

Adaptif Kontrolcü Tasarımı Kullanılarak Laboratuvar Helikopteri Üzerinde Adaptasyon Hız Değişkeni Etkisinin İncelenmesi

Bedrettin Mahmut KOCAGIL^{1*} Engin Hasan ÇOPUR² Metin U. SALAMCI³

¹ Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye

² Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği, Konya, Türkiye

³ Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

ÖZET

Geliş Tarihi: 31.10.2024

Kabul Tarihi: 18.11.2024

Yayın Tarihi: 31.12.2024

Anahtar Kelimeler:

Model referans adaptif

kontrol,

Doğrusal olmayan kontrol,

Adaptasyon hızı.

Model Referans Adaptif Kontrolcüler (MRAK), modellenememiş dinamiklere ya da parametre belirsizliklerine sahip sistemler için uygun ve kullanımına sıkça başvuru yapılan kontrolcü tasarımlardır. MRAK tasarımlarında en önemli husus, seçilen bir referans sistem ile kontrol edilmek istenen sistem arasındaki hata değerinin sıfırlanması ya da makul bir değere düşmesidir. Hata değeri kontrolcü tarafından zaman ilerledikçe azaltılsa da, referans sistemin her zaman aralığında olabildiğince düzgün takip edilmesi de istenir. Bu sebeple, adaptasyon kuralı oluşturulurken, referans model cevabına yakınsama hızı da uygulamacılar açısından önem taşır. Yakınsama hızı da doğrudan adaptasyon hızı ile ilişkilidir. Konvansiyonel adaptasyon kuralı tasarımları, adaptasyon hızı çok büyük değerlere sahip olmadığı sürece takip hata değişimlerinin büyük ve/veya hızlı olması durumlarıyla yeterli ölçüde başa çıkamayabilir. Bazı durumlarda kontrol edilmek istenen sistemin dinamiği ile ilgili apriori bilgiler gerekebilir, bu bilgilerin olmadığı durumlarda adaptasyon hızının çok büyük değerlerde olması dahi adaptasyonda başarı sağlamayabilir. Ayrıca, sistem dinamiğinin ilgili referans model dinamiği ile uyumu da adaptasyonda başarı ve daha iyi takip ihtimalini güçlendirebilir. Bu amaçla çalışma kapsamındaki referans model, klasik yöntemlerin aksine, kontrol edilmek istenen fiziksel sistemin doğasına çok daha uygun gelen doğrusal olmayan matematiğe sahip bir sistem olarak ele alınmıştır. Bu araştırmanın konusu, adaptasyon kuralında önemli rol oynayan adaptasyon hızı değişkeninin, doğrusal olmayan bir referans sistemi tasarlanarak elde edilmiş MRAK'ye sahip fiziksel bir sistem üzerindeki etkinliğinin irdelenmesidir. Bu irdeme, önerilen MRAK tasarımının özelinde, üç serbestlik dereceli bir helikopter sisteminin benzetimi yapılarak sonuçların kıyaslanması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Kıyaslamalar, helikopterin konum kontrolleri sağlanan iki eksen üzerinden yapılmıştır. Test edilen her bir MRAK, adaptasyon hızı haricindeki değişkenler farklılaştırılmadan ele alınmış ve değişen adaptasyon kurallarıyla, referans sistem takiplerinin ne ölçüde yapılabildiği incelenmiştir.

Investigation of the Effect of Adaptation Rate Variable on a Laboratory Helicopter Using Adaptive Controller Design

Article Info

ABSTRACT

Received: 31.10.2024

Accepted: 18.11.2024

Published: 31.12.2024

Keywords:

Model Reference adaptive control,

Nonlinear control,

Adaptation rate.

Model Reference Adaptive Controllers (MRAC) are widely used control designs suitable for systems with unmodeled dynamics or parameter uncertainties. The primary goal in MRAC design is to minimize or eliminate the error between the selected reference model and the system to be controlled. While the controller reduces the error over time, smooth tracking of the reference model at all times is also desired. Therefore, the convergence rate to the reference model response, directly linked to the adaptation rate, is crucial when designing the adaptation rule. Conventional adaptation rule designs may struggle with large or rapid tracking error changes unless the adaptation rate is set to very high values. In some cases, a priori knowledge of the system's dynamics may be required, as even high adaptation rates may not guarantee success without such information. Additionally, compatibility between system dynamics and reference model dynamics can significantly enhance adaptation success and tracking performance. In this study, the reference model is designed as a nonlinear system, more suitable for the nature of the physical system being controlled compared to classical methods. The research investigates the impact of the adaptation rate variable, a key factor in the adaptation rule, on a physical system controlled with an MRAC designed using a nonlinear reference model. A three-degree-of-freedom helicopter system is simulated to evaluate the proposed MRAC design. Comparisons are made across two axes for helicopter position control. Each MRAC configuration is tested with identical variables, except for the adaptation rate, to assess how well the reference system is followed under different adaptation rules.

Bu makaleye atıfta bulunmak için:

Kocagil, B. M., Çopur, E. H., & Salamcı, M. U. (2024). Adaptif kontrolcü tasarımı kullanılarak laboratuvar helikopteri üzerinde adaptasyon hız değişkeni etkisinin incelenmesi. *Aerospace Research Letters (ASREL)*, 3(2), 79-96. <https://doi.org/10.56753/ASREL.2024.2.2>

*Sorumlu Yazar: Bedrettin Mahmut KOCAGIL, mahmutkocagil@gazi.edu.tr



This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

GİRİŞ

Model Referans Adaptif Kontrolcüler (MRAK), modellenememiş dinamiklere ya da parametre belirsizliklerine sahip sistemler için uygun ve kullanımına sıkça başvuru alan kontrolcü tasarımlarıdır. Anlaşılacağı üzere bu kontrolcü tasarımlarının en önemli özelliği, deterministik model yaklaşımında kontrol edilmek istenen sistem modeli için bir kesinlik gerektirmemesidir. Belirsizlik içeren sistem cevabı, tasarımcı tarafından istenen sistem cevabını sergileyen referans bir sistem seçilerek/tasarlanarak belirlenmeye çalışılır. Ardından kontrolü hedeflenen değişkenlerin iki sistem arasındaki farkını minimize etmeye çalışan bir yapı oluşturulur ve bu yapı terminolojide adaptasyon kuralı olarak adlandırılır (Landau, 1979). Bu sayede adım adım güncellenen adaptasyon kuralı takip hatasını zamanla kapatır ve istenen referans sistem cevabının takibi gerçekleştirilir.

Başlangıç paragrafında bahsedildiği üzere MRAK, kontrol edilmek istenen sistemde meydana gelen değişikliklere karşı adaptasyon kurallarının oluşturulması sayesinde kontrol parametrelerinin anında güncellenmesine olanak sağlar. Parametre belirsizliklerine sahip bir sistemin MRAK'si için oluşturulan adaptasyon kuralı ise, genellikle Lyapunov Kararlılık Teoremi kullanılarak elde edilmektedir (Krstić ve ark., 1995). Bu teoreme göre inceleme sonucunda adaptasyon kuralı genellikle, sistem kararlılığını sağlayacak türevsel bir terime karşılık gelmektedir. Parametre belirsizliği özelinde oluşturulan bu kural sayesinde de sistem için MRAK kazanç katsayı matrisi tahmini yapılmaktadır. Kısaca özetlenen bu sürecin önemli aşamalarından biri, kuşkusuz türevsel bir terim olarak elde edilen adaptasyon kuralının değişim miktarıdır. Bu değişim miktarının istenen biçimde ayarlanabilmesine olanak sağlayan “adaptasyon hızı (öğrenme hızı)” teriminin, adaptasyon kuralının bir değişkeni olacak şekilde tanımlanma ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bunun doğal bir sonucu olarak adaptasyon hızı, kazanç katsayı matrisini direkt etkileyen önemli bir parametre konumundadır (Sastry & Bodson, 1989).

Adaptasyon hızı değişkeni, genellikle, kazanç katsayı matrisi tahmininin bir değere yakınsamasını hızlandırma amacıyla kullanılır. Yakınsama hızının artması için doğal olarak adaptasyon hızı da artırılmalıdır ancak bu artış hızını kısıtlayan faktörler bulunabilir. Örneğin, gereğinden büyük değerlerde seçilmiş adaptasyon hızı değişkeni, parametre belirsizliğine ya da modellenememiş dinamiklere sahip bir kontrol sisteminin dış bozulmalara karşı hassasiyetini artırması sonucu sistem kararlılığının bozulmasına varan olumsuz etkilere sebep olabilmektedir. Bu nedenle, istenen seviyede bir kontrol performansı yakalama ya da bu performansı iyileştirme adına yapılabilecek adaptasyon hızı değişikliklerinde dikkatli olunması gerekliliğine literatürde sıkça yer verilmektedir (Egardt, 1979; Landau ve ark., 2011). Bu değişkenin büyük değerleri kullanılarak MRAK performansının iyileştirilme hususu, kontrol terminolojisinde hızlı adaptasyon ismiyle anılmaktadır (Friedland, 1996). Hızlı adaptasyona başvuru alan adaptif kontrolcülerde değişken değeri seçiminin, kapalı-döngü kararlılığına tesir etmesi bakımından önemi ortaya konulmaktadır. Bu durum, MRAK'ye sahip sistemlerde adaptasyon hızının artırılması sonucu, referans sistemle ilintili takip hatası düşürülerek istenen seviyede bir kontrol performansı elde edilmek istendiğinde, gürbüzlüğün -çokça bilindiği üzere- azalması sonucunu da destekler niteliktedir (Ioannou & Sun, 1996).

Farklı tasarım yapılarına sahip MRAK'lerle birlikte kullanılmış adaptasyon hızı değişkeni, doğrusal davranış sergileyen sistemlerde, sistem cevap ve kararlılıklarına olan etkileri bu alanda çalışan birçok bilim insanı tarafından incelenmiştir (Landau, 1979; Aström & Wittenmark, 1995; Krstić ve ark., 1995). Değişkenin sabit sayılarla sıkça kullanımının yanı sıra, zamanla değişen yapıya sahip kullanımı da görülmektedir. Bu kullanımda, en küçük kareler tekniğinin kullanıldığı parametre tanımlama yöntemindeki zamanla değişen kovaryans matrisine, tıpkı adaptasyon hızı değişkeni gibi davranış sergiletilmesi, en yaygın örneklerden biri olarak göze çarpmaktadır (Bitmead ve ark., 1990). Zamanla değişen MRAK yapılarında kullanımı öne çıkan bir diğer yöntem de normalizasyondur ve bahsi geçen her iki teknik de hızlı adaptasyon ile gürbüzlük arasında dengenin gözetilmesini hedeflemektedir

(Bitmead ve ark., 1990). Farklı ve son bir örnek olarak, zaman-gecikmeli sistemlerde kapalı-döngü kararlılığının sağlanabilmesi için adaptasyon hızı değişkeninin keyfi seçiminden ziyade, üstten sınırlandırılması gerektiği bilinmektedir (Landau ve ark., 2011).

Adaptasyon hız değişkeni için son yıllarda da öneriler getirilmeye ve farklı sistemlerde oluşturduğu etkilerin incelenmesine devam edilmektedir. Değişken adaptasyon (öğrenme) hızı kullanan bir sinir ağı modelini referans model kabul eden bir adaptif kontrolcü algoritması yeni önerilerden biridir (Slama ve ark., 2019). Adaptasyon hızının sinir ağı eğitim hızını doğrudan etkilediğini göstermişlerdir. Slama ve arkadaşları, öğrenme sürecini kayda değer şekilde hızlandırabilen ve aynı anda öğrenme sürecinin kararlılığını sağlayabilen bir eğitim algoritmasını, değişken bir adaptasyon hızı kullanan kontrolcü için sunmaktadırlar. Bir diğer farklı çalışmada, yapay zeka-insan etkileşimi ile yürütülen bir deneyde farklı adaptasyon hızlarının etkisi incelenmiştir (İsa ve ark., 2024). İsa ve arkadaşları, yapay zekanın adaptif algoritmasındaki adaptasyon hızı değişikliklerinin, iki oyunculu-sürekli oyunlarda davranış tahminlerini nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Sonuçlarında, yapay zeka adaptasyon hızının insan davranışını önemli ölçüde etkileyebileceğini ve sonucu değiştirme yeteneğine sahip olduğunu göstermişlerdir. Yavaş adaptasyon hızının sonucu Nash oyun teorisi dengesine doğru kaydırıldığını, hızlı adaptasyonun ise sonucu insan liderliğindeki Stackelberg dengesine doğru kaydırıldığını gözlemlemişlerdir. Havacılık uygulamalarına yönelik bir çalışma ise, dört pervaneli insansız hava aracı (quadrotor) için farklı adaptasyon hızlarının klasik MRAK'lerde incelenmesidir (Tosun & Işık, 2023). MRAK mimarisine göre farklı referans modelleri ve adaptasyon hızlarını benzetim yoluyla test etmişlerdir. Tosun ve Işık, istedikleri sonuçları veren referans model ve parametrelerle Quanser firmasının üretmiş olduğu Qball-X4 test düzeneğinin gerçek zamanlı adaptif kontrol uygulamasını gerçekleştirmişlerdir.

Konvansiyonel adaptasyon kuralı tasarımları, adaptasyon hızı çok büyük değerlere sahip olmadığı sürece takip hata değişimlerinin büyük ve/veya hızlı olması durumlarıyla yeterli ölçüde başa çıkamayabilir. Anahtarlamalı kontrol şemaları takip hata değişimlerinin büyük ve/veya hızlı olduğu durumlar için bir alternatif olabilmektedir (Zhang, 2010). Yine de bazı durumlarda kontrol edilmek istenen sistemin dinamiği ile ilgili apriori bilgiler gerekebilir, bu bilgilerin olmadığı durumlarda adaptasyon hızının çok büyük değerlerde olması dahi adaptasyonda başarı sağlamayabilir. Buna ilave olarak, sistem dinamiğinin ilgili referans model dinamiği ile uyumu da adaptasyonda başarı ve daha iyi takip ihtimalini güçlendirebilir. Bu motivasyonla referans model, klasik yöntemlerin aksine, kontrol edilmek istenen fiziksel sistemin doğasına çok daha uygun gelen doğrusal olmayan matematiğe sahip bir sistem olarak ele alınmıştır. Bahsedilen bilgilendirmeler ışığında bu araştırmanın konusu, adaptasyon kuralında önemli rol oynayan adaptasyon hızı değişkeninin, doğrusal olmayan bir referans sistemi tasarlanarak elde edilmiş MRAK'ye (Kocagil ve ark., 2018) sahip fiziksel bir sistem üzerindeki etkinliğinin irdelenmesidir. Bu irdeme, giriş kısmında bahsi geçen -doğrusal davranış sergileyen-sistemlerdeki teorik yaklaşımlardan ziyade, önerilen MRAK tasarımının üç serbestlik dereceli bir helikopter sisteminde benzetimi yapılarak sonuçların kıyaslanması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Kıyaslamalar, helikopterin konum kontrolleri sağlanan iki eksen üzerinden yapılmıştır. Test edilen her bir MRAK, adaptasyon hızı haricindeki değişkenler farklılaştırılmadan ele alınmış ve değişen adaptasyon kurallarıyla referans sistem takiplerinin ne ölçüde yapılabildiği incelenmiştir.

YÖNTEM

MRAK yönteminde sistem girdisine arzu edilen cevabı üretebilen herhangi bir sistem referans model olarak tanımlanabilir. Yöntem, belirsizliğe sahip sistem ile referans sistem arasındaki takip hatasını en aza indirgeyecek kazanç katsayılarını bulmak üzerine kuruludur. MRAK kazanç katsayıları, tasarlanan adaptasyon kuralının gerektirdiği kurala bağlı bir şekilde, önceden belirlenmiş ya da değişken işlem adımlarında güncelleştirilerek tahmin edilmektedir. Adaptasyon kuralı, sistemlerin çıkış

değişkenleri ile birlikte, takip hatasını da bir değişken kabul eden yapı üzerine kuruludur ve bu değişkenlerin tümünün sınırlandırılması koşuluyla Lyapunov Kararlılık Teoremi esas alınarak tasarlanır. Bu tasarım sonucunda takip hata değeri kullanılarak referans model takibini sağlayacak MRAK kazanç katsayıları, her işlem adımında hesaplanarak bulunur.

Referans Model için Doğrusal Olmayan Kontrolcü Tasarımı

Durum-Uzay modelinde tanımlı olacak şekilde doğrusal olmayan bir referans model için Durum Bağımlı Riccati Denklemi (DBRD) kullanılarak optimum kontrolcü tasarlanacaktır. $x_r \in \mathbb{R}^n$ referans model için durum değişkenleri vektörü, $u_r \in \mathbb{R}^m$ ($1 \leq m \leq n$) kontrol girişi, $f_r(x_r): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n \times n}$ sürekli ve türevlenebilir fonksiyon ve $g_r(x_r): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n \times m}$ olarak tanımlansın. Böylece,

$$\dot{x}_r(t) = f_r(x_r) + g_r(x_r)u_r(t), \quad x_r(0) = x_{r0} \quad (1)$$

Bir referans modeli tanımlanır. Eşitliğin sağında yer alan $f_r(x_r)$ fonksiyonunu açıkça durum bağımlı yapacak bir $f_r(x_r) = A_r(x_r)x_r(t)$ eşitliğini sağlaması istensin.

Varsayım-1:

Eş.(1) ile tanımlanabilen bir sistem ele alınsın. Bu sistemde kontrol girişi ve tüm durum değişkenleri sıfır alındığında, sistemin denge durumu orijinde bulunuyorsa, durum bağımlı katsayı (DBK) matrisi olan $A_r(x_r)$ vasıtasıyla $f_r(x_r) = A_r(x_r)x_r(t)$ eşitliği tanımlıdır. Eğer $f_r(0) \neq 0$ ise, uygun bir dönüşümle denge noktası orijine döndürülebilir.

Varsayım-1'e göre yazılabilen bir $f_r(x_r) = A_r(x_r)x_r(t)$ eşitliği yardımıyla Eş.(1), durum-uzay modeli yapısında aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{x}_r(t) = A_r(x_r)x_r(t) + B_r(x_r)u_r(t), \quad x_r(0) = x_{r0} \quad (2)$$

Böylece $A_r(x_r): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ ve $B_r(x_r): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n \times m}$ tanımlı olacak şekilde doğrusal olmayan referans model, DBK matrislerine bağlı doğrusal modele benzer biçimde gösterilebilir.

Eşitlik (2) yapısındaki matematiksel modele kontrolcü tasarımının yapılabilmesi için aşağıdaki koşulu sağlamalıdır.

Koşul-1:

$\forall x_r$ için durum bağımlı $B_r(x_r)$ matrisi $B_r(x_r) \neq 0$ koşuluyla, $\{A_r(x_r), B_r(x_r)\}$ çifti, noktasal kontrol edilebilir ve, $\{A_r(x_r), Q_r^{0.5}(x_r)\}$ çifti gözlemlenebilir.

Koşul-1 'in sağlandığı (2) eşitliği için DBRD kullanılarak doğrusal olmayan kontrolcü tasarımı yapılacaktır. Tüm durumların geri beslendiği optimum kontrolcü için kontrol girişi $u_r(t) = -K_r(x_r) x_r$ ifadesi ile tasarlansın. DBRD yöntemi, aşağıda tanımlanan maliyet fonksiyonunu minimum değerine ulaştırma hedefler:

$$J_r = 0.5 \int_0^{\infty} [x_r^T(t)Q_r(x_r)x_r(t) + u_r^T(x_r)R_r(x_r)u_r(x_r)] dt \quad (3)$$

Burada $Q_r(x_r): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n \times n}$ yarı-pozitif tanımlı durum bağımlı ağırlık matrisi ve $R_r(x_r): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{m \times m}$ pozitif tanımlı durum bağımlı kontrol girişi ağırlık matrisidir. Eş.(3)'ü minimum değerine ulaştıracak optimum kontrol girişi

$$u(x_r) = -R_r^{-1}(x_r)B_r^T(x_r)P_r(x_r)x_r \quad (4)$$

eşitliği ile tasarlanır. (4) eşitliğindeki $P_r(x_r)$ terimi,

$$P_r(x_r)A_r(x_r) + A_r^T(x_r)P_r(x_r) - P_r(x_r)B_r(x_r)R_r^{-1}(x_r)B_r^T(x_r)P_r(x_r) + Q_r(x_r) = 0 \quad (5)$$

eşitliği ile tanımlanan DBRD'nin simetrik, pozitif tanımlı ve tek bir çözümü olan matristir. Ayrıca, kontrolcü kazanç katsayı matrisini ifade eden $K_r(x_r) \in \mathbb{R}^{m \times n}$ terimine Eş.(4) üzerinden ulaşılır:

$$K_r(x_r) = R_r^{-1}(x_r)B_r^T(x_r)P_r(x_r) \quad (6)$$

Kapalı-döngüye sahip kararlı haldeki referans model aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir:

$$\dot{x}_r(t) = (A_r(x_r) - B_r(x_r)K_r(x_r))x_r = A_{rkd}(x_r)x_r(t) \quad (7)$$

Referans sistem için tasarlanan optimum-altı DBRD kontrol yöntemi, benzetim aşamasına geçildiğinde örnekleme zamanı ile birlikte kullanılacaktır. Her bir örnekleme zamanı için, geri beslenecek durum değişkenlerinin (DBRD için tüm durumların) değerleri hesaplanır. Bu an için ulaşılan durum değişkeni değerleri, tüm DBK matrislerinin hesaplamasında kullanılarak kapalı-döngü sistemin kontrolü sağlanır. Eş. (7) için hesaplanan $A_{rkd}(x_r)$ matrisi, noktasal olarak Hurwitz kararlı matristir.

DBRD Tabanlı MRAK Tasarımı

Kontrol edilmek istenen ve doğrusal olmayan bir sistemi, tıpkı referans modelde olduğu gibi DBK matrisleri ile tanımlayıp Eş. (2) gösterimi için Varsayım-1'i de sağlayan, doğrusal benzeri bir yapıda aşağıdaki gibi ele alabiliriz:

$$\dot{x}(t) = A(x)x(t) + B(x)u(t), \quad x(0) = x_0 \quad (8)$$

Burada $A(x)$ ve $B(x)$ bilinen DBK matrisleri olarak kabul edilmişlerdir. Kontrol edilmek istenen

ve Eş.(8) yapısında tanımlı sisteme, tüm durumların geri-beslendiği bir kontrolcü tasarımı $u(t) = -K^*(x)x(t)$, aşağıda tanımlanan koşulların sağlanması ile mümkündür.

Koşul-2:

$\forall x_r$ için $K^*(x)$ kazanç katsayı matrisinin varlığı ve durum bağımlı $B(x)$ matrisi $B(x) \neq 0$ koşullarıyla, $\{A(x), B(x)\}$ çifti, noktasal kontrol edilebilirdir.

Yukarıda verilen Koşul-2 altında tüm durumlar için geri-beslemeli kontrolcü tasarımı yapıldığı düşünülün. O halde Eş.(8)'de verilen sistem, kapalı-döngüye sahip bir kontrol sistemi $A_{kd}(x) = A(x) - B(x)K^*(x)$ eşitliği ile gösterilebilir.

Şimdi ise Eş.(8)'de tanımlı $A(x)$ ve $B(x)$ matrisleri, bilinmesi pek muhtemel olmayan DBK matrisler olarak ele alınsın. Takip hatası $e(t) \triangleq x(t) - x_r(t)$ ifadesini sıfırlamak için tüm durumların geri-beslendiği bir MRAK tasarımıyla elde edilsin. Kontrolcü tasarımı, aşağıdaki varsayıma dayandırılmaktadır.

Varsayım-2:

- i. $\forall x$ için $K^*(x, e)$ kazanç katsayı matrisinin var olduğu ve durum bağımlı $B(x)$ matrisi $B(x) \neq 0$ koşullarıyla, $\{A(x), B(x)\}$ çifti, noktasal kontrol edilebilirdir.
- ii. $K^*(x, e)$ kazanç katsayı matrisinin türevleri sınırlıdır. ($\|\dot{K}^*(x, e)\| \leq \varepsilon \leq \infty$)

Böylece kontrol girişi $u(t) = -K^*(x, e)x(t)$ eşitliği ile ifade edilen ve kapalı-döngüye sahip kontrol sisteminin, takip hatasını sıfıra götürmesi amacıyla kapalı-döngü referans sistemine (Eş.(7)) eşitleneceği bir MRAK tasarımı mümkündür:

$$A_{rkd}(x_r) = A(x) - B(x)K^*(x, e) \quad (9)$$

Eş.(9), MRAK terminolojinde uyum (ya da mükemmel uyum) koşulu olarak bilinir. Burada $K^*(x, e) \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ideal kazanç katsayı matrisi olarak tanımlanır.

$A(x)$ ve $B(x)$ matrisleri tam olarak bilinemediği ve uyum koşulu Varsayım-2 üzerinden oluşturulduğundan, Eş.(9)'daki $K^*(x, e)$ kazanç katsayı matrisinin $K(x, e)$ tahminine ihtiyaç duyulmaktadır. MRAK'nin $K(x, e)$ tahmini için, Lyapunov kararlılık teoremine dayanan ve her adımda güncellenecek bir adaptasyon kuralı türetilir. Adaptasyon kuralının türetilmesi için Varsayım-3'e ihtiyaç duyulmaktadır.

Varsayım-3:

$\forall x$ için $B(x)$ 'in tahmini olan $\hat{B}(x) \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ve $\hat{B}(x) = B(x)G$ eşitliğini sağlayan bir $G \in \mathbb{R}^{m \times m}$ matrisi mevcuttur.

$K(x, e)$ tahminini her adımda gerçekleştiren adaptasyon kuralı durum bağımlı olacak şekilde aşağıdaki gibi ele alınsın:

$$\dot{K}(x, e) = \hat{B}^T(x)e(t)x^T(t)P_{ad}(x, x_r) \Gamma, \quad K(x_0, e_0) = K_0 \in \mathbb{R}^{m \times n} \quad (10)$$

Burada K_0 , $K^*(x, e)$ için tahmin edilen $K(x, e)$ matrisinin başlangıç koşuludur. $P_{ad}(x, x_r)$ terimi de aşağıda verilen cebirsel Lyapunov denkleminin pozitif tanımlı ve başka eşi olmayan çözümüdür:

$$A_{rkd}^T(x_r)P_{ad}(x, x_r) + P_{ad}(x, x_r)A_{rkd}(x_r) = -Q_{ad}(x) \quad (11)$$

Bu çözümü sağlayan $Q_{ad}(x) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ matrisi; keyfi seçilebilen simetrik ve pozitif tanımlı bir matristir.

Bu bilgiler ışığında $K(x, e)$ tahmini için Eş.(10) ile ele alınan adaptasyon kuralı, Teorem-1 kullanılarak türetilir:

Teorem-1:

Tüm durum değişkenlerinin geri beslendiği adaptif kontrolcü tasarımı, $u(t) = -K(x, e)x(t)$, Eş.(10) ile verilmiş adaptasyon kuralı ile birlikte Eş.(8) yapısında bir sisteme uygulandığında, doğrusal olmayan ve kapalı-döngüye sahip kararlı bir kontrol sistemi elde edilir. Kapalı-döngü kontrol sisteminin $x(t)$, $e(t)$ ve $u(t)$ sinyalleri sınırlıdır ve zaman içerisinde kontrol sisteminin durum değişkenleri $x(t)$, referans sistemin durum değişkenleri $x_r(t)$ 'ye Barbalat yardımcı teoremine göre yakınsamak zorundadır. Bu durumda $t \rightarrow \infty$ iken takip hatası, $e(t) \rightarrow 0$ olmalıdır. (İspatı için bkz. Kocagil ve ark., 2018).

Kontrolü MRAK ile sağlanan sistem, referans model kontrolcü tasarımında kullanılan DBRD yöntemindeki gibi noktasal kararlılık açısından değerlendirilmektedir. Her bir örnekleme zamanı için, geri beslenecek tüm durum değişkenlerinin değerleri hesaplanır. Bu an için ulaşılan durum değişkeni değerleri, tüm DBK matrislerinin hesaplamasında kullanılarak kapalı-döngü sistemin kontrolü sağlanır.

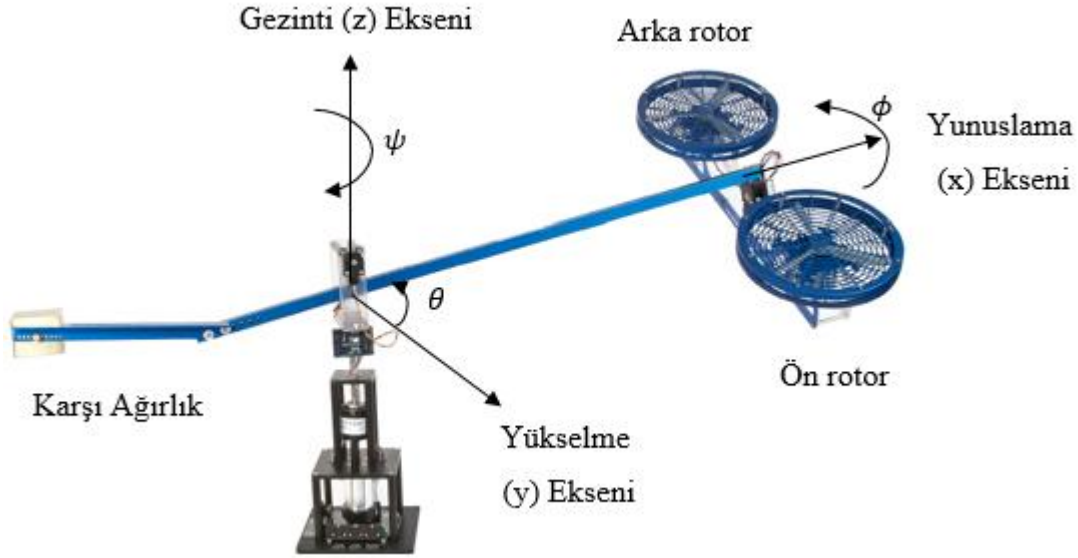
BENZETİM MODELİ

Benzetimi yapılmış olan fiziksel sistem, üç serbestlik derecesine sahip (SDS) olan ve Quanser firması lisansı ile piyasaya sürülmüş tandem rotorlu yapıda laboratuvar helikopteridir. Bahsedilen serbestlik dereceleri Şekil-1'e referans verilerek açıklanmıştır: Düşeyde hareket serbestliğine sahip ve y-ekseninde konum ölçümü de yapılan yükseliş açısı θ , yine düşeyde hareket serbestliğine sahip ve x-ekseninde konum ölçümü de yapılan yunuslama açısı ϕ ve yatayda hareket serbestliğine sahip ve z-ekseninde konum ölçümü de yapılan gezinti açısı ψ .

Yine Şekil-1'de görüldüğü gibi helikopter, tandem yapıda ve birbirinden bağımsız iki farklı doğru akım motoruyla çalışmaktadır. Rotorlar, ön ve arka rotor olarak tanımlanmıştır ve bu rotora uygulanan gerilimler sırasıyla, ön rotor (V_δ) ve arka rotor (V_a) gerilimleridir. Rotorlara farklı gerilimler uygulandığında, düşey hareketi tanımlayan yükselti ve yunuslama açılarındaki değişimin ifade edilebilmesi için iki farklı rotor gerilimi tanımlanmıştır: Toplam ($V_t = 0.5(V_a + V_\delta)$) ve Fark ($V_f = 0.5(V_a - V_\delta)$) Gerilimleri. Toplam gerilim pozitif olduğunda yükselme eksenindeki θ açısı da pozitif yönlü hareket sağlarken, fark gerilimi pozitif olduğunda da benzer şekilde yunuslama eksenindeki ϕ açısı da pozitif yönlü hareket eder. Her bir açının pozitif yönü Şekil-1'de gösterildiği gibidir.

Şekil 1

3 SDS Helikopter Test Düzeneği Üzerinde Eleman ve Eksen Tanımlamaları



Rotorların matematiksel modelinin oluşturulabilmesi amacıyla iki farklı rotor itkisi tanımlanmıştır: Toplam ($\tau_t = \tau_a + \tau_0$) ve Fark ($\tau_f = \tau_a - \tau_0$) İtkileri. Toplam ve fark itkileri sayesinde helikopter, üç eksende hareket ettirebilmektedir. Doğrusal olmayan helikopter modelinin, basitleştirilmiş matematiksel modeli (Ishutkina, 2004) aşağıda verilmiştir:

$$\begin{aligned}
 \ddot{\theta} &= -d_1 \dot{\theta} - d_2 \sin(\theta) + d_3 \tau_{coll} \cos(\phi) \\
 \ddot{\phi} &= -b_1 \dot{\phi} - b_2 \sin(\phi) - b_3 \tau_{cyc} \\
 \ddot{\psi} &= -a_1 \dot{\psi} - a_2 (\alpha \tau_t + 1) \sin(\phi) \\
 \dot{\tau}_f &= -c_1 \tau_f + 0.5 c_2 (V_a - V_0) \\
 \dot{\tau}_t &= -e_1 \tau_t + 0.5 e_2 (V_a + V_0)
 \end{aligned} \tag{12}$$

Eş.(12)'de kullanılan sabitler Tablo-1'de verilmiştir.

Tablo 1

3 SDS Helikopter Referans Modelinin Sabitleri (Ishutkina, 2004)

Sabitler	a_1	a_2	b_1	b_2	b_3	c_1	c_2	d_1	d_2
Değerler	0.2517	0.2105	0.3290	1.5664	16.2000	7.3200	1.0000	0.1011	0.5040

Sabitler	d_3	e_1	e_2	α
Değerler	1.3400	6.1600	1.0000	4.0000

Yukarıda Eş.(12) ve Tablo-1 ile birlikte sunulan basitleştirilmiş 3 SDS Helikopter matematik modeli, referans model olarak kullanılacaktır. MRAK tasarımı için uygun bir durum-uzay formuna aşağıdaki şekilde dönüştürülebilir: $[x_{r_1} x_{r_2} \dots x_{r_8}]^T = [\theta \phi \psi \dot{\theta} \dot{\phi} \dot{\psi} \tau_f \tau_t]^T$ ve $[u_{r_1} u_{r_2}]^T = [V_\delta V_a]^T$ olmak üzere,

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_{r_1} &= x_{r_4} \\
 \dot{x}_{r_2} &= x_{r_5} \\
 \dot{x}_{r_3} &= x_{r_6} \\
 \dot{x}_{r_4} &= -d_1 x_{r_4} - d_2 \sin(x_{r_1}) + d_3 x_{r_8} \cos(x_{r_2}) \\
 \dot{x}_{r_5} &= -b_1(x_{r_5}) - b_2 \sin(x_{r_2}) - b_3 x_{r_7} \\
 \dot{x}_{r_6} &= -a_1 x_{r_6} - a_2(\alpha x_{r_8} + 1) \sin(x_{r_2}) \\
 \dot{x}_{r_7} &= -c_1 x_{r_7} - 0.5c_2 u_{r_1} + 0.5c_2 u_{r_2} \\
 \dot{x}_{r_8} &= -e_1 x_{r_8} + 0.5e_2 u_{r_1} + 0.5e_2 u_{r_2}
 \end{aligned} \tag{13}$$

Eş.(13) ile verilen durum-uzay formu ile birlikte $\dot{x}_r = A_r(x_r)x_r + B_r(x_r)u_r$ yapısının kullanılabilmesi için, uygun $A_r(x_r)$ ve $B_r(x_r)$ DBK matrisleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$A(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -d_2 H(x) & 0 & 0 & -d_1 & 0 & 0 & 0 & d_3 \cos(x_{r_2}) \\ 0 & -b_2 E(x) & 0 & 0 & -b_1 & 0 & -b_3 & 0 \\ 0 & -a_2(\alpha x_{r_8} + 1)E(x) & 0 & 0 & 0 & -a_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_1 \end{bmatrix} \tag{14}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & -0.5c_2 & 0.5c_2 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0.5e_2 & 0.5e_2 \end{bmatrix}^T$$

Burada $E(x) = \sin(x_{r_2})/x_{r_2}$ ve $H(x) = \sin(x_{r_1})/x_{r_1}$ terimlerini temsil etmektedir.

Benzetimde kontrolü sağlanacak sistem olarak durum-uzay formunda ele alınacaktır. $\dot{x} = A(x)x + B(x)u$ yapısında, referans model ile benzer $A(x)$ ve $B(x)$ DBK matrisleri kullanılmıştır. Matematik modelinde kullanılacak olan sabitler Tablo-2’de verilmiştir.

Tablo 2

Kontrol edilmek istenen 3 SDS Helikopter Modelinin Sabitleri

Sabitler	a_1	a_2	b_1	b_2	b_3	c_1	c_2	d_1	d_2
Değerler	0.4000	0.3500	0.2000	3.5000	12.8000	4.6000	1.0000	0.2000	0.3000

Sabitler	d_3	e_1	e_2	α
Değerler	2.4000	8.2800	1.0000	4.8000

Som olarak, referans modelin kontrolü sağlanacak iki ekseninde istenen değerleri takip edebilmesi için, ele alınan tüm sistemlerin hem durum değişkenleri hem de DBK matrisleri aşağıdaki gibi genişletilmiştir: $\tilde{x}_r = x - x_r$, $\zeta_e = \int(x_r - y)$ ve $y = Cx$ olmak üzere,

$$e = \begin{bmatrix} \tilde{x}_r \\ - \\ \zeta_e \end{bmatrix}, \quad \tilde{A}_r(e) = \begin{bmatrix} A_r(\tilde{x}_r) & 0 \\ - & - \\ -C & 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{B}_r(e) = \begin{bmatrix} B_r(\tilde{x}_r) \\ - \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

burada $C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{m \times n}$. Böylece doğrusal olmayan, genişletilmiş referans model dinamiği, aşağıdaki durum-uzay formunda kullanılarak kontrol edilir:

$$\dot{e} = \tilde{A}_r(e)e + \tilde{B}_r(e)\tilde{u}_r \quad (16)$$

BULGULAR ve TARTIŞMA

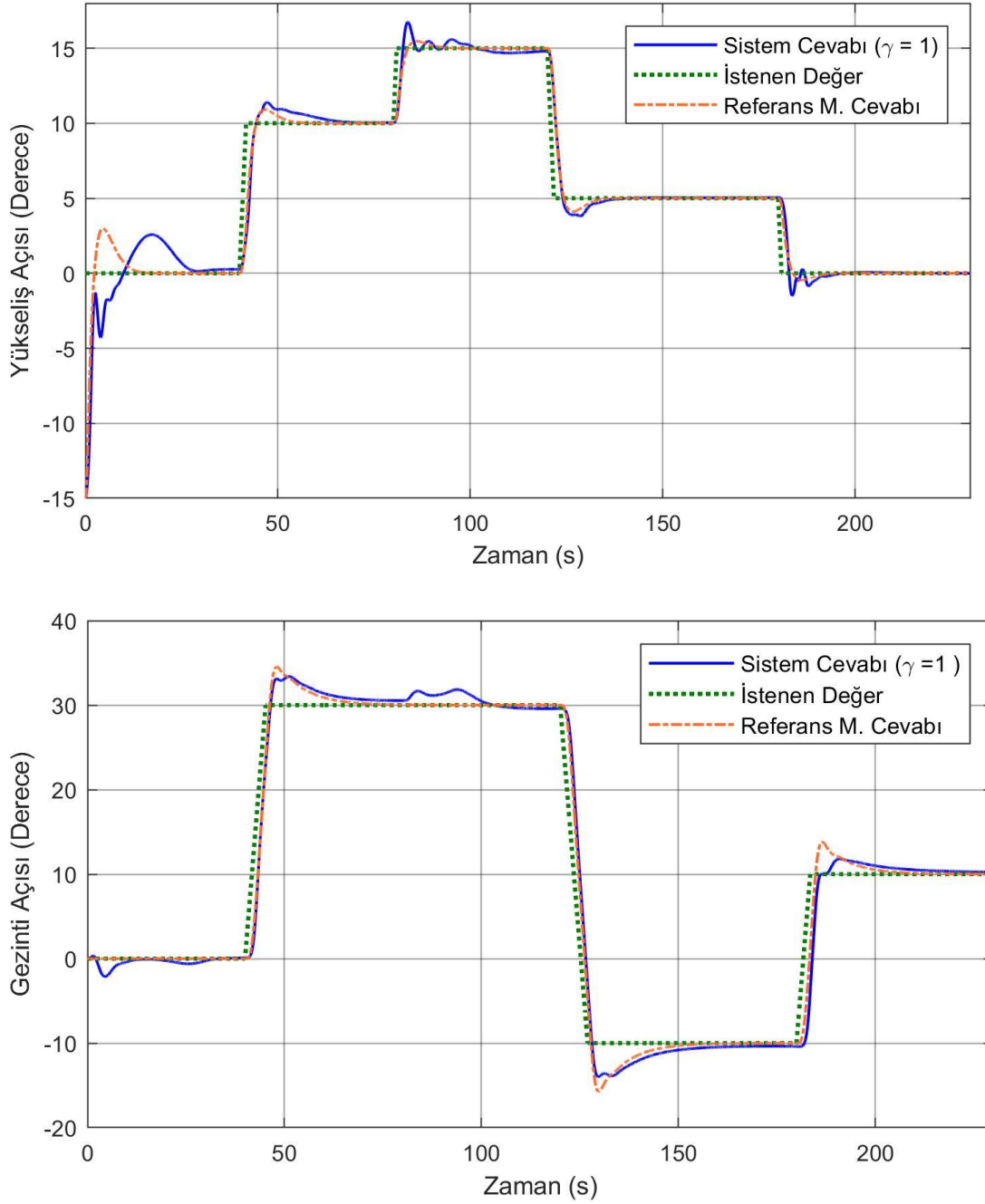
Benzetim modeli oluşturulan üç serbestlik dereceli tandem rotora sahip laboratuvar helikopteri, yöntem bölümünde önerilen MRAK ile kontrol edilmiştir. Araştırmanın ana konusu, doğrusal olmayan referans modele sahip MRAK tasarımında bulunan adaptasyon hızı değişkeninin, sistem cevabına etkisinin incelenmesidir. Üç serbestlik dereceli helikopterin kontrolü, yükselme ve gezinti eksenlerinde sağlandığından, sistem cevapları bu iki eksen üzerinden irdelenmiştir.

Adaptasyon hızı değişkeni, kolaylık olması açısından, her bir inceleme için tüm durum değişkenlerine eşit ağırlıklandırma yapılacak şekilde seçilmiştir: $\Gamma = \gamma * (\text{diag}(1 \cdots 1)) \in \mathbb{R}^{n \times n}$. Gösterilen yapıda, γ değişkeninin seçilen beş farklı pozitif değeri için (1,3,5,10 ve 100) irdeleme yapılmıştır.

İlk olarak, adaptasyon hızı değişkeninin, adaptasyon kuralı içerisinde etkisiz eleman olarak yer aldığı $\gamma = 1$ değeri için hesaplanan kontrol sistemi ele alınmıştır. $\gamma = 1$ değeri için benzetimi yapılan sistemin cevapları, Şekil-2'de her iki eksen için de verilmiştir. Sistemin, yükselme eksenindeki 0-40 s aralığında referansı takip etmekte başarılı olduğu söylenemez. Aynı zaman aralığında gezinti ekseninde durağan kalması beklenen sistemin, yükselme ekseninde gerçekleşen başarısız takip sürecinin sonucunda yalpaladığı görülmektedir. Yükselme ekseninde 80-120 s ve 180-230 s aralıklarındaki geçici hal cevabı sırasında istenen takip performansı yine sergilememiştir, buna karşın; 40-80 s ve 120-180 s aralığında, geri kalan zaman dilimlerine nispeten daha iyi takibin sağlatılmış olduğu söylenebilir. Gezinti ekseninde ise, ilk 40 s ve yükselme eksenine komut sinyali verildiği 80'inci s'de görülen bozulmalar haricinde takibin gerçekleştirilebildiği görülmektedir. Adaptasyon hızı devreye alınarak, yükselme eksenindeki referans model takibinin iyileştirilmesi beklenmektedir.

Şekil 2

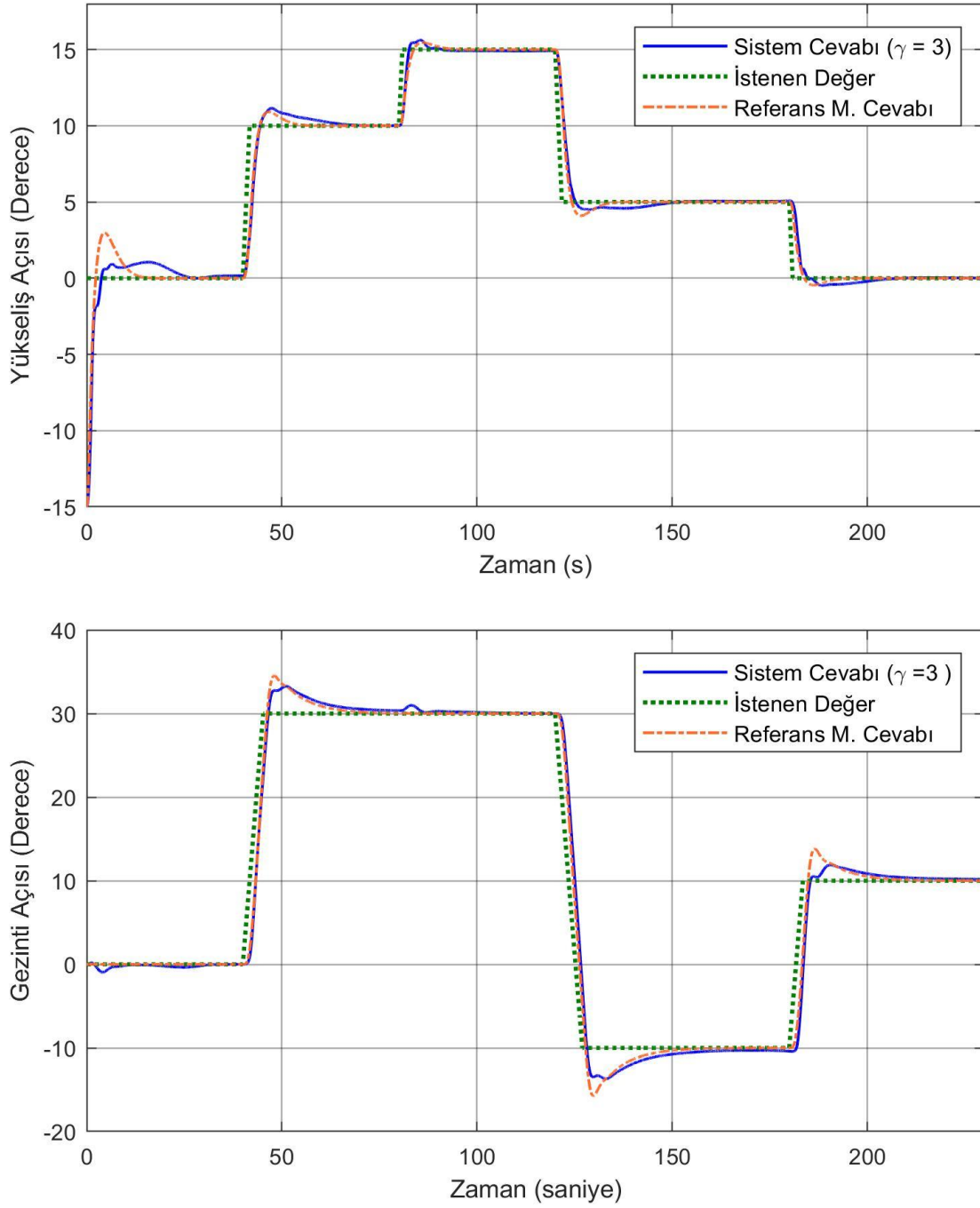
$\gamma = 1$ Değeri için Sistemin Yükseliş ve Gezinti Eksenlerindeki Cevapları



$\gamma = 3$ değeri için benzetimi yapılan sistemin cevapları, Şekil-3’de her iki eksen için de verilmiştir. Sistemin, yükselme eksenindeki 0-40 s aralığında referansı takip etmekte başarılı olduğu söylenemez ancak, Şekil-2’ye kıyasla daha düzgün bir yönelime sahip takibin yaptırıldığı söylenebilir. Aynı zaman aralığında gezinti ekseninde durağan kalması beklenen sistemin, yükselme ekseninde gerçekleşen istikrarsız takip sürecine göre yalpalama durumu Şekil-2’ye kıyasla çok daha azalmıştır. Yükselme ekseninde 80-120 s ve 180-230 s aralıklarındaki geçici hal cevabı sırasında takip performansı Şekil-2’ye kıyasla büyük oranda iyileşme göstermiş, buna karşın; 40-80 s ve 120-180 s aralığında, Şekil-2’ye kıyasla aşma değerlerinde iyileşme görülürken oturma zamanı değerlerinde kötüleşmeden bahsedilebilir

Şekil 3

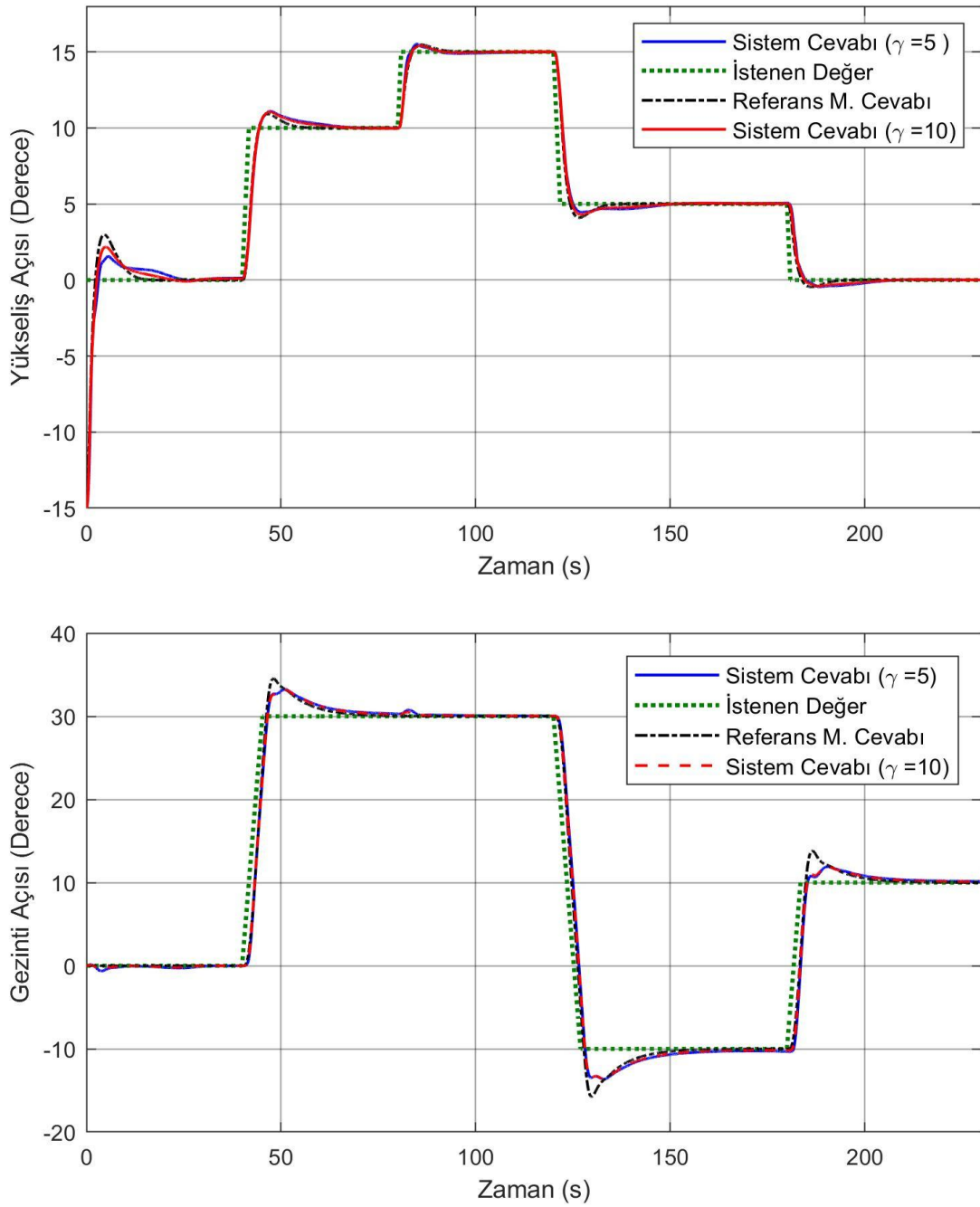
$\gamma = 3$ Değeri için Sistemin Yükseliş ve Gezinti Eksenlerindeki Cevapları



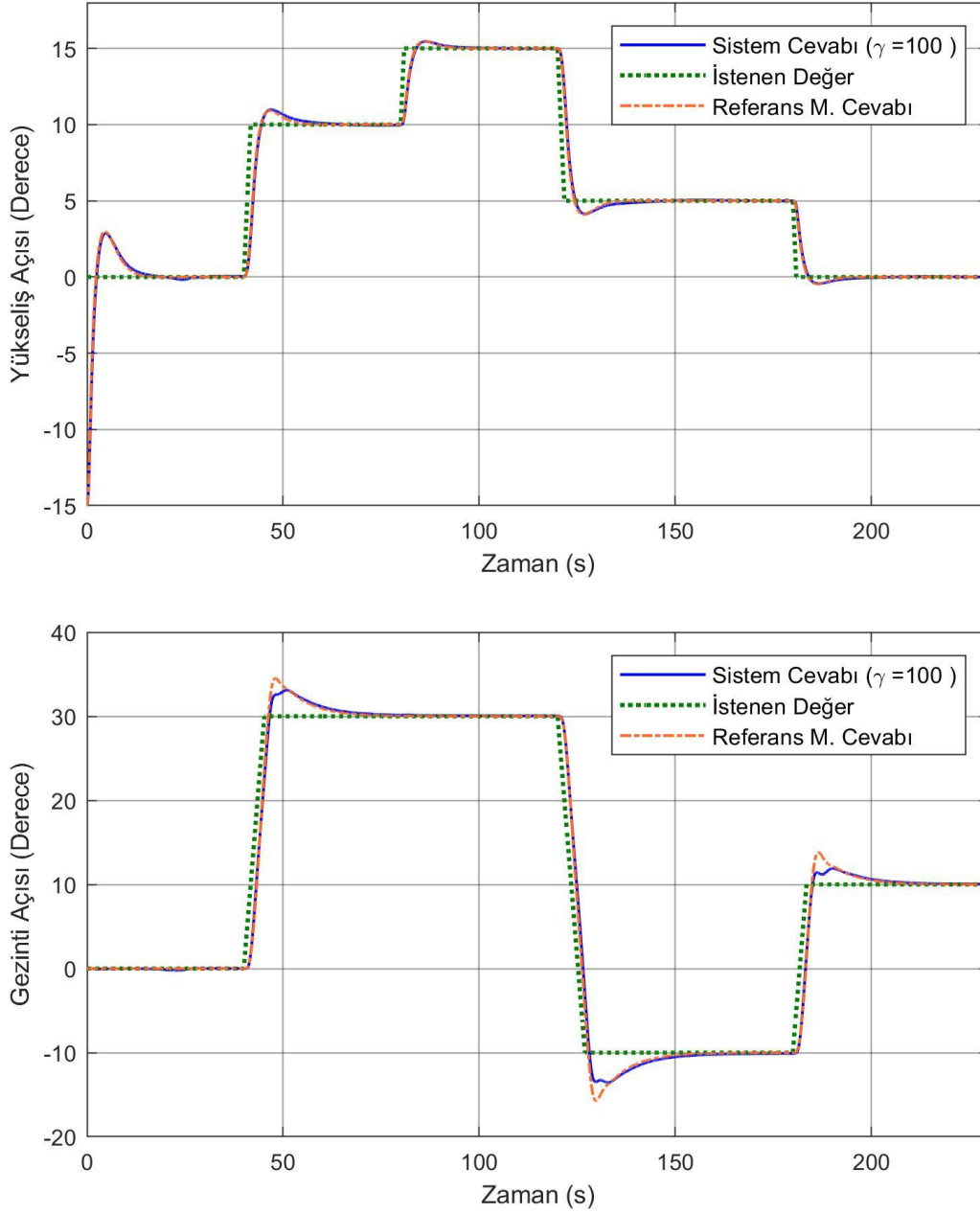
Gezinti ekseninde ise, ilk 40 s ve yükselme eksenine komut sinyali verildiği 80'inci s'de görülen bozulmaların Şekil-2'ye kıyasla büyük oranda düzeltildiği görülmektedir. Adaptasyon hızı artırılarak, yükselme ekseninde daha iyi düzeltmeler beklenmektedir.

Şekil 4

$\gamma = 5$ ve $\gamma = 10$ Değerleri için Sistemin Yükseliş ve Gezinti Eksenlerindeki Kıyaslamalı Cevapları



$\gamma = 5$ ve 10 değerleri için benzetimi yapılan sistemin cevapları, Şekil-4'de her iki eksen için de kıyaslamalı şekilde verilmiştir. Sistemin, yükselme eksenindeki $0-40$ s aralığında referansı takip etmekte $\gamma = 10$ değerinin 5 değerine göre daha da başarılı olduğu söylenebilir ve Şekil-3'e kıyasla kayda değer gelişim gösteren takiplerin yapıldığı söylenebilir. Aynı zaman aralığında gezinti ekseninde durağan kalması beklenen sistemin yalpalama durumu, her iki değer için de Şekil-3'e kıyasla çok daha azalmıştır. Yükselme ekseninde $80-120$ s aralığında referans takibi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Aynı eksen, geriye kalan zaman aralıklarındaki referans takip performansı, Şekil-3'e kıyasla her iki değer için, az da olsa iyileşme göstermiştir. Gezinti ekseninde ise, yükselme eksenine komut sinyali verildiği 80 'inci s'de görülen bozulmaların her iki değer için de Şekil-3'e benzer olduğu ve referans takibin başarıyla yapıldığı söylenebilir.

Şekil 5 $\gamma = 100$ Değeri için Sistemin Yükseliş ve Gezinti Eksenlerindeki Cevapları

Şekil-4'ten de açıkça görüldüğü üzere, adaptasyon kuralındaki γ 'nın değeri 5 ila 10 değerleri arasında seçildiğinde hem yükselti hem de gezinti eksenini için başarılı sonuçlar alınmaktadır. Yükseltme eksenindeki ilk 40 s için daha başarılı bir referans takibinin olup olmayacağı sorusunun cevaplanabilmesi adına, adaptasyon hızı $\gamma = 10$ değerine göre on kat daha artırılmıştır. Şekil-5'te, sistemin her iki eksen için de referans takip cevabı, özellikle yükseliş eksenindeki ilk 40 s için kayda değer bir düzelme göstererek, tatmin edici sonuçlar vermiştir. Bu çalışmada adaptasyon değişkeninin, kapalı-döngü kontrol sisteminin kararlılığına etkisi teorik olarak incelenmemiştir. Ayrıca, önerilen MRAK tasarımı için henüz bu durum bilinmemektedir. Bu sebeple sistem, benzetim tabanlı operasyon zamanının on katı kadarlık süre boyunca çalıştırılarak gözlemlenmiştir. Bu sistem özelinde, $\gamma = 10^2$ değeriyle çalışan MRAK'ye sahip sistem, 2500 s süresince kararlı bir şekilde çalışmıştır.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Doğrusal sistemler için MRAK tasarımlarında önemli yer tutan adaptasyon hızı değişkeni; teorik anlamda literatürde çokça çalışılmış, bu sayede değişkenin sistemler için sınırlandırılmaları ve sistem cevaplarına etkileri bilinmektedir. Doğrusal olmayan referans modele sahip olacak şekilde önerilen MRAK tasarımında ise -yazarların bildiği kadarıyla- adaptasyon hızının etkileri henüz incelenmemiştir. Buradan yola çıkarak, adaptasyon hızı değişkeninin, doğrusal olmayan bir referans sistemi tasarlanarak elde edilmiş MRAK'ye sahip fiziksel bir sistemin üzerindeki etkinliği irdelenmiştir. Bu irdeleme, önerilen MRAK tasarımının özelinde, 3 SDS bir helikopter sisteminin benzetimi yapılarak sonuçların kıyaslanması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Kıyaslamalar, helikopterin konum kontrolleri sağlanan iki eksen üzerinden yapılmıştır.

Adaptasyon hızı değişkeni, kolaylık olması açısından, her bir inceleme için tüm durum değişkenlerine eşit ağırlıklandırma yapılacak şekilde seçilmiştir: $\Gamma = \gamma * (\text{diag}(1 \dots 1)) \in \mathbb{R}^{n \times n}$. Gösterilen yapıda, γ değişkeninin seçilen beş farklı pozitif değeri için (1,3,5,10 ve 100) irdeleme yapılmıştır. Adaptasyon hızı değişkeninin, adaptasyon kuralı içerisinde etkisiz eleman olarak yer aldığı $\gamma = 1$ değeri için sistem incelenmiş, referans takibinin özellikle yükselme ekseninde istenen şekilde yapılamadığı görülmüştür. Ardından bu değişken 3 değerine artırılmış, bu değer için yükselme eksenindeki referans takibinde iyileşmeler gözlemlendiği ve gezinti ekseninde takibinin büyük ölçüde gerçekleştirildiği görülmüştür. $\gamma = 3$ değerinden itibaren gezinti eksenini için herhangi bir değer artışına gerek duyulmayabilir. Değerler 5 ve özellikle 10 olarak seçildiğinde, yükselme eksenini için referans takip istenen düzeye gelmiştir. Yükselme eksenindeki ilk 40 s için daha başarılı bir referans takibinin olup olmayacağı sorusunun cevaplanabilmesi adına, adaptasyon hızı $\gamma = 10$ değerine göre on kat daha arttırılmıştır. Şekil-5'te, sistemin her iki eksen için de referans takip cevabı, özellikle yükseliş eksenindeki ilk 40 s için kayda değer bir düzelmeye göstererek, tatmin edici sonuçlar vermiştir. Ayrıca, $\gamma = 100$ değeri için benzetim, 2500 s süresince sorunsuz çalıştırılmıştır.

Test edilen her bir MRAK'nin değişen adaptasyon kurallarıyla, referans sistem takiplerinin ne ölçüde yapılabildiği incelenmiştir. γ değeri 1 ila 100 arası değerleri için benzetimler gerçekleştirilmiş ve bu değerlerin arttırılması sonucunda –beklenildiği üzere- sistem cevaplarında kayda değer düzelmeler görülürken, kapalı-döngü kontrol sisteminde herhangi bir kararlılık sorunu yaşanmamıştır.

Gelecekte, doğrusal olmayan bu kontrolcü önerisinde yer alan adaptasyon hızı değişkeninin sistemler için kararlılık açısından sınırlamaları, teorik olarak çalışılabilir.

Etik Kurul Onayı

Bu çalışmada etik kurul onayı gerektiren insan veya hayvan denekleri kullanılmamıştır. Araştırma, kamuya açık veri setleri, literatür taramaları veya teorik analizler üzerinden yürütülmüştür. Etik kurallar gereği, araştırma sürecinin her aşamasında akademik dürüstlük ve bilimsel etik kurallara tam uyum sağlanmıştır. Bu nedenle, etik kurul onayı gerekmemiştir.

Yazar Katkıları

Araştırma Tasarımı (CRediT 1) Yazar 1 (%60) – Yazar 2 (%20) – Yazar 3 (%20)

Veri Toplama (CRediT 2) Yazar 1 (%60) – Yazar 2 (%20) – Yazar 3 (%20)

Araştırma - Veri analizi - Doğrulama (CRediT 3-4-6-11) Yazar 1 (%60) – Yazar 2 (%20) – Yazar 3 (%20)

Makalenin Yazımı (CRediT 12-13) Yazar 1 (%60) – Yazar 2 (%20) – Yazar 3 (%20)

Metnin Tashihi ve Geliştirilmesi (CRediT 14) Yazar 1 (%20) – Yazar 2 (%40) – Yazar 3 (%40)

Finansman

Bu çalışmada finansal destek alınmamıştır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar arasında çıkar çatışması yoktur.

Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SDG)

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları: Desteklemiyor

REFERENCES

- Aström, K. J. & Wittenmark, B. (1995). *Adaptive Control (2nd Edition)*. New York: Addison-Wesley.
- Bitmead, R. R., Gevers, M. & Wertz, V. (1990). *Adaptive Optimal Control: The Thinking Man's GPC*. New York: Prentice Hall.
- Egardt, B. (1979). *Stability of Adaptive Controllers*. Berlin: Springer.
- Friedland, B. (1996). *Advanced Control System Design (1st Edition)*. New Jersey: Prentice Hall.
- Ioannou, P. A. & Sun, J. (1996). *Robust Adaptive Control*. New Jersey: Prentice Hall.
- Isa, J. T., Wu, B., Wang, Q., Zhang, Y., Burden, S. A., Ratliff, L. J., & Chasnov, B. J. (2024). Effect of Adaptation Rate and Cost Display in a Human-AI Interaction Game. *arXiv preprint arXiv:2408.14640*.
- Ishutkina, M. A. (2004). *Design and implementation of a supervisory safety controller for a 3DOF helicopter*. Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- Kocagil, B. M., Ozcan, S., Arican, A. Ç., Guzey, U. M., Çopur, E. H. & Salamci, M. U. (2018). *MRAC of a 3-DoF Helicopter with Nonlinear Reference Model*. 26th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED) (pp.278-283).
- Krstić, M., Kokotovic, P. V. & Kanellakopoulos, I. (1995). *Nonlinear and Adaptive Control Design*. New York: Wiley.
- Landau, I. (1979). *Adaptive Control-The Model Reference Approach*. New York: Marcel Dekker.
- Landau, I. D., Lozano, R., M'Saad, M. & Karimi, A. (2011). *Adaptive Control: Algorithms, Analysis and Applications*. London: Springer-Verlag. pp.1-33.
- Sastry, S. & Bodson, M. (1989). *Adaptive Control: Stability, Convergence, and Robustness*. New Jersey: Prentice Hall.
- Slama, S., Errachdi A. & Benrejeb M. (2019). Online MRAC Method Using Neural Networks based on Variable Learning Rate for Non-linear Systems. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 60(3), 215-224.
- Tosun, D.C. & Işık, Y. (2023). Model Reference Adaptive Control of a Quadrotor: Simulation and Flight Tests. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 9(3), 220-239.
- Zhang, P. (2010). *Advanced Industrial Control Technology: Chapter 19 - Industrial control system simulation routines*. New York: William Andrew Publishing. pp.781-810.

EXTENDED ABSTRACT

Purpose: Model Reference Adaptive Controllers (MRAC) are commonly used for systems with unmodeled dynamics or parameter uncertainties. While the adaptation rate's impact has been extensively studied in linear MRAC designs, its role in nonlinear reference model-based MRAC remains unexplored. This study investigates the influence of adaptation rate on the performance of a 3-degree-of-freedom (3-DoF) helicopter system controlled by a nonlinear MRAC.

Methods: The nonlinear MRAC design utilizes an adaptation rate parameter, $\Gamma = \gamma \cdot \text{diag}(1, \dots, 1)$, tested with γ values of 1, 3, 5, 10, and 100. Simulations focused on the system's ability to track the reference model along elevation and travel axes. Each test retained identical conditions apart from the adaptation rate to isolate its effects.

Results: At $\gamma=1$, the system showed poor tracking, particularly along the elevation axis. Increasing γ improved tracking significantly, with optimal performance achieved at $\gamma=10$. A further increase to $\gamma=100$ enhanced early tracking without stability issues, and the system ran stably for extended periods (up to 2500 seconds).

Conclusion: The adaptation rate is critical for nonlinear MRAC performance, directly influencing tracking quality and convergence. Future research could explore theoretical stability constraints for adaptation rate in nonlinear systems.