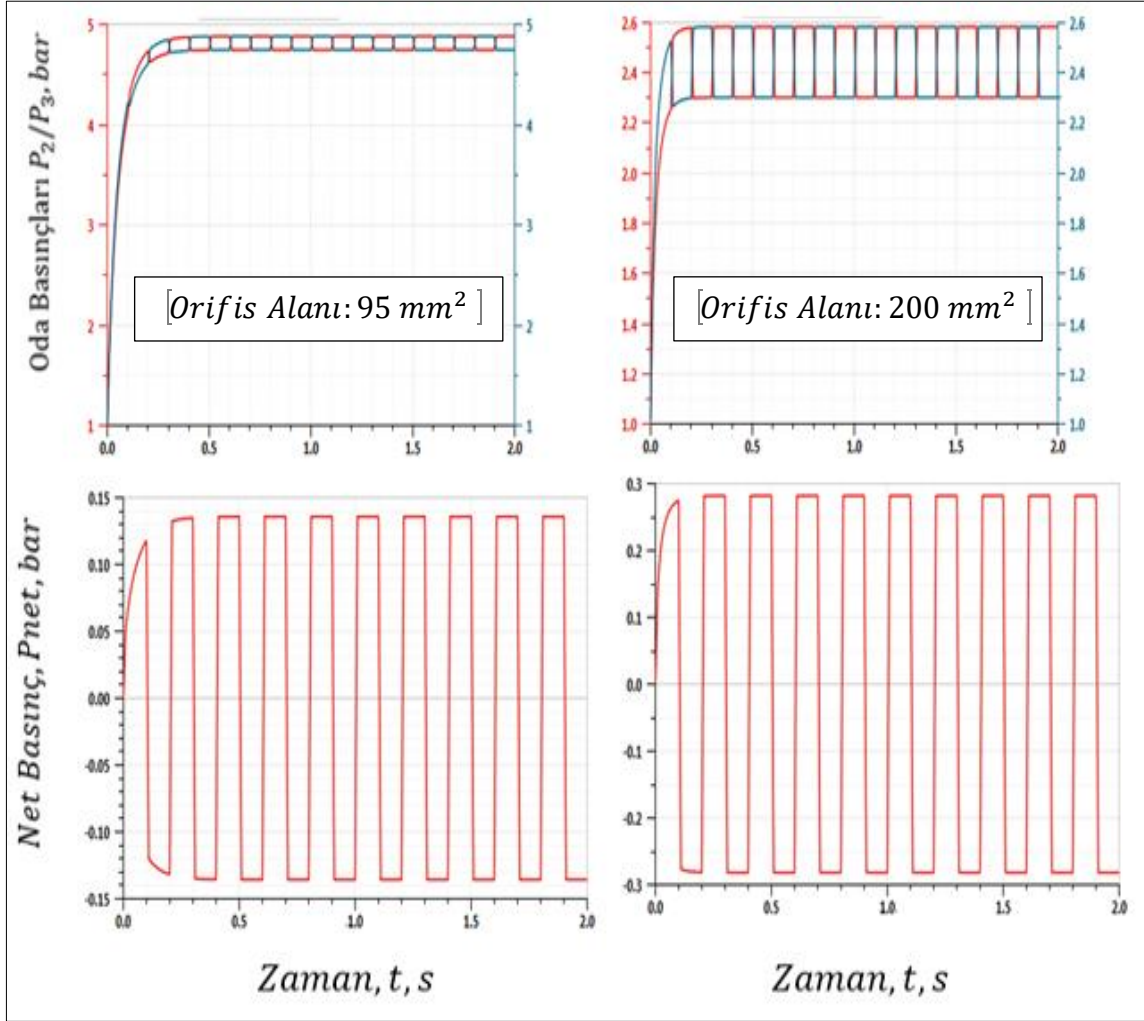


Şekil 4.16. Kanatçık-gövde arası radyal orifis alanının 100 mm² olduğunda oda basınç ve basınç farkları

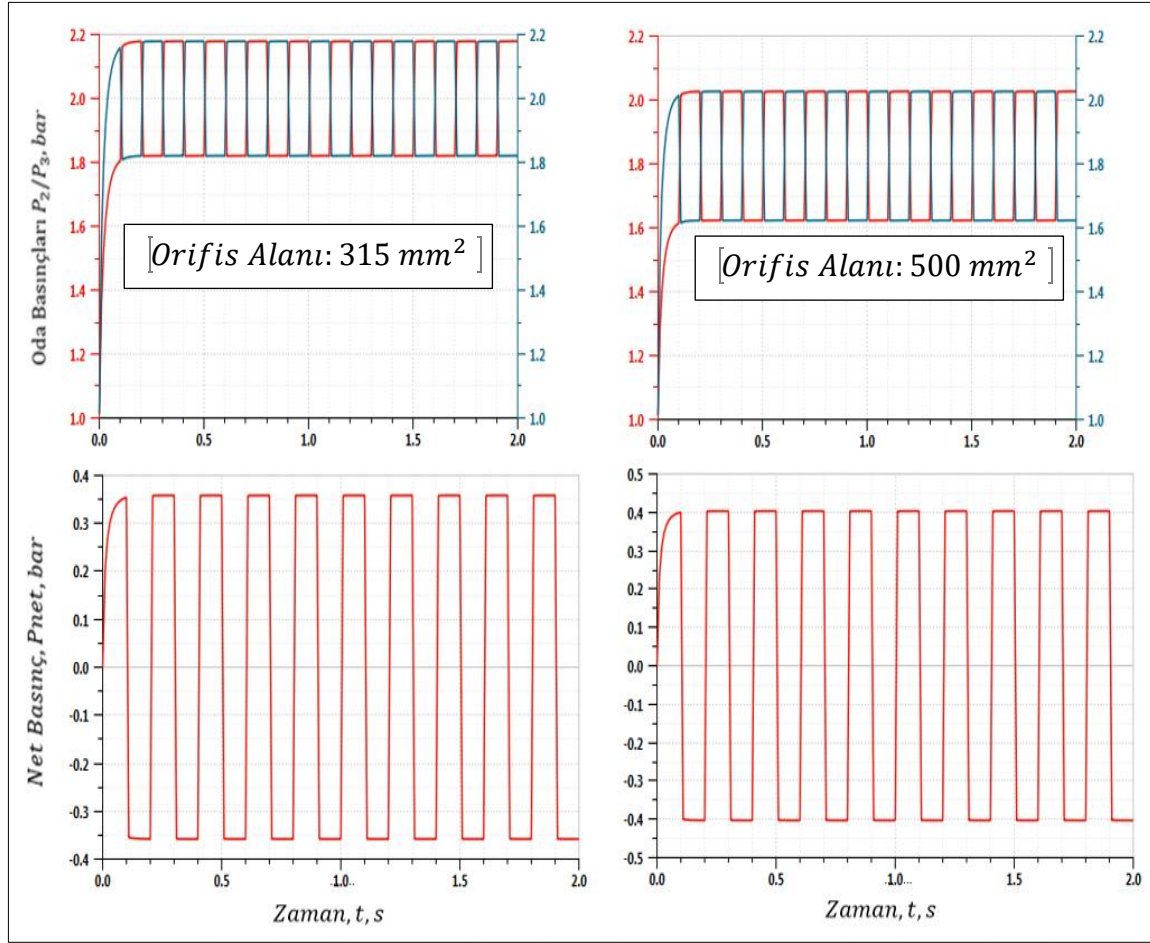
Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16 incelendiğinde tahmin edildiği gibi kanatçık-gövde arasındaki radyal orifis alanlarının azalması ile basınç farkı artmaktadır. Oda basınç farklarının artması aynı oranda torkun da artmasını sağlamaktadır. Ancak kapakçığın her iki yanına etki eden basınç farkı artacağı için solenoidin istenilen çalışma frekansında vermesi gereken kuvvet değeri artmaktadır.

İkinci parametre olarak kapakçığa ait dairesel orifis alanı incelenmiştir. Kapakçık çıkış orifis alanı solenoidin hareketi ile değişmektedir. Solenoid kapakçığı kendine çekmekte ve kendi tarafındaki odayı basınçlandırmaktadır. Aynı zamanda kapakçığın diğer odadaki orifis çıkış alanını maksimum alana yükseltmektedir. (3.39) ve (3.40) nolu eşitlikler incelendiğinde

düşük basınç tarafındaki odanın çıkışında kapakçığın küçük bir rezistansa sahip olması için kapakçık alanının yeterli büyüklükte olması gerekmektedir. Bu sebeple farklı kapakçık çıkış alanları için oda basınç değerleri Amesim modelinde incelenmiştir. Bu basınç ve basınç fark değerleri Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



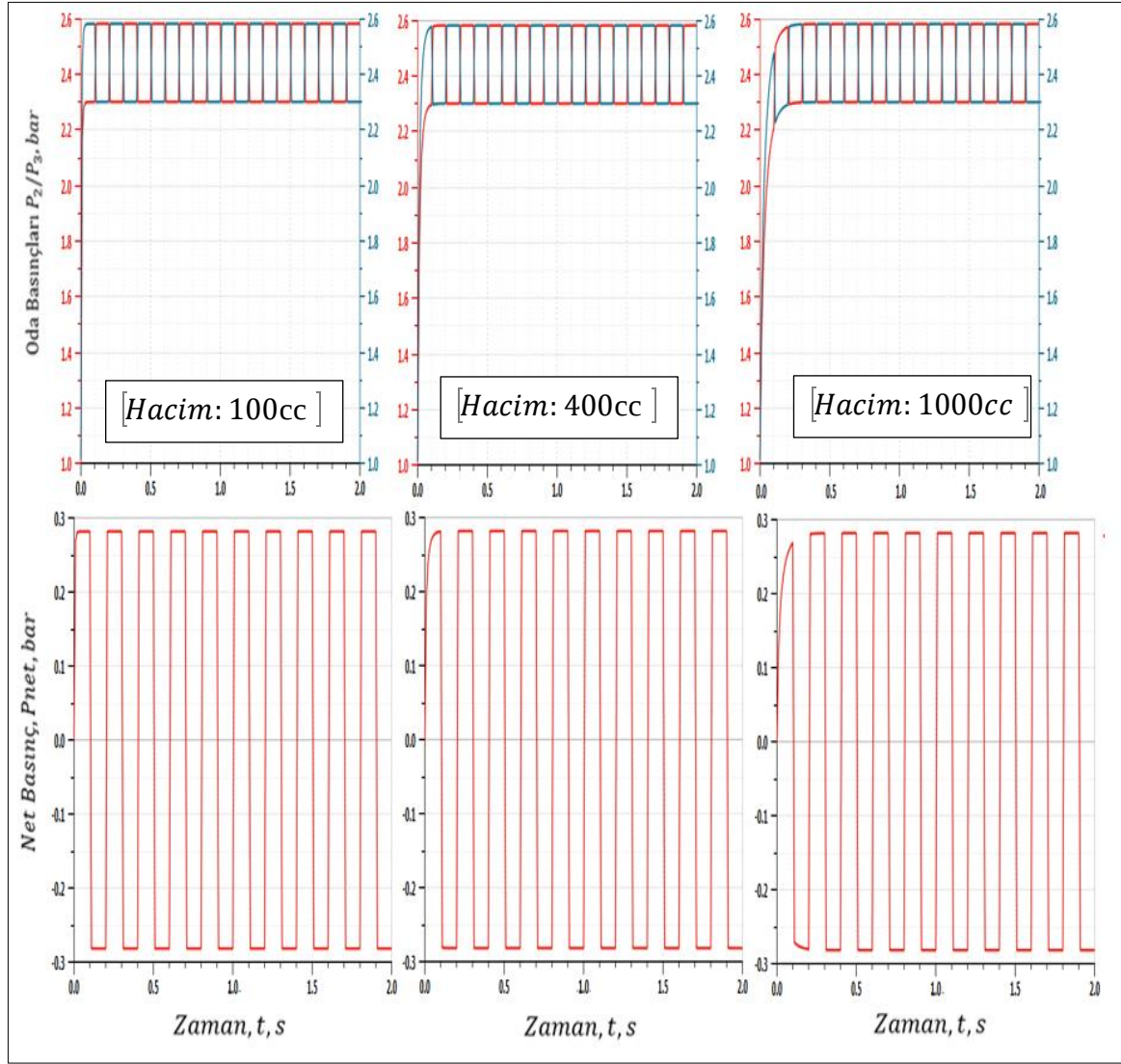
Şekil 4.17. Farklı kapakçık dairesel alanlarında oluşan oda basınç ve basınç farkları-1



Şekil 4.18. Farklı kapakçık dairesel alanlarında oluşan oda basınç ve basınç farkları-2

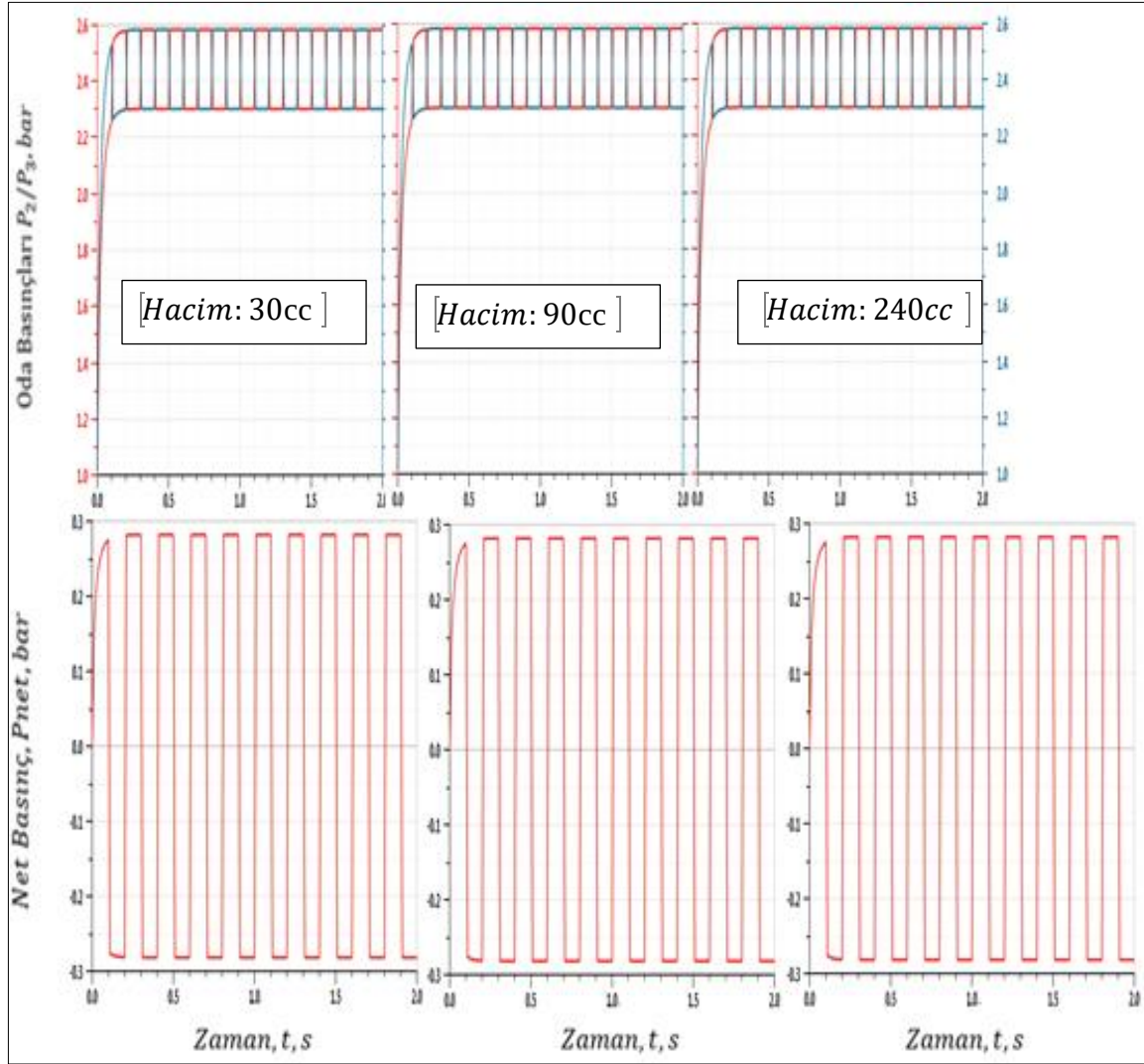
Şekil 4.17 ve Şekil 4.18 incelendiğinde kapakçık orifis alanının artması bir noktaya kadar basınç farkını artırdığı gözlenmektedir. Şekil 4.18’ de görüldüğü gibi orifis alanı bir noktadan sonra yeterli büyüklüğe ulaşmakta ve oda basınç değerlerine fazla etki yapmamaktadır. Kapakçık orifislerinin alanlarının artması ile kapakçığa etkiye kuvvet farkı artmaktadır. Yapılan bu analizlerde solenoidin bu kuvvetleri karşılayacak kadar kuvvetli olduğu varsayılmıştır. Ancak 500 mm^2 ’ ye sahip kapakçığın alanına karşılık gelen tutma kuvveti 598 N ’ dur. Dolayısıyla optimum tasarım yapılırken solenoid kuvvetlerinin değerlerine göre kapakçık orifis alanları sınırlandırılacaktır.

Sisteme etkisi olabileceği düşünülen diğer bir parametre ilk giriş hacmidir. İlk giriş hacminin değiştirilmesi ile oluşturulan grafik Şekil 4.19’ da verilmiştir.



Şekil 4.19. Farklı burun ilk hacim değerlerine göre basınç ve basınç farkları

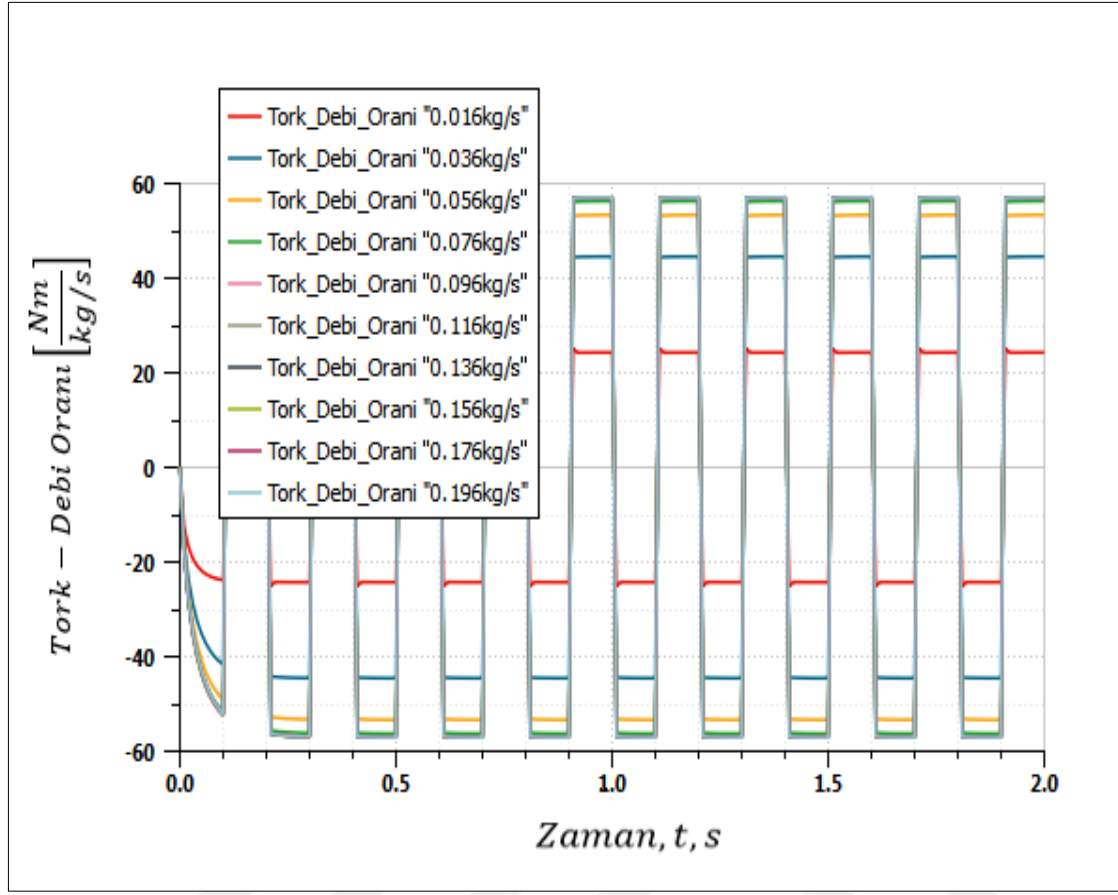
Şekil 4.19' da görüldüğü gibi burunda oluşturulan ilk hacmin basınç ve basınç değerlerine etkisi olmamaktadır. İlk hacim değeri sadece ilk komut anında (transient region) oluşan basıncın süresini etkilemektedir. Dolayısıyla ilk hacim değerinin küçültülmesi sistemdeki ilk hareketin daha hızlı olmasına yardımcı olacaktır.



Şekil 4.20. Farklı kanatçık altı oda hacim değerlerine göre basınç ve basınç farkları

Kanatçık altında kalan odanın hacmi Şekil 4.20’ de incelenmiştir. Grafiklere göre oda hacminin farklı değerlerinin oda basınçlarına etkisinin olmadığı görülmüştür.

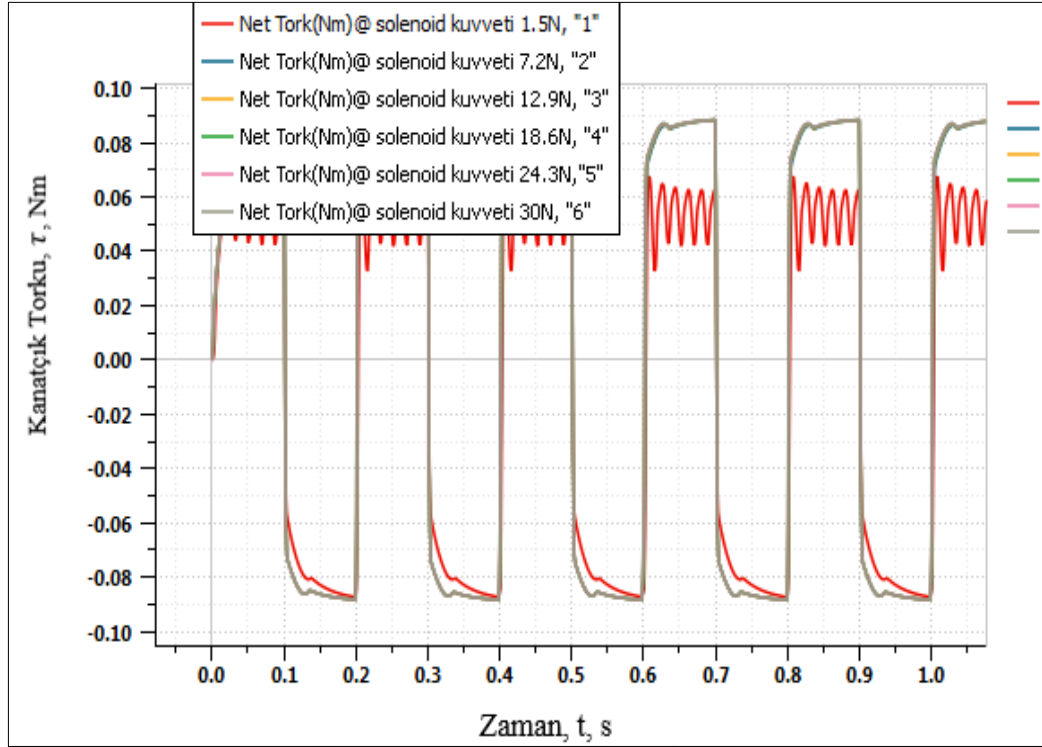
Füzenin burundan giren havanın kütleli debisinin artması ile odada bulunan hava hacminin daha çok sıkışarak oda basıncını artıracakları öngörülmektedir. Basıncın artması ile çıkış torku da artacaktır. Kütleli hava debisinin artması ile torkun artması ve tork-debi oranı değişimi Şekil 4.21’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.21. Kanatçık tork/ kütleli debi oranının giriş kütleli hava debisini farklı değerlerine göre değişimi

Şekil 4.21 incelendiğinde genel olarak kanatçık torkunun kütleli debinin artış oranı kadar arttığı gözlenmektedir. Ancak düşük kütleli hava debilerinde (0-0,06 kg/s) daha düşük tork/ kütleli debi oranı elde edilmektedir.

Simülasyonlarda kullanılan girdi solenoid kuvveti 30 N olarak seçilmiştir. Bu kuvvetin azalması ile oluşan etki irdelenmiştir (Şekil 4.22).

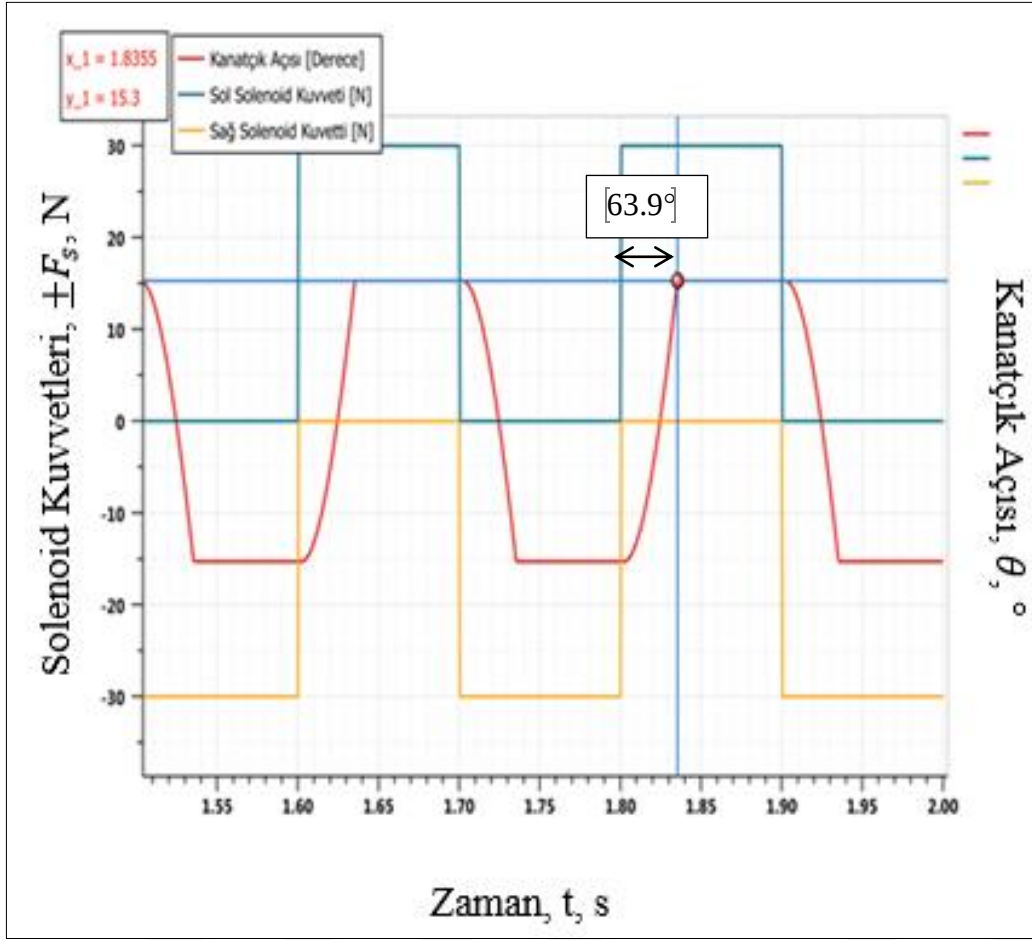


Şekil 4.22. Farklı solenoid kuvvetlerinin tork çıktısına etkisi

Şekil 4.22’deki veriler incelendiğinde solenoid kuvvetinin 30 N’ dan belirli bir mertebeye kadar düşürülmesi kanatçık tork çıktısında anlamlı bir değişiklik yaratmadığı anlaşılmaktadır. Ancak kritik bir eşikten sonra, solenoid, kapakçıya istenilen yer değişimini (± 1 mm) üretmekte zorlanacağı için kapakçığı tam olarak kapatamayacaktır. Dolayısıyla odalarda oluşan basınç düşüşü sebebiyle tork kaybı ve pozisyon yaşanacaktır. Simülasyondaki mevcut solenoid yerine daha düşük kapasiteye sahip bir solenoid kullanılabileceği değerlendirilmiştir (~ 3 N). Ancak solenoid kapasitesi optimize edilirken mühimmatın uçuşu esnasında solenoid eyleyici ekseninde oluşabilecek titreşim veya yükler ayrıca değerlendirilmelidir. Örneğin; 3 N kuvvet kapasitesine sahip bir solenoide, uçuş ivmeleri sonucunda solenoid eyleyici eksenine 5 N’ luk bir yük etkir ise, kapakçık ve mühimmat kontrol edilemez hale gelecektir. Ek olarak, düşük solenoid kuvvetlerinde (< 2 N) pozisyon cevabına ait simetrimin de bozulduğu Şekil 4.22’de görülmektedir.

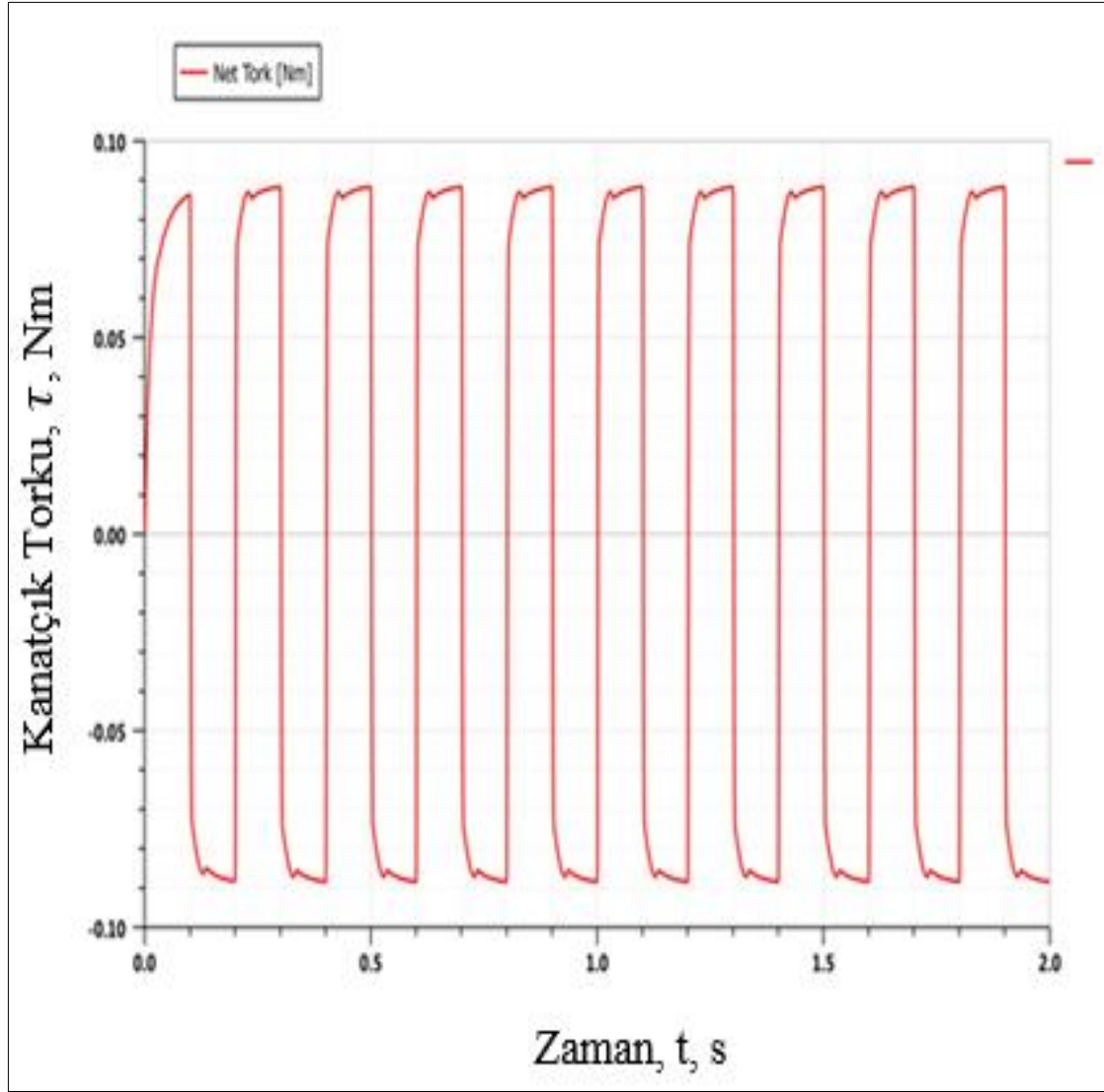
4.3. Modelin Frekans Cevabının İrdelenmesi

Simülasyonlarda hava alıklı KTS sisteminde hedef çalışma frekansı 5 Hz olarak belirlenmiştir. Bu frekans değerinde girdilere bağlı oluşan kanatçık açısı ve tork cevabı sırasıyla Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’te verilmiştir.



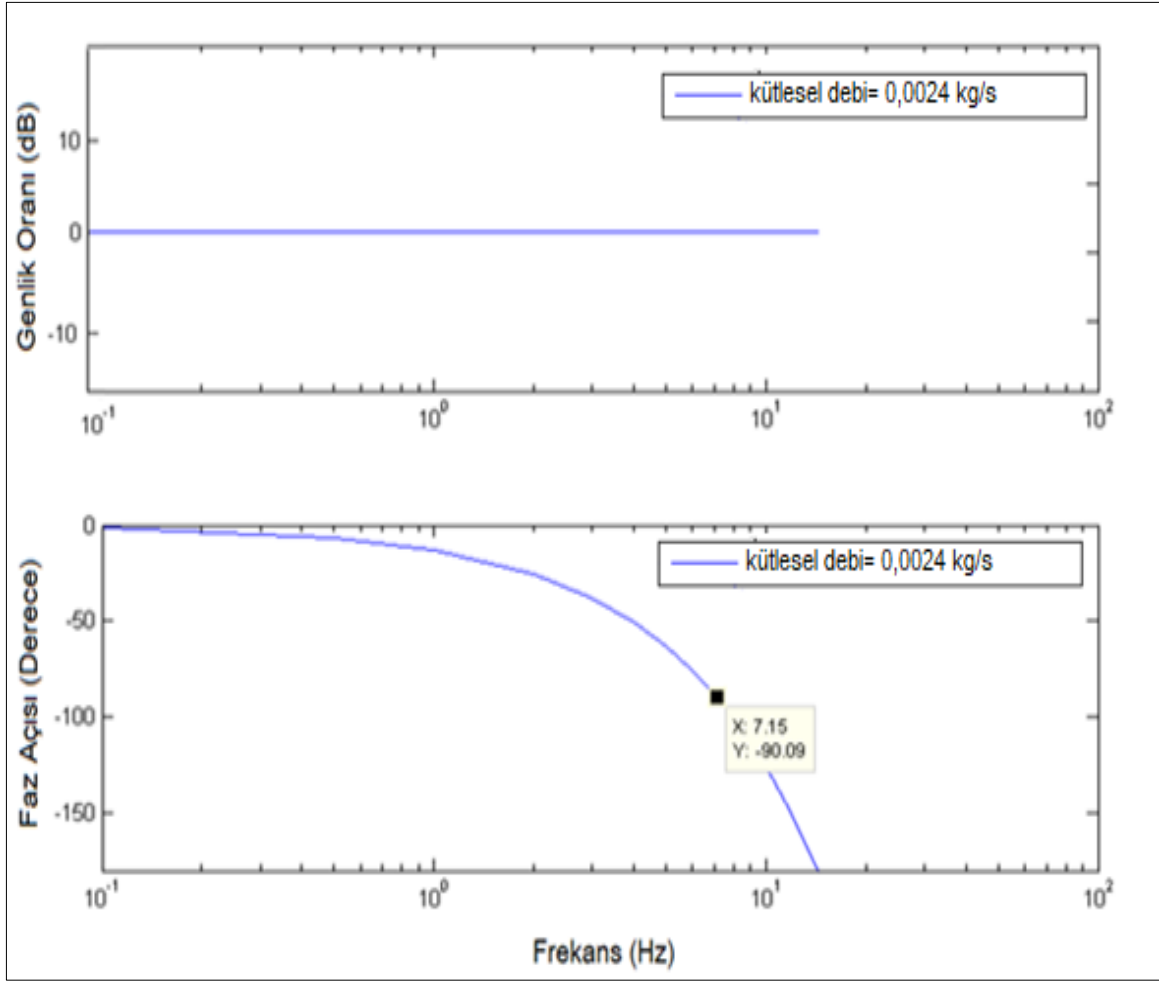
Şekil 4.23. 5 Hz hedef frekanstaki solenoid komut girdisine karşılık elde edilen kanatçık açısı çıktısı

Şekil 4.23 incelendiğinde 5 Hz’ deki 30 N’ luk solenoid komut girdisine karşılık kanatçığın $\pm 15,3^\circ$ aralığında başarıyla hareket ettiği gözlenmiştir. Hesaplanan faz farkı $63,9^\circ$ dir. Akışkan dinamiğini daha rahat gözlemlemek için simülasyonlarda solenoidlerin yüksek frekans cevabına (>100 Hz) sahip olduğu varsayılmıştır. Şekil 4.24’ e göre elde edilen tork değeri yaklaşık 0,09 Nm’ dir.



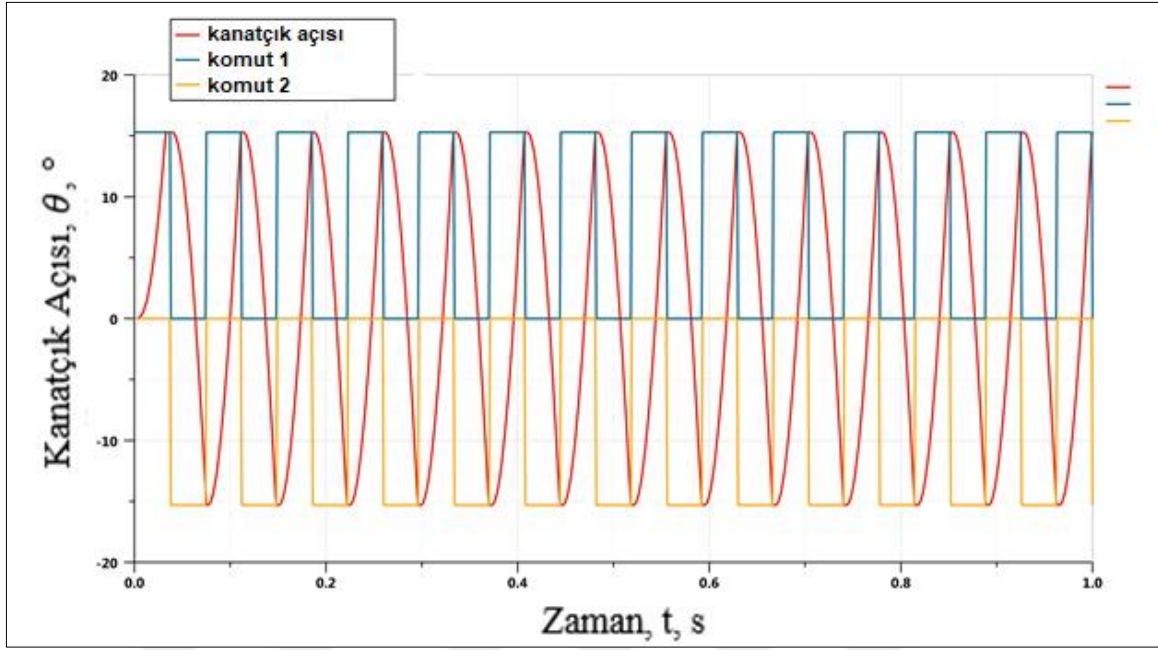
Şekil 4.24. 5 Hz hedef frekanstaki solenoid komut girdisine karşılık elde edilen kanatçık tork çıktısı

Simülasyonlarda ek olarak çalışma frekansı artırılarak elektro-pnömatik KTS' nin Bode eğrisi elde edilmiştir. Eğriler elde edilirken modelde kullanılan parametre değerleri korunmuştur. Bu verilere bağlı olarak modelleme sonucu oluşturulan Bode eğrileri Şekil 4.25' de verilmiştir.

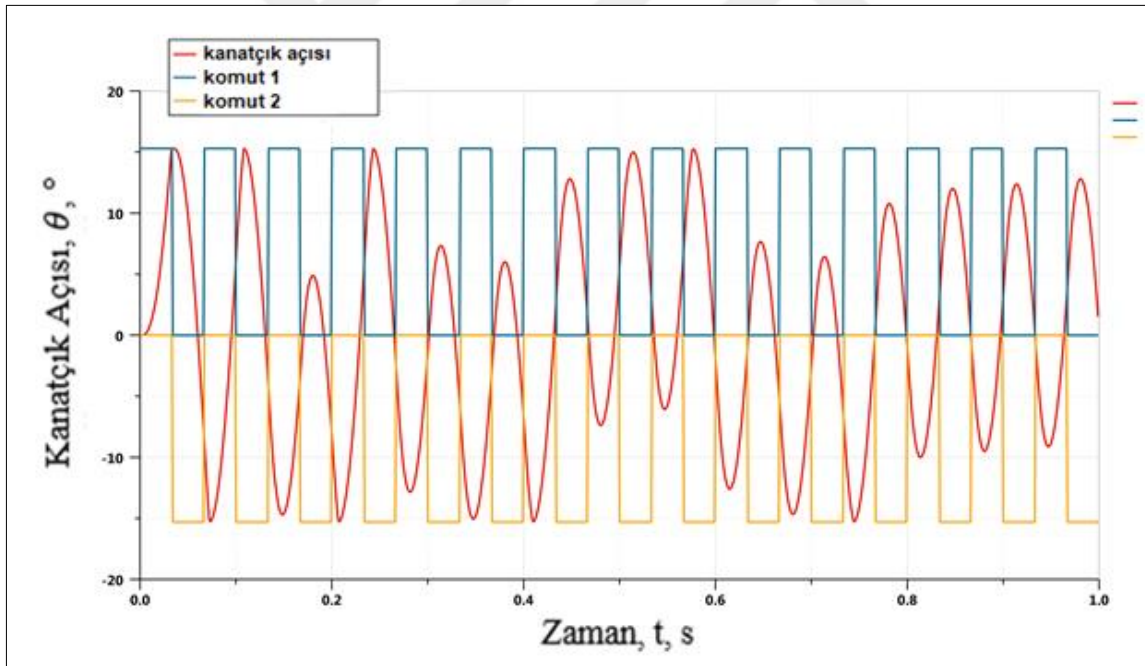


Şekil 4.25. Açık çevrim frekans cevabı ve Bode eğrileri

Şekil 4.25 incelendiğinde 7,15 Hz’ de 90° faz kaymasının gerçekleştiği gözlenmiştir. Bu noktaya kadar genlik oranında herhangi bir düşüş söz konusu olmamıştır. Yani verilen 30 N solenoid kuvvetine karşılık $\pm 15,3^\circ$ kanatçık açısı hedefine ulaşılmıştır. 180° faz kayması 13,5 Hz’ de gerçekleşmiştir. 180° faz kaymasına kadar genlik kaybı veya kanatçık cevabında bozulma gerçekleşmemiştir. Bu durum aslında kanatçığın daha yüksek açılara ulaşabileceğini ancak mekanik limite kanatçığın dayanması sebebiyle hızın limitlendiğini göstermektedir. Ancak 180° faz kaymasından (13,5 Hz) sonra komut ile açı ters gelmeye başladığı için 15 Hz’ den sonra kanatçık açı genliklerinde bozulmalar meydana gelmiştir. Bu iki durum Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’ de gösterilmiştir.

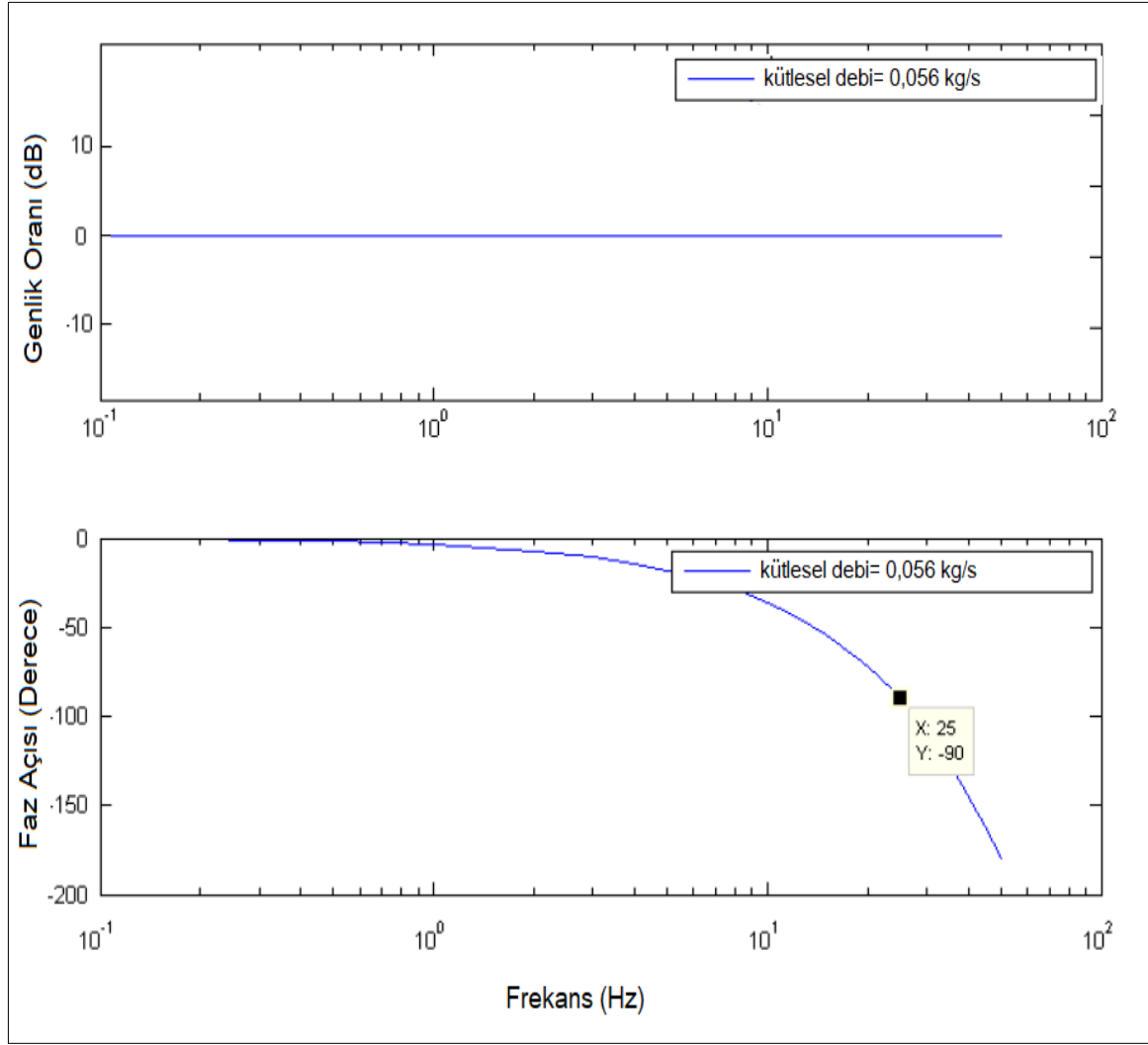


Şekil 4.26. 180° faz kaymasının gerçekleştiği 13,5 Hz frekans cevabı



Şekil 4.27. Kanatçık açısı genliklerinin bozulmaya başladığı 15 Hz frekans cevabı

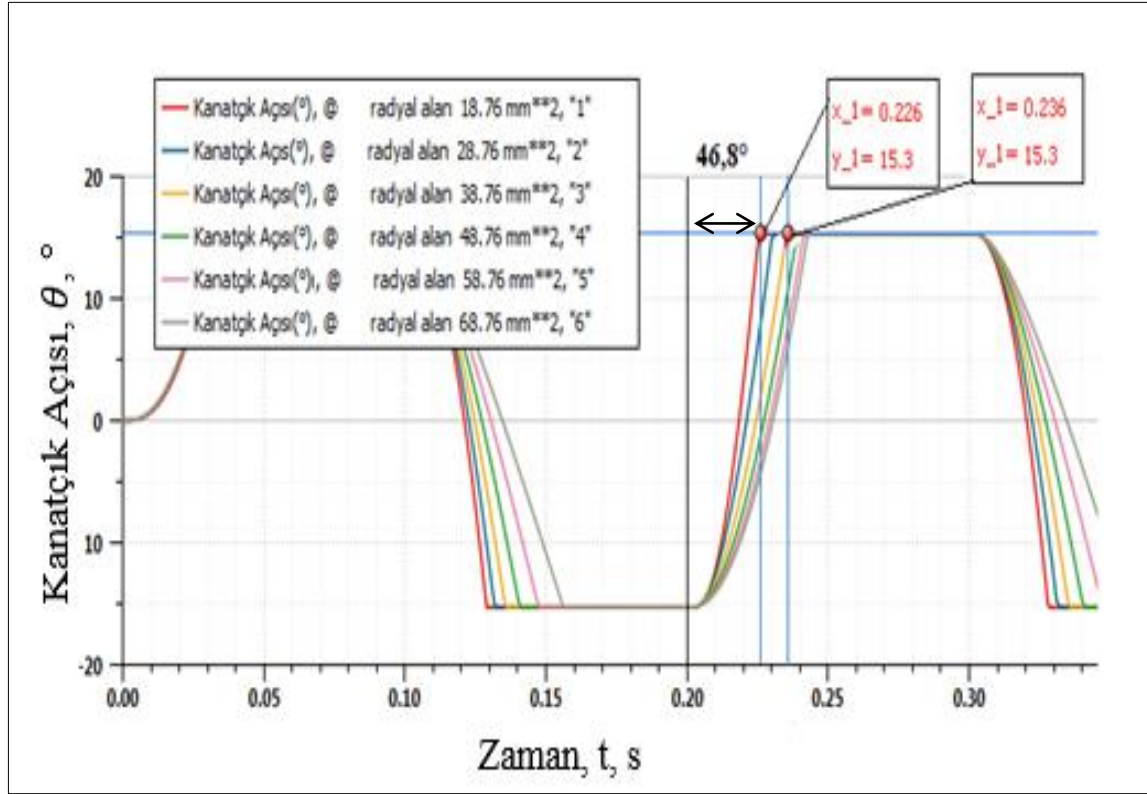
Matematiksel eşitliklerde önemli rol oynadığı ve basınç eşitliğinde sisteme kazanç olarak etki ettiği düşünülen burun hava kütleli debisi artırılarak frekans cevabı tekrar irdelenmiştir. Kütleli debinin artırılmasından sonra elde edilen yeni Bode eğrileri Şekil 4.28’ de verilmiştir.



Şekil 4.28. Debi artırıldıktan sonra açık çevrim frekans cevabı ve bode eğrileri

Şekil 4.28'e göre kütleli debi 0,0024 kg/s' den 0,056 kg/s' ye yükseltildiğinde 90° faz kayma frekansı 25 Hz' e yükselmiştir. Genliklerde beklenildiği gibi herhangi bir bozulma olmamıştır.

Eşitlik 26 ve 27 incelendiğinde radyal orifis alanının frekans cevabında etkili olacağı tahmin edilmiştir. Bu sebeple farklı değerlerdeki radyal orifis alanlarının (A_r) kanatçık açısı çıktısı (θ) üzerine etkisi Şekil 4.29' daki gibi simüle edilmiştir.



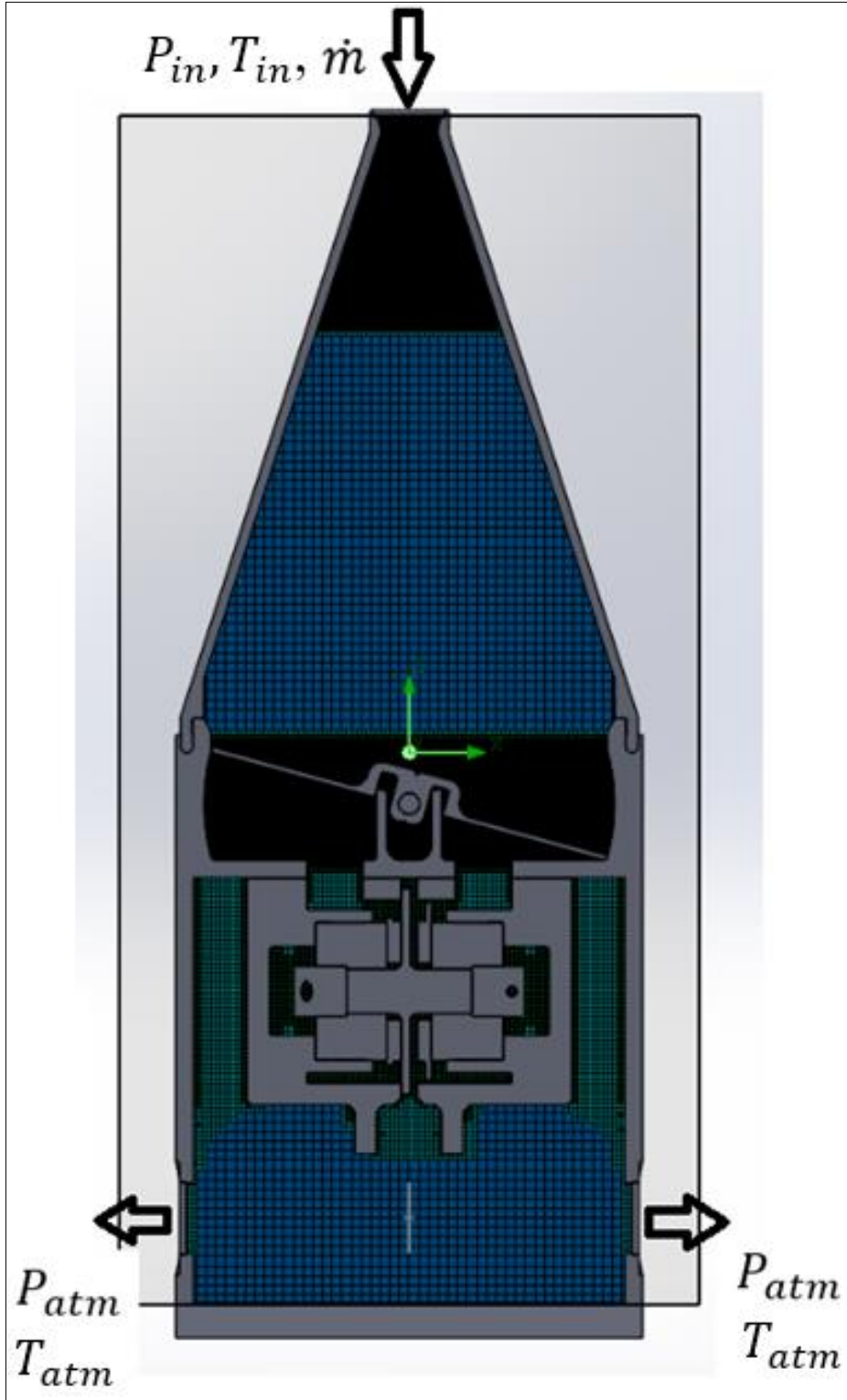
Şekil 4.29. Farklı radyal orifis alanlarına (A_r) bağlı olarak kanatçık açısı (θ) çıktıları

Şekil 4.29' a göre radyal orifis alanının küçülmesi kanatçık açısının hedefe yükselme zamanını kısaltmaktadır. Varsayılan alan değerinde ($38,76 \frac{mm^2}{0,1} mm$ boşluk) faz farkı $63,9^\circ$ iken, radyal alan $18,76 mm^2$ ($\sim 0,05 mm$ boşluk)' ye eşit olduğunda faz farkı $46,8^\circ$ ye düşmüştür. Radyal alanın düşürülmesi ile bant genişliğinin artırılacağı düşünülmektedir. Ancak mekanik toleransların daralması ($< 0,1 mm$) üç boyutlu yazıcı ile üretim gibi ucuz imalat yöntemlerinin devre dışı kalmasına sebep olabilecektir. Ayrıca dar toleranslar verilmesi kanatçığın burun gövdesine sürtme riskini artırmaktadır (salgı, boşluk vb. sebebiyle).



5. AKIŞ MODELLEMESİ VE HESAPLAMALI AKIŞKAN DİNAMİĞİ ANALİZLERİ

Bölüm 4’ te yapılan simülasyonlarla kıyaslamak ve sistemin kolay test edilebilmesi amacıyla kütleli debisi bilinen bir kaynak girdisi ile akışkan dinamiği analizleri (HAD) gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple 6 bar fabrika hava basıncı referans alınarak hava tabancasından çıkan debi HAD analizlerinde burun girdisi olarak kabul edilmiştir. Atölyelerde sıklıkla kullanılan hava tabancalarının 6 bar’ daki debileri 80-180 lt/dk arasında değişmektedir. Kullanılan tabancanın katalog değeri eldeki ürün için 120 lt/dk’ dır. Amesim ve test sonuçları ile kolayca kıyaslanabilmek için atmosfer basıncındaki hava yoğunluğu baz alınarak kütleli debi hesaplandığında 0,0024 kg/s elde edilir. Bu değer referans alınarak HAD analizlerine burun giriş kütleli debi girdisi tanımlanmıştır. FloEFD yazılımı ile oluşturulan çözüm ağ modeli ve sınır koşulları Şekil 5.1 ’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Çözüm ağı yapısı ve sınır koşullarının görünümü

Şekil 5.1’de de görüldüğü gibi iç akış modelinde burun kısmında kütleli debi girdisi sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Giriş kütleli debisinin değeri 0,0024 kg/s, sıcaklığı 293 K ve basıncı 1,013 bar’ dır. Füze çıkış delikleri ise atmosfere (1,013 bar, 293 K) açılan basınç çıkış sınır koşulu olarak belirlenmiştir.

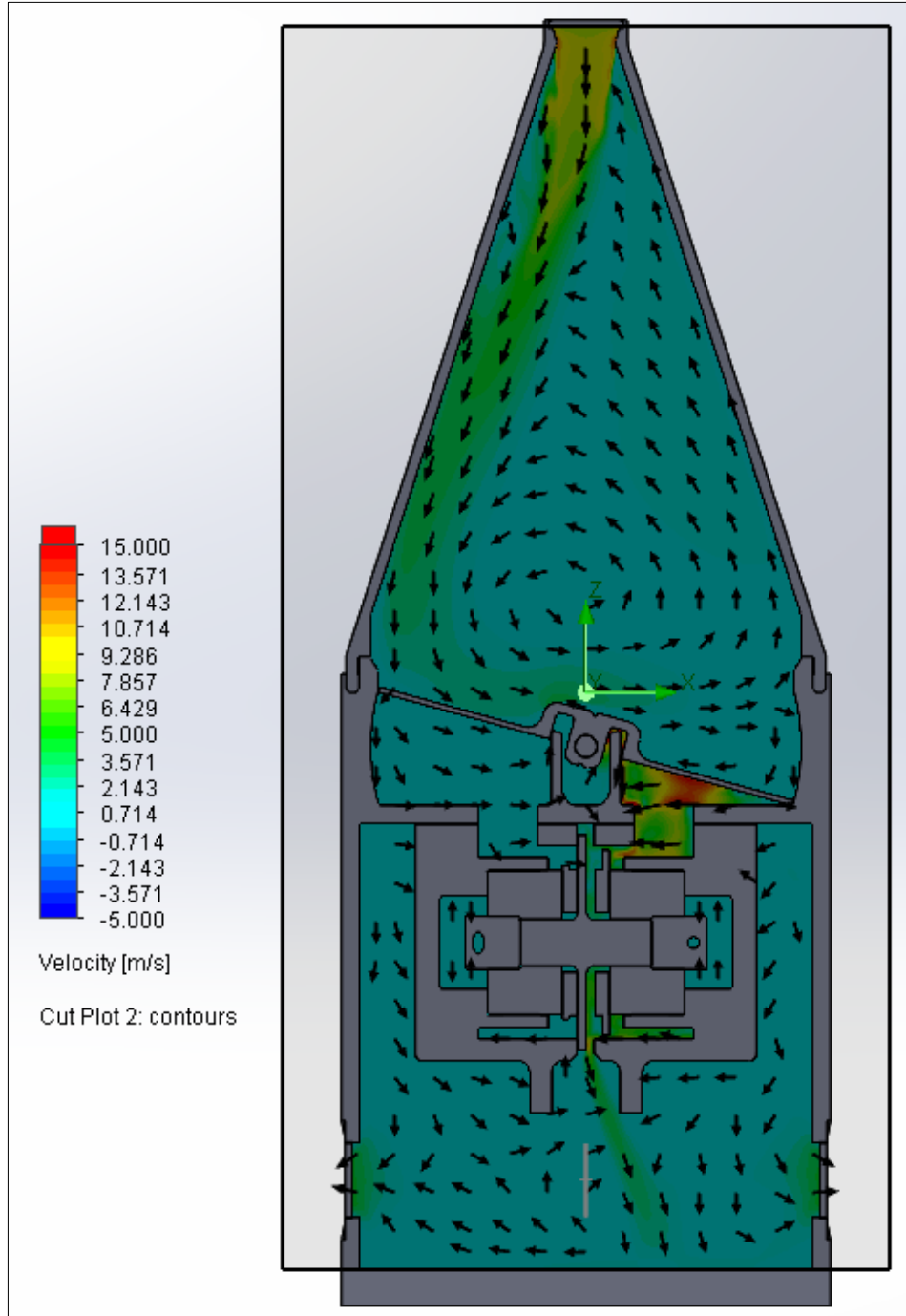
Çözüm ağı yapısında giriş kısmında ve kanatçık etrafında ağı yapısı iyileştirilmiştir. Ayrıca küçük kanal yapılarındaki çözüm ağı sayısı artırılmıştır.

Çözüm ağı sayısı ve bu sayıya bağlı olarak kanatçık ve kapakçık kuvvetleri Çizelge 5.1’ de verilmiştir. Çözüm ağı bağımsızlığı HAD yazılımı (FloEFD) kapasitesi ve bilgisayar işlem süresi ile sınırlanmıştır.

Çizelge 5.1. Çözüm ağı sayısı ve kuvvet değerleri

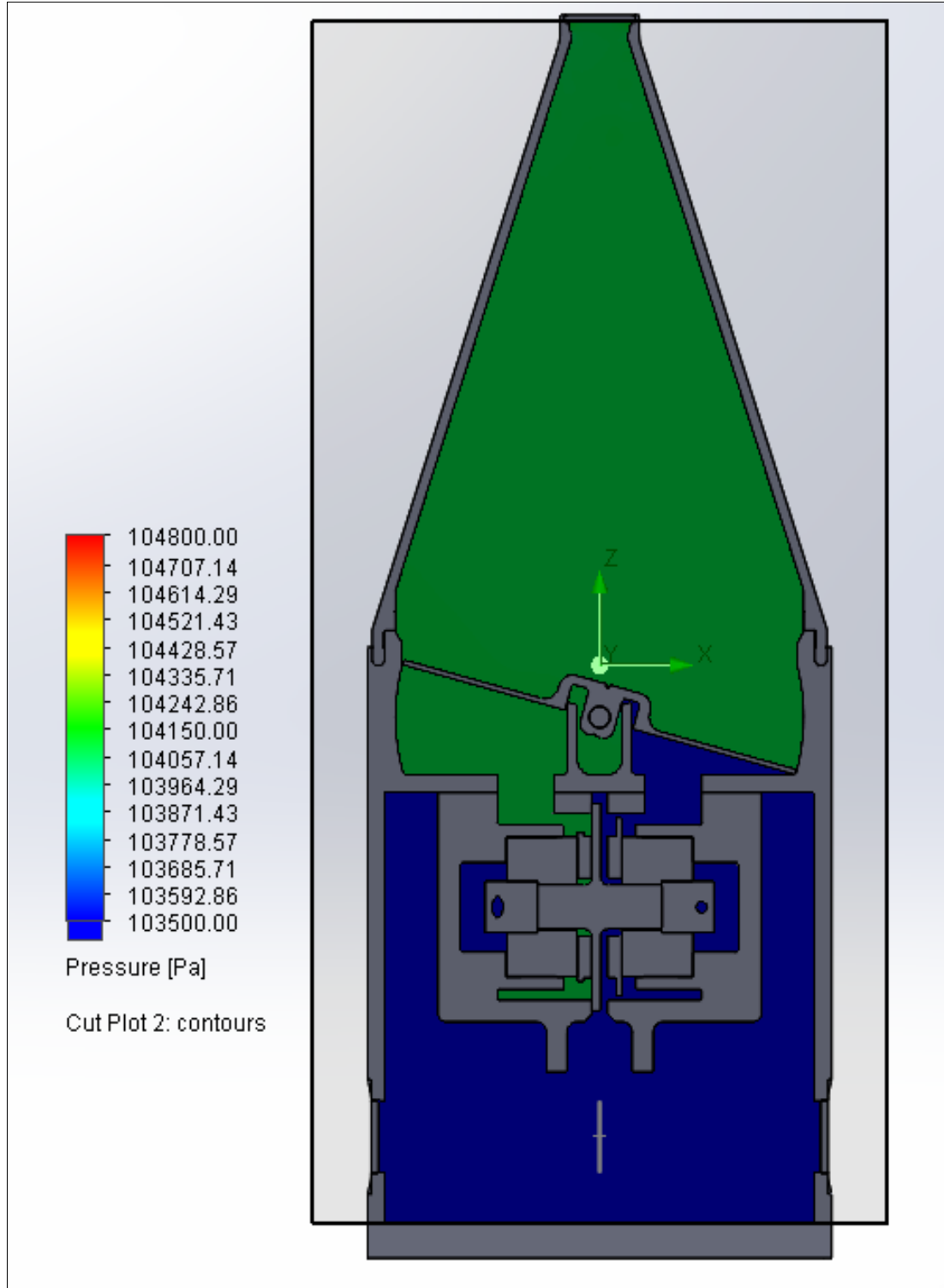
	Çözüm Ağı Sayısı	Sol Kanatçık Kuvveti (N)	Sağ Kanatçık Kuvveti (N)	Sol Kapakçık Kuvveti (N)	Sağ Kapakçık Kuvveti (N)
1	126.179	2,46	-0,09	4,44	0,51
2	1.301.634	6,35	-0,09	11,44	0,61
3	9.289.779	5,28	-0,09	9,51	0,62
4	10.029.977	5,27	-0,09	9,5	0,62
5	10.515.594	5,26	-0,10	9,47	0,59

Şekil 5.2’ de havanın iç akış hız dağılımı verilmiştir.

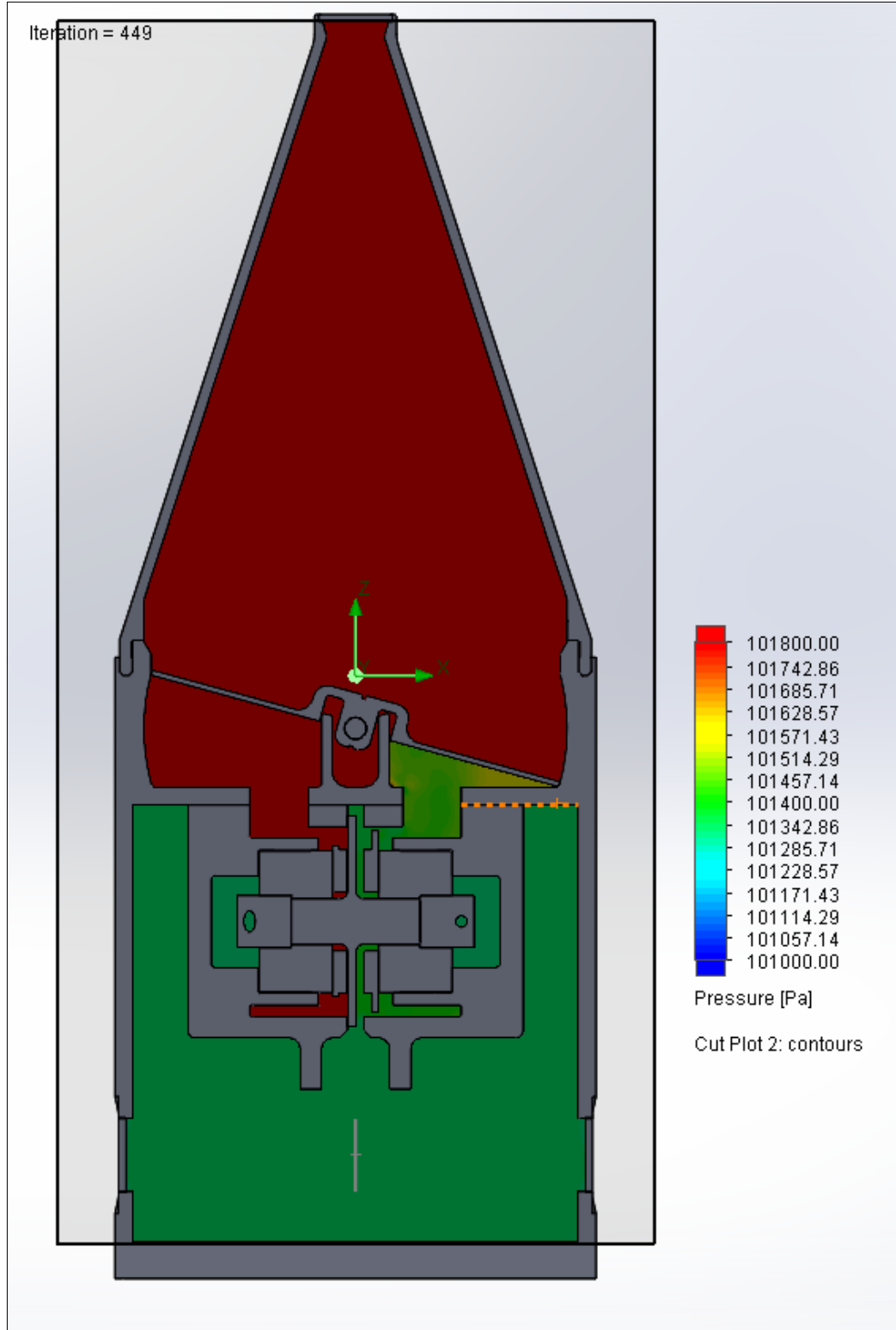


Şekil 5.2. Burun içi havanın hız dağılımı

Şekil 5.2 incelendiğinde hızların düşük olduğu gözlenmiştir. Statik basınç dağılımları hem düşük hem de yüksek oda açısından değerlendirildiğinde Şekil 5.3 ve Şekil 5.4 elde edilir.



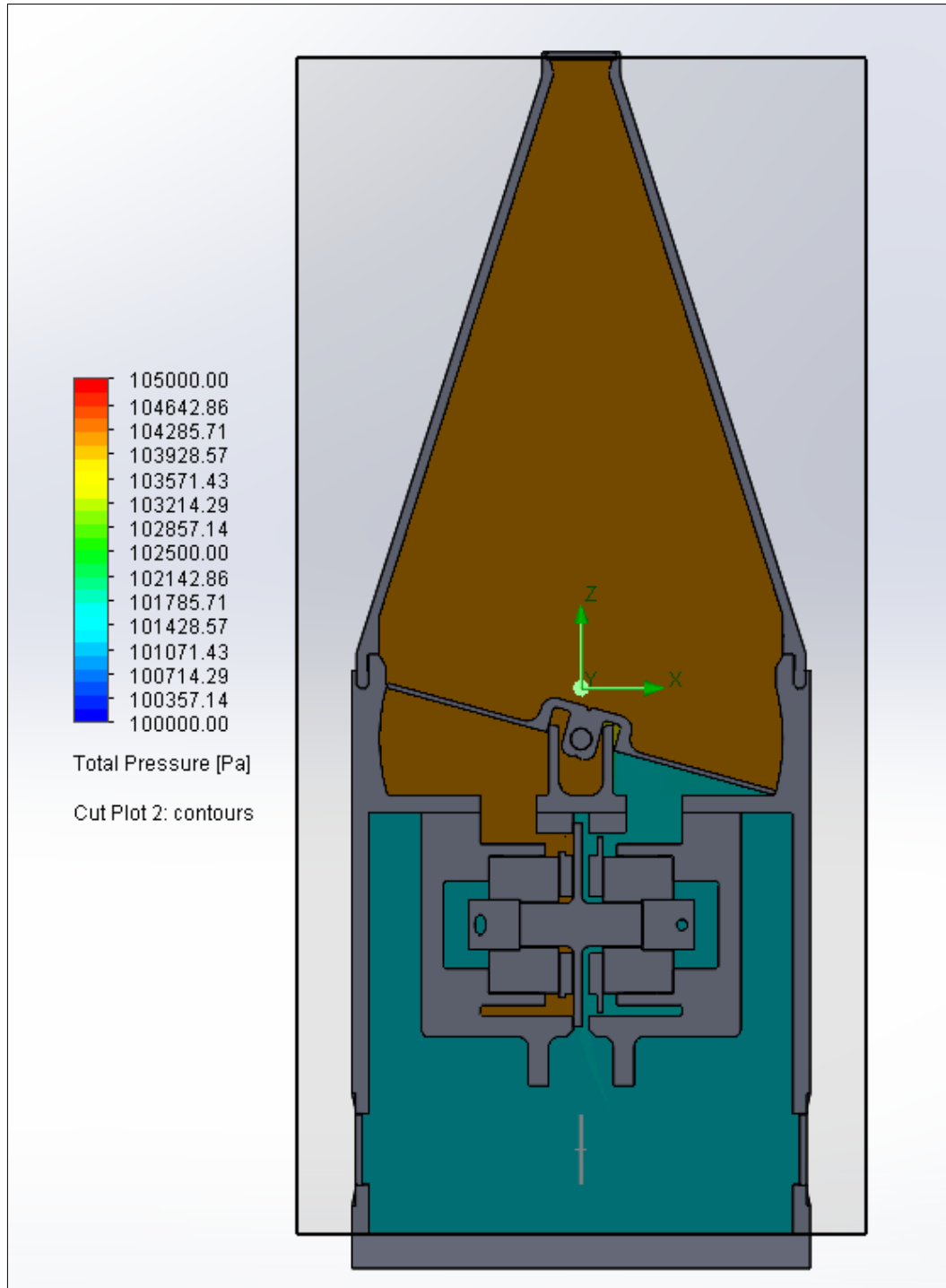
Şekil 5.3. Yüksek basınç odasına ait statik basınç dağılımı



Şekil 5.4. Düşük basınç odasına ait statik basınç dağılımı

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4' e göre yüksek basınç ve düşük basınç odalarına ait yaklaşık statik basınçlar sırasıyla 1,041 bar ve 1,014 bar' dır.

Toplam basınç dağılımı Şekil 5.5' te verilmiştir.



Şekil 5.5. Toplam basınç dağılımı

Şekil 5.5' e göre kütleli debi giriş ağız kısmındaki toplam basınç ($P_{o,in}$) değeri 1,044 bar, basınç çıkış kısmında ise 1,013 bar olarak ölçülmüştür. Şekil 5.3' te giriş kısmına ait basınç (P_{in}) değeri 1,013 bar tanımlanmıştır. Giriş ağız kısmındaki toplam basınç ve statik basınç

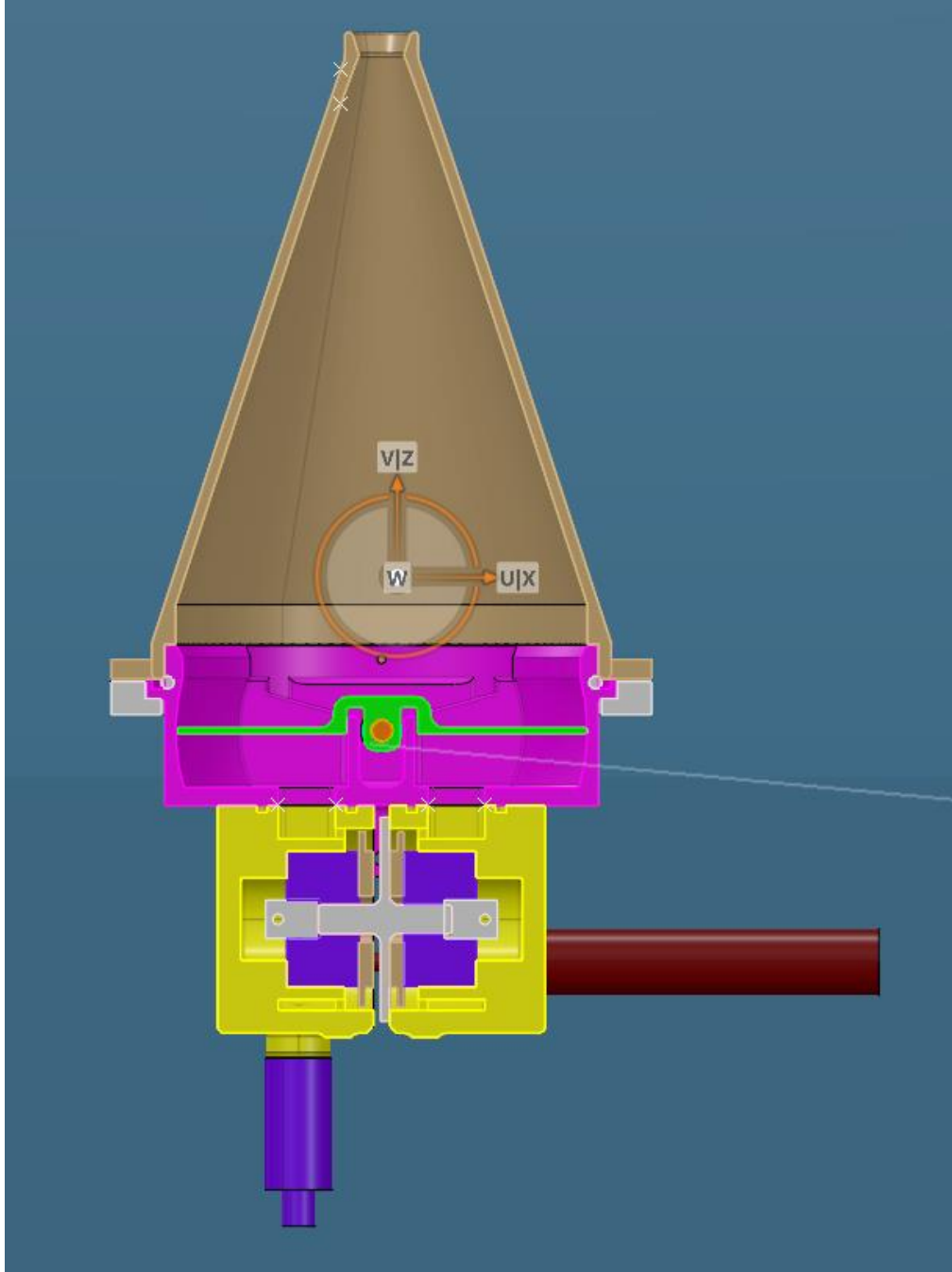
değerlerine göre akışkanın izentropik ve ideal olduğu varsayılarak eşlenik giriş Mach sayısı hesaplanırsa;

$$\frac{P_{in}}{P_{o,in}} = \frac{1,013}{1,044} = 0,970 \quad (5.1)$$

Eşitlik 5.1' deki basınç oranına göre eşlenik Mach sayısı 0,21 olarak hesaplanır. Bu durum mühimmatın 0,21 Mach ile uçmasına eş basınç koşulları sağlar (Aksel ve Eralp, 1994: Appendix C).

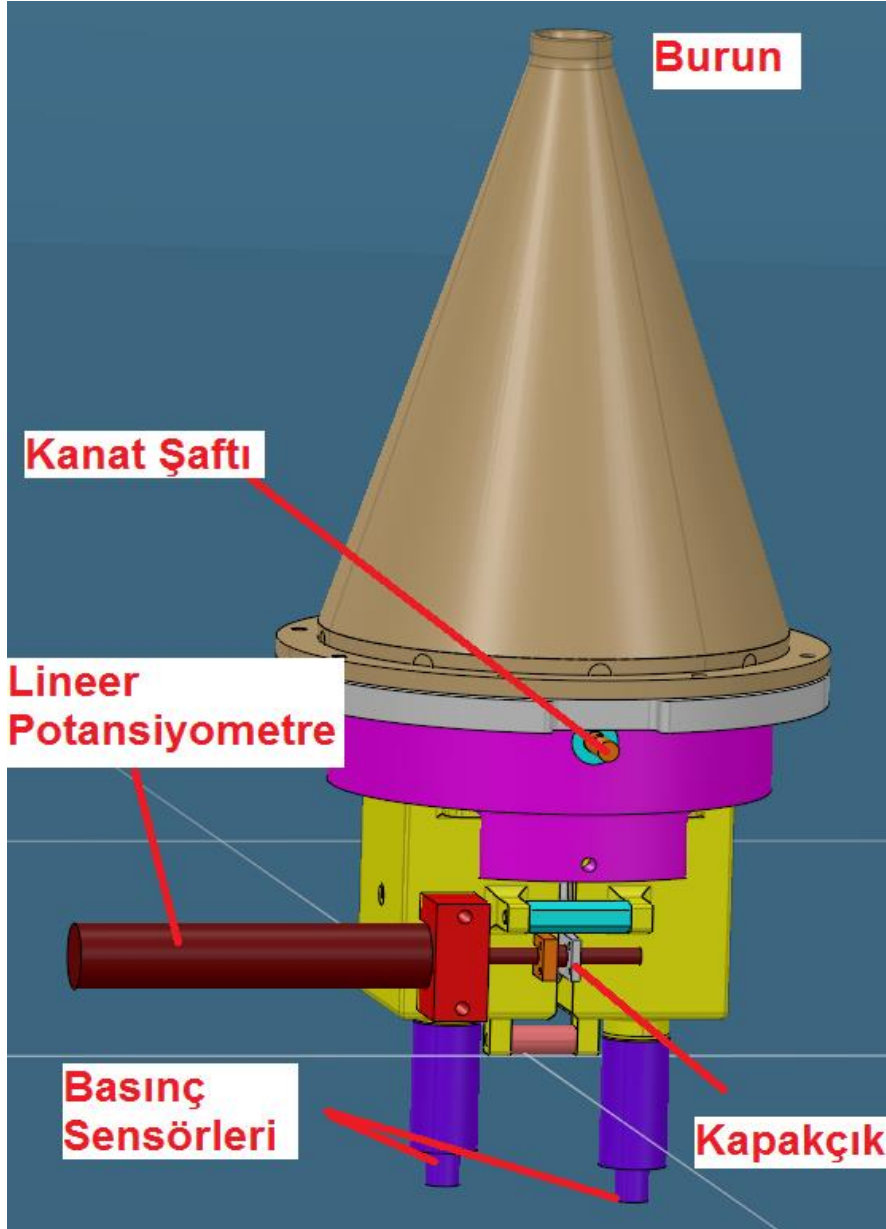
6. ÜRETİM VE TESTLER

Hava alıklı kontrol tahrik sisteminin ön modelleme ve HAD analizleri yapılmıştır. Tasarlanan sistem Şekil 6.1’ deki gibi montaj ve üretim kolaylığı açısından optimize edilmiştir.



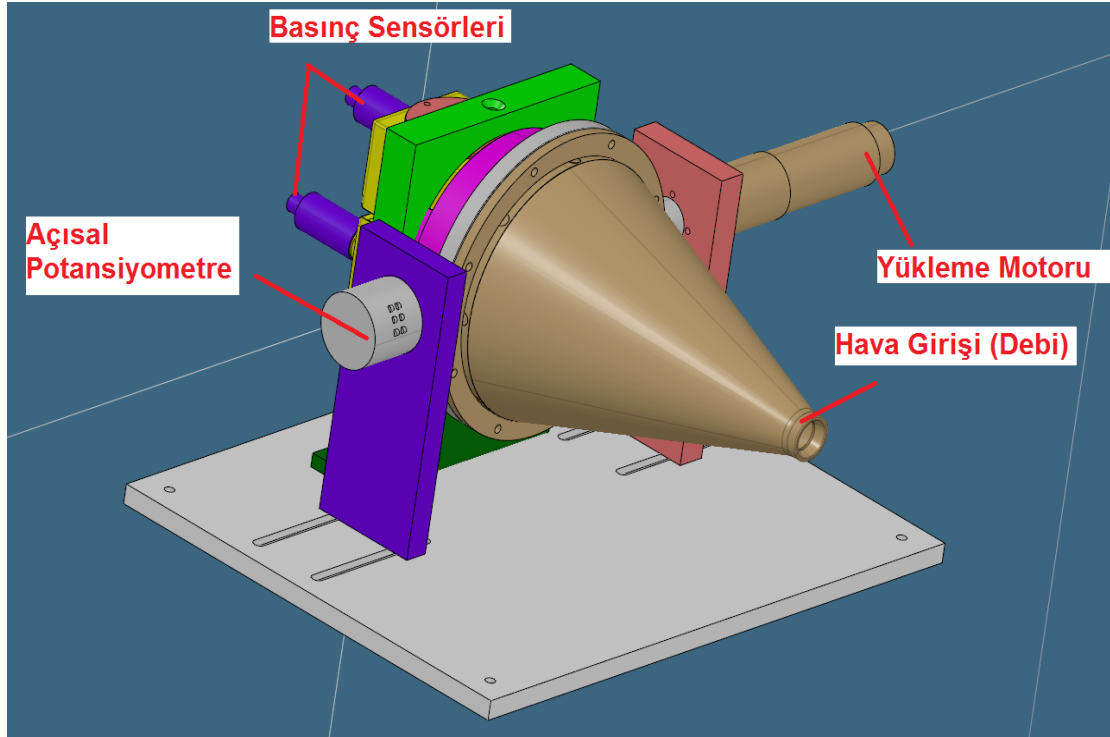
Şekil 6.1. Tasarımı optimize edilmiş katı model

Tasarıma odacıkların basıncını ölçmek için basınç sensörleri, kapaçık deplasmanını ölçmek için lineer potansiyometre eklenmiştir. Şekil 6.2’ de eklenen donanımlar gösterilmiştir.



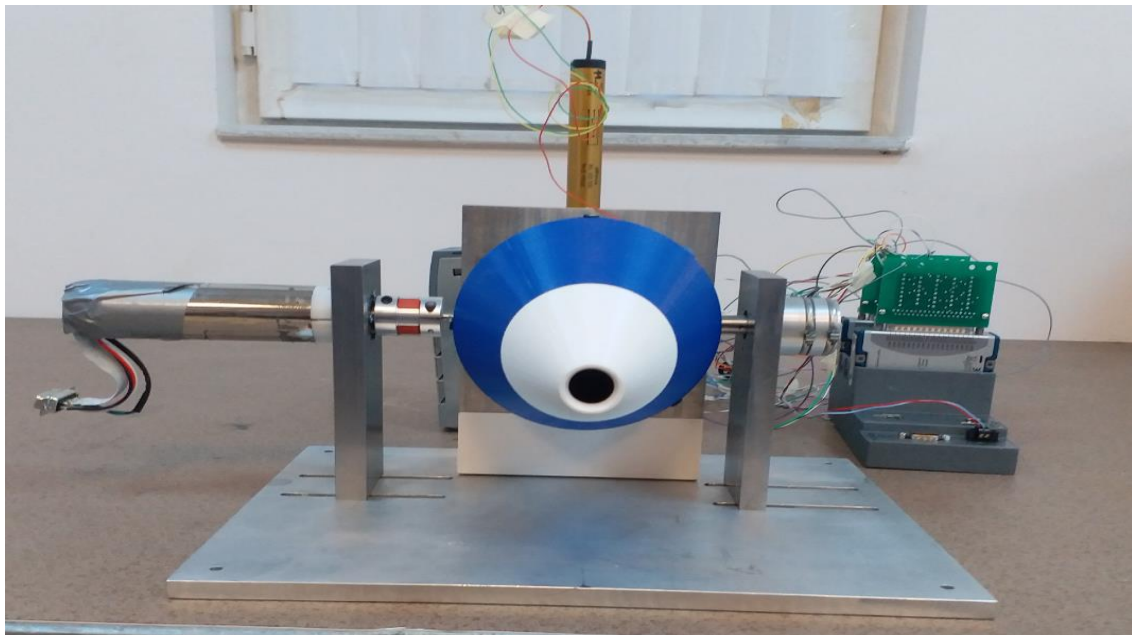
Şekil 6.2. Eklenen sensörlerle beraber mekanik yerleşim

Tasarlanan sistemi test etmek için Şekil 6.3’ teki gibi bir test düzeneği tasarlanmıştır. Bu test düzeneği sayesinde kütleli debisi bilinen bir hava akışı sistemin burnundan verilerek oda basınçları, kanat açısı ve kanat torku tespit edilebilecektir. Kanat açısını ölçmek için bir açısal potansiyometre, kapakçık deplasmanını ölçmek için lineer potansiyometre, oda basınçlarını ölçmek için basınç sensörleri ve kanada yük vermek için servo motor kullanılmıştır.



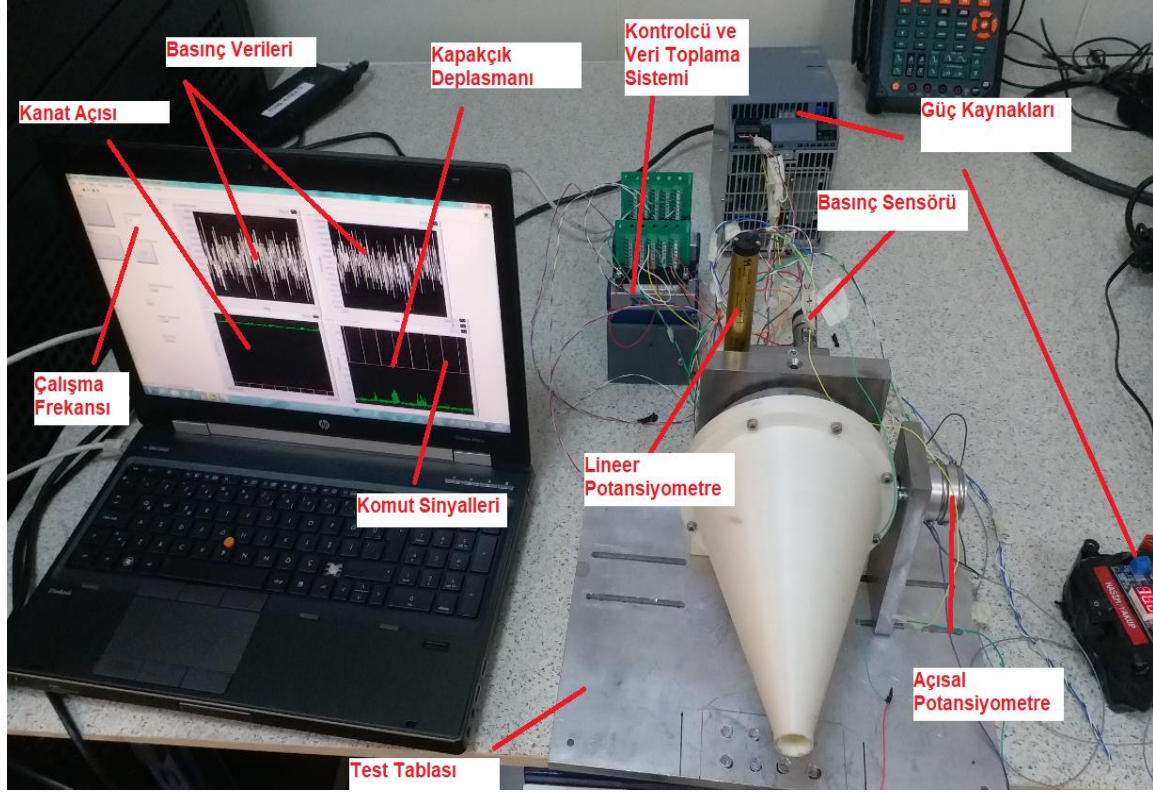
Şekil 6.3. Hava alıklı KTS test düzeneği

Şekil 6.3’ de katı modellemesi ve tasarımı tamamlanan test düzeneği ürettirilmiştir. Üretim esnasında kanatçık parçası hafif olması maksadıyla üç boyutlu yazıcıdan çıkarttırılmıştır. Burun gövdesi ve diğer basit parçaların ucuz maliyetli olması için yine üç boyutlu yazıcıdan yararlanılmıştır. Üretilen hava alıklı KTS ve test düzeneği Şekil 6.4 ‘de gösterilmiştir.



Şekil 6.4. Hava alıklı KTS ve test düzeneği

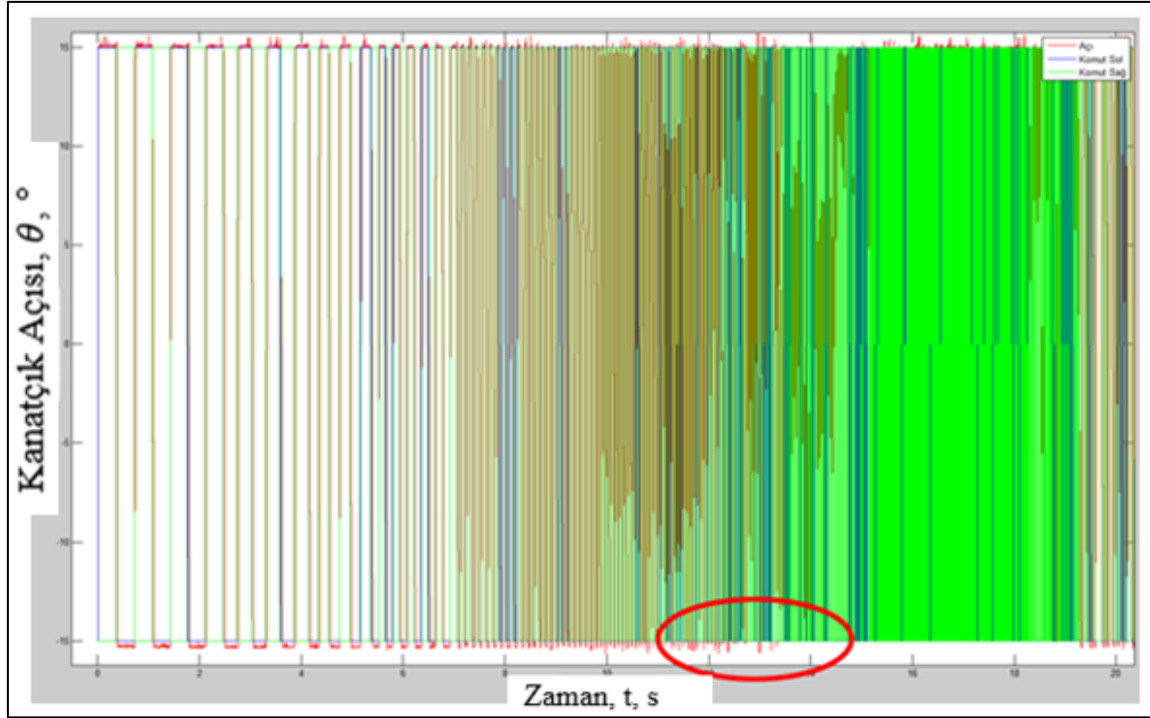
Şekil 6.4’ de üretilen test düzeneğini kontrol etmek ve KTS üzerinden istenen verileri toplamak için Labview yazılımında ara yüz tasarlanmıştır. Tasarlanan ara yüz ve test görüntüsü Şekil 6.5’ de verilmiştir.



Şekil 6.5. Test esnasında Labview kontrolcü ve veri toplama arayüzü

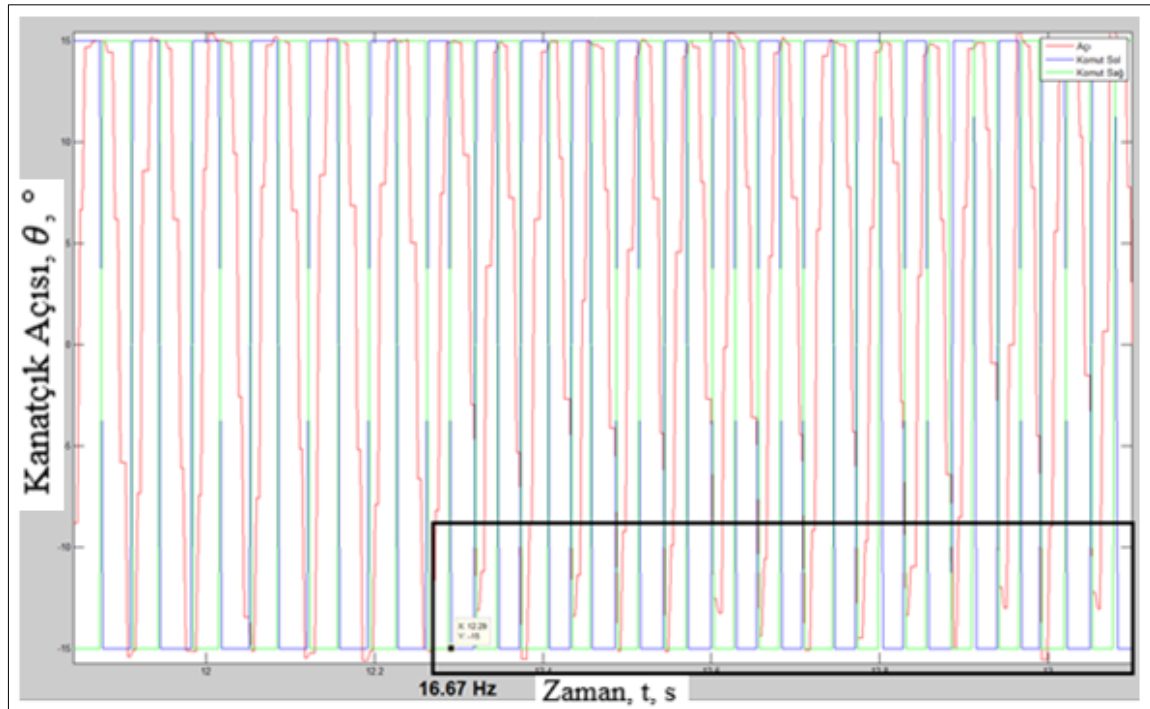
Test düzeneğine debisi sabit bir hava girişi sağlamak için testlerde fabrika hava tabancası kullanılmıştır. Hava tabancası katalog değerlerine bakıldığında hava tabancasının 6 bar basınçta 120 lt/dk hacimsel debi verdiği görülmektedir. Amesim modellemesinde kütleli debi girdisi daha kullanışlı olduğu için tabanca hava debisi 0,0024 kg/s kütleli debi girdisine dönüştürülmüştür.

Testlerde Şekil 6.5’ deki Labview yazılım ve National Instruments veri toplama-kontrolcü donanımları sayesinde belirli frekanslarda sistemin dinamik performansı incelenmiştir. Dinamik performans testinde 1 Hz’ den başlanarak 35 Hz’e kare dalga komutları verilmiştir. Mevcut test düzeneği ile 500 Hz çözünürlükte veri toplanmıştır. Testlerde Labview yazılımı üzerinden toplanan veriler MATLAB ortamında grafiğe dönüştürülmüştür. Kanat açısı-komut grafiği Şekil 6.6’ da verilmiştir.



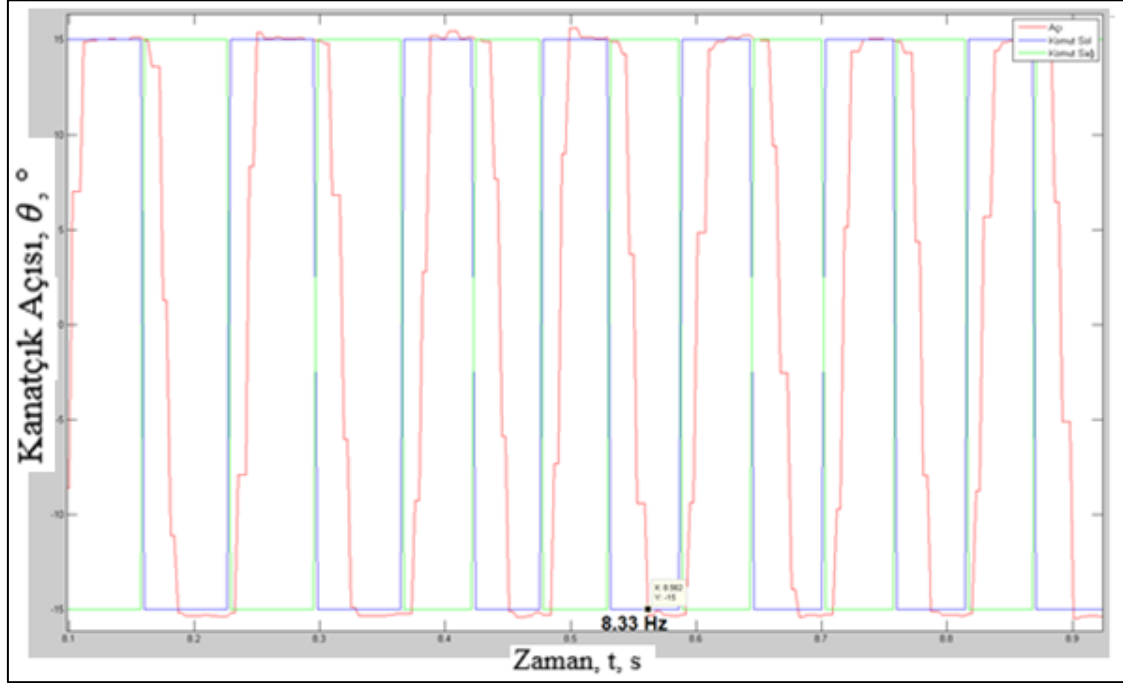
Şekil 6.6. Performans testi sonucu elde edilen açı ve komut grafiği

Veriler daha yakından incelendiğinde Şekil 6.7’ deki gibi kanat açısının komut sinyalini 16,67 Hz’ den sonra takip edemediği görülmüştür.



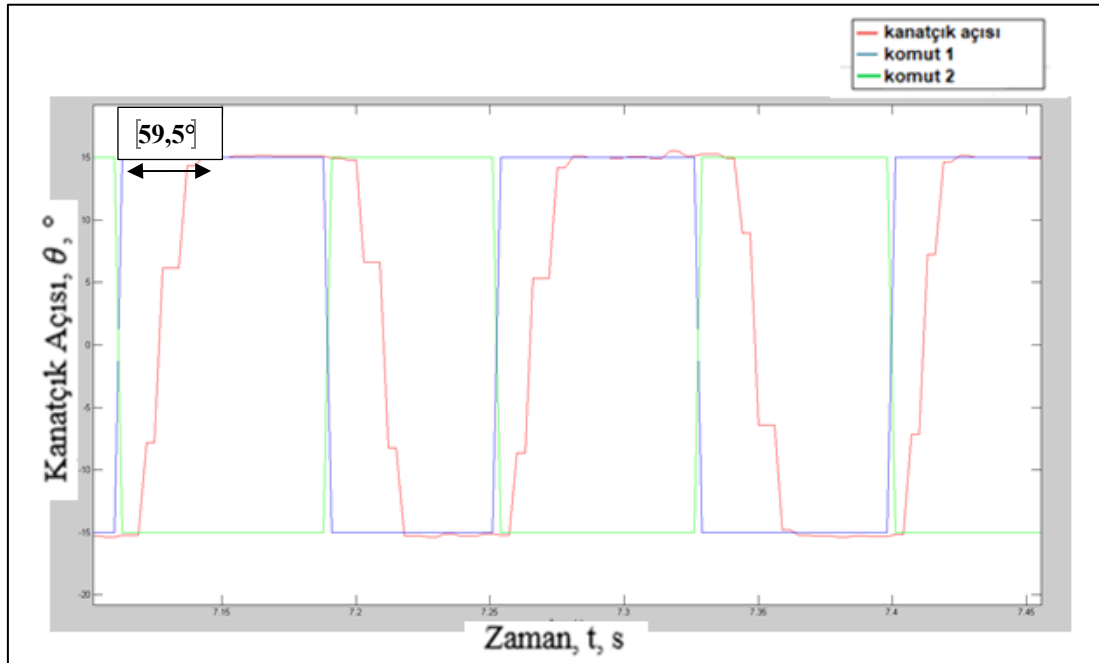
Şekil 6.7. Kanat açısının komutu takip etmeyi bıraktığı bölge

Komut takibinin kesilmesi ve genlik kaybı 16,67 Hz’lerde başlarken Şekil 6.8’ de görüldüğü gibi 90° faz kayması 8,33 Hz’ de başlamıştır.



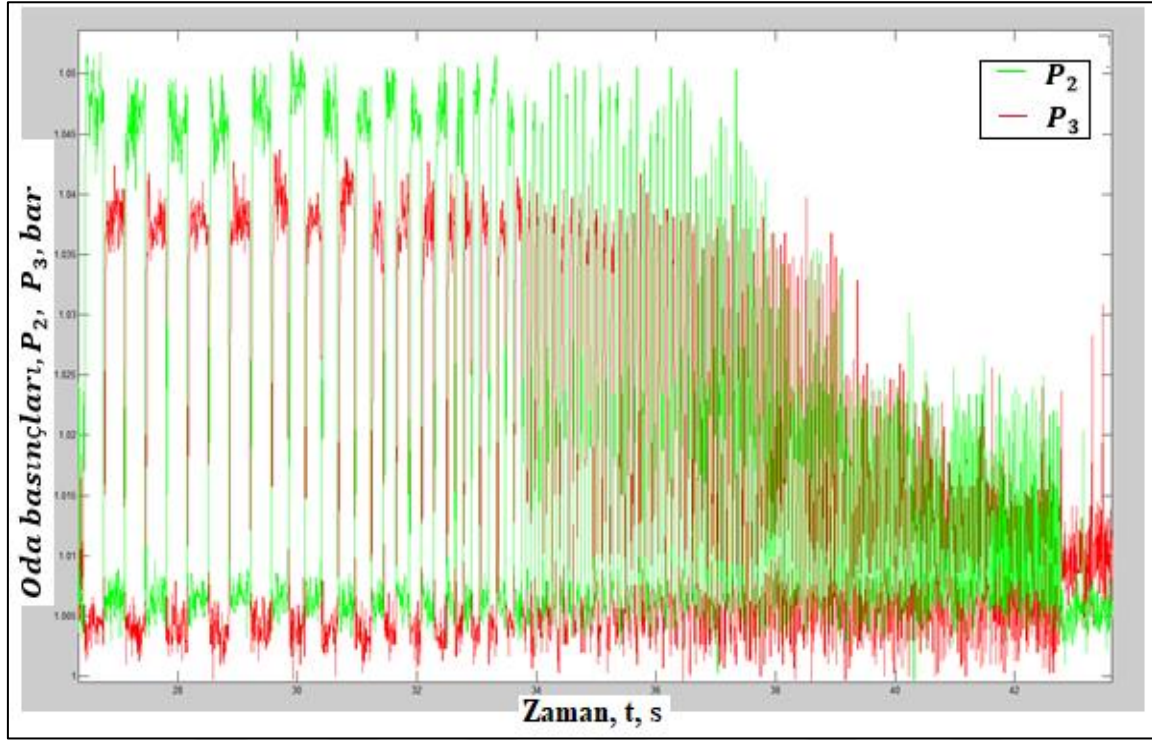
Şekil 6.8. Kanat açısının 90°’ lik faz kaymasını yaşadığı bölge

5 Hz hedef frekans cevabı incelendiğinde, testlerde kanatçık açısının komutu yaklaşık 59,5° faz farkı ile takip ettiği görülmüştür. Bu durum Şekil 6.9’ da gösterilmiştir.



Şekil 6.9. Kanatçık açısının 5 Hz hedef frekansındaki cevabı

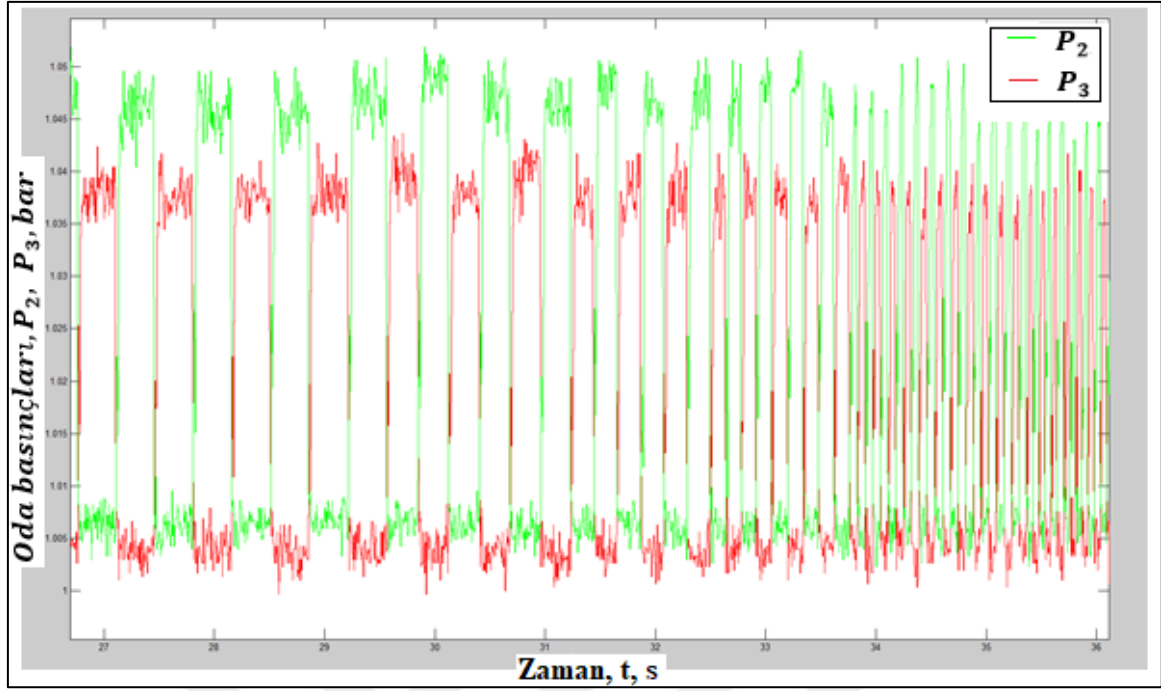
Performans testleri esnasında basınç sensörleri sayesinde oda basınçları elde edilmiştir. Bu veriler Şekil 6.10’ da gösterilmiştir.



Şekil 6.10. Performans testleri boyunca oda basınç değerleri

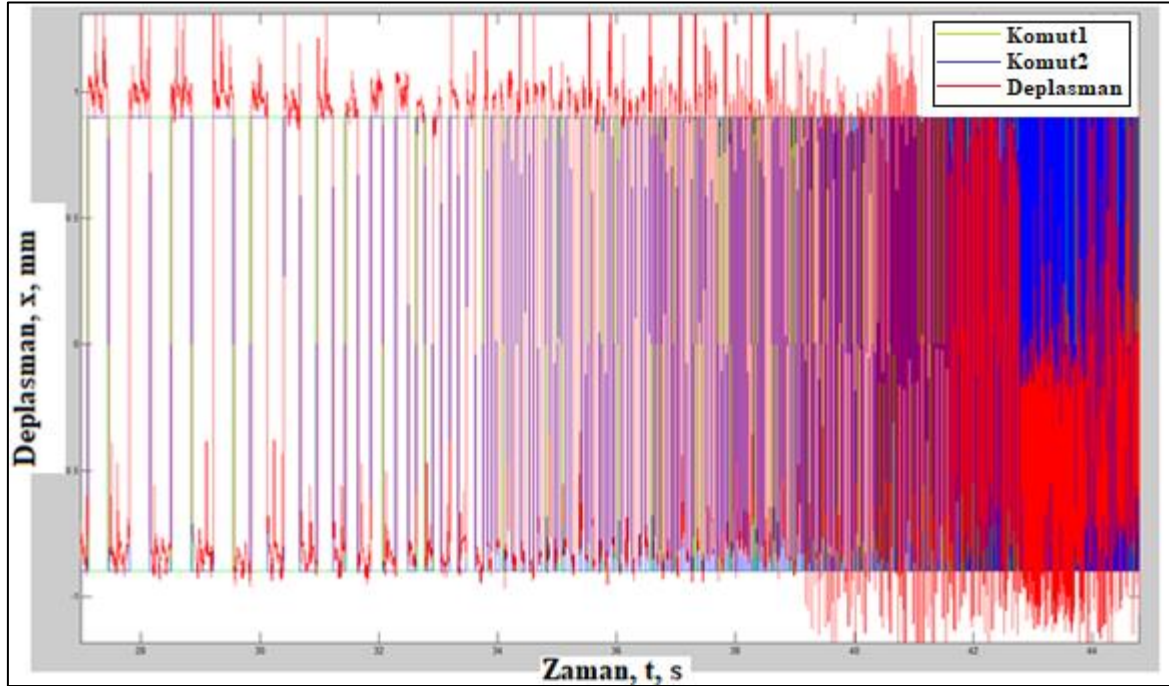
Şekil 6.10 incelendiğinde basınç değerlerinin 39. saniye bölgesindeki 12,5 Hz’lerden itibaren artan hızla düştüğü gözlenmiştir. 12,5 Hz’lerden itibaren gözlenen bu durum solenoidin 12,5 Hz’lerden itibaren istenilen komuta gidemediği için odalarda basınç kaybı yaşandığına veya havanın basınçlanabilmek için yeterince zaman bulamadığına bağlanmaktadır.

Ayrıca sağ odacık basınçlarının (P_2) sol odacık basınçlarına (P_3) göre bir miktar daha düşük kaldığı görülmektedir. Bu durum sol kanat ve sağ kanat bölgesinin üretim tolerans ve hatalarından kaynaklı orifis alanlarının değişmesine bağlanmaktadır. Düşük frekans bölgesinde basınçların yakından görünümü Şekil 6.11’de verilmiştir.



Şekil 6.11. Düşük frekans bölgesindeki oda basınç değerleri

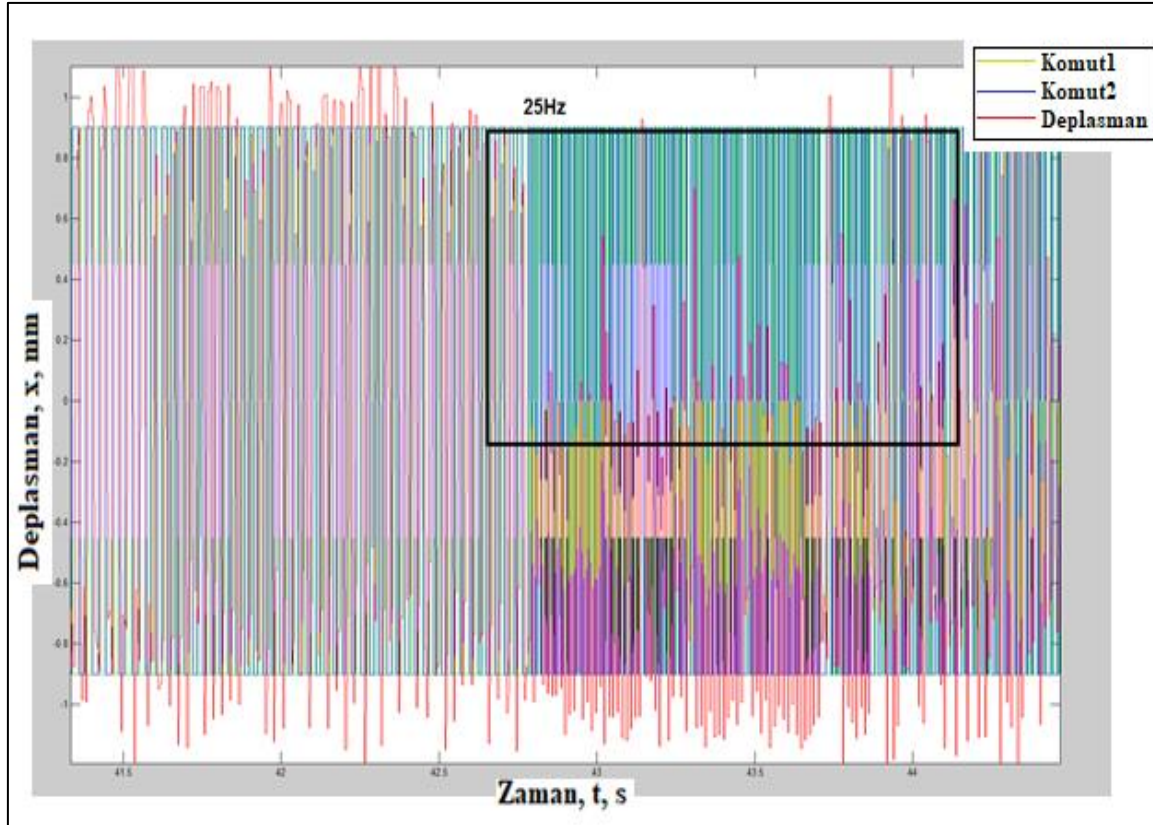
Dinamik testlerde ayrıca solenoidin bağlı olduğu kapakçık deplasmanı lineer potansiyometre ölçülmüştür. Ölçülen bu deplasman verisi ve ölçeklendirilmiş komut verisi Şekil 6.12’ de gösterilmiştir.



Şekil 6.12. Testler esnasında kapakçık komut ve deplasman verileri

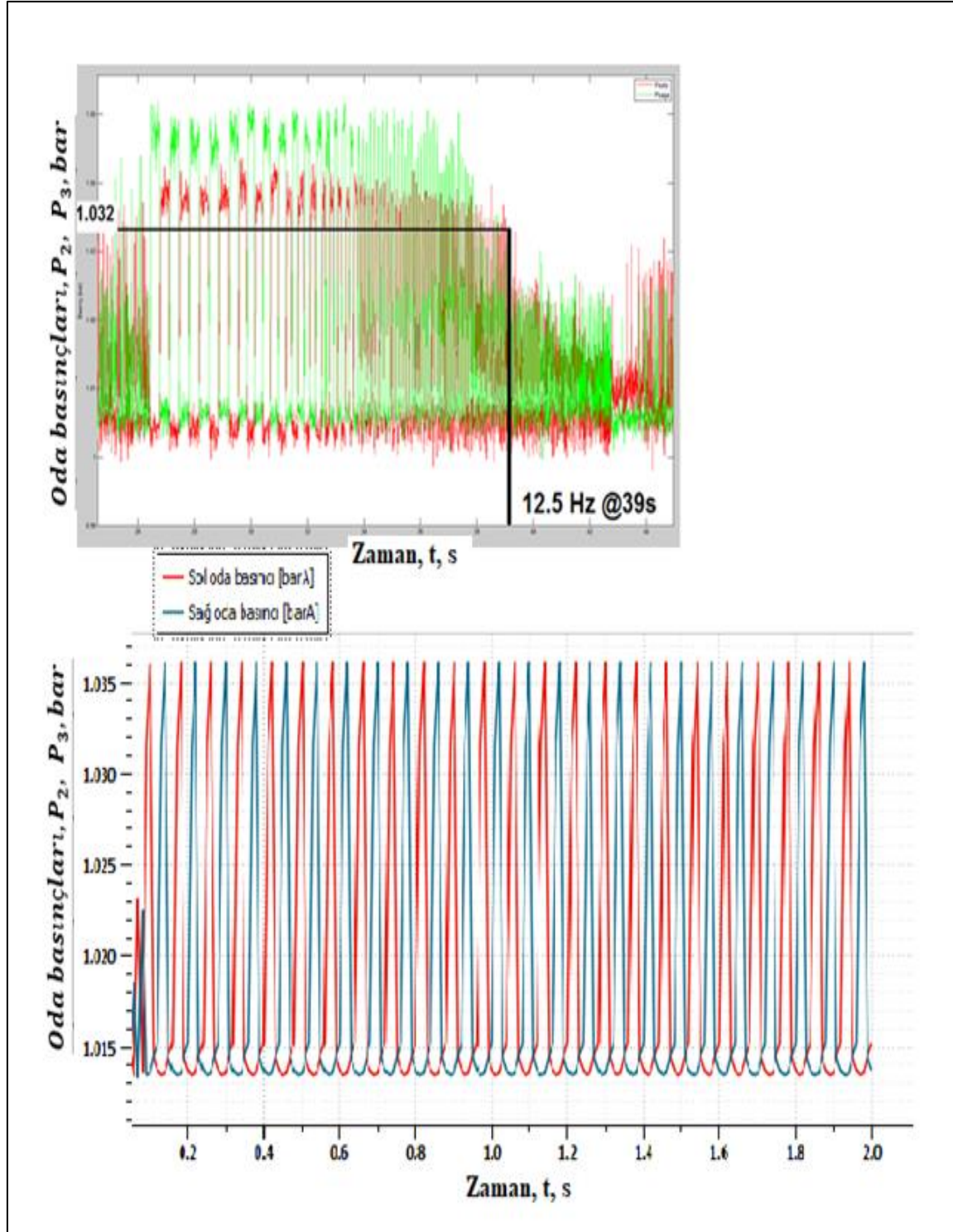
Şekil 6.12’ de gösterilen verilerde lineer potansiyometre deplasman verisinde gözlenen salınımlı aşımalar, solenoidin plastik malzemeden üretilmiş kapakçık parçasını esnetmesi sonucunda oluşmuştur.

Solenoid deplasmanı Şekil 6.13’ deki gibi yakından incelendiğinde özellikle 25 Hz bölgesinden itibaren solenoidin kapakçığı tam kapatamadığı görülmektedir.

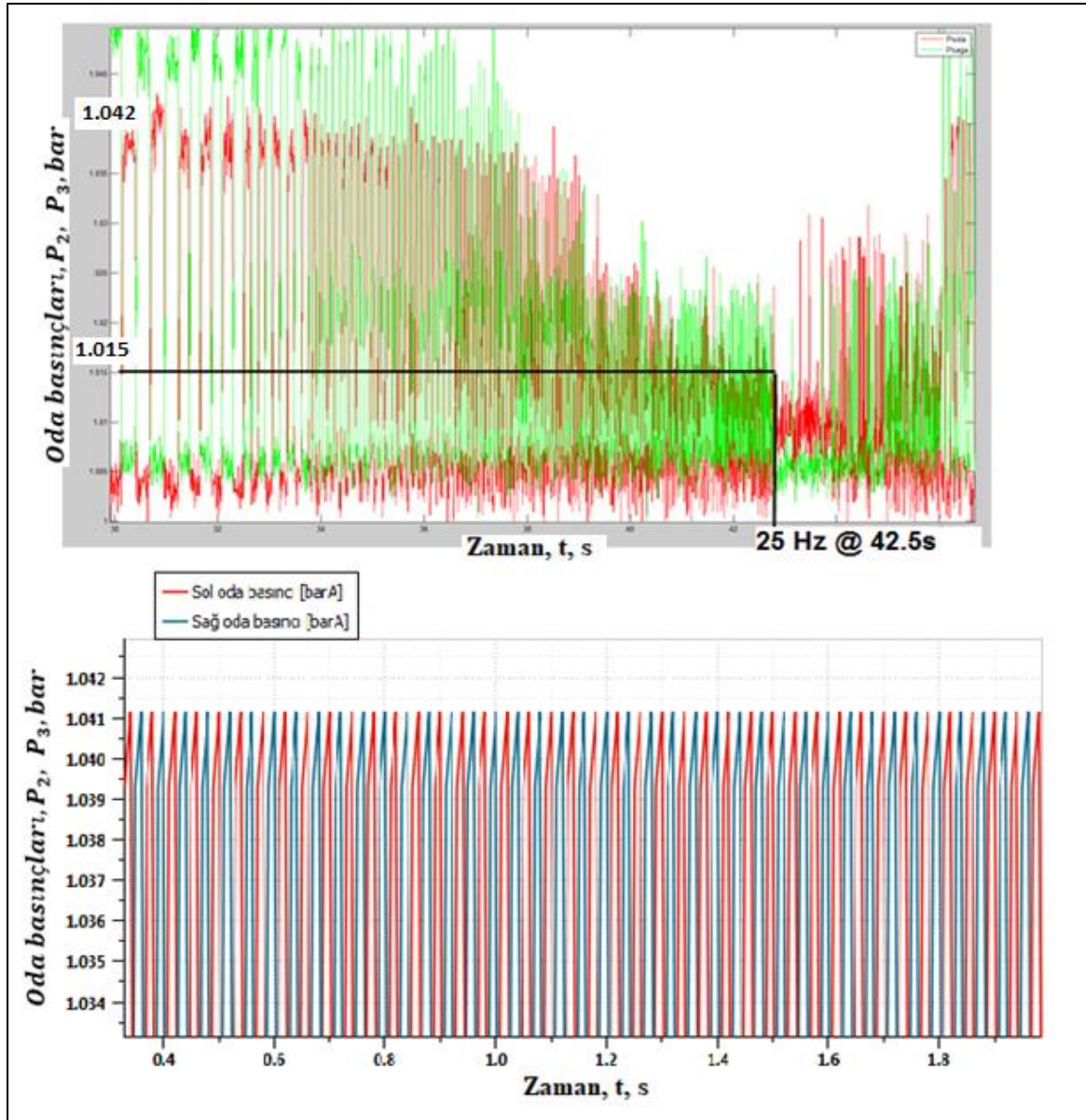


Şekil 6.13. Kapakçık deplasmanının azaldığı bölge

Şekil 6.10 ve 6.13 karşılaştırıldığında Şekil 6.10’ da 12,5 Hz’ lerden başlayan düşüşün sadece solenoid dinamiğine bağlı olmadığı anlaşılmıştır. Çünkü solenoid Şekil 6.13’ ye göre 25 Hz’den sonra kapakçığı kapatamamaya başlamıştır. Bu durumu simülasyonla doğrulamak için Amesim modelinde solenoidin 500 Hz’ de çalışabildiği girilerek KTS sistemi 12,5 Hz ve 25 Hz’ de çalıştırılmıştır.



Şekil 6.14. Amesim ve test basınç verilerinin 12,5 Hz’ deki kıyası



Şekil 6.15. Amesim ve test basınç verilerinin 25 Hz’ deki kıyası

Şekil 6.14 ve Şekil 6.15 incelendiğinde 12,5 Hz frekans bölgesinde hava dinamiği sebebiyle basınç değeri Amesim modelinde de 1,045 bar’dan 1,035 bar’ a düşmektedir. Şekil 6.15 incelendiğinde ise basıncın Amesim tarafında 1,041 bar basınç olduğu ancak test verisine göre 1,015 bar’ a düştüğü gözlenmektedir. Bu durumda solenoidin 25 Hz’ de cevap veremediği tekrar görülmüştür. Ayrıca hava alıklı KTS modelinde 12,5 Hz’ de basınç 1,035 bar’ a düşerken 25 Hz’ de 1,041 bar’ a çıkması sistemin lineer olmayan davranışa sahip olduğunu göstermektedir.

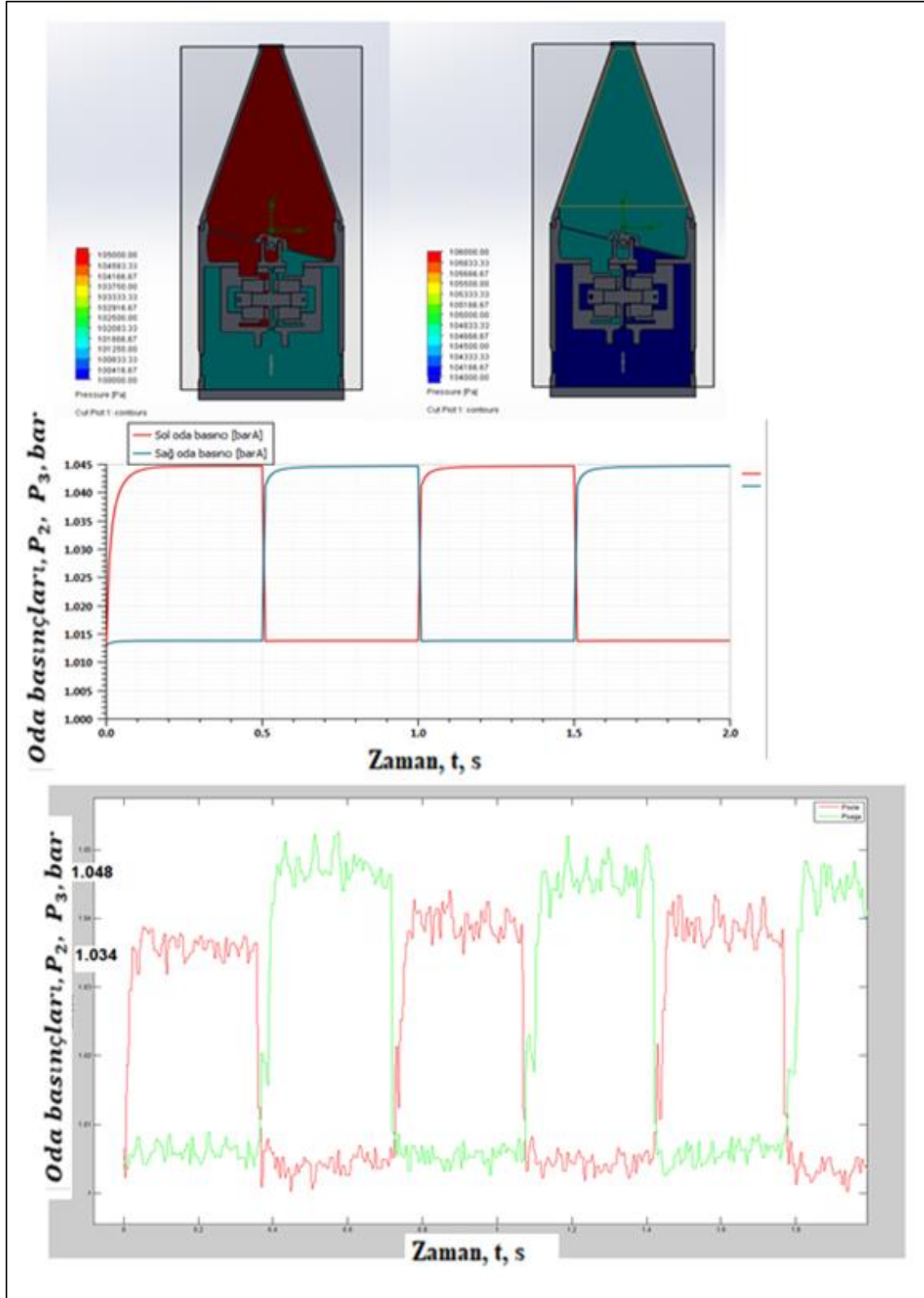
Basınç odaları arasında basınç farkı sayesinde oluşan tork miktarı mevcut yükleme motoru için çok düşük kaldığı için yükleme torku kanat şaftına verilememiştir.



7. SİMÜLASYON, AKIŞKAN ANALİZİ VE TEST SONUÇLARININ KİYASI

Amesim modellemesi, Simulink modellemesi ile kıyaslanarak kısmen doğrulanmıştır. Ancak Amesim modelinin daha iyi irdelenmesi ve sonuçların kıyaslanabilmesi için HAD analizleri ve testler yapılmıştır. HAD analizlerinde KTS prototipinin test edilebilmesi için burun giriş debisi fabrikasına eşit seçilerek HAD analizleri elde edilmiştir. Bu sayede Amesim modeli bu debi ile simüle edilerek hem HAD analizleri hem de test verileri ile kıyaslanabilmiştir.

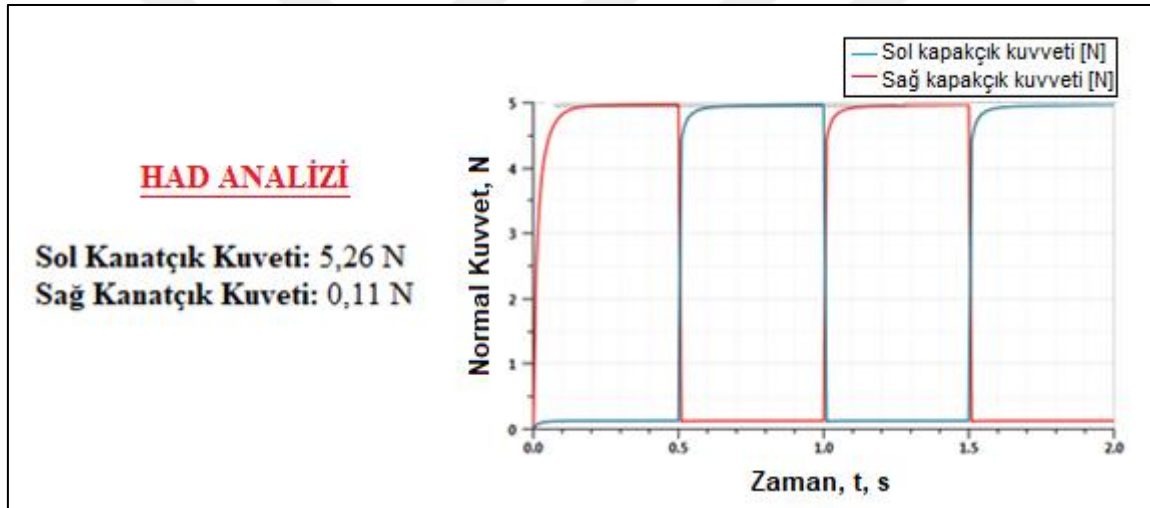
İlk olarak 1 Hz girdi komutunda Amesim sonuçları HAD analizleri ve test sonuçları ile kıyaslanmıştır. Oda basınç değerlerinin kıyaslaması Şekil 7.1’de gösterilmiştir.



Şekil 7.1. Amesim modeli basınç değerlerinin HAD analizi ve test sonuçları ile kıyası

Şekil 7.1 incelendiğinde yüksek ve düşük oda basınçlarının Amesim modelinde sırasıyla 1,045 bar ve 1,015 bar olduğu görülmüştür. HAD analizi sonuçların göre ise sırasıyla yaklaşık 1,041 bar ve 1,014 bar ölçülmüştür. Test sonuçlarında ise yüksek basınç hattında kanatçığın sol ve sağ oda yüksek basınç verilerinde bir miktar (%1,3) farklılık bulunmaktadır. Bunun nedeni üretim toleransları ve sensörler arası ölçüm hatasıdır. Yüksek basınç değerinin ortalaması alınırsa 1,044 bar olarak yüksek oda basıncı kabul edilir. Düşük oda basıncı 1,005 bar olarak ölçülmüştür. Verilerin yakın olduğu gözlenmektedir. Dolayısıyla Amesim basınç verileri testlerle doğrulanmıştır.

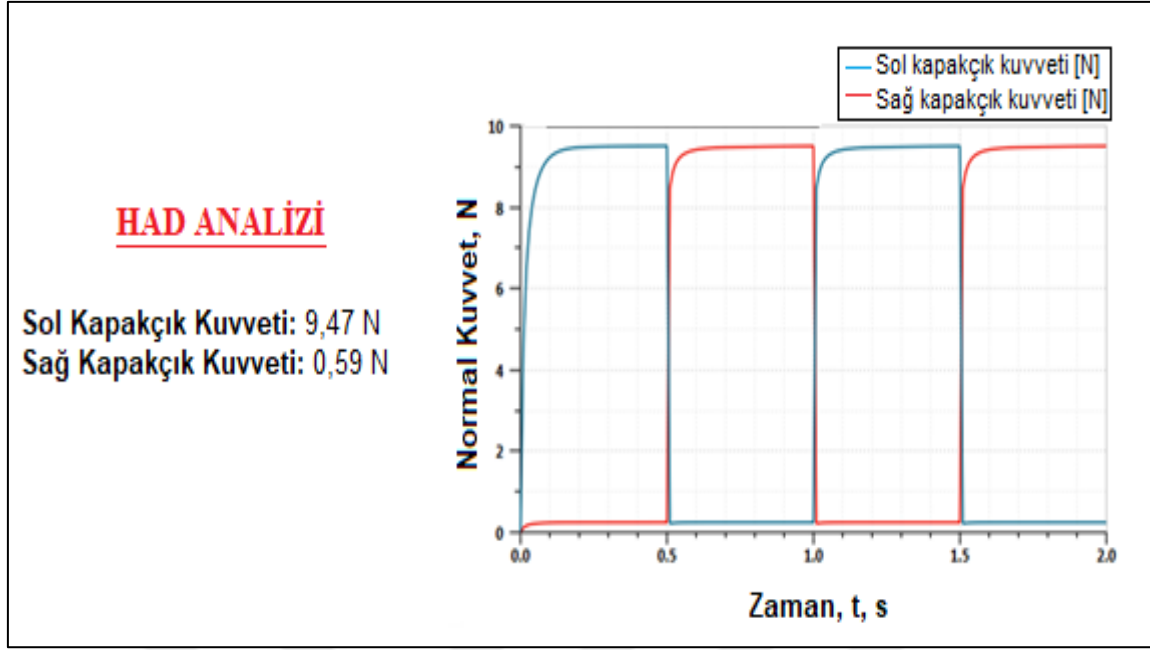
Şekil 7.2’ de kanatçığa etki eden normal kuvvetler Amesim modeli ve HAD analizleri arasında kıyaslanmıştır.



Şekil 7.2. Test debisi senaryosunda Amesim modeli kanatçık normal kuvvetlerinin HAD analizi ile kıyası

Sonuçlara göre Amesim modelinde sol kanatçığa etkiyen kuvvet 5 N, sağ kanatçığa etkiyen kuvvet 0,1 N’ dur. Test debisi senaryosunda HAD analizi sonuçlarına göre sol kanatçık normal kuvveti 5,26 N, sağ kanatçık 0,11 N’ dur. Simülasyon ve akış analizi arasında büyük bir farklılık bulunmamaktadır.

Şekil 7.3’ te solenoid kapakçığine etkiyen kuvvetler verilmiştir.

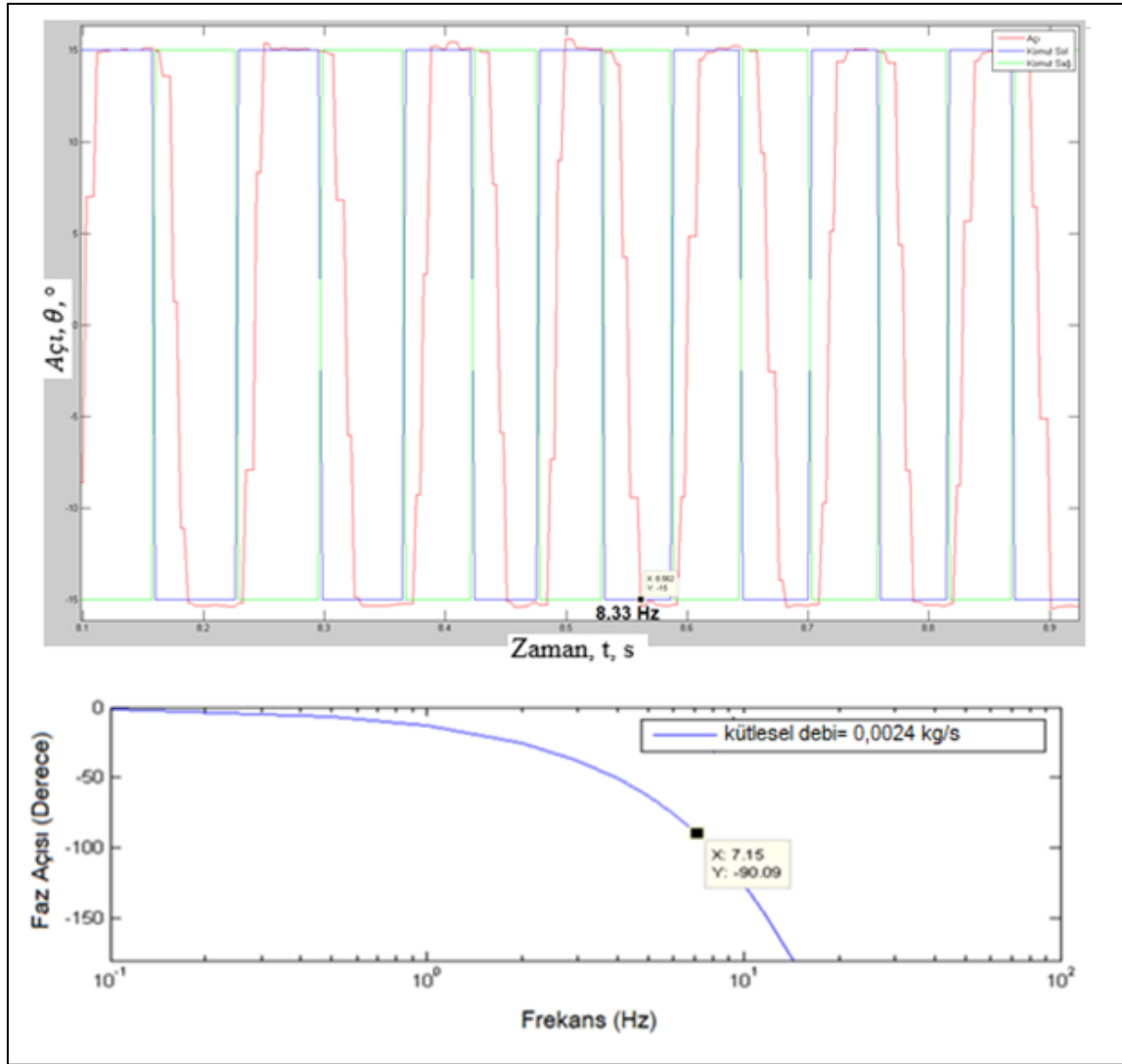


Şekil 7.3. Kapakçık kuvvetlerinin Amesim modeli ve HAD analizinde kıyası

Sol ve sağ kapakçık kuvvetleri sırasıyla Amesim simülasyonunda 9,4 N ve 0,3 N olarak ölçülmüştür. HAD analizlerinde ise sol kapakçıya etkiyen kuvvet 9,47 N, sağ tarafta ise 0,59 N olarak elde edilmiştir.

Kanatçık ve kapakçık kuvvetleri simülasyon ve HAD analizleri ile karşılaştırıldığında değerlerin benzer çıktığı gözlenmiştir. Yine de, simülasyonlarda kapakçık ve kanatçık orifis akış katsayılarının ampirik olarak daha doğru şekilde elde edilmesi simülasyonun daha hassas olmasına katkı sağlayacaktır.

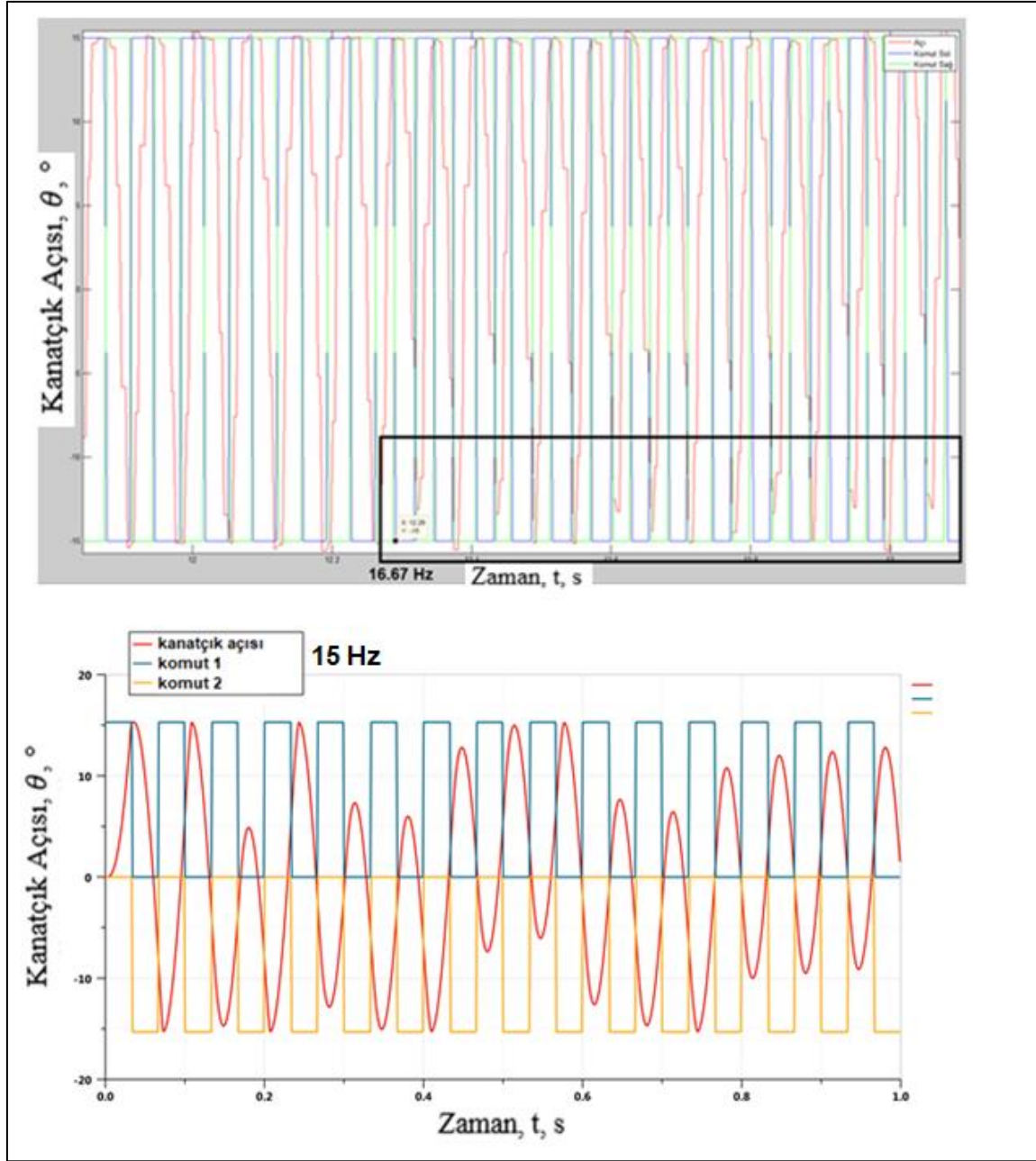
Şekil 7.4 ve Şekil 7.5’ te hava alıklı KTS frekans cevabının simülasyon ve test kıyaslaması yapılmıştır. Şekil 7.4, Şekil 6.8’de verilen simülasyon ve Şekil 4.26’ da verilen test frekans cevabında oluşan faz açısı sonuçları ile oluşturulmuştur.



Şekil 7.4. Test debisi senaryosunda frekans cevabı faz açısı değerlerinin simülasyon ve test sonuçlarına göre kıyası

Şekil 7.4' e göre simülasyonlarda 90° faz farkı $7,15 \text{ Hz}$ ' de meydana gelmiştir. Test sonuçlarına göre $8,33 \text{ Hz}$ ' de 90° faz farkı oluşmuştur.

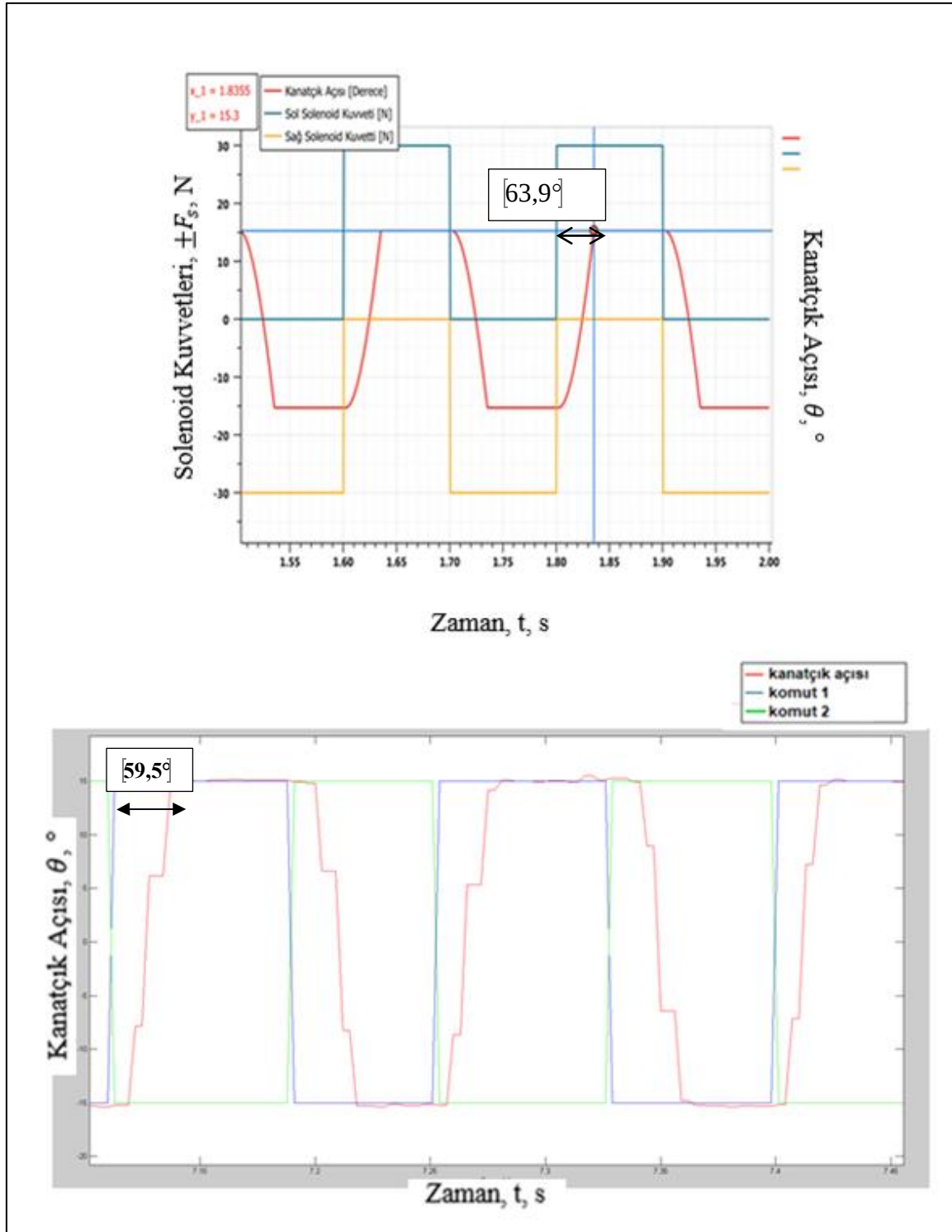
Açık çevrim frekans cevabındaki genliğin bozulduğu frekans değerlerinin kıyası Şekil 6.7 ve Şekil 4.27' deki sonuçların birleştirilmesi ile elde edilmiştir.



Şekil 7.5. Genliğin bozulduğu frekans değerlerinin simülasyon ve test sonuçlarına göre kıyası

Şekil 7.5’ teki veriler incelendiğinde simülasyonlarda kanatçık aç genlik değerlerinin 15 Hz’ den sonra bozulmaya başladığı, testlerde ise 16,66 Hz’ den sonra bozulmalar meydana geldiği gözlenmiştir.

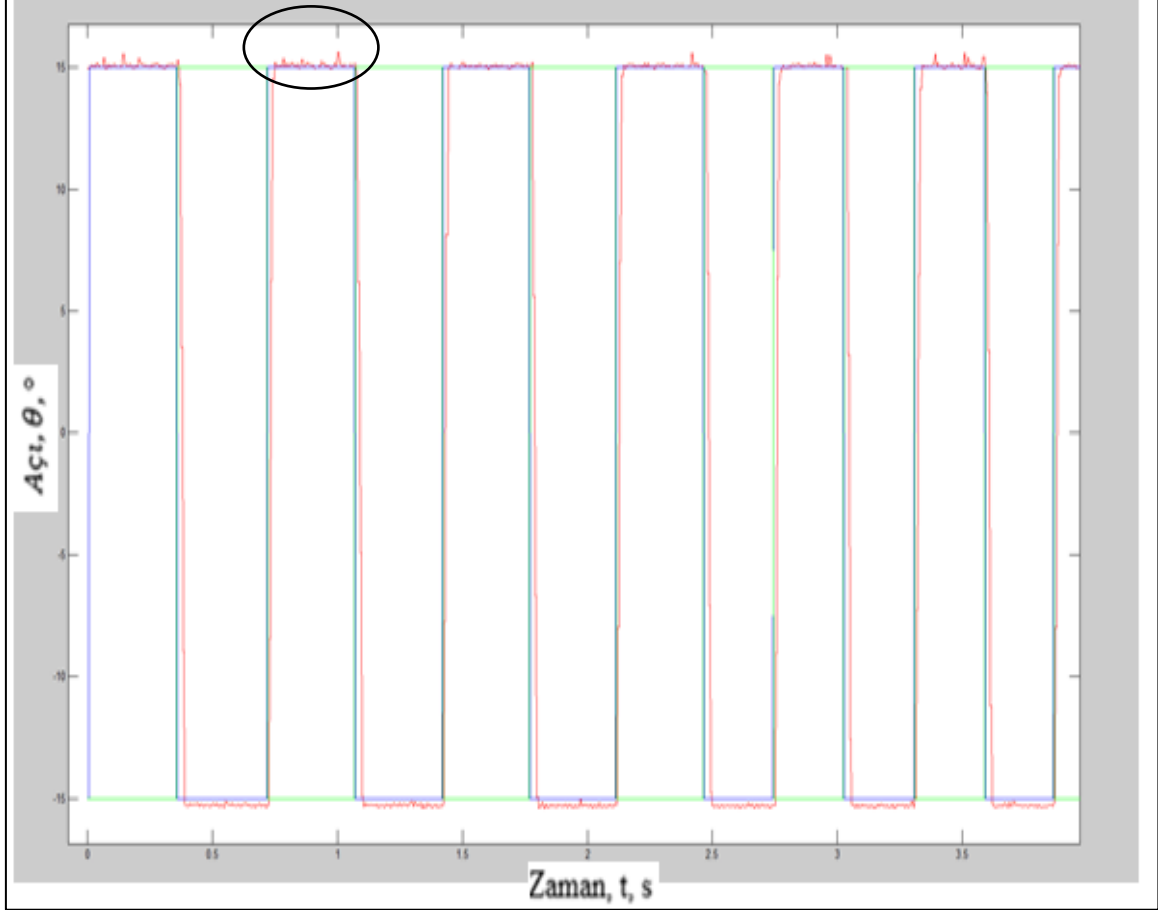
5 Hz hedef frekansında, test ve simülasyonlardaki faz açılarının kıyası Şekil 7.6’ da verilmiştir (Şekil 6.9 ve Şekil 4.24 kullanılarak).



Şekil 7.6. 5 Hz hedef frekans cevabı faz açısının simülasyon ve test sonuçlarına göre kıyası

Şekil 7.6' ya göre 5 Hz hedef frekansında simülasyonlardaki sonuçlara göre $63,9^\circ$, test sonuçlarına göre $59,5^\circ$ faz kayması meydana gelmiştir. Simülasyonlar ve testler arasındaki faz kaymaları birbirlerine yakındır.

Ek olarak yüksek dinamik etkinin olmadığı kanatçık açısının düşük frekans değerleri olan 1-1,5 Hz arasındaki durum Şekil 7.7’ de gösterilmiştir. Düşük frekans değerlerinde sorunsuz olarak kanat açısının komutu takip ettiği gözlenmiştir. Oturma bölgelerinde gözlenen dalgalanmaların sensör gürültülerinden (200-300 Hz) kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 7.7. Düşük frekans değerlerinde (1-1,5 Hz) Komut-Kanat Açısı grafiği

8. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında füze / roket kontrol tahrik sistemleri için daha ucuz ve daha basit yapıya sahip olan hava alıklı elektro-pnömatik kontrol tahrik sistemi geliştirilmiştir. Geliştirme aşamasında modelleme, test ve analiz çalışmalarından yararlanılmıştır.

Modelleme çalışmalarında kontrol tahrik sisteminin hedef çalışma frekansı 5 Hz olarak seçilmiştir. Belirlenen koşullara göre Amesim simülasyon modeli çalıştırılmış ve sonuçlar elde edilmiştir. Kanatçık açısı 5 Hz hedef frekansında Şekil 4.23' te gösterildiği gibi $63,9^\circ$ faz farkı ile komut sinyalini başarı ile takip etmiştir. Bu simülasyon sonucu elde edilen tork değeri yaklaşık 0,09 Nm' dir. Amesim model sonuçları Simulink sonuçları ile kıyaslanarak kısmen doğrulanmıştır. Lineer olmayan matematiksel eşitliklerde kritik olduğu tahmin edilen parametreler Amesim modellemesinde incelenmiştir. Bu kritik parametrelerin etkisi incelenerek değerler optimize edilmiştir. Ayrıca sistemin frekans cevabı Amesim simülasyonlarına göre irdelenmiştir. Simülasyonlara göre hava tabancası debisinde 7,15 Hz' de 90° faz kayması meydana gelmiştir. 13,5 Hz' de 180° faz kayması meydana gelmiştir. 13,5 Hz'e kadar kanatçık açısı komutu başarı ile takip edilmiştir. Ancak özellikle 15 Hz' den sonra genliklerde kayıplar ve bozulmalar meydana gelmiştir.

HAD analizlerinden kanatçık ve kapakçıga etkiyen kuvvetler, oda basınçları elde edilmiştir. HAD analizleri yapıldıktan sonra KTS geometrik parametreleri optimize edilmiş ve HAD analizleri ile kıyaslamak için test düzeneğine uygun şekilde katı model düzenlenmiştir.

Testlerde DGM ile verilen solenoid komutu ve hava tabancası debisi girdilerine karşılık sistem frekans cevabı irdelenmiştir. 1 Hz' den 35 Hz' e kadar frekans girdisi artırılarak frekans cevabı davranışı incelenmiştir. 8,33 Hz 'de 90° faz kayması meydana gelmiştir. 16,66 Hz frekanstan sonra genliklerde düzensiz hareketler meydana gelmiş ve kanatçık açısı komutu takip edememiştir. 5 Hz hedef frekansını kanatçık açısı genlik kaybına uğramadan komutu $59,5^\circ$ faz açısı ile takip etmiştir. 25 Hz' lerden itibaren solenodin kapakçığı tam olarak kapatamadığı gözlenmiştir. Ancak basınç verileri frekansa bağlı olarak incelendiğinde kapakçığın tam olarak kapatılamamasının tek sebebinin solenoid kuvveti olmadığı, artan frekansla birlikte oda basınç değerlerindeki düşüşün de rol oynadığı görülmüştür.

Amesim simülasyonları, HAD analizleri ve hava tabancalı testler kıyaslanmıştır. Üç sonuç arasında düşük basınç ve düşük kuvvet bölgelerinde olunmasına rağmen anlamlı bir fark görülmemiştir. Simülasyon ve test frekans cevabı kıyaslanmıştır. 5 Hz hedef frekans bölgesinde ve diğer frekans cevaplarında birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Nihai olarak test sonuçları ve ikinci senaryodan çıkan veriler oldukça uyumludur. Amesim modeli büyük oranda doğrulanmış ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar için temel oluşturmuştur. Gelecek çalışmalarda akış katsayılarının ampirik olarak elde edilmesi ile modelleme sonuçlarının daha da iyileştirilebileceği yorumu yapılmıştır.

Sonuç olarak bu tez çalışmasında elektro-pnömatik hava alıklı kontrol tahrik sistemi geliştirilmiş, tahrik sistemi testler ve analizlerle doğrulanmıştır. Geliştirme aşamasında mimari oluşturma, katı modelleme, simülasyon, akış analizi, dinamik davranış inceleme, üretim ve test çalışmaları yapılmıştır.

KAYNAKLAR

- Abd-Altief, M.A., El-Sheikh, G.A., and Dogheish, M.Y. (2006). Anti-tank guided missile performance enhancement part-1: hardware in the loop simulation. *5th International Conference on Electrical Engineering*.
- Aksel, M. H. ve Eralp, O. C. (1994). *Gas Dynamics*. New Jersey: Prentice Hall, 140-142.
- Dryer, R. (2009). *Projectile control device*. U.S Patent No. 20,100,237,185A1. United States Patent Application Publication.
- Gade, M.M., Mangrulkar, K.K. (2018). Modeling and PWM control of electro-pneumatic actuator for missile applications. *IFAC Papers Online*, 51(1), 237-242.
- Hejrati, B., Najafi, F. (2012). Accurate pressure control of a pneumatic actuator with a novel pulse width modulation–sliding mode controller using a fast switching on/off valve. *Proc IMechE Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 227(2), 230–242.
- İnternet: 62 Series Servo Valves (2020). URL: <https://www.moog.com/products/servovalves-servo-proportional-valves/industrial/flow-control/analog-without-integrated-electronics/legacy-product-direct-operated-servo-valves-for-analog-signals-62-series.html>, Son erişim tarihi 15.11.2020.
- İnternet: 9K115 Metis (2010). URL: <https://www.armedconflicts.com/9K115-Metis-9-1050-115-1052-1077-1090-1080-1089-t26889#360912>, Son erişim tarihi: 21.06.2020.
- İnternet: 9M113 Kornet (Mart, 2014). URL: <http://vieclam.laodong.com.vn/vu-khi/suc-manh-ten-lua-sieu-khung-kornetem-cua-nga-189873.bld>, Son erişim tarihi: 21.06.2020.
- İnternet: Actuation Solutions (2019). URL: <https://aerospace.honeywell.com/content/dam/aero/en-us/documents/learn/products/actuation/brochures/N61-1575-000-001-ActuationSolutions-bro.pdf>, Son erişim tarihi: 21.06.2020.
- İnternet: Advanced Products and Game-Changing Engineering are Trending for Fluid Power Pros (Haziran, 2017). URL: <https://fluidpowerjournal.com/advanced-products-and-game-changing-engineering-are-trending-for-fluid-power-pros>, Son erişim tarihi 15.11.2020
- İnternet: AT-14 Kornet (Ağustos, 2012). URL: <http://anwaralsharrad-mbt.blogspot.com/2012/08/at-14-kornet.html>, Son erişim tarihi: 21.06.2020.

İnternet: Davis, M.A. (1984). High Performance Electromechanical Servoactuation Using Brushless Dc Motor. URL: https://www.moog.com/content/dam/moog/literature/Space_Defense/Technical_Bulletins/Technical_Bulletion_150.pdf, Son erişim tarihi: 21.06.2020.

İnternet: Dihovicni, D., Medenica, M. (2011). Mathematical Modelling and Simulation of Pneumatic Systems. URL: <https://cdn.intechweb.org/pdfs/14402.pdf>, Son erişim tarihi: 21.06.2020.

İnternet: EPOS3 Positioning Controller (Nisan, 2015). URL: https://www.maxongroup.com/medias/sys_master/root/8816815374366/15-391-392-393-EN.pdf, Son erişim tarihi: 15.11.2020.

İnternet: Innovations in Flight Control Systems and Subsystems (2011). URL: <https://www.parker.com/Literature/Control%20Systems%20Division/CSD%20literature/CSDBrochure.pdf>, Son erişim tarihi: 21.06.2020.

İnternet: Part number 363970 (2020). URL: <https://www.maxongroup.com/maxon/view/product/363970>, Son erişim tarihi: 15.11.2020.

İnternet: Pneumatic Wing and Tail Actuators (2009). URL: <https://www.cobhammissionsystems.com/tactical-control-systems/weapon-control-and-actuation-systems/pneumatic-wing-and-tail-actuators/docview/>, Son erişim tarihi: 21.06.2020.

İnternet: Precision Guidance Kit (PGK) (Nisan, 2015). URL: https://ndiastorage.blob.core.usgovcloudapi.net/ndia/2015/armament/wed17409_Hunter.pdf, Son erişim tarihi: 21.06.2020.

İnternet: Servo Valves (Haziran, 2018). URL: https://www.moog.com/literature/ICD/Moog_ServoValves_72Series_Catalog_en.pdf, Son erişim tarihi: 21.06.2020.

İnternet: Thayer, W. J. (Şubat, 1988). Electropneumatic Servoactuation an Alternative to Hydraulics for Some Low Power Applications. URL: https://www.moog.com/content/dam/moog/literature/Space_Defense/Technical_Bulletins/Technical_Bulletin_151.pdf, Son erişim tarihi: 21.06.2020.

Kamari, A., Mohammadi, A.H., Bahadori, A., Zendejboudi, S. (2014). Prediction of air specific heat ratios at elevated pressures using a novel modelling approach. *Chemical Engineering & Technology*, 37(12), 2047–2055.

Krivts, I. L. (2004). Optimization of performance characteristics of electropneumatic (two-stage) servo valve. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 126(2), 416-420.

- Qiao, G., Liu, G. , Shi, Z., Wang, Y., Ma, S., and Lim, T.C. (2018). A review of electromechanical actuators for more/all electric aircraft systems. *Proc IMechE Part C: J Mechanical Engineering Science*, 232(22), 4128-4151.
- Richer, E. and Hurmuzlu, Y. (2000). A high performance pneumatic force actuator system: part i: nonlinear mathematical model. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 122(3), 416-425.
- Zhou, M., Mao, D., Zhang, M., Guo, L., Gong, M. (2018). A hybrid control with pid-improved sliding mode for flat-top of missile electromechanical actuator systems. *Sensors (Basel)*, 18(12), 4449.





ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ERCİS, Orhan Fatih
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 18.03.1986, İstanbul
 Medeni Hali : Evli
 Telefon : 0 (532) 481 51 79
 e-mail : fatih.ercis@roketan.com.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / Makina Mühendisliği	Devam Ediyor
Yüksek lisans	O.D.T.Ü / Makina Mühendisliği	2013
Lisans	Gazi Üniversitesi / Makina Mühendisliği	2009
Lise	Kalaba Anadolu Lisesi	2004

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013-Halen	Roketsan	Tasarım Mühendisi
2010-2013	O.D.T.Ü. Makina Mühendisliği	Bilimsel Araştırma Uzmanı

Yabancı Dil

İngilizce, Almanca

Yayınlar

Ercis, F., Keleş, Ö., (2020). Hava alıklı elektro-pnömatik bir sistemin modellenmesi ve simülasyonu, *Savunma Bilimleri Dergisi*, 38, 44-67

Hobiler

Olta Balıkçılığı, Seyahat etmek, Müzik, Yüzme



GAZİ GELECEKTİR..