



# SOĞUK GAZ İTKİ KONTROL SİSTEMİNİN PNÖMATİK AKIŞ KONTROLÜNÜN BENZETİMİ

Yusuf SİLİK  
Semih TANIKER  
Ulaş YAMAN

## ÖZET

Bu çalışma kapsamında bir soğuk gaz itki kontrol sisteminin pnömatik akış kontrolünün benzetimi yapılmıştır. Soğuk gaz itki kontrol sistemi, uzay araçlarının konum kontrolünde kullanılan reaksiyon kontrol yöntemlerinden birisidir. İtki, basınç regülatöründen sağlanan sabit basınçlı gazın pnömatik akış kontrol valfinin kontrolü ile sağlanır. Valften çıkan akış, momentum korunumu prensibine göre akışın yönüne ters bir kuvvet oluşturur. Sistemin benzetiminde pnömatik akış kontrol valfi olarak, düşük maliyetlerine karşın yeterli akış kontrol etkinliği nedeniyle, aç/kapa solenoid valf modeli kullanılmıştır. Aç/kapa valf kullanarak sürekli kuvvet kontrolü yapabilmek için Darbe Genişlik Modülasyonu yöntemi uygulanmıştır. Darbe genişlik modülatörünün frekans ve doluluk-boşluk yüzdesi limitlerini belirleyebilmek için valfin çubuk konumu ile akım benzetimi Matlab/Simulink modeli hazırlanarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra tasarlanan modülatör ile hazırlanan model kullanılarak açık çevrim itki kontrol benzetimi yapılmıştır. Böylece itki sisteminin eyleyici olarak kontrolü sağlanmış ve limitleri belirlenmiştir. Modellenen ve açık çevrim kontrolü yapılan eyleyicinin bir kapalı çevrim kontrol uygulamasında başarımını test edebilmek için dönü ekseninde aç kontrol çalışması gerçekleştirilmiştir. Bunun için tek serbestlik dereceli (dönü eksen) bir platformun dinamik modeli oluşturulmuş ve eyleyicinin bu platformdaki yerleri belirlenmiştir. Bir kapalı çevrim kontrol algoritması ile platformun aç kontrol benzetimi yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Aç/Kapa valf kontrolü, Darbe genişlik modülasyonu, Durum geri beslemeli kontrolcü tasarımı, Reaksiyon kontrolü, Soğuk gaz itki sistemleri.

## ABSTRACT

In this study, simulation of a pneumatic flow control of a cold gas thrust control system has been performed. Cold gas thrust control system is one of the reaction control systems that is used for position control of space vehicles. Controlled thrust is obtained using the constant pressure flow, which is supplied by a regulator valve, controlled by the flow control valve. According to the law of conservation of momentum, flow expelled from a valve generates opposite force to the flow direction. Due to low cost, on/off solenoid valve model is used as a flow control valve in the simulation. In order to obtaining continuous output Pulse Width Modulation technique has been employed using on/off valve. Frequency and duty cycle limits of the pulse width modulation modulator are designated using plunger position and current simulation of the solenoid valve in Matlab/Simulink environment. After all, open loop control simulation of an output thrust is accomplished using designed modulator and prepared model. By controlling output thrust, continuous output actuator model is obtained for position control and its limits are determined. To be able to observe the closed loop control performance of the actuator, roll control simulation is also realized. For this simulation, a dynamic model of a single degree freedom (roll axis) platform is obtained and the position of the actuators on the platform is modelled. By using closed loop control approach, roll control simulation is done.

**Key Words:** On/Off valve control, Pulse width modulation, State feedback controller design, Reaction control, Cold gas thruster systems.

## 1. GİRİŞ

Havacılık uygulamalarında kontrol yüzeyi olarak genellikle aerodinamik kanatlar kullanılır. Aerodinamik kanatların kullanımının uygun olmadığı durumlar aşağıdaki aerodinamik kuvvet eşitliği ile açıklanabilir:

$$F \propto \rho V^2 \quad (1)$$

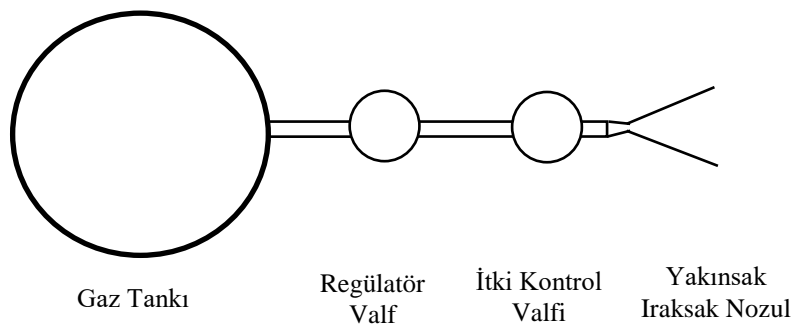
Eşitlikten görülebileceği üzere aerodinamik kuvvet ortamın yoğunluğu ve kontrol yüzeyi ile ortam arasındaki bağıl hızın karesi ile doğru orantılıdır. Dolayısıyla ortam yoğunluğunun düşük olduğu yüksek atmosfer uygulamaları ve bağıl hızın düşük olduğu uygulamalarda aerodinamik kanat kullanmak verimsiz bir yöntemdir. Ayrıca, yüksek manevra kabiliyeti gereksinimi olan uygulamalarda, sınır tabaka ayrılması limitinden dolayı aerodinamik kanat kullanılması verimsiz olabilmektedir.

Yukarıda bahsedilen aerodinamik kanatçık kullanımının uygun olmadığı havacılık uygulamalarında kontrol yüzeyi olarak reaksiyon kontrol yöntemleri kullanılır. Başlıca reaksiyon kontrol sistemleri reaksiyon tekerleği, kontrol moment jiroskopu, manyetik tork üreticiler ve itki sistemleridir.

Bu yayında reaksiyon kontrol sistemi olarak en çok tercih edilen yöntem olan itki sistemlerinin akış kontrolü ve eyleyici olarak kontrol uygulamasında kullanımı incelenecektir. İtki sistemleri Newton'un üçüncü kanunu olan etki tepki prensibine göre çalışırlar. Hava aracından belirli bir hız ve kütle debisi ile salınan gaz, araç üzerinde akışa ters yönde kuvvet oluşturur. Diğer yöntemlere göre başlıca avantajları tepki sürelerinin kısa olması, tork değil kuvvet üretebilmeleri ve geniş bir aralıkta kuvvet üretebilmeleridir.

Bu yayında incelenecek soğuk gaz itki sistemleri dışında tek yakıt, çift yakıt, plazma ve arkjet gibi sıcak gaz itki sistemleri bulunmaktadır. Soğuk gaz itki sistemleri, diğer sistemlere göre daha düşük özgül itme ve maksimum itki değerlerine sahiptirler. Buna rağmen basit tasarım ve düşük maliyetleri ile havacılık ve uzay uygulamalarında sıkça kullanılmaktadır.

Soğuk gaz itki kontrol sisteminin temel elemanları Şekil 1'de verilmiştir. Gaz tankında yüksek basınçta gaz depolanmaktadır. Gaz tankı çıkışındaki regülatör valf itki kontrol valfine sabit basınçta akış sağlar. İtki kontrol valfi akış kütle debisini açıp kontrol ederek itkiyi kontrol eder. İtki kontrol sistemlerinin çoğunda itki seviyesinin artırılması ve düzenli bir akış sağlanabilmesi için yakınsak iraksak nozul kullanılır. Bu yayında hesaplamalar ve benzetimler yapılırken regülatör valf çıkışında sabit basıncın sağlandığı varsayılacaktır.



Şekil 1. Soğuk gaz itki kontrol sistemi şeması.

İtki sistemlerinde itki kontrol valfi olarak genellikle aç/kapa valfler tercih edilir. Aç/kapa valf kullanılarak diferansiyel akış elde edebilmek için frekans tabanlı yöntemler kullanılmaktadır. Literatürde frekans temelli farklı yöntemler bulunmaktadır. Bu yayında sabit frekansta doluluk-boşluk oranının değiştirilerek diferansiyel çıktı alınan darbe genişlik modülasyonu tekniği kullanılacaktır.

Darbe genişlik modülasyonu itki kontrol sistemlerinin yanı sıra aç/kapa valflerin düşük maliyet ve yüksek güvenilirlik gibi özellikleri nedeniyle endüstride pnömatik ve hidrolik uygulamalarda tercih edilmektedir. Steinsland [1] darbe genişlik modülasyonu yöntemi ile aç/kapa valf kullanarak kamyon rötardarına yönelik hava freni uygulaması yapmıştır. Carantu [2] ise üç yollu solenoid valf kullanarak darbe genişlik modülasyonu ile otomatik vites debriyaj kontrolü sağlamıştır.

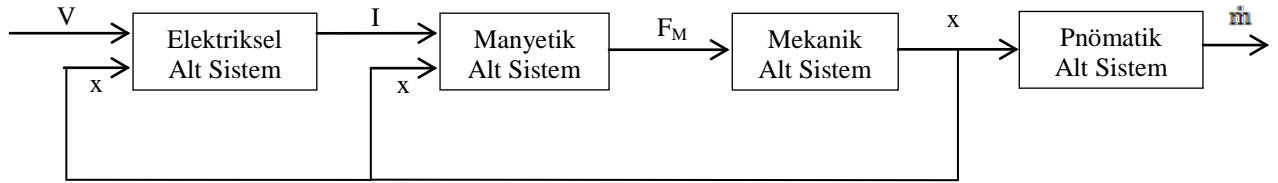
Uzay uygulamalarında, Sarli [3] itki sistemi için kayma modu kontrolcüsü ile darbe genişlik modülasyonu tasarlamış; Sarah [4] ise ay yüzeyine yer değiştirme için kullanılması planlanan araç için aç/kapa iticileri darbe genişlik modülasyonu ile kontrol etmiştir.

Yayında sırasıyla aç/kapa valf matematiksel modeli, darbe genişlik modülatör tasarımı ve durum geri beslemeli kontrol uygulaması konuları işlenecektir.

## 2. SOLENOİD VALF MATEMATİKSEL MODELİ

Bu bölümde itki sistemi benzetiminde kullanılacak solenoid valfin matematiksel modelinin çıkarımı verilecektir. İtki sisteminde kullanılacak valf iki yollu ve normalde kapalı konfigürasyonda olmalıdır. Solenoid valf, solenoid çubuğunun hareketi ile orifisi açıp kapatarak akışı kontrol eder. Çubuğun hareketi, çubuk etrafına sarılmış olan bobine akım verilerek manyetik kuvvet oluşturulması ile sağlanır. Çubuk akım verilmediği durumda bir yay yardımı ile kapalı durumda kalır. Konvansiyonel solenoid valflerde çubuğun pozisyon bilgisi bir kontrolcüye geri beslenmez ve akış üzerinde sadece aç/kapa kontrolü gerçekleştirilebilir.

Solenoid valf modeli kolay anlaşılması açısından dört alt sistemde incelenecektir. Bunlar elektriksel, manyetik, mekanik ve pnömatik alt sistemlerdir. Alt sistemlerin birbirleri ile ilişkileri Şekil 2'de verilmiştir. Bu ilişkiler sonraki bölümlerde detaylı bir şekilde anlatılacaktır.



Şekil 2. Solenoid valf alt sistem şeması.

### 2.1. Elektriksel Alt Sistem

Solenoid valfin elektriksel alt sistemi seri şekilde bağlanmış voltaj kaynağı, direnç ve indüktans olarak modellenebilir. Fakat devrenin indüktansı solenoid çubuğun hareketine göre değişmektedir. Modelin devre gösterimi ve sistem grafiği Şekil 3'te verilmiştir.

Sistemin eleman eşitlikleri direnç ve indüktans üzerindeki voltaj farkıdır. Direnç üzerindeki voltaj farkı:

$$V_R = Ri \quad (2)$$

İndüktans üzerindeki voltaj farkı, indüktansın bağımlı değişken olmasından dolayı klasik indüktans eşitliği ile yazılamaz. İndüktansın değişimi çubuğun hareketiyle değişen akı bağından kaynaklanmaktadır. İndüktans üzerindeki voltaj farkı aşağıdaki gibi yazılabilir [5].

$$V_L = \frac{d\lambda(x)}{dt} \quad (3)$$

Burada akı bağı:

$$\lambda = L(x)I \quad (4)$$

eşitliği ile ifade edilir.

Yukarıdaki iki eşitlik kullanılarak, indüktans üzerindeki voltaj farkı aşağıdaki gibi elde edilebilir.

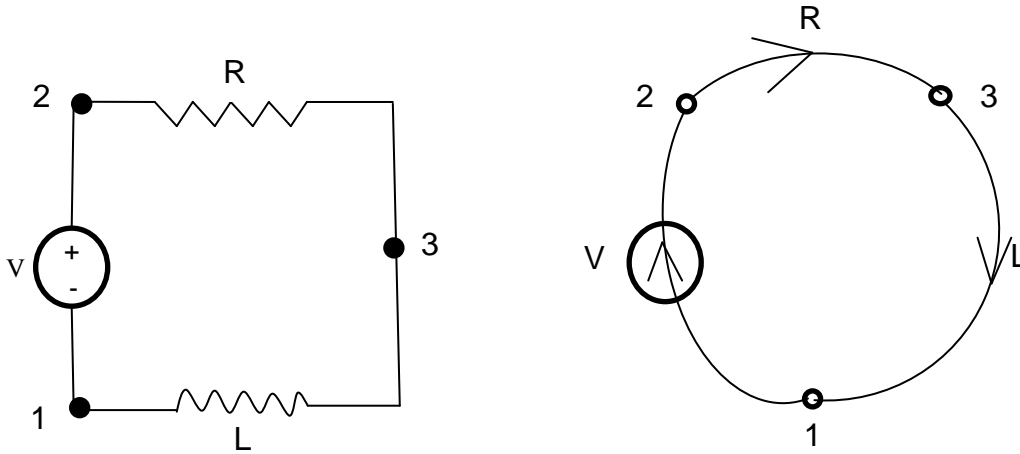
$$V_L = \frac{d\lambda(x)}{dt} = L(x) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(x)}{dt} \quad (5)$$

Yukarıdaki eşitlikte görüldüğü üzere indüktans çubuk pozisyonuna bağlıdır. Literatürde solenoid indüktansının farklı şekillerde modellendiği ile karşılaşılmıştır. Makled [6] yaptığı deneysel çalışma ile indüktansı üçüncü dereceden bir fonksiyon ile modellemiştir. Bu model ve diğer modeller grafik üzerinde incelendiğinde, eşitliklerin doğrusala çok yakın eşitlikler olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, indüktans davranışının farklı solenoidler için farklı davranışları olacağı düşünülmektedir. Bu sebeplerden dolayı bu çalışmada indüktans doğrusal olarak modellenmiştir. Böylece bir solenoidin açık ve kapalı durumdaki indüktansı bilinirse kolayca modele eklenebilir.

$$L(x) = L_{off} + \frac{L_{off} - L_{on}}{\delta} x \quad (6)$$

Sistemin bağdaşıklık eşitliği aşağıdaki gibidir.

$$V - V_R - V_L = 0 \quad (7)$$



Şekil 3. Elektriksel alt sistem devresi ve sistem grafiği.

## 2.2. Manyetik Alt Sistem

Solenoid çubuğuna etki eden manyetik kuvvet, manyetik akı ve bobin üzerinden geçen akımın fonksiyonudur. Bobinin indüktansı aşağıdaki eşitlikte verilmiştir [5]:

$$L(x) = N^2 L_0 f(x) \quad (8)$$

Manyetik akı [5]:

$$\lambda(I, x) = N^2 L_0 I f(x) \quad (9)$$

Manyetik kuvvet aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir.



$$F = \frac{\partial W}{\partial x} \quad (10)$$

Burada yapılan iş aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$W = \int \lambda dI = \frac{N^2 L_0 I^2}{2} f(x) \quad (11)$$

Yukarıdaki eşitlikler kullanılarak çubuğa etki eden manyetik kuvvet bulunur.

$$F = \frac{N^2 L_0 I^2}{2} \frac{df(x)}{dx} \quad (12)$$

Burada  $L_0$  yaklaşık olarak aşağıdaki gibi verilebilir.

$$L_0 = \frac{A_x \mu_0}{2} \quad (13)$$

Kuvvet fonksiyonunun pozisyona bağımlı bobin ile çubuk arasındaki boşluk değişiminden dolayıdır. Bu değişim aşağıdaki gibidir.

$$f(x) = \frac{1}{x_0 - x} \quad (14)$$

Sonuç olarak çubuğa uygulanan manyetik kuvvet aşağıdaki eşitlik ile bulunabilir.

$$F = \frac{N^2 A_x \mu_0 I^2}{4} \frac{1}{(x_0 - x)^2} \quad (15)$$

### 2.3. Mekanik Alt Sistem:

Solenoid valfin mekanik alt sistemi kütle-yay-sönümleyici olarak modellenebilir. Solenoid çubuğuna etki eden kuvvetler; yay kuvveti, viskoz sürtünme kuvveti, akış basıncı kuvveti ve manyetik kuvvetlerdir. Bu kuvvetlerin yönleri valf konfigürasyonuna göre değişebilmektedir. Normalde kapalı tek yönlü valflerde yay kuvveti valfe kapanma yönünde, manyetik kuvvet açılma yönünde kuvvet uygular. Akış basıncından kaynaklanan kuvvet, giriş ve çıkış basınçları arasındaki farktan kaynaklanır. Tasarıma göre değişebilmesine rağmen genellikle valfe açılma yönünde kuvvet uygular. Viskoz sürtünme kuvveti ise tanımı gereği harekete ters yönde bir kuvvet uygular. Bunların dışında valfi kapalı tutan bir ön yük bulunmaktadır. Bu ön yük çubuğa bağlı yayın sıkıştırılması ile elde edilir. Mekanik alt sistemin şematiği ve sistem grafiği Şekil 4'te verilmiştir.

Yay, viskoz sürtünme ve kütlelerin eleman eşitlikleri aşağıda verilmiştir.

Yay kuvveti:

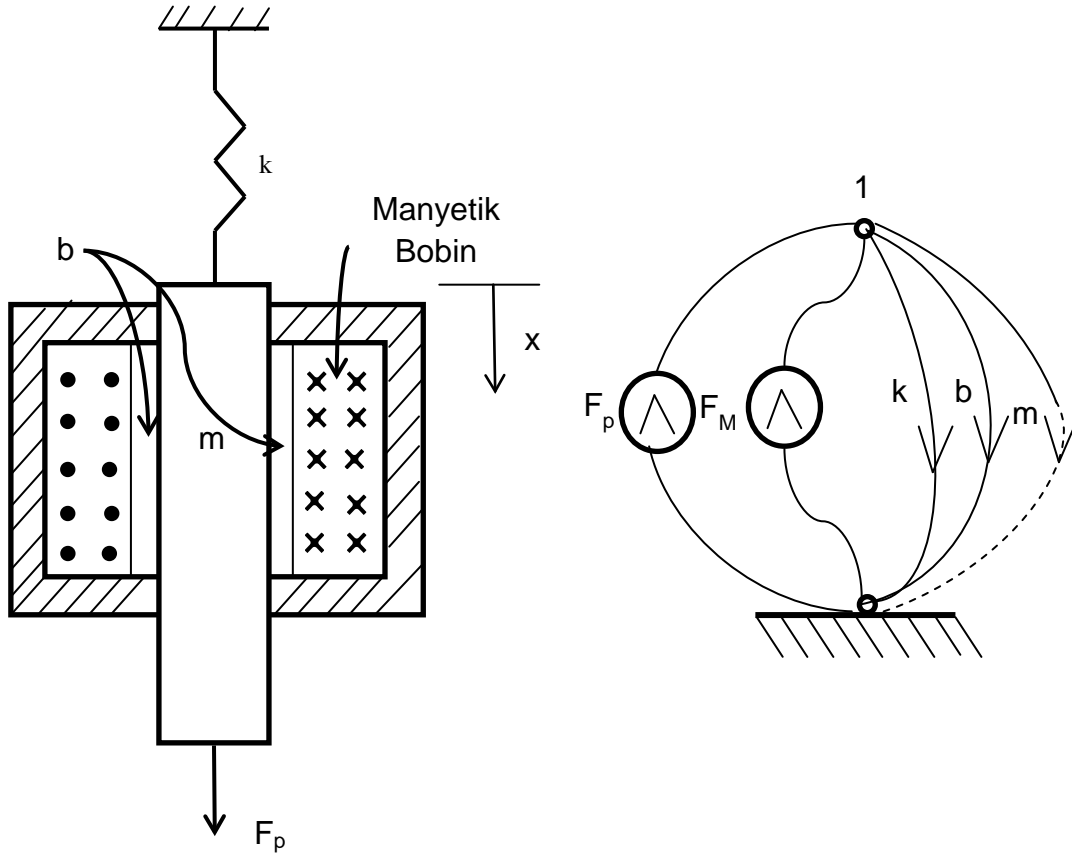
$$F_k = kx \quad (16)$$

Viskoz sürtünme kuvveti:

$$F_b = b\dot{x} \quad (17)$$

D'Alembert Prensibine göre ataletsel eşitlik:

$$F_m = m\ddot{x} \quad (18)$$



Şekil 4. Mekanik alt sistem şematiği ve sistem grafiği.

Akış basıncından kaynaklanan kuvvet ise aşağıda verilmiştir. Bu kuvvet daha önce bahsedildiği gibi giriş ve çıkış basınçlarının fonksiyonudur. Gerçek bir sistemde valfin açılma süresince giriş ve çıkış basınçlarında değişiklikler olması beklenir. Bu değişiklik akışkanın gaz tankı ve pnömatik bağlantılardaki kapasitif ve indükleyen davranışlarından dolayıdır. Topçu [7] bu değişimleri yapılan deneysel çalışma ile ortaya koymuştur. Bu değişiklikleri modellemenin zor olması ve modelde basitliği sağlamak için; valf giriş ve çıkış basınçları sabit alınmıştır.

$$F_{prs} = \frac{(P_u - P_d) \pi d^2}{4} \quad (19)$$

Mekanik sistemin bağdaşıklık eşitliği aşağıda verilmiştir:

$$F_p + F_M - F_k - F_b - F_m - F_{prs} = 0 \quad (20)$$

#### 2.4. Pnömatik Alt Sistem

Pnömatik valflerde akış eşitlikleri yazılırken, akışkanın sıkıştırılabilirliği ihmal edilemeyecek kadar etkili bir parametredir. Sıkıştırılabilir gaz eşitlikleri birçok termodinamik ve gaz dinamiği kaynaklarında çıkarılmıştır. Bu sebeple pnömatik valf eşitliği model içerisinde doğrudan kullanılmıştır [8].

$$\frac{m}{A} = C_d \sqrt{\frac{k}{R} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k-1}{k+1}} \frac{P_u}{\sqrt{T_u}} f_1 \left( \frac{P_d}{P_u} \right)} \quad (21)$$

Burada  $f_1$  farklı  $\frac{P_d}{P_u}$  oranları için aşağıdaki eşitlik ile ifade edilebilir.

$$f_1 \left( \frac{P_d}{P_u} \right) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{(k-1) \left( \frac{2}{k+1} \right)^{k-1}} \left( \frac{P_d}{P_u} \right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{1 - \left( \frac{P_d}{P_u} \right)^{\frac{k-1}{k}}} & , \left( \frac{P_d}{P_u} > 0.528 \text{ (Hava için)} \right) \\ 1 & , \left( \frac{P_d}{P_u} < 0.528 \text{ (Hava için)} \right) \end{cases} \quad (22)$$

Yukarıdaki eşitliklerde gaz sabiti (R) ve ısı sığası oranı (k) ideal gaz önermesi altında sabit değerlerdir. Eşitliklerde verilen  $f_1$  fonksiyonu ise gazın valf çıkışında boğulup boğulmama durumuna göre değişmektedir. İtki sistemlerinde valfin giriş ve çıkış basınç oranları hava için verilen 0.528 oranından düşük olmaktadır. Valf çıkışına bir yakınsak iraksak nozul koyulmadığı sürece gaz valfte boğulacaktır. İtki sistemlerinde akışkanın çıkış hızını arttırabilmek için yakınsak iraksak nozul çoğunlukla kullanılır. Fakat bu modelde kontrol eylemine doğrudan etkisi olmayan bir parametre olacağı için yakınsak iraksak nozul yok sayılmıştır.

Pnömatik valf eşitlikleri kullanılarak valf çıkışındaki kütle debisi elde edilebilmektedir. İtki sisteminin bir eyleyici olarak ana performans parametresi kuvvet çıktısıdır. Momentumun korunumu eşitliğinden kuvvet çıktısı aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$F = \rho QV \quad (23)$$

Bu eşitlik aşağıdaki gibi de düzenlenebilir.

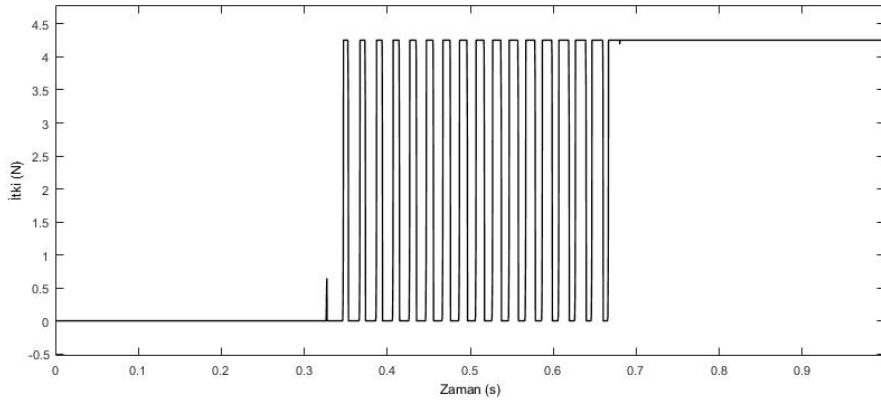
$$F = \dot{m}V \quad (24)$$

### 3. DARBE GENİŞLİK MODÜLATÖRÜ TASARIMI

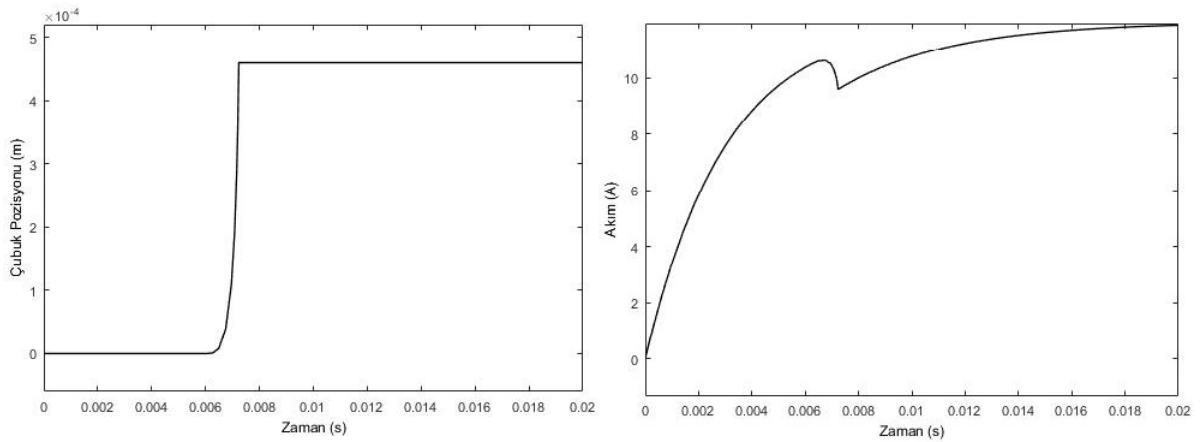
Aç/kapa valf kullanılarak diferansiyel çıktı alabilmek için darbe genişlik modülatörü kullanılacaktır. Bu bölümde itki sistemi için en uygun parametrelerin seçilebilmesi için yöntem oluşturulacaktır. İtki sistemlerinde hassas kontrol etkinliğini sağlayabilmek için eyleyiciden yüksek çözünürlükte çıktıya gereksinim duyulabilmektedir. Bu sebeple modülatörün doluluk-boşluk oranı limitleri gereksinimlere göre belirlenmelidir. Öte yandan sistemin yüksek frekanstaki kontrol komutlarını gerçekleştirebilmesi için yüksek modülatör frekansına ihtiyaç duyulabilir.

Doluluk-boşluk oranı limitlerini açıklayan 50 Hz'te yapılmış bir benzetimin sonuçları Şekil 5'te verilmiştir. Benzetim seçilen valf parametreleri ile oluşturulan modele darbe genişlik modülatörü kullanılarak voltaj referansı verilmesi ile gerçekleştirilmiştir (Modülatörün doluluk-boşluk oranına birim rampa referansı verildi ve 1 saniyelik benzetim yapıldı. Böylelikle tek bir grafikte doluluk-boşluk oranı limitleri görülebilmektedir). Görüldüğü üzere modülatör 50 Hz frekansta çalışırken dar bir doluluk-boşluk oranı limitine sahiptir (Doluluk-boşluk oranı 0.35 altında valf açılmamakta ve 0.68 üstünde valf kapanmamaktadır).

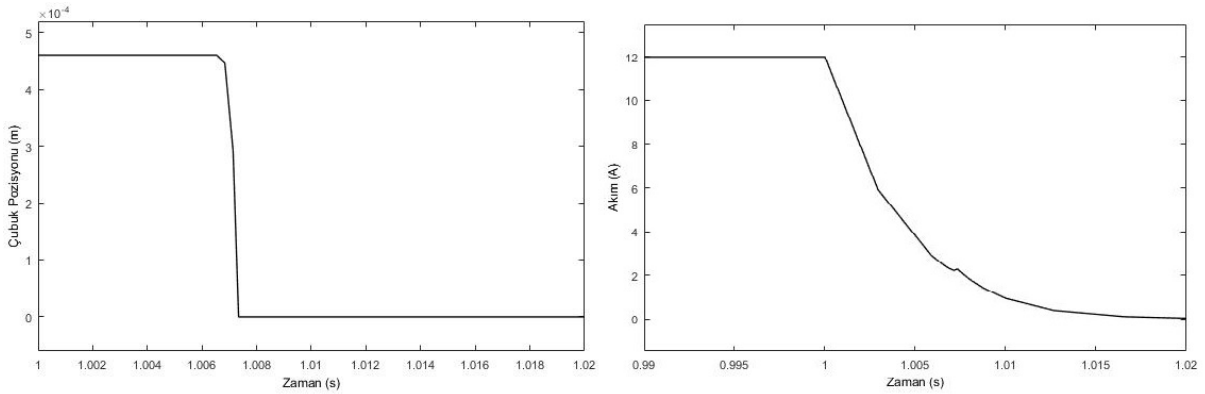
Modülatör frekansı seçimi için hazırlanan model ile benzetim çalışması yapılacaktır. Solenoid çubuk pozisyonu ile solenoid devresine uygulanan akımın grafiği Şekil 6'da verilmektedir. İki grafik karşılaştırıldığında çubuğun hareket ettiği an ile akımda oluşan düşüş anının örtüştüğü görülmektedir. Akımda olan ani düşüş solenoid çubuğunun hareketi sonucu indüktanstaki yükselmeden kaynaklanmaktadır. Bu bağlamda akımda gözlenen düşüş anı, çubuğun hareket ettiği, diğer bir deyiş ile valfin açılma, anını göstermektedir. Birçok solenoid valf konfigürasyonunda bulunan bu özellik sayesinde parametreleri bilinmeyen bir hazır valfin akımı gözlenerek açılma süresi bilinebilir. Aynı durum Şekil 7'de görüldüğü üzere kapanma süresi için de geçerlidir.



Şekil 5. 50 Hz frekans benzetimi.



Şekil 6. Solenoid çubuk pozisyonu ile akım benzetimi (açılma).



Şekil 7. Solenoid çubuk pozisyonu ve akım benzetimi (kapanma).

Modülâtör tasarımı %10 ile %90 doluluk-boşluk oranı değerlerinde çalışma gereksinimini karşılayacak şekilde yapılacaktır. Bu gereksinim için modülâtörün frekansı belirlenecektir.

Solenoid çubuğunun açılma süresi Şekil 6'daki akım benzetiminden 7.25 milisaniye olarak bulunmaktadır. Çubuğun kapanma süresi ise Şekil 7'deki akım benzetimi grafiğinden görüleceği üzere 7.3 milisaniyedir.

Benzetimi yapılan valf için düşük doluluk-boşluk oranı gereksinimini sağlayan frekansı bulmak için aşağıdaki formül kullanılabilir. Bu formül valfin en düşük doluluk-boşluk oranında açılacağını garanti eder.

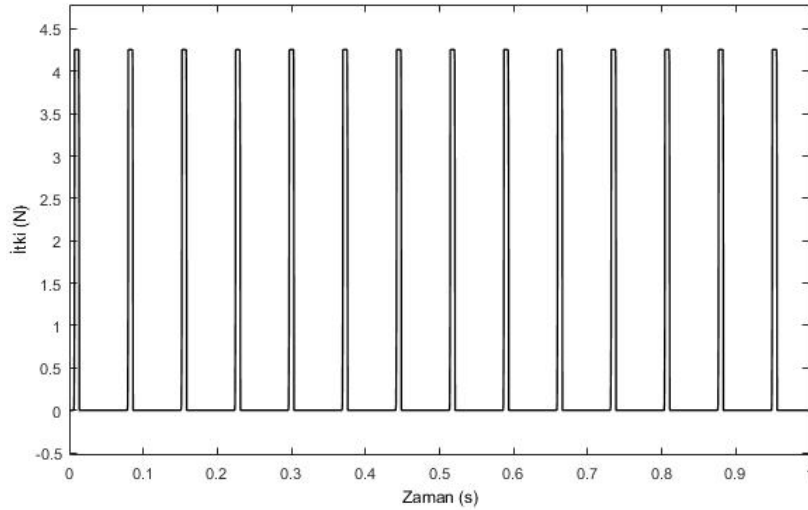


$$T_{pwm} > \frac{1}{\text{Doluluk-Boşluk Oranı}_{\min}} T_{apılma} \quad (25)$$

$$T_{pwm} > 72.5 \text{ ms} \quad (26)$$

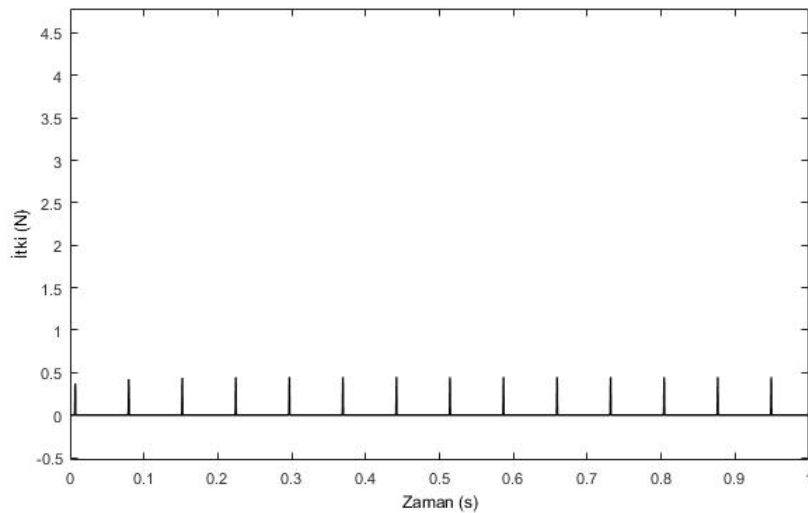
$$f_{pwm} < 13.8 \text{ Hz} \quad (27)$$

Tasarlanan modülatörün gereksinimi sağlayıp sağlamadığını görebilmek için 13.8 Hz frekansta ve sabit %10 doluluk-boşluk oranında yapılan itki benzetimi Şekil 8'de verilmiştir. Grafikten görüleceği üzere valf seçilen frekansta doluluk-boşluk oranı gereksinimi karşılamaktadır.



**Şekil 8.** İtki benzetimi (13.8 Hz - %10 Doluluk-Boşluk oranı).

Şekil 9'da seçilen frekansta %9 doluluk boşluk oranında yapılan itki benzetimi gösterilmiştir. Grafikte çok düşük tepkiler alınsa da valfin açılmadığı görülmektedir.



**Şekil 9.** İtki benzetimi (13.8 Hz - %9 Doluluk-Boşluk oranı).

Yukarıda düşük doluluk-boşluk oranı limiti yapılan frekans seçimi yüksek doluluk-boşluk oranı limiti için de yapılmalı ve ikisi arasından düşük olan modülatör frekansı için seçilmelidir. Yüksek doluluk-boşluk oranı seçiminde valfin verilen darbe genişlik modülatörü periyodunda kapanmasını garanti edecek aşağıdaki formül kullanılabilir.

$$T_{pwm} > \frac{1}{1 - \text{Doluluk-Boşluk Oranı}_{maks}} T_{kapanma} \quad (28)$$

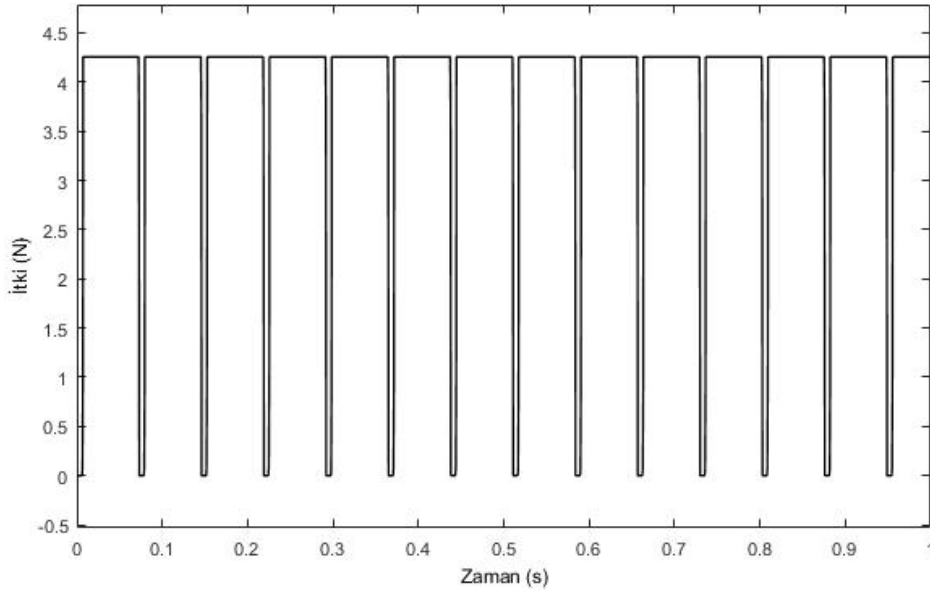
$$T_{pwm} > 73 \text{ ms} \quad (29)$$

$$f_{pwm} < 13.7 \text{ Hz} \quad (30)$$

13.7 Hz frekansta %90 doluluk-boşluk oranında valfin kapanabildiği Şekil 10'da görülmektedir. Sonuç olarak istenilen gereksinim için darbe genişlik modülatörünün frekansı 13.7 Hz değerinden düşük olmalıdır. Sadelik için frekans 13 seçilebilir.

Verilen gereksinimler için aşağıdaki eşitlik sağlandığı için kapanma ve açılma zamanlarından yüksek olan alınıp, formül bir kere kullanılarak frekans belirlenebilir. Aşağıdaki eşitliğin sağlanmadığı durumlarda düşük ve yüksek limitler için ayrı ayrı frekans bulunup düşük olan seçilmelidir.

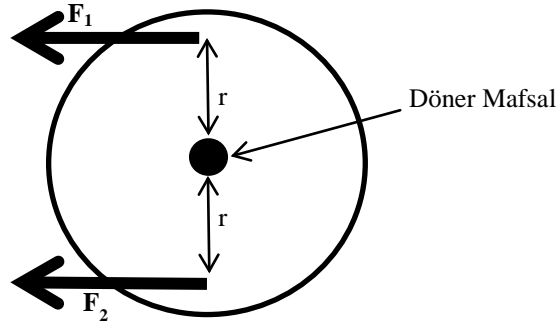
$$1 - \text{Doluluk} - \text{Boşluk Oranı}_{maks} = \text{Doluluk} - \text{Boşluk Oranı}_{min} \quad (31)$$



Şekil 10. İtici benzetimi (13.7 Hz - %90 Doluluk-Boşluk oranı).

#### 4. DÖNÜ EKSENİNDE HAREKET KONTROLÜ

Bu bölümde modellenen eyleyici ve modülatör, dönü ekseninde hareket kontrol benzetiminde kullanılacaktır. Hareket kontrolünün şematığı Şekil 11'de verilmiştir. Şematikte tek serbestlik dereceli bir platforma dönme eksenine dik aynı yönde iki eyleyici yerleştirilmiştir. Eyleyiciler kullanılarak platformun açı kontrol benzetimi yapılacaktır.



Şekil 11. Dönü ekseninde hareket kontrolü şematığı.

#### 4.1. Dinamik Model

Bu bölümde platformun dinamik modeli çıkarılacaktır. Dinamik model durum uzay formunda oluşturulacaktır. Hareket eşitliği:

$$m\ddot{\theta} + b\dot{\theta} = Fr \quad (32)$$

Durumlar:

$$x_1 = \theta \text{ (açı)} \quad (33)$$

$$x_2 = \dot{\theta} \text{ (açısal hız)} \quad (34)$$

Durum uzay formu:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{b}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{r}{m} \end{bmatrix} [F] \quad (35)$$

Nümerik değerler durum uzay formuna yerleştirildiğinde:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.0125 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 6.25 \end{bmatrix} [F] \quad (36)$$

#### 4.2. Durum Geri Beslemeli Kontrolcü Tasarımı

Bu bölümde hazırlanan dinamik model kullanılarak kutup yerleştirme tekniği kullanılarak durum beslemeli kontrolcü tasarlanacaktır. Kontrolcü tasarlanırken iki durumun da ölçülebilir olduğu varsayılmıştır. Dinamik sistemin karakteristik eşitliği tip bir olduğu için durum geri besleme kontrolcüsüne integral kontrolcüsü eklenmesine gerek duyulmamıştır.

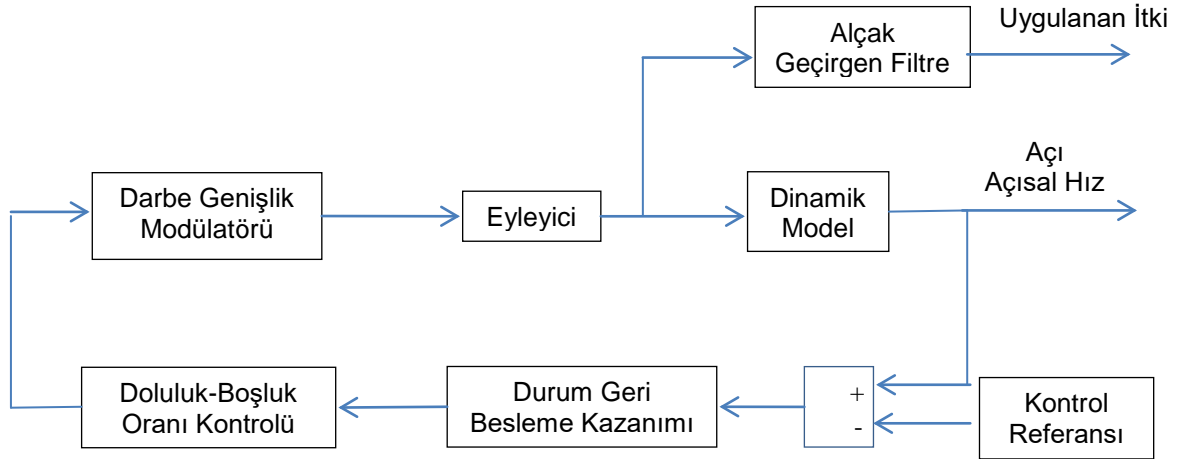
Kutupların yerleştirilmesi hedeflenen yerler:

$$J = [-4 - 4] \quad (37)$$

Kutupların hedeflenen yerlere yerleştirilmesi için aşağıdaki geri besleme kazanım matrisi kullanılmalıdır.

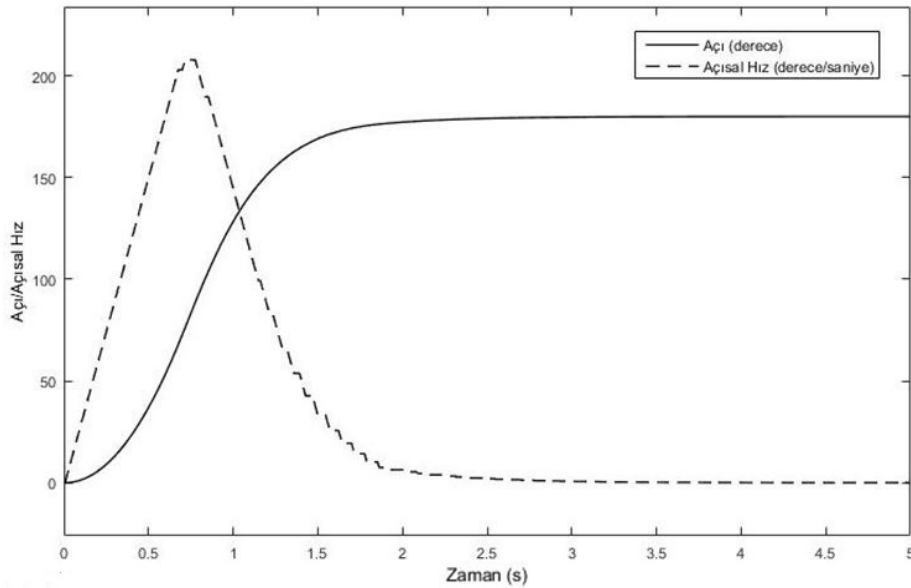
$$K = \begin{bmatrix} 2.560 \\ 1.278 \end{bmatrix} \quad (38)$$

Kontrolcü ve eyleyici performansını gözlemek için açı kontrol benzetimi yapılacaktır. Kontrol şeması Şekil 12’de verilmiştir. Dinamik modelden ölçülen açı ve açısal hız, açı kontrol referansı ile karşılaştırılıp durum geri besleme kazanımından geçirilecektir. Darbe genişlik modülatörüne gitmesi gereken komut doluluk-boşluk oranını kontrol eden 0 ve 1 arasında bir değerdir. Bu sebeple sistem gereksinimlerine göre durum geri besleme kazanımından çıkan kontrol sinyali 0 ve 1 arasına indirgenmelidir. Bu kısımda tasarlanan modülatörün düşük ve yüksek doluluk-boşluk oranı limitleri de göz önünde bulundurulmalıdır.

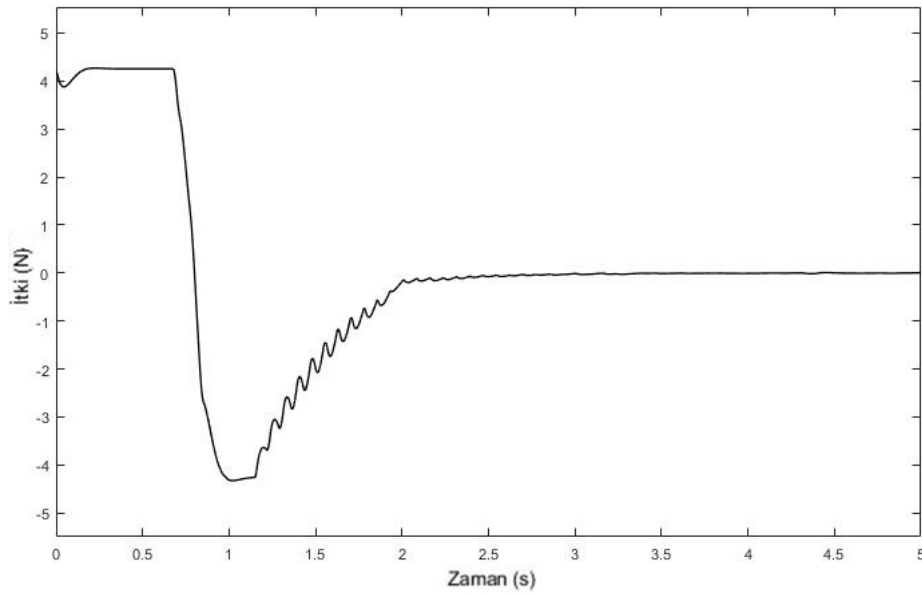


Şekil 12. Dönü eksenli kontrol şematığı.

Başlangıç koşulu sıfır olan sisteme açı referansı olarak 180 derece verildiği benzetim Şekil 13’te verilmiştir. Grafikten görüleceği üzere sistemin yatışma süresi 2 saniyenin biraz üstündedir ve üstten aşma yoktur. Bu durum geri besleme kontrollü sistemin kutuplarının (-4,-4) sönümlenme katsayısı bir olması ile örtüşmektedir. Benzetim sırasında iticilerin uyguladığı itki seviyesi Şekil 14’te verilmiştir. Sisteme uygulanan itkinin modüle edilmiş yapısı ikinci dereceden alçak geçirgen bir filtreden geçirilerek grafikte gösterilmiştir.



Şekil 13. Durum geri beslemeli kontrol benzetimi.



Şekil 14. Uygulanan itki seviyesi.

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada soğuk gaz itki kontrol sisteminin pnömatik akış kontrolünün benzetimi yapıldı. Akış kontrolü aç/kapa sürülebilir solenoid valf ile sağlandı. İtki kontrol sisteminin diferansiyel çıktı verebilmesi için solenoid valf darbe genişlik modülasyonu yöntemi kullanılarak açık çevrim kontrol edildi. Darbe genişlik modülörünün doluluk/boşluk oranı gereksinimleri için uygun frekans seçimi valf modelinin çubuk pozisyonu ve akım benzetimleri kullanılarak sağlandı. Daha sonra hazırlanan valf modeli ile tasarlanan darbe genişlik modülörünün eyleyici olarak performansı bir kapalı çevrim kontrol uygulamasında test edildi. Sadece dönü ekseninde serbestlik derecesine sahip bir platformun dinamik modeli oluşturuldu ve eyleyicilerin yerleri platform üzerinde belirlendi. Durum geri beslemeli kontrol yöntemi kullanılarak platformun açı kontrol benzetimi sağlandı.

Sonraki aşamada, bu yayında benzetimi yapılan açık çevrim itki kontrolünün ve kapalı çevrim dönü kontrol uygulamasının doğrulamasının yapılması planlanmaktadır. Doğrulama için planlanan deney düzeneğinde endüstri sınıfı valfler ve bağlantı elemanları kullanılacaktır. Valfin açık çevrim kontrolü üçüncü kısımda geliştirilen yöntem kullanılarak sağlanacaktır. Açık çevrim kontrolcünün doğrulaması itki seviyesinin yük hücresi kullanılarak gözlemlenmesi ile denetlenecektir. Daha sonra oluşturulan itki kontrol sistemi, üretilecek tek serbestlik dereceli sisteme entegre edilecek ve dönü eksenin açı kontrolü sağlanacaktır. Dönü eksenindeki açı ve açısal hız döner enkoder ile kontrolcüye geri beslenecektir.

## KAYNAKLAR

- [1] STEINSLAND, V., "Modeling and Control of Retarder using On/Off solenoid valves", 2008.
- [2] CĂRUNTU, C. F., MATCOVSKI, M. H., LAZĂR, C., & PĂSTRĂVANU, O., "Modelling of an electromagnetic valve actuator", Buletinul Institutului Politehnic din Iași, SecNia Automatică și Calculatoare, Tomul LVLIX–Fasc. 1-2, 2009.
- [3] SARLI, B. V., DA SILVA, A. L., & PAGLIONE, P., "Sliding mode attitude control using thrusters and pulse modulation for the ASTER mission", Computational and Applied Mathematics, 34(2), 535-556, 2015.
- [4] NOTHNAGEL, S. L., "Development of a cold gas propulsion system for the talaris hopper" (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology), 2011.



- [5] BRAUER, J. R., "Magnetic actuators and sensors", John Wiley & Sons, 2006.
- [6] MAKLED, A. E., AL-SANABAWY, M. A., & BAKR, M. A., "Theoretical and experimental evaluation of cold gas system components", In 13th International conference on aerospace science and aviation technology (p. 23), 2009.
- [7] TOPÇU, E. E., YÜKSEL, İ., & KAMIŞ, Z., "Development of electro-pneumatic fast switching valve and investigation of its characteristics". Mechatronics, 16(6), 365-378, 2006.
- [8] ERCAN Y., "Akışkan Gücü Kontrol Teorisi", Gazi Üniversitesi Yayın No:206, 1989.

**KISALTMALAR**

V	:	Voltaj
R	:	Direnç
i	:	Akım
L	:	İndüktans
$L_{off}$	:	Valf Kapalıyken İndüktans Değeri
$L_{on}$	:	Valf Açıkken İndüktans Değeri
$\delta$	:	Toplam Çubuk Yer Değiştirme Miktarı
$\mu_0$	:	Havanın Manyetik Geçirgenliği
$A_e$	:	Akı Yolunun Efektif Akı Kesiti
N	:	Bobin Çevrim Sayısı
k	:	Yay Sabiti
b	:	Viskoz Sürtünme Sabiti
m	:	Solenoid Çubuk Ağırlığı
$F_m$	:	Manyetik Kuvvet
$F_{pre}$	:	Yay Önyüklemeye Kuvveti
w	:	Kütle Debisi
A	:	Solenoid Valf Orifis Alanı
$C_d$	:	Valf Akış Katsayısı
k	:	Isı Sığası Oranı
R	:	İdeal Gaz Sabiti
$P_u$	:	Valf Giriş Basıncı
$P_d$	:	Valf Çıkış Basıncı
$T_{açılma}$	:	Valf Açılma Süresi
$T_{kapanma}$	:	Valf Kapanma Süresi
$f_{PWM}$	:	Darbe Genişlik Modülatörü Frekansı
$T_{PWM}$	:	Darbe Genişlik Modülatörü Periyodu



## ÖZGEÇMİŞ

### Yusuf SİLİK

1993 yılında Eskişehir’de doğdu. Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü’nden 2016 yılında “Lisans” derecesini aldı. Halen aynı bölümde “Yüksek Lisans” çalışmasını yürütmektedir. Şubat 2016’dan bu yana ROKETSAN / Kontrol Teknolojileri Birimi’nde mühendis olarak çalışmaktadır.

### Semih TANIKER

1985 yılında Ordu’da doğdu. Lisans (2008), Yüksek Lisans (2011) ve Doktora (2015) derecelerini Boğaziçi Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünden aldı. Ekim 2015’den bu yana ROKETSAN / Kontrol Teknolojileri Birimi’nde çalışmaktadır.

### Ulaş YAMAN

1984 yılında Ankara’da doğdu. Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) Makina Mühendisliği Bölümünde Şubat 2016’dan beri öğretim üyesi olarak çalışmaktadır. Lisans (2007), Yüksek Lisans (2010) ve Doktora (2014) derecelerini ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümünden alan Dr. Yaman, lisans eğitimi sırasında Mekatronik Yandal (2007) programını da başarıyla tamamlamıştır. Dr. Yaman doktorasını tamamladıktan sonra Purdue Üniversitesi (ABD) Bilgisayar Bilimi Bölümünde misafir öğretim üyesi olarak 2014 – 2015 yılları arasında çalışmıştır. Mekatronik eğitiminin vermiş olduğu vizyon ve Purdue Üniversitesinde yürüttüğü çalışmalar ışığında disiplinlerarası çalışmalar yürütmeyi seven Dr. Yaman’ın çalışma alanları 3 boyutlu (3B) yazıcılar ve eklemeli üretim, CAD/CAM yazılım mimarileri, üretim sistemleri için komut üretimi, FPGA-tabanlı gömülü sistemler ve hesaplamalı geometri olarak sıralanabilir. Bu alanlarda birçok yayını bulunan Dr. Yaman, şu anda “3B Yazıcılar İçin Yeni Bir Tasarım ve Üretim Akışı: LIPRO” başlıklı TÜBİTAK projesini yönetmektedir