



The investigation of open loop performance of electro-pneumatic control actuator system with air intake

O. Fatih Ercis^{1*}, Ömer Keleş²

¹Department of Control Systems Development, Roketsan A.Ş., Elmadağ, 06780, Ankara, Türkiye

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Gazi University, 06570, Maltepe, Ankara, Türkiye

Highlights:

- Electro-pneumatic actuator system design
- Open loop controller
- Simulation of gas dynamics

Keywords:

- Amesim
- Pneumatic
- Simulation
- Test
- Control

Article Info:

Research Article

Received: 28.02.2023

Accepted: 08.10.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1257561

Acknowledgement:

This paper is supported by Roketsan Rocket and Missile Industry funds.

Correspondence:

Author: O. Fatih Ercis

e-mail:

fatihercis@hotmail.com

phone: +90 532 481 5179

Graphical/Tabular Abstract

In this study, the open loop performance of an electro-pneumatic control actuator system is investigated by simulation and tests. At 5 Hz command frequency, the phase shift test results are given in Figure A.

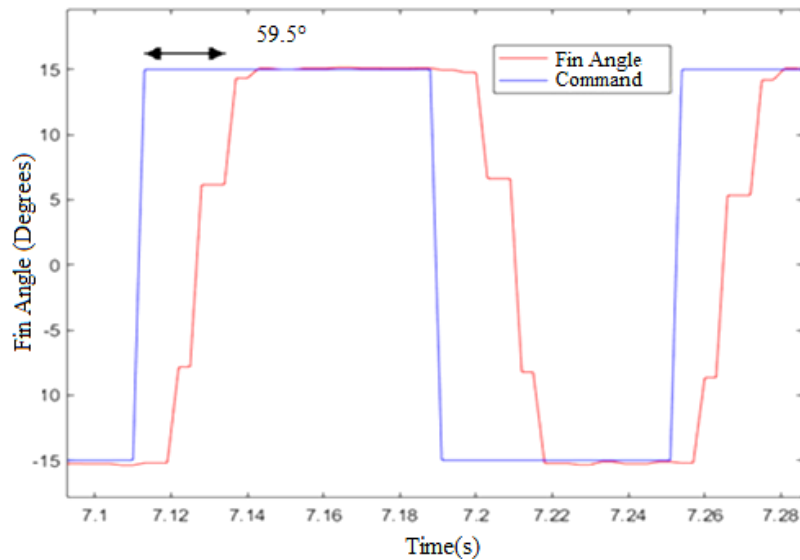


Figure A. The test results at 5 Hz command frequency

Purpose:

The aim of this study is to examine the tests and simulation studies of a simple and inexpensive open loop electro-pneumatic control actuator system and compare the results.

Theory and Methods:

Open loop control simulations are performed with Amesim simulation software. The outputs of these simulations are compared with the test results by using test hardware and software.

Results:

The fin angle follows the command signal with a 63.9° phase difference at target frequency of 5 Hz at Amesim simulations. The phase difference is also measured as 59.5° in the tests. In addition, it is observed that 90° phase shift occurred at 7.15 Hz and 180° phase shift occurred at 13.5 Hz according to the simulations. Furthermore, the fin successfully follows the command up to 13.5 Hz. On the other hand, amplitude loss and distortions occur specially after 15 Hz. It is also showed that increasing mass flowrate of the air intake increases the bandwidth.

Conclusion:

The simulations are substantially consistent with the test results. The results of this study are expected to serve as a basis for future research on electro-pneumatic control actuation systems.



Hava alıklı elektro-pnömatik kontrol tahrik sisteminin açık çevrim performansının incelenmesi

O. Fatih Ercis^{1*}, Ömer Keleş²

¹Kontrol Sistemleri Geliştirme Birimi, Roketsan A.Ş., Elmadağ, 06780, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 06570, Maltepe, Ankara, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Elektro-pnömatik tahrik sistemi tasarımı
- Açık çevrim kontrolcü
- Gaz dinamiği simülasyonu

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 28.02.2023

Kabul: 08.10.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1257561

Anahtar Kelimeler:

Amesim,
pnömatik,
simülasyon,
test,
kontrol

ÖZ

Bu çalışma kapsamında elektro-pnömatik bir kontrol tahrik sisteminin simülasyonu yapılmış ve testlerle açık çevrim performansı değerlendirilmiştir. Açık çevrim elektro-pnömatik sistemde, hava alığından giren gaz izole edilmiş iki odaya dolmaktadır. Hava odaları arasında basınç farkı solenoidler yardımı ile oluşturularak mühimmatın kanat hareketi sağlanmaktadır. Solenoidlerin yarattığı basınç farkı bir döner kanat üzerine etkiyerek aerodinamik kanatların dönüşünü sağlamaktadır. İlk olarak sistemin basamak cevabı testlerde ve simülasyonlarda kıyaslanmış ve sonuçların birbirine yakın oldukları görülmüştür. Frekans cevabı testlerinde 35 Hz'e kadar simülasyon ve testler gerçekleştirilmiştir. Cevaplara göre simülasyonlarda 7,15 Hz 'de, testlerde 8,33 Hz'de 90° faz farkı gerçekleşmiştir. Ayrıca simülasyon ve test çalışmalarında 5 Hz hedef çalışma frekansı olarak belirlenmiştir. Amesim simülasyonlarında kanatçık açısı 5 Hz hedef frekansında 63,9° faz farkı ile komut sinyalini takip etmiştir. Testlerde ise kanatçık 59,5° faz kayması ile komutu genlik kaybı olmadan takip etmiştir. Ek olarak hava giriş debisinin artması ile sistemin bant genişliğinin de artabileceği gösterilmiştir. Sonuç olarak ucuz ve basit bir yapıdaki elektro-pnömatik tahrik sisteminin performansı simülasyon ve testlerle elde edilmiştir.

The investigation of open loop performance of electro-pneumatic control actuator system with air intake

HIGHLIGHTS

- Design of electro-pneumatic actuator system,
- Open-loop controller,
- Simulation of gas dynamics

Article Info

Research Article

Received: 28.02.2023

Accepted: 08.10.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1257561

Keywords:

Amesim,
pneumatic,
simulation,
test,
control

ABSTRACT

In this study, an electro-pneumatic control actuator system is simulated and its open loop performance is evaluated with tests. In the open loop electro-pneumatic system, the gas entering from the air intake is filled into two isolated chambers. The fin movement of the ammunition is provided by creating the pressure difference between the air chambers with the help of solenoids. The pressure difference created by the solenoids acts on a rotary vane and provides the rotation of the aerodynamic fins. Firstly, the step responses of simulation and tests are compared and it is seen that the results are close to each other. In frequency response test, the simulation and tests are conducted until 35 Hz. According to the responses, 90° phase difference is occurred at 7.15 Hz in the tests and at 8.33 Hz in the simulations. Besides, 5 Hz is chosen as target operating frequency in the simulation and test studies. The fin angle follows the command signal with a 63.9° phase difference at 5 Hz in Amesim simulations. In the tests, the fin also follows the command with 59.5° phase shift at the target frequency without losing the angle amplitude. In addition, the bandwidth of the system can be increased with increasing inlet mass flowrate. As a result, the performance of an inexpensive and simple electro-pneumatic control actuator system has been obtained through simulations and tests.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *fatihercis@hotmail.com, omer@gazi.edu.tr / Tel: +90 532 481 5179

1. Giriş (Introduction)

Güdümlü roket/füzelerde aerodinamik kanat kontrolünü kontrol tahrik sistemleri (KTS) sağlamaktadır. Bu mühimmatlarda elektro-hidrolik, elektro-mekanik, elektro-pnömatik KTS ve bunların kombinasyonu tahrik sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemler güç ve performans ihtiyaçlarına bağlı olarak mühimmatlara yerleştirilmektedir [1-4]. Ancak KTS bazı alt bileşenlerinin temininde ve üretiminde sıkıntılar yaşanabilmektedir.

Servo elektro-mekanik KTS'ler yaygın bir biçimde farklı türdeki güdümlü mühimmatlarda kullanılmaktadır. 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 savunma sanayisinde karşılaşılan problemleri parçalar. Elektro-mekanik KTS'lerin elektro-manyetik girişim yaratması da bir diğer sorundur [5-7].

Tahrik sistemi, kanatçık üzerine gelen bozululara karşı kanatçığın istenilen açılma konumunda tutulmasını sağlamak için gerekli torku üretmektedir [3]. Burada yüksek güç veya tork ihtiyacı olduğunda genellikle servo elektro-hidrolik KTS'ler tercih edilmektedir. Yüksek güç aralığında elektro-mekanik yapılara göre daha hafif ve daha küçük boyutlara sahip olabilmektedirler. Elektro-mekanik sistemlere kıyasla daha basit elektronik donanımlar gerektirmektedirler. Ancak hidrolik eyleyicilerde servo valf gibi parçalar hassas üretim teknolojileri gerektirmektedir. Ayrıca hidrolik akışkanın kirlilik seviyesinin belirli bir düzeyin altında tutulması da dezavantaj (ince örgülü filtre, basınç düşümü vb.) yaratmaktadır [4].

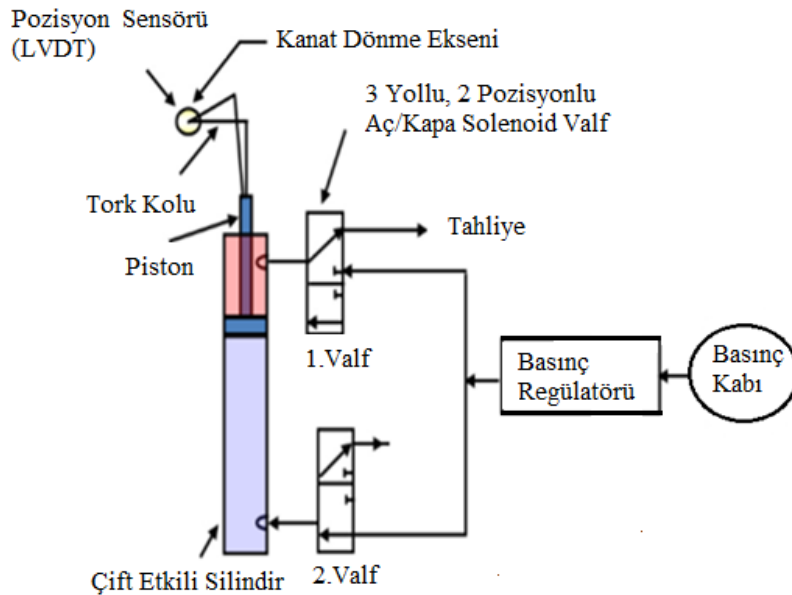
Literatürde pnömatik servo valf ve oransal valf tasarımları bulunsu da yüksek maliyet, boyut ve gazın sıkıştırılabilirliği sebebiyle bu valfler savunma sanayinde nadir olarak tercih edilmektedir [8-10]. Servo kontrollü elektro-pnömatik eyleyiciler yoğunlukla taktik füze sistemlerinde kullanılmaktadır [11]. 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 (maksimum ~1,5

kW) kalmaktadır. Bant genişliği 0,8 kW güce kadar 1-50 Hz aralığında değişmektedir. 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 problemdir [4]. Bu sebeple benzer oransal valf ve eyleyiciler daha çok endüstriyel ve robotik uygulamalarda kullanılmaktadır [12].

Özellikle küçük boyutlu mühimmatlarda (Çap:107-155mm) KTS birimlerine ait alt bileşen maliyetlerinin (servo motor, sürücü, bilyalı vida, servo valf vb.) yüksek olması ve alt sistemlerin tedariginin-üretiminin zor olması bu yönelim birimlerine alternatif bulma ihtiyacı doğurmuştur.

Ucuz ve basit yapıda olmalarından dolayı, aç-kapa solenoidlerle füze kontrol tahrik sisteminin pozisyon kontrolü tercih edilmektedir. Bu yapıda klasik elektro-pnömatik eyleyicilerde bulunan 4 yollu-3 konumlu (4/3) servo valf/oransal valf yerine iki adet 2 yollu-2 konumlu (2/2) aç-kapa solenoid valften yararlanılarak pozisyon kontrolü sağlanmaktadır. Ayrıca bazı aç-kapa solenoid yapılarına basınç sensörü eklenerek çeşitli kapalı çevrim kontrol adapte edilebilmektedir [13-15]. Şekil 1'deki makalede 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 (2/2) yararlanılarak pozisyon kontrolü yapılmaktadır. Kapalı çevrim pozisyon kontrolünü sağlamak için darbe genişlik modülasyonu (DGM) kullanılmıştır. Tahrik sistemine ait enerji rezervuardaki basınçlı gaz ile sağlanmaktadır [16, 17].

Bu çalışmada ise açık çevrim, aç-kapa solenoidlerle çalışan, üretimi kolay, kapalı çevrime göre daha basit yapıda olan elektro-pnömatik KTS tasarımına ait dinamik performans incelenmiştir. Çalışmadaki tasarımın katı model ve simülasyon çalışmaları yayınlanan bir makaleden elde edilmiştir [18]. Benzer hava tahrikli sistemler genellikle tanksavar mühimmatlarında kullanılmaktadır [19-21]. Açık çevrim kontrolde DGM algoritması ile solenoidleri sürmek maliyeti düşürücü bir etki yaratmaktadır [22]. Ayrıca mimaride mühimmat



Şekil 1. Basınç kaynaklı pnömatik servo kontrol tahrik sistemi [16] (Servo control actuator system with pressure vessel)

içinde bir enerji kaynağına ihtiyaç bulunmamaktadır. Bu sayede servo valf, servo motor ve sürücü gibi pahalı alt sistemler kullanılmayarak daha maliyet etkin bir sistem elde edilmiştir. Amesim simülasyon çıktıları, test düzeneği kurularak elde edilen deneysel sonuçlar ile kıyaslanmıştır.

2. Tasarım ve Simülasyon (Design and Simulation)

Elektro-pnömatik kontrol tahrik sisteminde, 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 farklılığının sayesinde füzeye güdüm kabiliyeti kazandırılması hedeflenmiştir. Şekil 2’de tasarımı yapılan sistemin kesit görüntüsü verilmiştir [18].

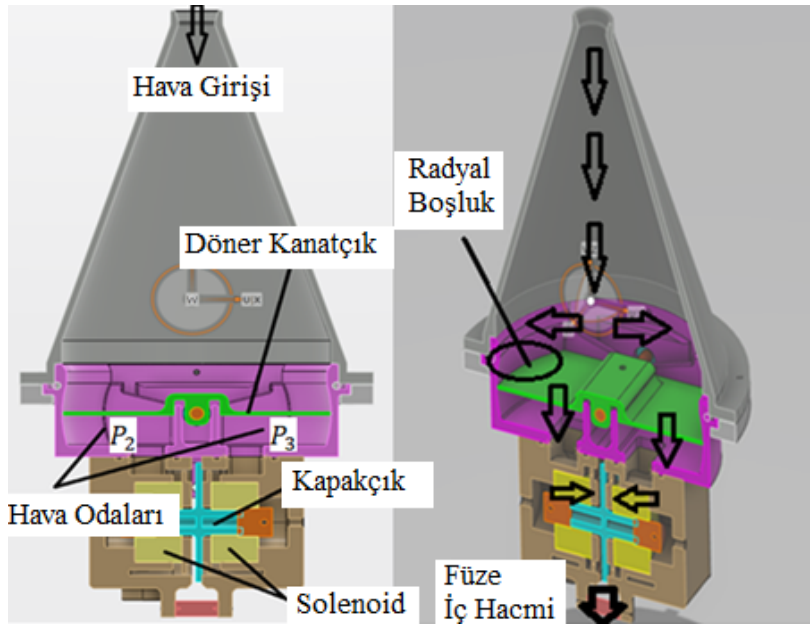
Şekil 2’den de anlaşıldığı gibi güdümlü mühimmat uçarken burun kısmından içeri hava girişi bir delik/açıklık yardımı ile sağlanmaktadır. Uçuş rejimine bağlı olarak içeri alınan hava döner kanatçığın radyal boşluklarından geçerek birbirinden duvarla ayrılmış iki odaya dolmaktadır. Hava odalarının çıkışları füze gövdesi vasıtasıyla atmosfere açıktır. Bu sayede komut verilmediğinde iki odanın çıkışından dışarı doğru akışa izin verilmektedir. Solenoidlerden birine komut geldiğinde o solenoide bağlı oda atmosfere kapatılarak akan havanın statik basınca ulaşması ve diğer odadan hava akışının atmosfere devam ettirilmesi sağlanmaktadır. Bu sayede bu iki valf sayesinde (3/2) statik basınca ulaşan odanın basıncı ile diğer akışın devam ettiği oda arasında basınç farkı yaratılmaktadır. Bu basınç farkı kanatçığın alt yüzeyine etki ederek kanatçığın dönmesini sağlamaktadır [18].

Amesim yazılımı kullanarak iki boyutlu (düzlemsel) modelleme ve simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Amesim yazılımı farklı alanlardaki fiziksel sistemlerin tek bir yazılım altında modellenmesini sağlayan bir simülasyon aracıdır. Farklı fiziksel

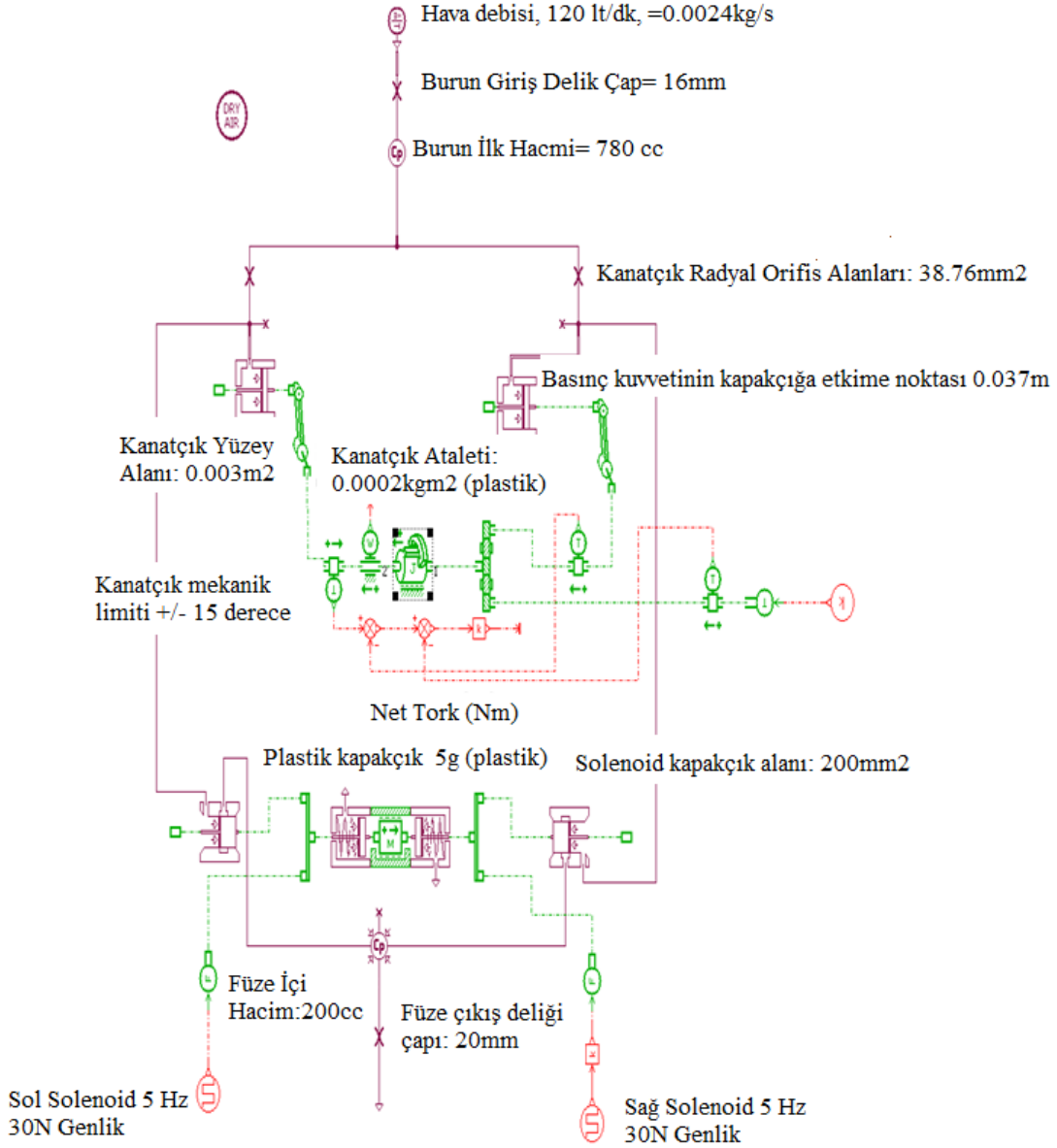
alanlara ait elemanları bağ grafiği (Bond Graph) teorisini kullanarak birbiri ile etkileşim halinde çözebilmektedir [23]. Amesim yazılımı ile Simulink çalışmaları tez çalışmasında kıyaslanmış ve aralarında bir miktar farklılık olduğu gözlenmiştir [24]. Bu farklılık Amesim yazılımında akışkan dinamiğinin daha detaylı modellenmesinden kaynaklanmaktadır. Amesim yazılımında farklı disiplinler arası bağlantılar daha kolay ve gerçeğe yakın şekilde modellenmektedir. Örneğin sürgü valfe ait açıklığın geometrisi Amesim’de tanımlanabilirken Simulink yazılımında sadece orifis olarak modellenmektedir. Sisteme ait alt birimlerin birleştirilmesiyle oluşturulan komple Amesim modeli Şekil 3’te gösterilmiştir.

Amesim modelinde sisteme girdi olarak; üretilecek olan prototipi kolay test edebilmek için regüle edilmiş fabrika havasına ait debi (0,0024 kg/s) ve mevcutta stoğu olan bir solenoid (30 N) seçilmiştir. Burun giriş delik çapı 16 mm olarak seçilmiştir ancak mühimmat boyutuna bağlı olarak değişiklik gösterecektir. Ancak delik çapının büyümesiyle sürüklenme kuvveti de artacaktır. Odaların ilk hacim değeri Şekil 2’deki katı model üzerinden ölçülmüştür. Kanatçık radyal boşluğunun ilk değeri 0,1 mm olarak varsayılmıştır. Buna karşılık gelen her bir radyal alan $38,76 \text{ mm}^2$ ’dir. Kanatçığa plastik malzeme atanarak, sol ve sağ odanın etkilediği simetrik kanatçık yüzey alanları ve kanatçık ataleti katı modelden hesaplatılmıştır. Basıncın kanatçığa etkiye noktası geometrik merkez olarak kabul edilmiştir. Kanatçığa ait mekanik açı limitleri benzer mühimmatlarla kıyaslanarak $\pm 15^\circ$ olarak belirlenmiştir. Kapakçık malzemesi hafif olması maksadıyla plastik seçilmiştir. Kapakçık çıkış alanı ($W * (x_o \pm x)$) çevre ölçüsü (W) ve solenoid yer değiştirmesi (x) ile sınırlandırılmaktadır. Solenoid yer değiştirmesi katalog verilerine bağlı olarak $\pm 1 \text{ mm}$ ile sınırlandırılmaktadır. Füze çıkış orifisi, burun giriş orifisinden büyük olacak şekilde (çapta 20 mm) modele girilmiştir. Füze içi hacmin atmosfer basıncına yakın olması sebebiyle füze içi hacminin performansa çok etkisi olmayacağı düşünülmektedir. Bu sebeple 200 cc (0,2 lt) olarak varsayılmıştır [18].

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.



Şekil 2. Elektro-pnömatik hava alımlı kontrol tahrik sistemine ait katı model [18].
(The solid model of the electro-pneumatic actuator system with air intake)



Şekil 3. Hava alıklı kontrol tahrik sisteminin Amesim simülasyon modeli [18].
(Amesim simulation model of the control actuator system with air intake)

Amesim modelinde solenoid kuvvetleri DGM ile beslenmiştir. KTS'nin en az 5 Hz'de çalışabilmesi hedeflendiği için DGM (sabit %50 çalışma oranı) frekansı 5 Hz olarak simülasyona girilmiştir.

Simülasyona ait çözücünün örnekleme zamanı en az 1000 Hz'lik veriyi yakalayabilecek şekilde seçilmiştir.

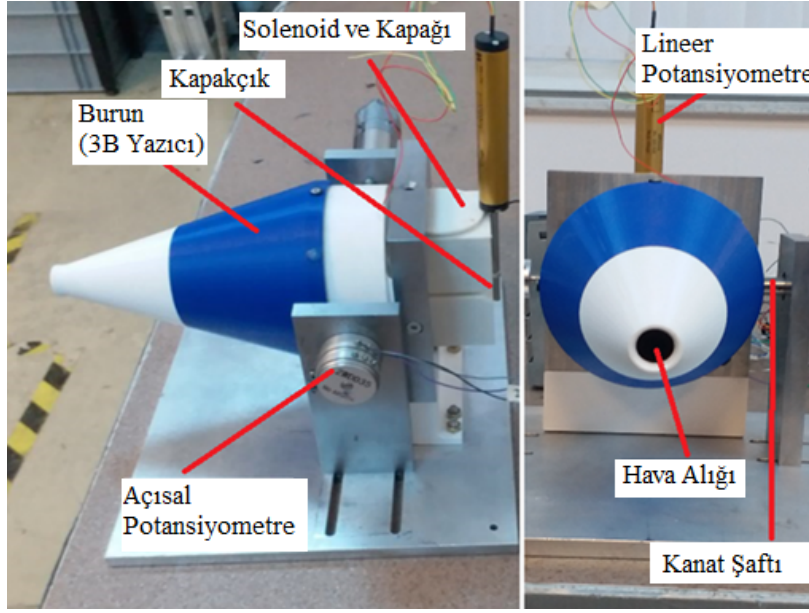
3. Deneysel Metot ve Sonuçları Kıyaslama (Tests and Comparison of the Results)

Tasarlanan KTS'yi test etmek için bir düzenek tasarlanmıştır. Bu test düzeneği sayesinde kütleli debisi bilinen bir hava akışı sistemin burundan verilerek oda basınçları ve kanat açısı elde edilebilecektir. Kanat açısını ölçmek için bir açıl potansiyometre, kapakçık deplasmanını ölçmek için lineer potansiyometre ve oda basınçlarını ölçmek için basınç sensörleri kullanılmıştır. Üretilen prototip ve alt

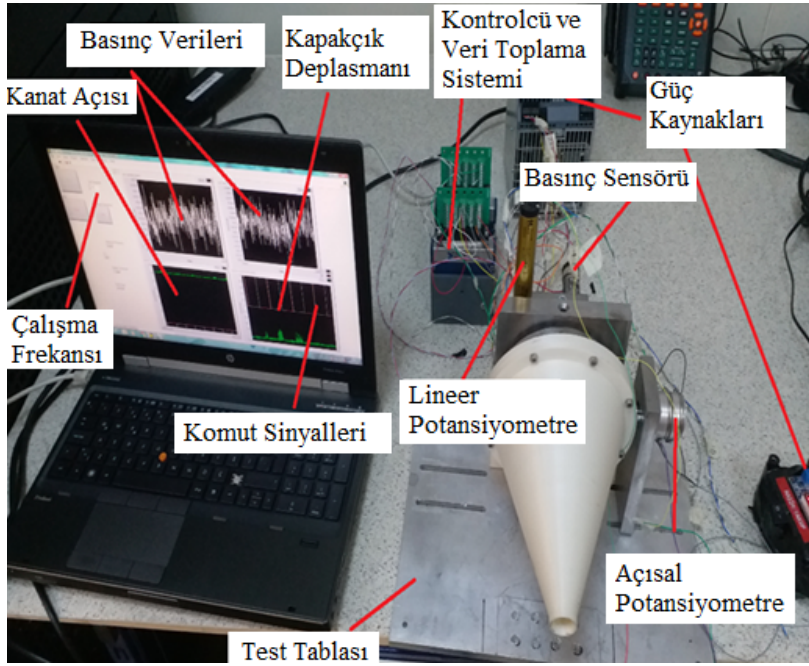
bileşenler Şekil 4'te görülmektedir. Prototipte burun, valf gövdesi, solenoid kapağı, kapakçık ve basit ara yüzler 3 boyutlu yazıcıdan üretilmiştir. Burun gövdesi ilk olarak hızlı ve ucuz üretmek için iki farklı yazıcı malzemesinde basılmıştır (mavi-beyaz renkler). Nihai durumda tek malzemeden (beyaz) üretilerek testlerde kullanılmıştır.

Sistemde kullanılan iki adet solenoid Zonhen marka ve ZHT-3918L-48A256 modeline sahiptir. Lineer potansiyometre $\pm 25,4$ mm deplasmanı, açıl potansiyometre $\pm 70^\circ$ 'yi ölçebilmektedir. Potansiyometreler 5V ile beslenmektedir. Valf gövdesi içinde bulunan ve her iki odanın basıncını ölçen basınç sensörleri olarak Trafag NAT 8252 (10 bar) kullanılmıştır.

Üretilen test düzeneğini kontrol etmek ve KTS üzerinden istenen verileri toplamak için Labview yazılımında ara yüz tasarlanmıştır. Tasarlanan ara yüz ve test görüntüsü Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 4. Prototip ve alt bileşenleri (The prototype and its subcomponents)



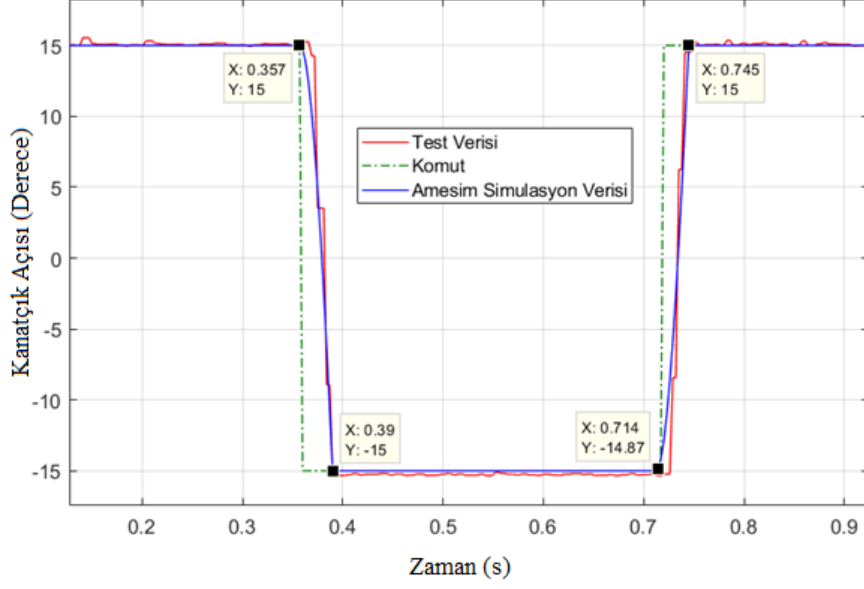
Şekil 5. Test düzeneği, Labview kontrolcü ve veri toplama ara yüzü (Test bench, Labview controller and data logger interface)

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 girişi daha kullanışlı olduğu için tabanca hava debisi 0,0024 kg/s kütleli debi girişine dönüştürülmüştür. Dönüşümde giriş basıncı atmosfer basıncı olarak alınmıştır. Ancak daha hassas hesaplama ve kütleli debinin doğruluğu için Rheonik RHM 015 marka-modele sahip debi ölçer kullanılmıştır. Bu debi ölçer ile 0,0024 kg/s'ye denk gelecek fabrika basıncı regülatör tarafında ayarlanmıştır (~ 6,2 bar). Testlerde Şekil 5'teki Labview yazılım ve National Instruments veri toplama-kontrolcü donanımları sayesinde belirli frekanslarda sistemin dinamik performansı incelenmiştir. Test ara

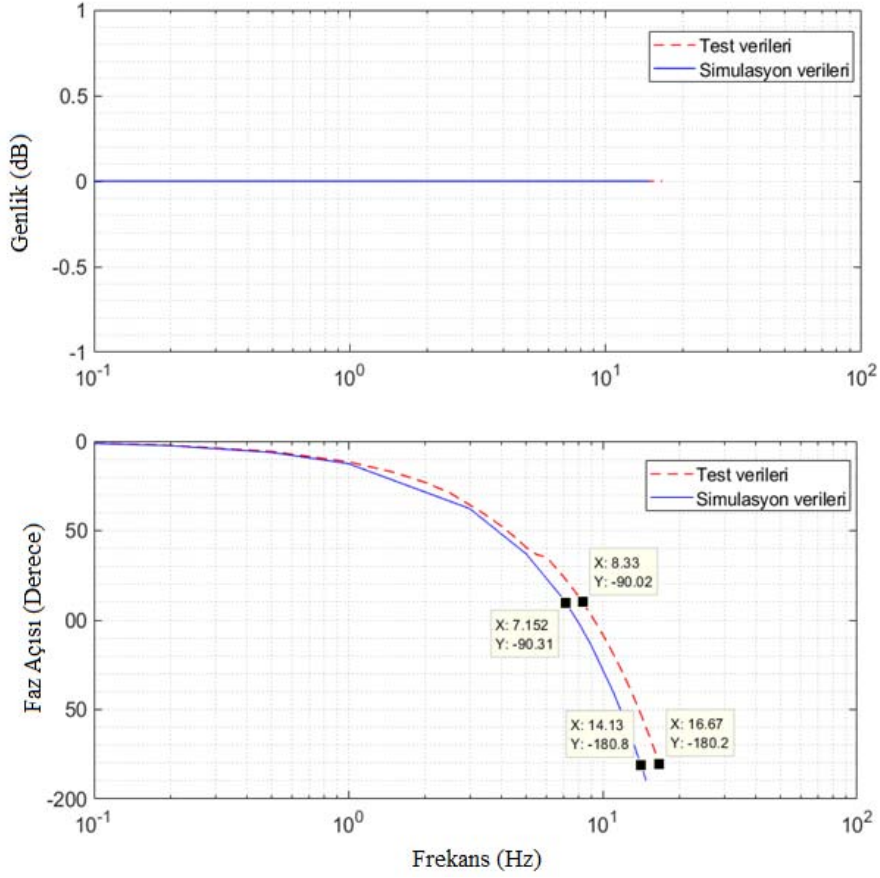
yüzünde cRIO-9063 ile beraber potansiyometre analog verilerini toplamak ve beslemek için sırasıyla NI 9205 ve NI 9264 modülleri kullanılmıştır. Ayrıca solenoid 24 V beslemesi NI 9474 dijital çıkış modülünden sağlanmıştır. Katalog verilerine göre solenoid 48 V'a kadar beslenebilmektedir, ancak mevcut donanımlarla 24 V ile beslenmesi tercih edilmiştir. Mevcut test düzeneği ile 500 Hz çözünürlükte veri toplanmıştır. Testlerde Labview yazılımı üzerinden toplanan veriler MATLAB ortamında grafiğe dönüştürülmüştür. Testlerde komut verisi solenoid besleme voltajı olan 24 V, simülasyonlarda ise solenoid kuvvet çıktısı komut olarak kabul edilmiştir. Simülasyonlarda solenoidin elektriksel ve manyetik dinamiği ihmal edilmiştir. Sistem açık çevrimde çalıştığı için tahrik sisteminin herhangi bir denge noktası bulunmamaktadır. Komut

verildiğinde kanatçık açısı mekanik limitlerden ($+15^\circ$ veya -15°) harekete başlamaktadır. Benzer olarak Amesim simülasyonlarından basamak cevabı da aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Dolayısıyla

sistemin basamak cevapları her iki mekanik limiti kapsayacak şekilde Şekil 6'daki gibi elde edilmiştir. Bu grafikteki verilere göre test ve simülasyon oturma zamanlarının birbirine yakın oldukları



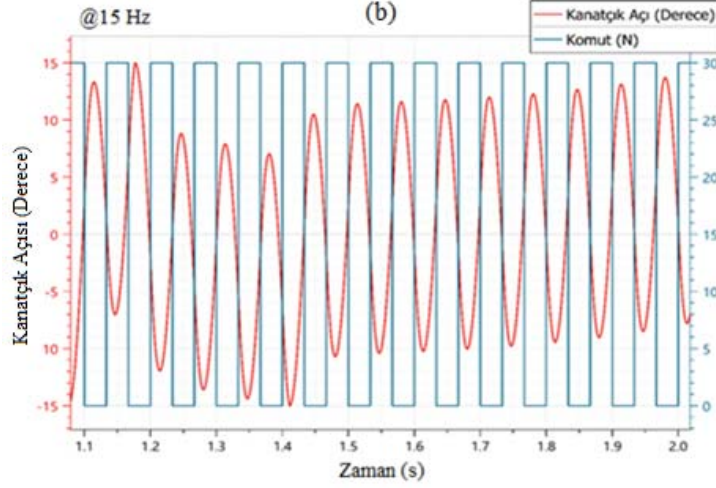
Şekil 6. Sistemin basamak cevabı (The step response of the system)



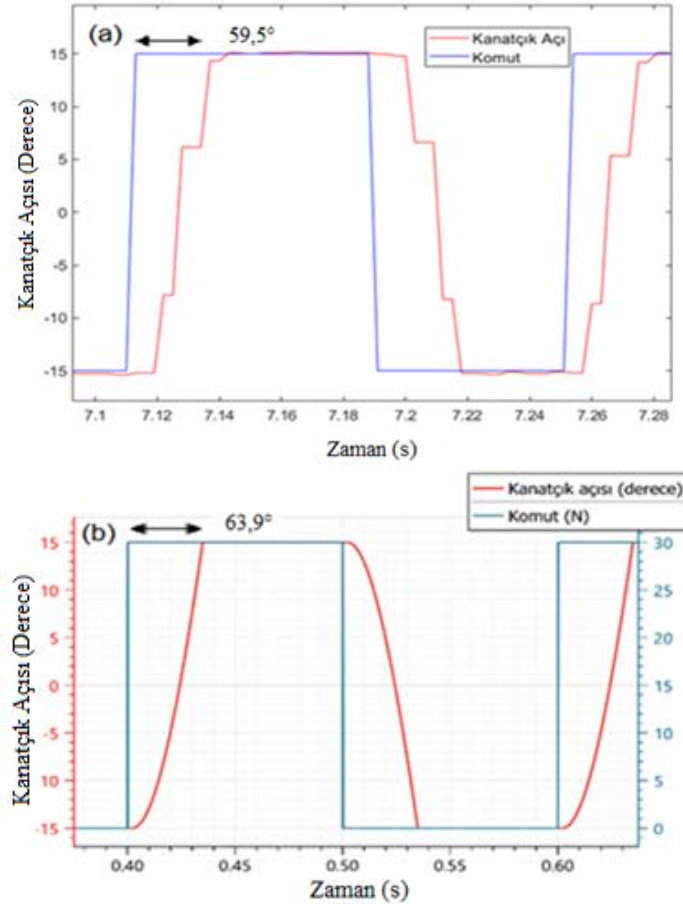
Şekil 7. Frekans cevabının simülasyon ve test sonuçlarına göre kıyası (The comparison of frequency response according to the simulation and test results)

gözlenmiştir. Kanatçık yaklaşık 32 ms sonra $\pm 15^\circ$ 'deki mekanik limitine ulaşmaktadır. Ayrıca dinamik performans değerlendirilirken hem testlerde hem de simülasyonlarda 1 Hz'den başlanarak 35 Hz'e kare dalga komutları verilmiştir. Bu sonuçlar ile Şekil 7'deki Bode grafikleri elde edilmiştir. Açık çevrim frekans cevabında mekanik limit olduğu için açı genliği Şekil 7'de görüldüğü gibi düşmemektedir. 90° faz kayması ise simülasyonlarda 7,15 Hz'de, test sonuçlarına göre ise 8,33 Hz'de gerçekleşmiştir. Ancak belirli bir

frekanstan sonra öngörülemeden cevaplar elde edilmiştir. Bu sebeple Bode grafiği 16 Hz'e kadar elde edilmiştir. Yaklaşık olarak 15 Hz frekanstan sonra genlikte harmonik bozulmalar ve dalgalanmalar meydana geldiği görülmüştür. Bu harmonik dalgalanmaların yaklaşık 180° faz kaymasından sonra başladığı gözlenmiştir. Simülasyon ve test frekans cevaplarında bu harmonik davranışlar Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 8a ve Şekil 8b'deki veriler incelendiğinde, testlerde kanatçık açı genlik değerlerinin yaklaşık 16,67 Hz'den sonra



Şekil 8. Genliğin bozulduğu frekansların kıyası (The comparison of the frequencies which amplitude distortion occurs)

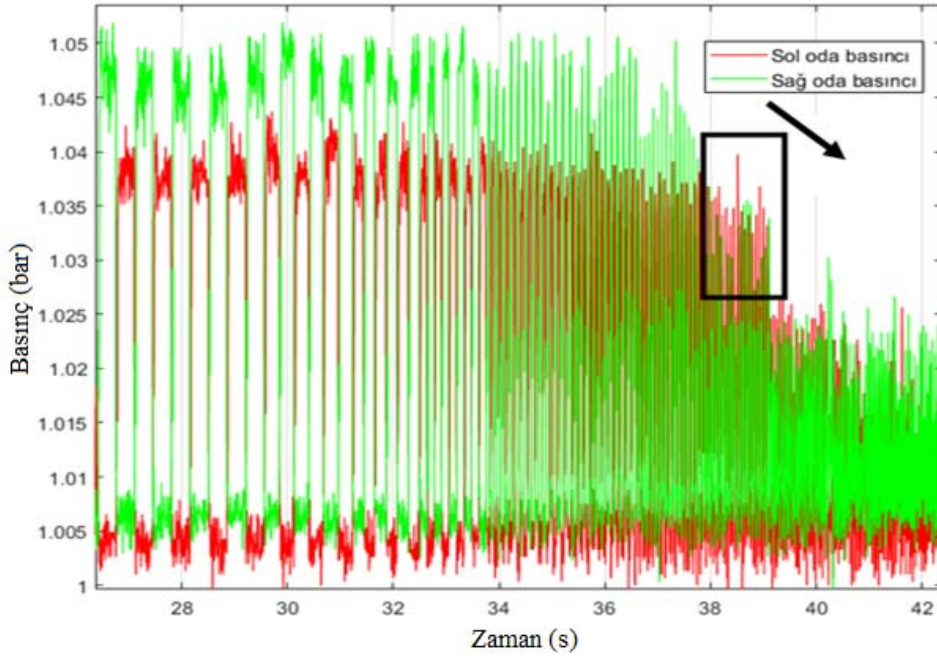


Şekil 9. 5 Hz çalışma frekansında faz açısının simülasyon ve test sonuçlarına göre gösterimi (The presentation of phase shift according to the simulation and test results at 5 Hz target frequency)

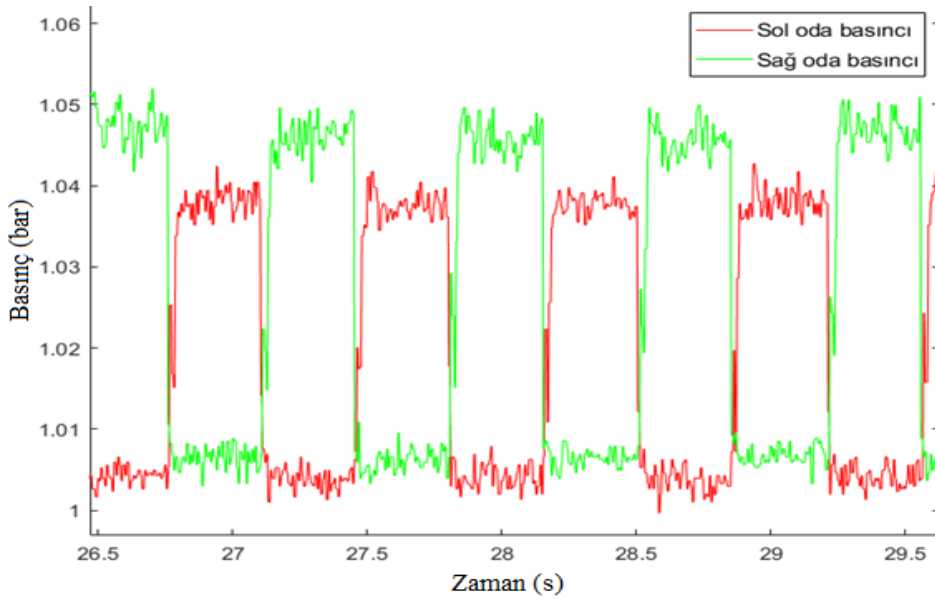
bozulmaya başladığı anlaşılmıştır. Simülasyonlarda ise 180° faz kaymasının yaşandığı $16,67$ Hz'den sonra düzensiz bozulmalar meydana geldiği gözlenmiştir. Bu bozulmaların 180° faz farkına yakın noktada gerçekleşmesi ile bu faz farkından sonra çalışmanın uygun olmayacağı değerlendirilmiştir. Ayrıca sistem mühendisleri tarafından hedef olarak belirlenen 5 Hz frekans bölgesi incelenmiştir. 5 Hz KTS hedef çalışma frekansında ise test ve simülasyonlardaki faz açılarının kıyası Şekil 9'da verilmiştir. Şekil 9a'ya göre 5 Hz hedef frekansında test sonuçlarına göre $59,5^\circ$, Şekil 9b'deki simülasyon sonuçlarına göre ise $63,9^\circ$ faz kayması meydana gelmiştir. Simülasyonlar ve testler arasındaki faz kaymaları birbirlerine yakındır. Sonuç olarak 5 Hz çalışma frekansında genlik kaybı olmamakta ve faz açısı 90° 'nin altında kalmaktadır.

1 Hz'den 35 Hz'e kadar komut girdileri ile gerçekleştirilen performans testleri esnasında basınç sensörleri sayesinde sol ve sağ oda basınçları elde edilmiştir. Bu veriler Şekil 10'da gösterilmiştir.

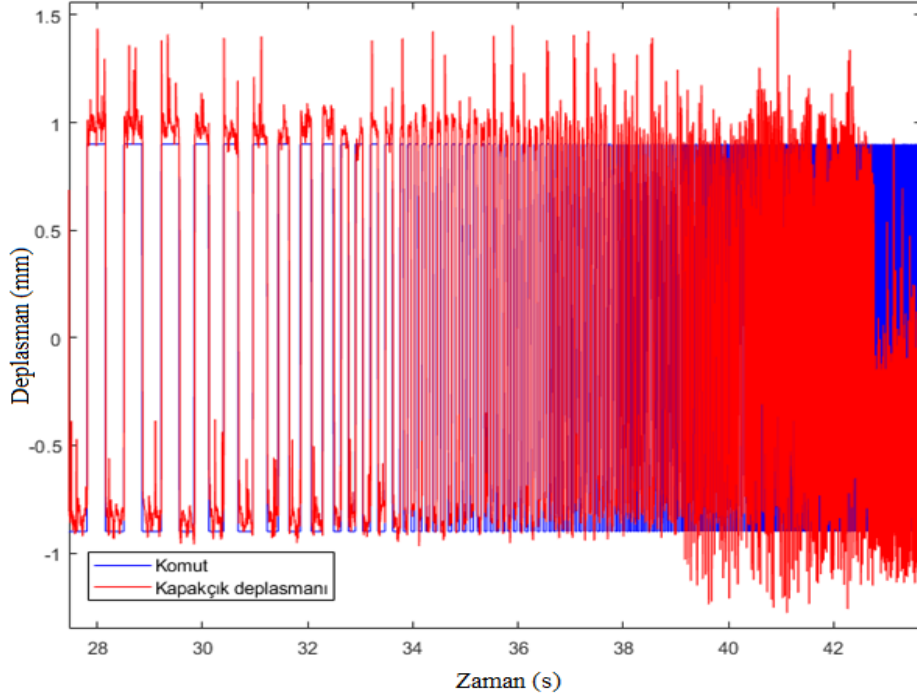
Ayrıca Şekil 10 incelendiğinde kanatçık altında kalan oda basınç değerlerinin 39 . saniye bölgesindeki $12,5$ Hz'lerden itibaren artan hızla düştüğü gözlenmiştir. $12,5$ Hz'lerden itibaren gözlenen bu durum solenoidin $12,5$ Hz'lerden itibaren istenilen komuta gidemediği için odalarda basınç kaybı yaşandığına veya havanın basınçlanabilmek için yeterince zaman bulamadığına bağlanmaktadır. Ayrıca sol oda basınçlarının (P_2) sol oda basınçlarına (P_3) göre bir miktar daha düşük kaldığı görülmektedir. Bu durum sol kanatçık ve sağ kanatçık bölgesinin üretim tolerans ve hatalarından kaynaklı orifis



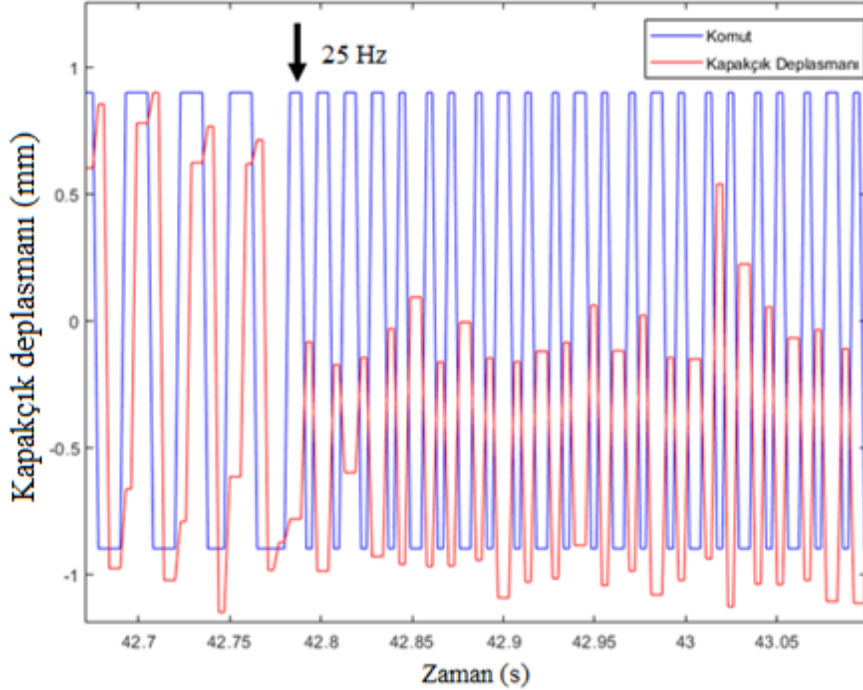
Şekil 10. Performans testleri boyunca oda basınç değerleri (The pressure values in the chambers through performance tests)



Şekil 11. Düşük frekans bölgesindeki oda basınç değerleri (The pressure values at low frequency region)



Şekil 12. Testler esnasında kapakçık komut ve deplasman verileri (The command and displacement values of the vane during test)



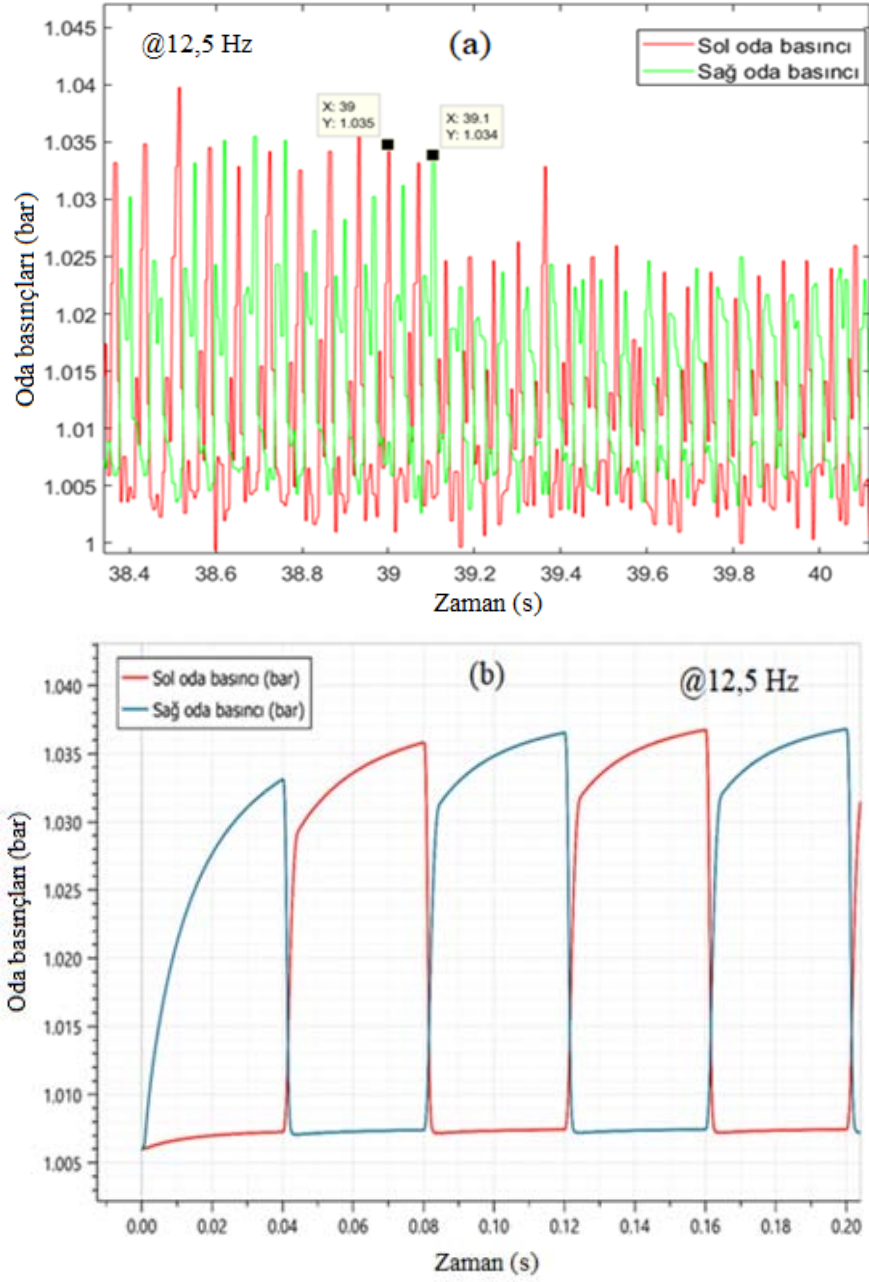
Şekil 13. Kapakçık deplasmanın azaldığı bölge (The part decreasing displacement of the vane)

alanlarının değişmesine bağlanmaktadır. Düşük frekans bölgesinde (~1 Hz) basınçların yakından görünümü Şekil 11’de verilmiştir.

Dinamik testlerde ayrıca solenoidin bağlı olduğu kapakçık deplasmanı gözlemek amacıyla lineer potansiyometre ölçülmüştür. Ölçülen bu deplasman verisi ve ölçeklendirilmiş 24 V komut verisi Şekil 12’de gösterilmiştir. Şekil 12’de gösterilen verilerde lineer potansiyometre deplasman verisinde gözlenen

salınımlı aşımalar, solenoidin plastik malzemeden üretilmiş kapakçık parçasını esnetmesi sonucunda oluşmuştur.

Solenoid deplasmanı Şekil 13’deki gibi yakından incelendiğinde özellikle 25 Hz (42,8 saniye) bölgesinden itibaren solenoidin kapakçığı tam kapatamadığı görülmektedir. Şekil 10 ve Şekil 13 karşılaştırıldığında Şekil 10’da 12,5 Hz’lerden başlayan düşüşün sadece solenoid dinamiğine bağlı olmadığı anlaşılmıştır.

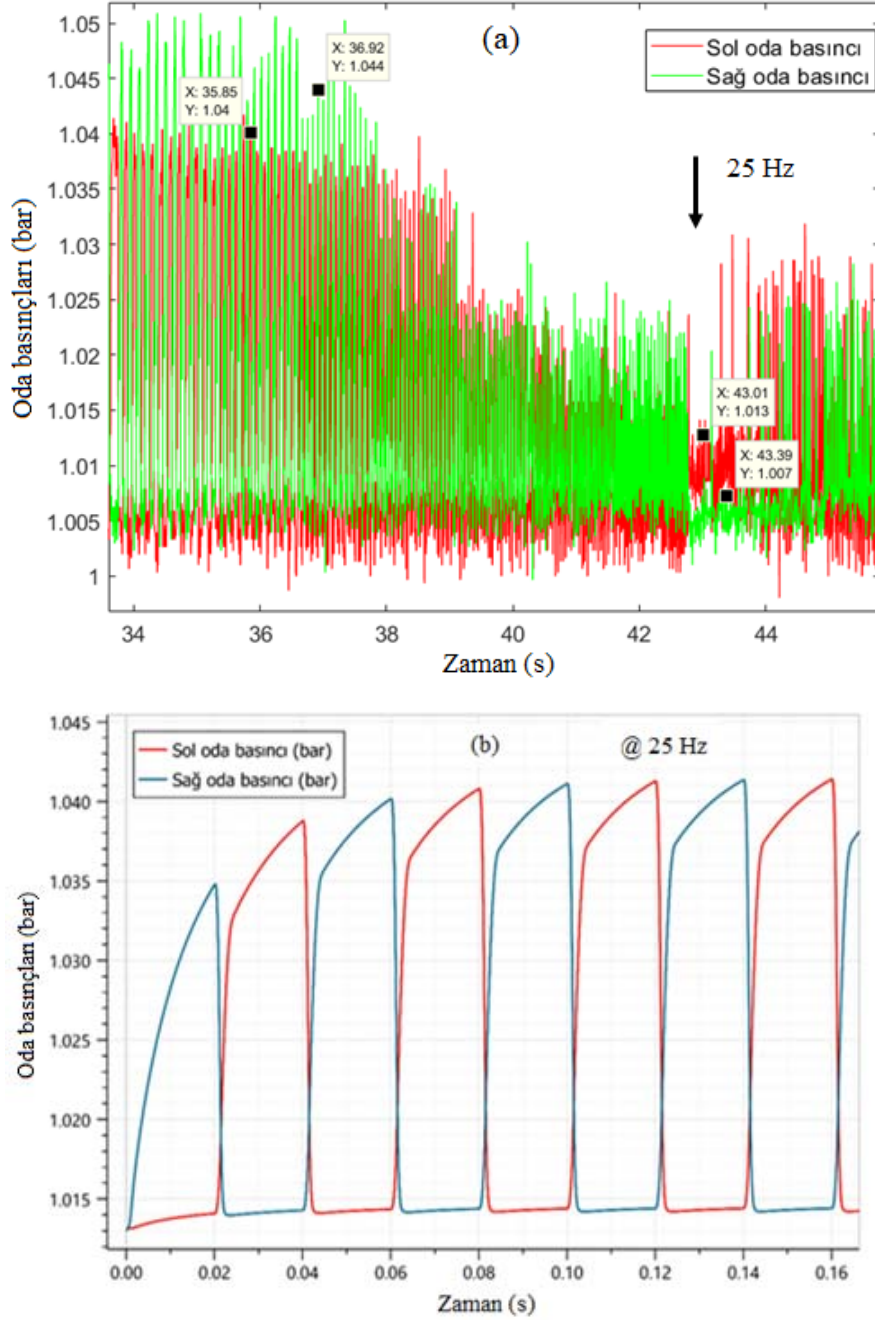


Şekil 14. Amesim ve test basınç verilerinin 12,5 Hz'deki kıyası (The comparison of Amesim and test pressure values at 12.5 Hz)

Çünkü solenoid Şekil 13'e 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. Bu sayede test ve simülasyondaki basınç verileri 12,5 ve 25 Hz'de kıyaslanmış ve kapakçığın kapatıp kapatmadığı anlaşılmıştır.

Şekil 14 ve Şekil 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 14 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 alıkları KTS simülasyon 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. Modelleme çalışmalarının test sonuçlarına yakın olduğu görülmektedir. 5 Hz sistem ön gereksinim hedefinde istenilen cevap elde edilse de hava debisinin artışı ile bant genişliğinin artabileceği tahmin edilmektedir. Bu durum matematiksel olarak düşünüldüğünde, hava debisini artışı ile basıncın birim zamanda artışını (basınç kazancı) artırmakta ve sistemdeki gazın hızı artmaktadır [18]. Dolayısıyla bu teoriyi doğrulamak için modelleme çalışmasında sisteme beslenen hava debisi iki katına çıkarılarak (0,0048 kg/s) 5 Hz'deki analiz tekrar edilmiştir. Bu analiz sonucunda Şekil 16'daki sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 16'daki 5 Hz analiz cevaplarına göre kütleli debideki artış, havanın dinamikliğini artırarak faz kaymasını $63,9^\circ$ 'den $33,66^\circ$ 'ye düşürmüştür. Dolayısıyla burundan içeri alınan havanın kütleli debisinin artması KTS'nin bant genişliğini artırabilmektedir. Hava alığı tasarımı yapılırken bu konuya dikkat edilmesi ve en verimli şekilde havanın içeri alınması



Şekil 15. Amesim ve test basınç verilerinin 25 Hz'deki kıyası (The comparison of Amesim and test pressure values at 25 Hz)

gerekmektedir. Ancak hava alığının uçuş rejimine bağlı olarak geometrisinin ve çaplarının tasarımı bu çalışma kapsamında bulunmamaktadır.

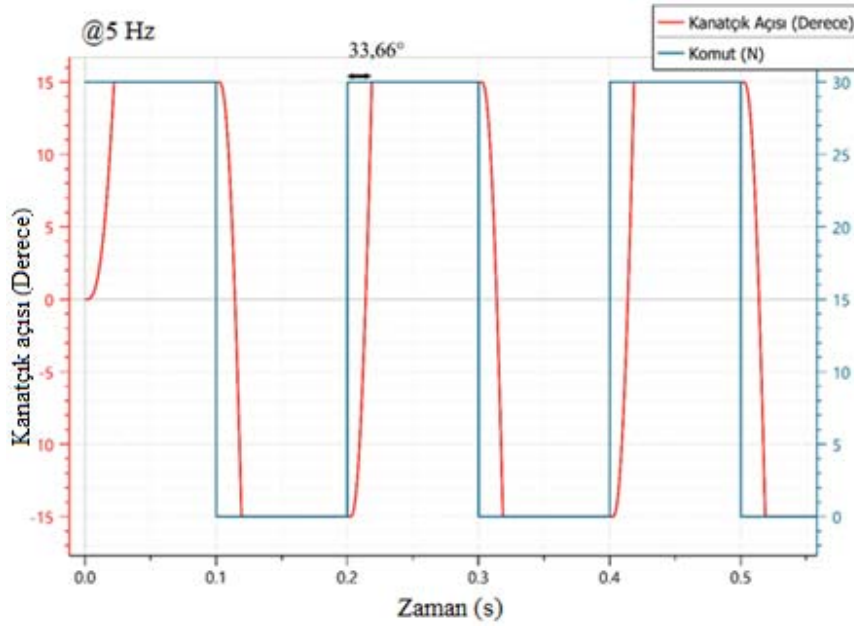
4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada füze / roket kontrol tahrik sistemleri için ucuz ve basit yapıya sahip olan hava alıklı elektro-pnömatik kontrol tahrik sistemine ait modelleme çalışmalarının simülasyonla kıyası yapılmıştır. Modelleme çalışmalarında Amesim yazılımından yararlanılmıştır. Test ve değerlendirme aşamasında Labview ve National Instruments yazılım-donanımları kullanılmıştır.

2340

İlk olarak sistemin mekanik limitleri ilk konum kabul edilerek basamak cevapları incelenmiştir. Simülasyon ve test cevaplarının benzer olduğu görülmüştür. Ayrıca sistemin frekans cevabını incelemek için 1 Hz'den 35 Hz'e kadar frekans aralığı taranmıştır. Elde edilen sonuçlara göre simülasyonlarda 7,15 Hz'de, testlerde ise 8,33 Hz'de 90° faz kayması meydana gelmiştir. Ek olarak yaklaşık 15 Hz'den sonra simülasyon ve testlerde genliklerde kayıplar ve bozulmalar meydana gelmiştir.

Kontrol tahrik sisteminin ön tasarım gereksinimi sistem mühendisliği birimi tarafından 5 Hz olarak belirlenmiştir. Belirlenen koşullara göre test ve simülasyonlar tekrarlanmıştır ve sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 16. 5 Hz’de kütleli debisi artırılmış frekans cevabı (The frequency response of the increased mass flowrate at 5 Hz)

Simülasyonlarda kanatçık açısı 5 Hz hedef frekansında $63,9^\circ$ faz farkı ile komut sinyalinin başarı ile takip etmiştir. Hava kaynağı ile yapılan testlerde ise kanatçık açısı genlik kaybına uğramadan komutu $59,5^\circ$ faz açısı ile takip etmiştir. Ayrıca 25 Hz’lerden itibaren solenoidin kapakçığı tam olarak kapatamadığı gözlemlenmiştir. Ancak basınç verileri frekansa bağlı olarak incelendiğinde kapakçığın tam olarak kapatılmamasının tek sebebinin solenoid kuvveti olmadığı, artan frekansla birlikte oda basınç değerlerindeki düşüşün de rol oynadığı görülmüştür. Son olarak hava debisinin artışı ile bant genişliğinin arttığı simülasyon sonuçları ile gösterilmiştir.

Nihai olarak test sonuçları ve simülasyon verileri uyumludur. Amesim modeli büyük oranda testlerle doğrulanmış ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar için temel oluşturmuştur.

Kaynaklar (References)

1. Parker. Innovations in Flight Control Systems and Subsystems. <https://www.parker.com/Literature/Control%20Systems%20Division/CSD%20literature/CSDBrochure.pdf>. Yayın tarihi 2011. Erişim tarihi Şubat 22, 2023.
2. Honeywell. Actuation Solutions. <https://aerospace.honeywell.com/content/dam/aero/en-us/documents/learn/products/actuation/brochures/N61-1575-000-001-ActuationSolutions-bro.pdf>. Yayın tarihi 2018. Erişim tarihi Şubat 22, 2023.
3. Gültekin A.M., Kılıçaslan S., Estimation of dynamic model of a missile fin with freereplay by using system identification methods, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 37 (4), 1899-1913, 2022.
4. Thayer, W.J., Electropneumatic Servoactuation an Alternative to Hydraulics for Some Low Power Applications. https://www.moog.com/content/dam/moog/literature/Space_Defense/Technical_Bulletins/Technical_Bulletin_151.pdf. Yayın tarihi 1988. Erişim tarihi Şubat 22, 2023.
5. Davis, M.A. High Performance Electromechanical Servoactuation Using Brushless Dc Motor. https://www.moog.com/content/dam/moog/literature/Space_Defense/Technical_Bulletins/Technical_Bulletin_150.pdf. Yayın tarihi 1984. Erişim tarihi Şubat 22, 2023.
6. Zhou, M., Mao, D., Zhang, M., Guo, L., Gong, M., A Hybrid Control with PID–Improved Sliding Mode for Flat-Top of Missile Electromechanical Actuator Systems, Sensors (Basel), 18 (12), 1-15, 2018.
7. Qiao, G., Liu, G., Shi, Z., Wang, Y., Ma, S. and Lim, T.C., A Review of Electromechanical Actuators for More/All Electric Aircraft Systems, Proc IMechE Part C: J Mechanical Engineering Science, 232 (22), 4128-4151, 2018.
8. Bağlar, E.T., Baysal, C.V., Yapay Pnömatik Kaslar için Denetim Kiplerinin Hızlı Aç/Kapa Valfler Kullanarak Deneysel Bir Değerlendirmesi, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 35 (2), 401-412, 2020.
9. Krivts, I.L., Optimization of Performance Characteristics of Electropneumatic (Two-Stage) Servo Valve, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 126 (2), 416-420, 2004.
10. Richer, E. and Hurmuzlu, Y., A. High Performance Pneumatic Force Actuator System: Part I: Nonlinear Mathematical Model, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 122 (3), 416-425.
11. Moog. Servo Valves. https://www.moog.com/literature/ICD/Moog_ServoValves_72Series_Catalog_en.pdf. Yayın tarihi 2018. Erişim tarihi Şubat 22, 2023.
12. Lin, C.J., Sie, T.Y., Chu, W.L., Yau, H.T., Ding, C.H., Tracking Control of Pneumatic Artificial Muscle-Activated Robot Arm Based on Sliding-Mode Control, MDPI Actuators, 10 (3), 1-18, 2021.
13. Hejrati, B., Najafi, F., 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, 2012.
14. Xavier, M.S., Fleming, A.J., Yong, Y.K., Model-Based Nonlinear Feedback Controllers for Pressure Control of Soft Pneumatic Actuators Using On/Off Valves, Frontiers in Robotics and AI, 9, 1-15, 2022.
15. Poçari, S., Londo, A., Mathematical Modelling Simulation and Experimental Verification of a Pneumatic System, European Journal of Engineering and Technology, 6, 1-12, 2018.
16. Gade, M.M., Mangrulkar, K.K., Modeling and PWM Control of ElectroPneumatic Actuator for Missile Applications, IFAC Papers Online, 51 (1), 237-242, 2018.
17. Abd-Altief, M.A., El-Sheikh, G.A., and Dogheish, M.Y., Anti-Tank Guided Missile Performance Enhancement Part-1: Hardware in the Loop Simulation, Proceedings of the 5th ICEENG Conference, Cairo-Egypt, 1-14, 16-18 Mayıs, 2006.
18. Ercis, O.F., Keleş, Ö., Hava Aıklı Elektro-Pnömatik Bir Sistem Modellemesi ve Simülasyonu, The Journal of Defense Sciences, 38, 44-67, 2020.
19. Laodong. 9M113 Kornet. <http://vieclam.laodong.com.vn/vukhi/sucmanh-ten-lua-sieu-khung-kornetem-cua-nga-189873.bld>. Yayın tarihi 2014. Erişim tarihi Şubat 22, 2023.

20. Anwaralsharradmbt. AT-14 Kornet (2012), 21 Haziran 2020'de <http://anwaralsharradmbt.blogspot.com/2012/08/at-14-kornet.html>. Yayın tarihi 2012. Erişim tarihi Şubat 22, 2023.
21. Armedconflicts. 9K115 Metis. <https://www.armedconflicts.com/9K115-Metis-9-1050-115-1052-1077-1090-1080-1089-t26889#360912>. Yayın tarihi 2010. Erişim tarihi Şubat 22, 2023.
22. Cococi, V.N., Safta, C.A., Calinoiu, C., Parameter tuning process for a closed-loop pneumatic actuator, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 664, 1-10, 2021.
23. Analizsimulasyon. Amesim. <https://analizsimulasyon.com/amesim/>. Yayın tarihi 2016. Erişim tarihi Şubat 22, 2023.
24. Ercis, O.F., Hava Alıklı Kontrol Tahrik Sistemi Tasarımı ve Modellemesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2021