FÜZE SİSTEMLERİ YER SEVİYESİ TESTLERİ ALTYAPISININ MODELLENMESİ VE KONTROLÜ

Cihan EROĞLU ¹ TOBB ETÜ / Roketsan A.Ş., Ankara Coşku KASNAKOĞLU ² TOBB ETÜ, Ankara Hasan TABANLI ³ Roketsan A.Ş., Ankara

ÖZET

Füze sistemlerinin yer seviyesi benzetim testlerinin gerçekleştirdiği altyapılarda test objesine zamana bağlı olarak aktarılan akışın basınç, sıcaklık ve debi parametrelerinin istenen doğrulukta olması kritiktir. Roketsan bünyesinde bu amaçla kullanılan ve doğrusallıktan oldukça uzak olan Boru Bağlantılı Test Düzeneği altyapısının modellenmesi ve kontrolü üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Calışmanın temel hedefi, anılan sistemin farklı test senaryolarına kısa zaman ve düşük maliyet ile cevap vermesidir. Literatür araştırması sonucunda dünyada bulunan benzer altyapıların modellenmesi ve kontrolü üzerine gerçekleştirilen herhangi bir çalışmaya ulaşılamamıştır. Boru Bağlantılı Test Düzeneği altyapısında gerçekleştirilen testlerden altyapının çeşitli noktalarından ölçülen ve zamana bağlı elde edilen basınç, sıcaklık ve debi parametreleri kaydedilmektedir. Benzer ihtiyaçlar doğrultusunda gerçekleştirilen testlerden test aileleri olusturulmakta ve her test ailesinin avri avri sistem tanılama aracına dahil edilmesi ile sistem durum uzayları elde edilmektedir. Çok girişli ve çok çıkışlı sistem durum uzayl kullanılarak $H\infty$, PID ve LOG kontrolcüler geliştirilmiştir. İlgili test ailesi testlerinden elde edilen çıkış sinyalleri ile modellenmiş sistem ve kontrolcü bütünü tarafından üretilen çıkış sinyalleri kıyaslanmaktadır. Ayar parametreleri çeşitli yaklaşımlar ile güncellenen kontrolcülerin, test sonuçları ile yaklaşıklığı arttırılmaya çalışılmaktadır. Geliştirilen kontrolcüler arasından LOG kontrolcünün diğer alternatiflere kıvasla daha iyi performans sergilediği görülmüştür. Kontrolcünün gerçek fiziksel sisteme dahil edilebilirliği ve doğrusal olmayan bu sistemin kontrolü için uygunluğu değerlendirilecektir.

GIRİŞ

Ramjet ve scramjet gibi hava solumalı füze sistemleri geliştirme çalışmalarında sevk sistemi performansının sınanabilmesi için bir test altyapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla Roketsan'da kurulmuş olan Boru Bağlantılı Test Düzeneği isimli altyapı; sevk sisteminin tasarlandığı Mach sayısı ve uçuş kaynaklı atmosferik parametrelerin yer seviyesi testler ile benzetiminin yapılması ve balistik tasarımın doğrulanması ihtiyacını karşılamaktadır. Anılan altyapı ayrıca balistik füze kapak açılma sistemleri ve ısı kalkanı gibi koruyucu sistemlerin serbest akış altında test edilmesine olanak sağlamaktadır.

Altyapı hava depolama sistemleri, akış kontrol vanaları, hava ısıtıcı sistem bütünü ve çıkış bölgesi boru bağlantıları ya da lüleleri bileşenlerinden oluşmakta ve test kalemlerine hava akışı sağlamaktadır. Tüm bu bileşenlerin oldukça doğrusal olmayan bir sistem ortaya çıkarması nedeni ile, istenen test koşullarının elde edilmesi için akış kontrol vanalarına gönderilecek komutların zamana bağlı sekansı doğru belirlenmelidir.

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü / Mühendis E-posta: ceroglu@etu.edu.tr

² Prof. Dr., Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, E-posta: kasnakoglu@gmail.com

³ Kıdemli Uzman Mühendis, E-posta: hasan.tabanli@roketsan.com.tr

Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı, Boru Bağlantılı Test Düzeneği altyapısının akış karakteristiğinin sistem tanılama yöntemleri ile ortaya çıkarılması ve uygun kontrolcü yaklaşımlarının sisteme dahil edilmesi ile farklı test senaryoları ihtiyaçlarına daha kısa zamanda ve daha düşük maliyet ile cevap verebilmesinin sağlanmasıdır.

Literatür Araştırması

Araştırma ile dünya çapındaki ramjet ve scramjet testlerinin gerçekleştirildiği benzer test altyapıların sistem ve akış mimarilerine ulaşılmıştır [Esirgen, 2014]. Ancak bu sistemlerde akış kontrolünün sağlandığı pnömatik kontrol vanaları ve diğer bileşenlerin modellenmesi ve kontrolü üzerine doğrudan çıktılarla karşılaşılmamıştır. Bu doğrultuda gerçekleştirilecek çalışmanın literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Literatürde sıkça karşılaşılan bir diğer konu ise pnömatik kontrol vanalarında görülen yüksek statik sürtünme, gecikme, geri tepme ve ölü bölge gibi problemlerin tespit edilmesi ve önlenmesidir [Hamdan, 2000]. Limit döngü salınımları gibi istenmeyen sonuçlar doğuran bu problemlerin ortadan kaldırılması fiziksel sistemi ve performansını iyileştirecektir [Hidalgo, 2017]. Bu noktada tasarlanacak kontrolcülerin kontrol vanaları ile uyumlu çalışacağından emin olunmalıdır [Rohilla, 2015].

YÖNTEM

Modellenmesi ve kontrolü hedeflenen Boru Bağlantılı Test Düzeneği şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1: BBTD Şematik Gösterimi

1 numaralı bölümdeki hava depolama tanklarında gerçekleştirilecek test koşullarının sağlanabileceği üst basınç seviyesinde depolanmaktadır. Test başlangıcı ile birlikte kontrol vanalarına gönderilen sinyaller, akışı başlatmaktadır. 2 numaralı ilk pnömatik kontrol vanası, 4 numaralı dinlendirme tankı ve 3 numaralı ikinci pnömatik kontrol vanası ile oluşan akış kontrol bütünü ile basınç farkı ile oluşturulan akış konfigüre edilmektedir [Fisher, 2017]. 5 numaralı hava ısıtıcı sistem ve 6 numaralı besleme sistemi bileşenleri ise sıcak akış testlerinde akışa dahil edilen yakıt ve oksitleyici ile yakılarak test kalemine aktarılan akışın toplam sıcaklığının yükseltilmesi amacı ile kullanılmaktadır.

Modelleme tutarlılığı adına, altyapıda farklı test kalemleri ile gerçekleştirilen testler bir test ailesi olarak nitelendirilmiş ve testler bu kapsamda gruplanmıştır. Çalışma çerçevesinde geliştirilen kod bütününün başlatılması ile bir test ailesi için gerçekleştirilen tüm testlerde elde edilen veriler sistematik bir şekilde MATLAB'a aktarılmaktadır. Depolama tankları (1), dinlendirme tankı (4) ve hava ısıtıcı sistemin (5) girişindeki zamana bağlı basınç ve sıcaklık verileri ve akış kontrol vanalarının (2)(3) zamana bağlı açılma sinyalleri içeri aktarılan verilerdir.

Her bir verinin çalışma noktalarının belirlenmesi için ortalamaları hesaplanır. Çalışma noktaları bilgisi, sistem tanılama modülünün kullanacağı veri tipine dönüştürülür. Zaman adımı hesaplanır. Daha sonra tüm zamana bağlı veriler sistem tanılama operasyonu için hazırlanır. Bu amaçla öncelikle verilerin belirlenen eşik değerlerinin altında kalan kısımları çıkarılır. Her bir test için zaman alanındaki giriş ve çıkış sinyalleri arasındaki ilişkinin ve zaman adımı bilgisinin saklandığı "iddata" tipindeki objeler oluşturulur. Eksik veri noktaları kontrolü gerçekleştirilir ve transfer fonksiyonu tahmini yöntemi ile eksik noktalar tahmin edilir. Sistem tanılama modülünün sıfır etrafında doğrusallaştırılmış veriler ile çalıştırılması için, her bir veri setinden hesaplanmış çalışma noktaları çıkarılır. Son olarak tüm testler için düzenlenmiş sistem tanılama "iddata" verileri birleştirilir ve veri setleri elde edilir.

Çalışmada sistem tanılama, alt uzay metodu ile durum uzayı tahmini "n4sid" yaklaşımı ile gerçekleştirilmektedir. Bu yaklaşım ile parametrik optimizasyon problemi öncesinde oluşturulması gereken durum uzayı sistem matrislerinin oluşturulmasına gerek kalmamaktadır.

Birleşik veri setinin "n4sid" yaklaşımına dahil edilmesi sırasında model derecesi 4 olarak belirlenmiştir. Bu parametre, oluşturulan durum uzayı matrislerinin 4 giriş ve 2 çıkış arasındaki ilişkiyi doğru tanımlayabilmesi için kritiktir. Ek olarak, farklı test aileleri için farklı ileri ve geri tahmin ufuklarının sonucu iyileştirdiği gözlemlenmiştir [Ljung, 1999]. Deneme yanılma yöntemi ile daha iyi sonuç aranmıştır. Bu kontrol, "N4Horizon" opsiyon parametresi ile gerçekleştirilmiştir. Sistem tanılama gerçekleştirilirken sürecin takip edildiği ekran, Şekil 2 ile aktarılmıştır.

State-space Model Identification	
Estimation data: Time domain data dataAllT	
Data has 2 outputs, 4 inputs and [693 1119 842 876 735 219 1366 1307 537 1297 1078 1108	
1178 1249 3237 1509] samples.	
Number of states: 4	
Estimation Progress	
Estimating parameters using subspace algorithm	<u></u>
dana	
done.	
	5
	•
Result	
Status: Estimated using N4SID with prediction focus (stability enforced)	
Fit to estimation data: [99.72 99.55 99.77 99.51 99.63 99.05 99.79 99.78 99.66 99.81 99.	59
99.84 99.66 99.83 99.9 99.7;99.94 99.75 99.94 99.87 99.87 99.76 99.94 99.92 99.91 99.92	
99.86 99.87 99.83 99.84 99.97 99.921%, FPE: 7.93974e-10	
······································	

Şekil 2: MATLAB Sistem Tanılama Süreç İlerleme Çıktısı

MATLAB Sistem Tanılama aracına girdi olarak verilmekte ve önceden tanımlanan bir test ailesi için çok girişli, çok çıkışlı "MIMO" (*İng.* Multi-Input-Multi-Output) bir sistem durum uzayı modeli elde edilmektedir. Bir test ailesi için yaklaşıklıkla elde edilen, sıfır etrafında doğrusallaştırılmış sistem tanılama çıkış sinyallerinin sıfır etrafında doğrusallaştırılmış test verileri ile karşılaştırılması Şekil 3 ile aktarılmıştır.



Şekil 3: MATLAB Sistem Tanılama Karşılaştırma Grafiği

Sistem tanılama modeli ile elde edilen veriler simülasyon modeline dahil edilirken hesaplanan çalışma noktaları ile toplama işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu sayede doğrusallaştırma sırasında çıkarılan trend bilgisi sinyallere geri eklenmektedir.

Doğrusal simülasyonun gerçekleştirildiği çatı Simulink modeli Şekil 4 ile gösterilmiştir. Modelde PV101 ve PV102 pnömatik kontrol vanalarının açılma sinyalleri, PT105 dinlendirme tankı basıncı ve FT101 ise hattan geçen akış debisini göstermektedir. Giriş sinyalleri olarak PV101 ve PV102, çıkış sinyalleri olarak ise FT101 ve PT105 kullanılarak iki giriş ve iki çıkışlı sistem ortaya çıkarılmıştır.



Şekil 4: Simülasyon Modeli

Sistemin durumları olarak ele alınan depolama tankları basıncı PT108 ve depolama tankları sıcaklığı TT108 verilerinin sistem giriş parametrelerine bağlı olarak türetilmesi adına, AutoRegressive eXogenous model (NARX) yapay sinir ağı yapısı kullanılmıştır. Tüm test ailelerinden elde edilen kontrol vanası açıklık sinyalleri ile etkileşimli olarak PT108 ve TT108 zaman serileri türetilmiştir. Ancak, kontrol vanası açıklıklarının süperpozisyon ilkesine uymaması ve kontrol vanası açılma başlangıç bölgelerindeki sürtünmelerin sistem dinamikleri üzerinde baskın etkisi olması dolayısı ile elde edilen zaman serilerinin kullanılamayacağı değerlendirilmiştir [Kayihan, 2000]. Bu sebeple, gerçek test verilerine ait depolama tankları basınç ve sıcaklık verileri doğrudan kullanılmıştır.

Uygulamalar başlığı altında aktarılan üç farklı kontrolcü yaklaşımından elde edilen kontrolcüler, doğrusallaştırılmış sistem ile birlikte simüle edilmiş ve test verileri ile karşılaştırılmıştır.

UYGULAMALAR

Karışık Hassasiyet Döngü Şekillendirme

Çalışmada ele alınan ilk kontrolcü, Karışık Hassasiyet Döngü Şekillendirme (*İng.* Mixed-Sensitivity Loop Shaping) metodu ile oluşturulan H_{∞} kontrolcüdür. Bu kontrolcü, sistemin frekans cevabını şekillendirmekte ve gürültüyü azaltmaktadır.

Anılan metot ile elde edilen kontrolcünün sistem performansı ve gürbüzlüğü arasındaki takası kullanıcı tarafından sağlanan ağırlık fonksiyonları W_1, W_2 ve W_3 ile gerçekleştirmektedir. Şekil 5(a)'da kontrolcü K ve sistem G'yi içeren blok diyagramı aktarılmıştır. Şekil 5(b) formuna dönüştürülen ve H_{∞} sentezleme problemi olarak ele alınan yapı, genişletilmiş sistem P'nin giriş ve çıkışı arasındaki ilişki üzerinden kurgulanmaktadır.



(a)

(b)

Şekil 5(a)(b): Karışık Hassasiyet Döngü Şekillendirme Blok Diyagramları

w ile z arasındaki ilişki, transfer fonksiyonu M(s) ile gösterilebilir (1).

$$M(s) = \begin{bmatrix} W_1 S \\ W_2 K S \\ W_3 T \end{bmatrix}$$
(1)

Bu matriste $S = (I + GK)^{-1}$ hassasiyet fonksiyonu, *KS w* ile *u* arasındaki transfer fonksiyonu ve $T = (I - S) = GK(I + GK)^{-1}$ tamamlayıcı hassasiyet fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır.

Karışık hassasiyet döngü şekillendirme yöntemi, *M*'nin H_{∞} normu $||M(s)||_{\infty}$ değerini minimize edecek *K* kontrolcüsünü aramaktadır. Bu amaçla P genişletilmiş sistemi üzerindeki H_{∞} tasarım limiti (2) ile gösterilir.

$$\|M(s)\|_{\infty} = \left\| \begin{array}{c} W_1 S \\ W_2 K S \\ W_3 T \end{array} \right\|_{\infty} \le 1$$

$$(2)$$

$$\|S\|_{\infty} \le |W_1^{-1}| \tag{3}$$

$$\|KS\|_{\infty} \le |W_2^{-1}| \tag{4}$$

$$\|T\|_{\infty} \le |W_3^{-1}| \tag{5}$$

Dolayısıyla, iyi referans takibi ve dış etkilerin baskılanması için kontrol bant genişliği içerisinde büyük W_1 değeri seçilerek küçük *S* değeri elde edilebilir (3). Kontrolcü hareketinin minimize edilmesi için, W_2 ağırlığı arttırılarak *KS* küçültülebilir (4). Kontrol eforunun kısıtlanması istenmiyorsa, bu ağırlık serbest bırakılabilir. Gürbüzlük ve gürültü önleme amacıyla kontrol bant genişliği dışında büyük W_3 değeri seçilerek küçük *T* değeri aranmalıdır (5). Teori göz önünde bulundurularak MATLAB koduna dahil edilen karışık hassasiyet döngü şekillendirici kontrolcü için kontrol bant genişliği (ω_n), bir adet alçak geçirgen filtre (*LPF*) ve bir adet yüksek geçirgen filtre (*HPF*) tanımlanmıştır. $\omega_n = 0.01 rad/s$ ile filtreler oluşturulmuştur (6,7).

$$LPF = \frac{\omega_n}{s + \omega_n} = \frac{0.01}{s + 0.01} \tag{6}$$

$$HPF = \frac{s}{s + \omega_n} = \frac{s}{s + 0.01} \tag{7}$$

Çıkış hata ağırlıklarının kontrol bant genişliği içerisinde yüksek seçilmesi, iyi takip performansı getirmektedir. Bu nedenle çıkış hata ağırlıkları alçak geçirgen filtre ile oluşturulmuştur (8,9,10).

$$W_{e_{FT101}} = 100 * LPF$$
 (8)

$$W_{e_{PT105}} = 10 * LPF$$
 (9)

$$W_{1} = \begin{bmatrix} W_{e_{FT101}} & 0\\ 0 & W_{e_{PT105}} \end{bmatrix}$$
(10)

Kontrolcü hareket ağırlığı serbest bırakılmıştır (11).

$$W_2 = [] \tag{11}$$

Giriş ağırlıklarının kontrol bant genişliği dışarısında yüksek seçilmesi, iyi takip performansı getirmektedir. Bu nedenle giriş ağırlıkları yüksek geçirgen filtre ile oluşturulmuştur (12,13,14).

$$W_{PV101} = 10 * HPF$$
 (12)

$$W_{PV102} = 1 * HPF \tag{13}$$

$$W_{3} = \begin{bmatrix} W_{PV101} & 0\\ 0 & W_{PV102} \end{bmatrix}$$
(14)

Oluşturulan ağırlıklar ile tasarlanan kontrolcü, Simulink doğrusal sistem modeli ile simüle edilmiş ve simülasyon sonuçları Şekil 6 ile aktarılmıştır. Grafikte kontrolcünün deneysel çıkış sinyallerine bir seviye yaklaşabilen giriş sinyallerini oluşturduğu gösterilmiştir. Ara tank basıncı PT105'in takip hatası, debi FT101'in takip hatasına kıyasla serbest bırakılmıştır.



Şekil 6: Karışık Hassasiyet Döngü Şekillendirme Kontrolcü Çıktı 1

Sistemin debi isterine daha iyi cevap verebilmesi adına farklı ağırlıklar ile simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. $W_{PV101} = 1 * HPF$ ve $W_{PV102} = 1 * HPF$ ile elde edilen sonuçlar Şekil 7'de aktarılmıştır. Grafik incelendiğinde debi isterinin karşılandığı gözlemlenmektedir. Ancak, bu takas ile kontrol vanalarının yüksek frekanslı hareketlere zorlandığı ortaya çıkmıştır.



Şekil 7: Karışık Hassasiyet Döngü Şekillendirme Kontrolcü Çıktı 2

Dinamik fiziksel sistemin kısıtları göz önünde bulundurulursa, Çıktı 1'de ele alınan kontrolcünün Çıktı 2'de ele alınan kontrolcüye kıyasla düşük performanslı ancak kontrol vanaları ile gerçeklenebilmesi açısından daha uygun olduğu söylenebilir. Bu noktada farklı kontrol bant genişliği ve ağırlık katsayıları denenerek fiziksel sisteme uygunluğu arttırılmış farklı bir kontrolcü tasarlanabilir.

Karışık Hassasiyet Döngü Şekillendirme kontrolcüsünün fiziksel sistemin yönetildiği yazılıma dahil edilmesi ile ilgili bir takım soru işaretleri bulunmaktadır. Yazılım içerisinde hazır matematiksel bloklar olmakla birlikte, kapsamlı matris hesaplamalarının gerçekleştirilebilmesi için yazılımın alt seviyeden detaylandırılması söz konusudur. Bu bağlamda uygulanabilirliği daha yüksek alternatif kontrolcüler araştırılmıştır.

Oransal – İntegral – Türevsel "PID" Kontrolcü

Ele alınan bir diğer kontrolcü ise, klasik Oransal – İntegral – Türevsel kontrolcüdür. Endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan bu kontrolcünün gerçek fiziksel sisteme uygulanabilirliği yazılımsal olarak mümkün görülmektedir. Paralel formdaki PID kontrolcü, (15) ile aktarılan transfer fonksiyonu ile ifade edilebilir.

$$K_p + K_i * \frac{1}{s} + K_d * \frac{s}{T_f * s + 1}$$
(15)

Bu formda K_p oransal katsayı, K_i integral katsayı, K_d türevsel katsayı ve T_f türev filtre zamanını göstermektedir. T_f , test verilerinin periyodu ile benzer şekilde 0.01 saniyedir.

Boru Bağlantılı Test Düzeneği altyapısı sistem tanılama yaklaşımı kullanılarak çok girişli, çok çıkışlı "MIMO" bir sistem durum uzayı modeli ile doğrusallaştırılmıştır. PID kontrolcüler ise bir giriş, bir çıkışlı sistemler için tanımlanmakta ve kullanılmaktadır. Bu noktada, sistemin giriş ve çıkışları arasındaki çapraz etkiler göz ardı edilmiş, PV101 kontrol vanası ile PT105 ara tank basıncının ve PV102 kontrol vanası ile FT101 debisinin kontrol edildiği varsayılmıştır [Boyd, 2016].

PID kontrolcü için ağırlıklar, Karışık Hassasiyet Döngü Şekillendirme yönteminde olduğu gibi gürbüz kontrol yaklaşımı ile ayarlanmıştır [Ibaraki, 2000]. Zamana bağlı test verisi çıkış sinyalleri ile simülasyon çıkış sinyalleri arasındaki hatalar alçak geçirgen filtre benzeri transfer fonksiyonları ile ayarlanmaktadır. Aynı şekilde, kontrol vanası giriş sinyalleri arasındaki farkların ağırlıkları yüksek geçirgen filtre benzeri transfer fonksiyonları (16,17,18,19) ile ayarlanmaktadır.

$$W_{e_{FT101}} = \frac{20}{10 * s + 1} \tag{16}$$

$$W_{e_{PT105}} = \frac{1}{10 * s + 1} \tag{17}$$

$$W_{PV101} = \frac{5 * s}{4 * s + 1} \tag{18}$$

$$W_{PV102} = \frac{5 * s}{5 * s + 1} \tag{19}$$

Bu yaklaşım, sabit yapılı kontrolcülerin H_{∞} ile ayarlanması "hinfstruct" olarak adlandırılmaktadır. Şekil 8'deki modelde P ile gösterilen matris, girişler ve çıkışlar arasındaki tüm ilişkiyi ve ağırlıklandırmayı içinde barındıran durum uzayı yapısıdır. C0 ise iki ayarlanabilir PID bloğunun diyagonal olarak konumlandırıldığı matristir.



Şekil 8: Sabit Yapılı Kontrolcülerin H_{∞} ile Ayarlanması Yapısı Blok Diyagramı

İki referans ve iki çıkış sinyali arasındaki ilişkinin kontrol edilmesine olanak sağlayan bu yaklaşım ile gerçek fiziksel sisteme girdi olarak verilebilecek üçer PID katsayısı elde edilmektedir.

Giriş ve çıkış sinyallerinin ilgili test ailesi için ağırlıklandırılması ile elde edilen ve Şekil 9 ile aktarılan sonuçta, PV102 girişinin PV101 girişine kıyasla salınıma serbest bırakıldığı, bu doğrultuda PT105 ve FT101 çıkışlarının kontrol girişini çok zorlamadan test senaryosuna benzer çıktılar verdiği gözlemlenmektedir.



Şekil 9: PID Kontrolcü Çıktı 1

Test ailesi için yukarıda aktarılan ağırlıklandırma ile PV101 ile PT105 arasındaki PID kontrolcü için $K_p = 4.53, K_i = 7.54e - 7$ ve $K_d = 0.0345$ katsayıları elde edilmiştir. PV102 ile FT101 arasındaki PID kontrolcü için ise $K_p = 0.0318, K_i = 0.0427$ ve $K_d = 0.0635$ katsayıları bulunmuştur.

Kontrol vanaları giriş sinyallerine ait olan ağırlıklar değiştirilerek farklı bir deneme gerçekleştirilmiştir. Değiştirilen iki transfer fonksiyonu (20,21) ile verilmiştir.

$$W_{PV101} = \frac{50 * s}{4 * s + 1} \tag{20}$$

$$W_{PV102} = \frac{1*s}{5*s+1} \tag{21}$$

Değişiklik sonucunda PV101 vanasının kontrol hareketinin bir miktar kısıtlandığı, PV102 vanasının kontrolcüsünün ise genliği ve frekansı daha yüksek salınımlar gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. Sonuçlar Şekil 10 ile aktarılmıştır.



Şekil 10: PID Kontrolcü Çıktı 2

Çıktı 1 ile aynı test ailesi için yukarıda aktarılan ağırlıklandırma ile PV101 ile PT105 arasındaki PID kontrolcü için $K_p = 17.8$, $K_i = 2.08e - 6$ ve $K_d = 0.193$ katsayıları elde edilmiştir. PV102 ile FT101 arasındaki PID kontrolcü için ise $K_p = 0.044$, $K_i = 0.00298$ ve $K_d = 0.00549$ katsayıları bulunmuştur.

Elde edilen PID kontrolcü katsayılarının Boru Bağlantılı Test Düzeneği kontrol yazılımına doğrudan dahil edilmesi ile gerçekleştirilen testlerden olumlu sonuç elde edilememiştir. Bu testlerde kontrol vanaları satürasyona uğramış veya yüksek frekanslı salınım davranışı sergilemiştir. Yazılıma gömülü PID bloklarının çalışma prensiplerinin klasik PID yaklaşımından bir miktar farklı olduğu ve fiziksel sistemin giriş ve çıkışları arasındaki çapraz etkilerin göz ardı edilemeyecek kadar baskın olduğu düşünülmektedir.

Doğrusal Karesel Gaussian "LQG" Kontrolcü

Sistem üzerinde geliştirilen bir diğer kontrolcü ise optimal kontrol yöntemleri altında ele alınan Doğrusal Karesel Gaussian kontrolcüdür. Bu kontrolcü temel olarak bir durum tahmin edici Kalman Filtresi ve bir doğrusal karesel düzenleyicinin birlikte kullanılması ile oluşturulmaktadır. Bu yaklaşımda düzenleyici ayar parametreleri ile giriş sinyallerinin davranışı, filtre ayar parametreleri ile sistemin gürültüye tepkisi ve integral ayar parametresi ile giriş ve çıkış sinyalleri arasındaki hatanın baskılanma miktarı ayarlanabilmektedir.

Durum uzayı haline getirilen sistem tanılama modeli üzerinde LQG kontrolcü tasarlanmaktadır. Şekil 11 ile gösterilen blok diyagramındaki yapıda düzenleyici C, istenen değer sinyali r ve ölçüm sinyali y'yi kullanarak kontrol sinyali u'yu oluşturmaktadır ve G sistem bloğuna iletmektedir. İntegral aksiyon içeren ve ölçüm sinyalinin istenen değeri takip etmesini sağlayan bu yapıya, LQG servo kontrolcü ismi verilmektedir.



Şekil 11: LQG Servo Kontrolcü ve Sistem Blok Diyagramı

LQG servo kontrolcü, *J* maliyet fonksiyonunu (22) minimize edecek şekilde çalışmaktadır. Bu fonksiyonda $x_i = r - y$ olarak tanımlanan integral takip hatasıdır. Fonksiyonu oluşturan matrislerin uygulama için seçilen değerleri aktarılmıştır.

$$J = E\left[\lim_{\tau \to \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} ([x^T, u^T] Q_{xu} \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} + x_i^T Q_i x_i) dt\right]$$
(22)

Q matrisi, sistem tanılama durum uzayı modelinin 4. derece olması dolayısı ile 4x4 birim matris olarak seçilmiştir (23). Bu matriste değerlerin yüksek olması, durum uzayındaki ilgili durumların daha hızlı regülasyon ve takibinin istendiğini göstermektedir.

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(23)

R matrisinde değerlerin yüksek olması, ilgili giriş sinyalinin az kontrol eforu harcamasının istendiğini göstermektedir (24). r_{11} PV101, r_{22} PV102 kontrol vanasını etkilemektedir.

$$R = \begin{bmatrix} 10 & 0\\ 0 & 10 \end{bmatrix}$$
(24)

Q ve R matrislerinin diyagonal olarak konumlandırılması ile Q_{xu} matrisi (25) oluşturulur.

$$Q_{xu} = \begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}$$
(25)

 Q_n matrisinde değerlerin yüksek olması, proses kaynaklı gürültünün yüksek olduğunu, bir diğer deyişle model hatalarının yüksek olduğunu göstermektedir (26).

$$Q_n = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(26)

 R_n matrisinde değerlerin yüksek olması, sırasıyla FT101 ve PT105 kanallarından alınan ölçüm kaynaklı gürültünün yüksek olduğunu veya bu kanallardan alınan ölçümlere güvenilmediğini göstermektedir (27).

$$R_n = \begin{bmatrix} 1 & 0\\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(27)

 Q_n ve R_n matrislerinin diyagonal olarak konumlandırılması ile Q_{wv} matrisi (28) oluşturulur. Bu matrisin *J* maliyet fonksiyonu ile ilişkisi (29) ile tanımlanmaktadır. Proses gürültüsü *w* ve ölçüm gürültüsü *v* eşvaryanslı Gauss beyaz gürültü olarak sisteme dahil edilmektedir.

$$Q_{wv} = \begin{bmatrix} Q_n & 0\\ 0 & R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Q_{wv} = E\left(\begin{bmatrix} W\\ v \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W' & v' \end{bmatrix}\right)$$
(28)
$$(28)$$

 Q_i matrisindeki (30) parametreler integratör kontrol parametreleridir. Bu değerlerin yüksek olması, sırası ile e_{FT101} ve e_{PT105} hatalarının hızlı baskılanmak istendiğini göstermektedir.

$$Q_i = \begin{bmatrix} 30 & 0\\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{30}$$

Şekil 12 ile aktarılan grafiklerde kontrolcünün oluşturduğu giriş sinyallerinin hedef basınç ve debi seviyelerini yakından takip ettiği gözlemlenmektedir. Şekil 13 ile aktarılan düşük debili test senaryosu için ise gerçekleştirilmiş testten oldukça farklı kontrol vana açıklıkları doğrusallaştırılmış sistem modeline girdi olarak sağlanmıştır. Zamana bağlı debi ve basınç sinyalleri ise istenene yakındır.



Şekil 12: Yüksek Debili Test LQG Kontrolcü Çıktısı



Şekil 13: Düşük Debili Test LQG Kontrolcü Çıktısı

Elde edilen kontrolcünün kontrol vanalarına gönderdiği açılma sinyallerinin fiziksel sistem için uygun ve anlamlı olduğu söylenebilir. LQG kontrolcünün fiziksel sistemin yönetildiği yazılıma dahil edilmesi için uygunluğu araştırılacaktır.

SONUÇ

Roketsan bünyesinde bulunan Boru Bağlantılı Test Düzeneği altyapısının modellenmesi ve kontrolü üzerine gerçekleştirilen çalışmalar aktarılmıştır. Çalışmanın hedefi olarak belirlenen, altyapının farklı test ihtiyaçlarına hızlı cevap verebilmesi noktasında gerçekleştirilen modelleme çalışmaları olumlu katkı sağlamıştır. Dinamik fiziksel sistemin daha iyi anlaşıldığı bu çalışma ile sistem yazılımına gömülü kontrolcü yapıları kullanılmaya ve farklı koşullar için test verileri elde edilmeye başlanmıştır.

Geliştirilen kontrolcülerden Karışık Hassasiyet Döngü Şekillendirme, gürbüzlük yönünden en başarılı kontrolcüdür. Ancak bu kontrolcünün daha yüksek frekanslarda çalışan ve girdilere daha hızlı cevap verebilen sistemlerde kullanıldığında verim alınabileceği düşünülmektedir.

Çalışmada ele alınan bir diğer kontrolcü ise klasik PID kontrolcüdür. BBTD sisteminde halihazırda deneysel olarak gerçeklenebilen PID kontrolcü ile çeşitli testler gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde doğrusallaştırılmış sistem tanılama modeli üzerinden geliştirilen çok girişli, çok çıkışlı yapı içerisindeki giriş ve çıkışların eşleştirilmesi yaklaşımı ile elde edilen PID katsayıları kullanılmış ancak olumsuz sonuç ile karşılaşılmıştır. Fiziksel sistemin doğrusallıktan uzaklığı dolayısı ile eşleştirilmiş giriş ve çıkışlar üzerinden ele alınabilmek için uygun olmadığı değerlendirilmiştir.

Test aileleri arasındaki belirsizliklere en iyi cevap verebilen kontrolcü ise Doğrusal Karesel Gaussian (LQG) kontrolcü olmuştur. Düzenleyici ve integral takip ediciyi içerisinde barındıran bu yapının ayar parametreleri sistem ve ölçüm kaynaklı belirsizliklerin baskılanmasını da sağlamaktadır. Bu kontrolcünün fiziksel sisteme yazılımsal olarak dahil edilebilmesi sağlanırsa, ayar parametrelerinin gerçekleştirilen testler ile güncelleneceği ve sonuçların bu yönde hatırı sayılır şekilde iyileştirileceği düşünülmektedir.

Çalışma, sistem modelleme yaklaşımlarının iyileştirilmesi adına farklı yapay sinir ağı ve derin öğrenme metotlarının araştırılması ve dinamik sisteme uygunluğunun değerlendirilmesi ile sürdürülecektir.

Kaynaklar

- Boyd, S., Hast, M., & Åström, K. J., 2016. *MIMO PID tuning via iterated LMI restriction*. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 26(8), 1718-1731.
- Esirgen, B., 2014. *Numerical and Experimental Investigation of Direct Connected Ramjet Test Facility*, Master's Thesis, Middle East Technical University.

Fisher, Emerson Automation Solutions, 2017. Control Valve Handbook, 5th Edition.

- Hamdan, M., & Gao, Z., 2000. A novel PID controller for pneumatic proportional valves with hysteresis, In Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference, Vol. 2, pp. 1198-1201. IEEE.
- Hidalgo, M. C., & Garcia, C., 2017. Friction compensation in control valves: Nonlinear control and usual approaches, Control Engineering Practice, 58, 42-53.
- Ibaraki, S., & Tomizuka, M., 2000. *H*∞ optimization of fixed structure controllers. In Proc. of the 2000 International Mechanical Engineering Congress and Exposition.
- Kayihan, A., & Doyle III, F. J., 2000. *Friction compensation for a process control valve*, Control Engineering Practice, 8(7), 799-812.
- Ljung, L., 1999. *System Identification: Theory for the User*, Second Edition. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR.
- Rahman, Y., Xie, A., & Bernstein, D. S., 2017. *Retrospective cost adaptive control: Pole placement, frequency response, and connections with LQG control.* IEEE Control Systems Magazine, 37(5), 28-69.
- Rohilla, P., Kumar, V., & Nakra, B. C., 2015. *Investigation of intelligent control system for non-linear real time pressure control system*, International Journal of Advanced Computer Research, 5(19), 212.