

Model Bağımsız Uyarlamalı Bulanık PID Kontrolör Tabanlı Hava Saldırı Algoritması

Model Free Adaptive Fuzzy PID Controller based Air Attack Algorithm

Mete Furkan OKUMUŞ¹, Hasan İŞÇİ², Kemal UÇAK³

^{1,3}Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

metefurkanokumus@gmail.com

ucak@mu.edu.tr

²Uçak ve Uzay Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi, Ayazağa

iscih@itu.edu.tr

Özetçe

Bu çalışmada, hava saldırı algoritmalarında, hız kontrolörü olarak kullanılması için, model bağımsız adaptif bulanık PID kontrolör yapısı önerilmiştir. Bulanık PID kontrolörün performansını iyileştirmek için, ölçekleme katsayılarının uyarlandığı, fonksiyon uyarlayıcı ve Levenberg-Marquardt tabanlı adaptasyon mimarileri kullanılmıştır. Fonksiyon uyarlayıcı adaptasyon mekanizması Bulanık PID kontrolörün tüm parametrelerini optimize etmek için iyileştirilmiştir. Farklı savaş senaryolar için çeşitli adaptasyon mekanizmalarının performansları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, it dalaşı problemi için, Levenberg-Marquardt tabanlı bulanık PID kontrolörün etkili bir kontrol performansı sunduğunu göstermektedir.

Abstract

In this study, a model-free adaptive fuzzy PID controller structure is proposed to be used as a speed controller in air attack algorithms. Function tuner and Levenberg-Marquardt based adaptation architectures to which scaling coefficients are adapted are used to enhance the performance of the fuzzy PID controller. The function tuner based adaptation mechanism has been improved to optimize all the parameters of the Fuzzy PID controller. The performances of various adaptation mechanisms for different war scenarios are examined. The results indicate that the Levenberg-Marquardt based fuzzy PID controller offers effective control performance for the dogfight problem.

1. Giriş

Hava savaşları, saldırı, savunma ve keşif amacıyla ilk kez Birinci Dünya Savaşı döneminde kullanılmaya başlanmıştır. Zamanla, hava savaş sistemlerinin önemi önemli ölçüde artmış ve

günümüzde modern savaş tekniklerinin temel bir unsuru haline gelmiştir. Uzman ve yapay zekâya sahip sistemler sayesinde, hava saldırısında kullanılan mekanizmalar tamamen otonom özelliğe bürünmüştür. Bu otonom sistemler son zamanlarda önemli bir ilerleme kaydetmiş ve birçok alanda etkili bir biçimde kullanılmaktadır. Bu teknoloji, özellikle hava savunma sanayi sektöründe büyük bir öneme sahip olmuştur. Askeri savunma, silahlanma ve saldırı için birçok otonom hava aracı üretilmiş ve büyük yatırımlar gerçekleştirilmiştir. İnsansız hava araçları, hızlı ve ani manevralar yapabilme yetenekleri ve daha düşük maliyetleri sebebiyle askeri alanda giderek artan bir şekilde tercih edilmektedir. Günümüzde halen gerçekleşen hava savaşlarında, uzman ve yapay zekâ destekli savaş stratejileri, pilotların taktiksel manevra kararlarında büyük bir rol oynadığı için bu teknolojilerin önemi oldukça büyüktür[1]. Otonom hava savaşlarında manevra kararı[2][3], algılama ve yürütme süreçlerini entegre etmek zorunda olan karmaşık bir mühendislik problemidir ve bu süreçlerin verimli bir şekilde yönetilmesi, savaş sırasındaki başarıyı belirleyen önemli faktörler arasındadır. Savaşta kullanılan akıllı algoritma tabanlı manevra planlaması, stratejik hareketlerin etkin bir şekilde planlanması için kullanılan bir yöntemdir[2]. SİHA'ların hava savaşlarında kullanımı için uygun algoritmaların tasarımı, hava savaş tekniği ile uyumlu hale getirilmelidir. Bu tasarım aşamasında bazı zorluklarla karşılaşılabilir. Gerçek zamanlı işlevsellik ve yetersiz sensör sayısı, bu tür algoritmaların tasarımında karşılaşılan başlıca zorluklar arasındadır[4]. Bu sebeple, teknik literatürde, bir dizi uzman ve yapay zekâ tabanlı hava saldırısı algoritması önerilmiştir. Hu vd, görsel mesafeyi aşan hava savaşları için akıllı manevra planlaması için bir derin Q ağı (DQN) kullanarak geliştirilmiş bir algoritma önermiştir[2]. Lei vd, pilot eğitimi için bir entegre sanal rakip eğitim platformu tasarlayarak, anlık eğitim imkânı sağlamışlardır[5]. Çimen, hava savaşları (dogfight) için genetik algoritma ve parçacık sürü algoritması tabanlı bir karar mekanizması önermiştir[6]. Wang vd,

belirli bir hava muharebesi senaryosunda kullanılabilen orantılı navigasyon gibi geleneksel navigasyon kanunlarının, saldırı manevralarının modellenmesi için başarılı bir şekilde kullanılabilirliğini iddia etmişlerdir[7]. Akbari ve Menhaj, hava-hava muharebelerinin özel bir senaryosu için, saldırı manevralarını modellemek için kullanılacak yeni bir bulanık mantık tabanlı güdüm yasası önermektedirler[8]. Changqiang vd, hava savaş durumunu Bayes çıkarım teorisi kullanarak etkin bir şekilde hesaplamışlar ve hava savaş oyununu bir Markov süreci olarak ele alarak otonom bir manevra karar sistemi önermişlerdir[9]. Akbari vd, hava muharebesinde iki uçak arasındaki karmaşık saldırı manevralarını modellemek ve gerçekleştirmek için etkili bir şekilde kullanılacak bir bulanık mantık tabanlı güdüm yasası önerisinde bulunmuşlardır[10]. Smith vd, savaş simülasyonu ve genetik algoritma tabanlı bir makine öğrenimi süreci başlatarak, yeni nesil dövüş manevralarını öğrenmek için bir yöntem önermişlerdir[11]. Zhang vd, hava muharebesi için bir karar verme modeli oluştururken, insan bilişinin belirsizliğini göz ardı eden üretim kuralı tabanlı bir yaklaşımın yerine daha güvenilir bir yaklaşım olarak tip-2 bulanık mantık sistemine dayalı bir yaklaşım önermişlerdir[12]. Stefek ve Frantis, sanal otopilot tasarımlarında kullanılacak bir bulanık kontrolör yapısı önerisi sunmuşlardır[13]. MsGrew vd, bir hava muharebesi manevra problemi için formülasyon yaparak, yaklaşık bir dinamik programlama yöntemi kullanarak optimal stratejinin tahminini belirlemişlerdir[14]. Zhang vd, hava muharebesinde kullanılabilen operasyonel simülasyon ortamlarında ajanların eğitimi için çekişmeli üretici ağlar (generative adversarial networks) (GAN) ve derin pekiştirmeli öğrenme (RL) yöntemlerini başarıyla kullanmışlardır[15]. Sun vd, bir hava muharebesi ortamında en iyi stratejinin belirlenmesi için bulanık karar mekanizması tabanlı bir akıllı karar destek sistemi önerisinde bulunmuşlardır ve bu sistemler, ileri düzeydeki savaş pilotlarına yardımcı olabilecek ve gelişmiş hava muharebesi simülasyonlarına uyum sağlayabilecek şekilde tasarlanmıştır[16]. Dongfeng vd, belirsizlik içeren ortamlarda rasyonel karar vermenin zorluğunu vurgulayarak, tehdit değerlendirmesi yapmak için bulanık mantık tabanlı bir muhakeme sistemi önerisinde bulundular[17]. Bu çalışmada, hava saldırısı algoritmaları için bulanık PID kontrolör yapısı ile optimal manevra stratejisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, kontrolör parametrelerinin adaptasyonu için, fonksiyon uyarlayıcı ve Levenberg-Marquardt algoritmaları kullanılmıştır. Önerilen adaptif yapıların çıkarım ve kontrol performansları, İşçi ve Günel tarafından önerilen saldırı algoritması[4][18] üzerinde değerlendirilmiştir. Önerilen uyarlama mekanizmaları, farklı senaryolar için, bulanık kontrolör parametrelerinin yeniden tasarımını gerektirmeden çevrimiçi kullanılabilirliği avantajı sağlamaktadır. Bu çalışma şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 2’de hava muharebe manevrası problemi sunulmuştur. Hava saldırı dinamiklerinin modellenmesi bölüm 2.1’de verilmiştir. Bölüm 2.2’de navigasyon kontrolör yapısı incelenmiştir. Bölüm 2.3.’de hız kontrolörü tasarımı araştırılmıştır. Bölüm 3’te model bağımsız uyarlamalı bulanık PID kontrolör yapıları araştırılmıştır. Bölüm 3.1’de bulanık PID kontrolör yapısına genel bir bakış sunulmuştur. Bölüm 3.2 ve 3.3’de fonksiyon uyarlayıcı yapısı araştırılmıştır. Bölüm 3.3’te fonksiyon uyarlayıcı mekanizma, tüm kontrolör parametrelerinin uyarlanması için iyileştirilmiştir. Bölüm 3.4’te Levenberg Marquardt(LM) tabanlı uyarlamalı bulanık bulanık PID

kontrolör yapısı araştırılmıştır. Önerilen adaptasyon mekanizmalarının kontrol başarımı, Bölüm 4’te simülasyon ve kıyaslama sonuçlarında sunulmuştur. Son olarak, bu çalışma bölüm 5’te sonuçlar bölümüyle bitirilmiştir.

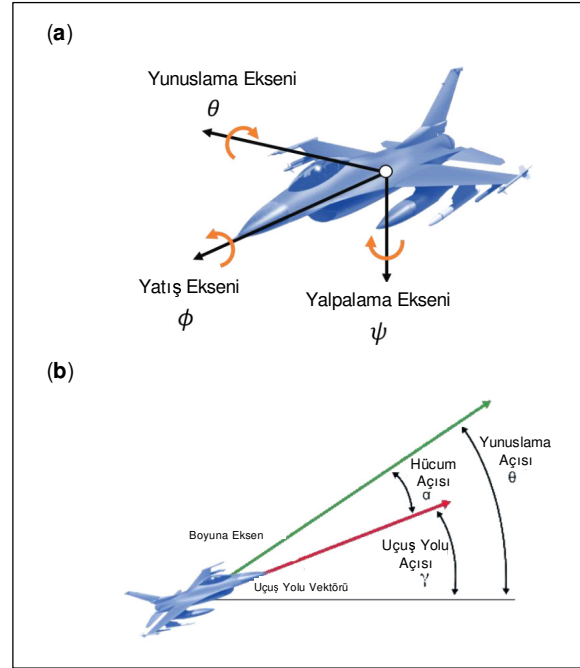
2. Hava Muharebe Manevrası Problemi

2.1. Hava Saldırı Dinamiklerinin Modellenmesi

Lineer olmayan 6 DOF (degree of freedom) model aşağıdaki gibi oluşturulmuştur. Hücum açısının ve yana kayma açısının sıfır olarak alındığı durumlar ve iç döngü kontrolörlerin başarılı bir şekilde hava aracının açılal hız değişimlerini kontrol ettiği varsayımları altında 6 serbestlik dereceli hareket denklem (1) deki gibi formülize edilebilir [4][18]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_N &= V_T \cos(\theta) \cos(\psi) \\ \dot{y}_E &= V_T \cos(\theta) \sin(\psi) \\ \dot{z}_D &= -V_T \sin(\theta) \\ \psi &= \frac{g}{V_T} \tan(\phi) \cos(\theta) \end{aligned} \quad (1)$$

Buradaki x , y , z uçağın dünya eksenindeki konumlarıdır ve N , E , D alt simgeleri sırasıyla kuzey, doğu ve aşağı koordinatları gösterir[4][18]. V_T uçağın vücut eksenindeki hızıdır [4][18]. ϕ , θ ve ψ uçağın sırasıyla yuvarlanma (yatış), yunuslama (uçuş yolu) ve yalpalama (yön) açılarını temsil eden Euler açılarıdır ve g yerçekimi sabitidir [4][18]. Şekil 1’de eksenler verilmiştir. Özetleyecek olursak denklem 1, hava aracının tutumuna göre basit hareketini gösterir [4][18]. Sınırlı manevra kabiliyetine sa-



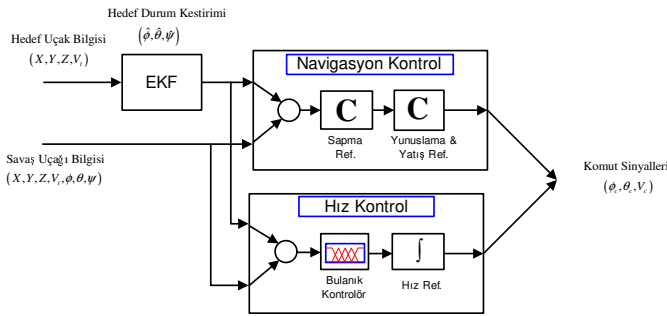
Şekil 1: Uçağın eksen (a) ve açı (b) tanımları[18].

hip bir silahlı insansız hava aracı için havadan havaya taarruz algoritması, Şekil 2’de gösterildiği gibi iki ana bölümden oluşmaktadır [4][18]. Şekil 2’de gösterildiği gibi, hedefin konumu

geniştirilmiş kalman filtresi (EKF) aracılığıyla tahmin edilmektedir [4][18]. Stabilite artırma sistemi (SAS), kontrol artırma sistemi (KBS) ve motor sistemleri, birinci dereceden dinamik sistemler olarak aşağıda verilen (2) denkleminde modellenmesi oluşturulmuştur[18]. Bu sebeple, uçağın komut verilen durum ve hız değerlerini zaman gecikmesiyle takip ettiği varsayılmıştır [18].

$$\begin{aligned}\dot{\phi} &= \frac{1}{\tau_p} (\phi_c - \phi) \\ \dot{\theta} &= \frac{1}{\tau_t} (\theta_{T_c} - \theta) \\ \dot{V}_T &= \frac{1}{\tau_v} (V_{T_c} - V_T)\end{aligned}\quad (2)$$

Burada ϕ , θ ve ψ açıları, uçağın Euler açıları iken, ϕ_c , θ_c ve V_{T_c} uçağın yuvarlanma açısı, yunuslama açısı ve hızının komut değerleridir [18]. τ_p , τ_t , ve τ_v kontrol edilmiş sistemlerin zaman sabitleridir [18]. Bu zaman sabitleri gerçek dünyadaki uçak tipine ve modeline göre farklılık gösterebilir[18]. Simülasyonlarda hem takipçi hem de hedef uçakların aynı özelliklere sahip olduğu varsayılır [18]. (1) ve (2) denklemlerinde verilen modellemede, bir SIHA'nın dinamik hareketleri, rehberlik algoritmalarına göre oluşturulmuştur [18]. Navigasyon kısmı, re-



Şekil 2: Hava saldırı algoritması genel tasarımı[4][18].

ferans yön açısı (sapma açısı), yatış açısı (yalpalama açısı) ve uçuş yolu açısının (yunuslama açısı) üretildiği algoritmanın ilk kısmıdır [18]. Hız kısmı, referans hızın PID kontrolör, bulanık kontrolör, bulanık PID kontrolör vb. gibi çeşitli yöntemlerle hesaplanabildiği algoritmanın ikinci kısmıdır [18].

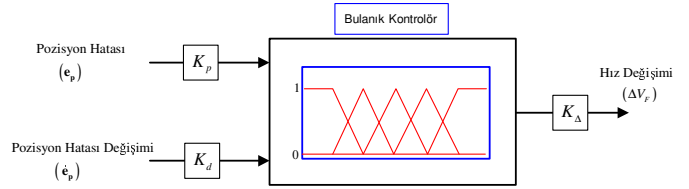
2.2. Navigasyon ve Güdüm Kontrolör

Navigasyon kontrolünün amacı, takipçi uçağı hedef uçağına göre en uygun konuma yerleştirmektir (hedef uçağın belirli bir mesafedeki kuyruğunun konumu en uygun konumdur). Ek olarak, bir uçak sürekli olarak hedefini arkadan takip ederse, hedef üzerinde hava hakimiyetine sahip olur ve hava çatışmasında üstünlük sağlar. Navigasyon algoritmasında, en avantajlı konum ve attitude (uçuş durumu) her zaman geçiş noktası olarak hedeflenir. Yön açısı, yatış (kanat) açısı ve uçuş yolu açısı komutları sırasıyla oluşturulur. Hedeflenen uçuş konumu, hedef uçağın konumu ve hızına ilişkin sensör ölçümlerine dayalı olarak tahmin edilir ve takipçi uçağın sistemine bilgi olarak aktarılır. Komutları oluşturmak için, hedef uçak ile takipçi uçağın konumu arasındaki konum hatası navigasyon biriminde hesaplanır. Daha

sonra hata vektörü, takipçi uçağın konumu kullanılarak uçağın sabit eksenine dönüştürülür. Son olarak, yatış (kanat) açısı ve uçuş yolu açısı komutları uçağın sabit ekseninde üretilir ve alt seviye kontrol artırma sistemlerine uygulanır. Navigasyon kontrolünün ayrıntıları [4][18] çalışmalarında sunulmuştur.

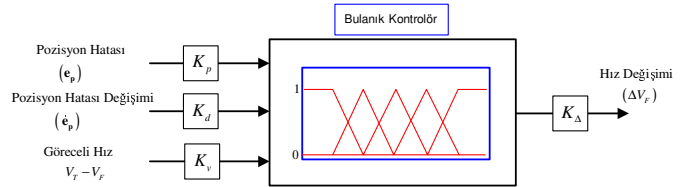
2.3. Hız Kontrolör

Hız kontrol kısmı, takipçi ve hedef uçak pozisyonları arasındaki konum hatasını en aza indirmek için takipçinin hızı için gerekli olan güncelleme terimini hesaplamayı amaçlar. Hız kontrolü için, iki ve üç girişli bulanık mantık tabanlı kontrol algoritmaları kullanılabilir. Pozisyon hatası ve hatanın türevini dikkate alan iki girişli bulanık kontrolör mimarisi Şekil 3'te sunulmuştur. Burada K_p ve K_d giriş ölçekleme katsayıları iken, K_Δ çıkış ölçekleme katsayısıdır. Şekil 4'te sunulduğu gibi, kontrol per-



Şekil 3: İki girişli bulanık mantık tabanlı hız komut oluşturma sistemi.[4][18].

formansını artırmak için, pozisyon hatası ve türevine ek olarak göreceli hız bilgiside kontrolör girişi olarak eklenebilir. Kontrolörün giriş sayısının artması durumu, kural tabanının boyutunu ve işlemsel yükü arttıracaktır. Kural tabanını daha kolay inşa edi-



Şekil 4: Üç Girişli bulanık mantık tabanlı hız komut oluşturma sistemi.[4][18].

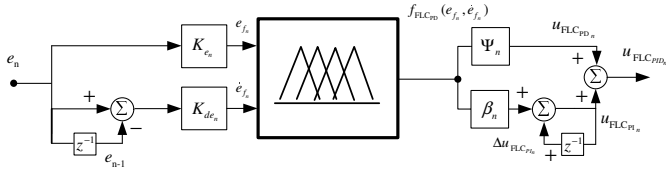
lebilmesi ve karmaşıklığı azaltmak için, Şekil 3'teki, iki girişli bulanık kontrolör mimarisi sıklıkla tercih edilmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada, Şekil 3'te gösterildiği gibi pozisyon hatası ve pozisyon hatası değişimi bilgilerini dikkate alan iki girişli bulanık mantık tabanlı kontrolör mimarisi kullanılmıştır.

3. Model Bağımsız Uyarlamalı Bulanık PID Kontrolör Yapıları

Bu bölümde, hız kontrolör olarak kullanılması hedeflenen uyarlamalı bulanık mantık tabanlı kontrolör mimarileri incelenmiştir. İşlemsel yükün azalması ve kontrol performansının iyileşmesi için, model bağımsız uyarlama mekanizmaları kullanılmıştır.

3.1. Bulanık PID Kontrolöre Genel Bir Bakış

İki girişli Bulanık PID kontrolör yapılarında, kural tabanının boyutu, 3 girişli bulanık kontrolörlere göre daha düşük olduğu ve sundukları basitliklerden dolayı, uygulamalarda sıklıkla tercih edilen kontrolör yapılarıdır. Bulanık bir PID kontrolör mimarisi Şekil 5'te verilmiştir. Burada K_e , K_d , α , β ölçekleme



Şekil 5: Bulanık PID Kontrolör Yapısı[19].

katsayılarıdır. Başarılı bir kontrol performansı için bu katsayıların uyarlanması gerekmektedir. Bu çalışmada, bulanık PID kontrolör parametrelerinin uyarlanması için, [20]'de sunulan fonksiyon uyarlama mekanizması ve LM algoritması kullanılmıştır. [20]'de sunulan fonksiyon uyarlama mekanizması, tüm ölçekleme katsayılarının adaptasyonu için iyileştirilmiştir.

3.2. Fonksiyon Uyarlayıcı (2 Parametre)

Şekil 5'te verildiği gibi, kontrolör yapısı genellikle dört parametreden oluşmaktadır. Woo vd tarafından önerilen mimaride sadece K_d ve β parametreleri adapif seçilmiştir[20]. Bu parametrelerin adaptasyon kuralları aşağıdaki gibi sunulmuştur.

$$\begin{aligned} f(e(t)) &= a_1|e(t)| + a_2 \\ g(e(t)) &= b_1(1 - |e(t)|) + b_2 \\ \beta_s(e(t)) &= \beta f(e(t)) \\ k_{d_s}(e(t)) &= k_d g(e(t)) \end{aligned} \quad (3)$$

Burada e kapalı çevrim sistemin izleme hatasını göstermektedir. Denklemlerdeki a_1 , a_2 , b_1 , b_2 pozitif sabit katsayıları temsil etmektedir.

3.3. Fonksiyon Uyarlayıcı (4 Parametre)

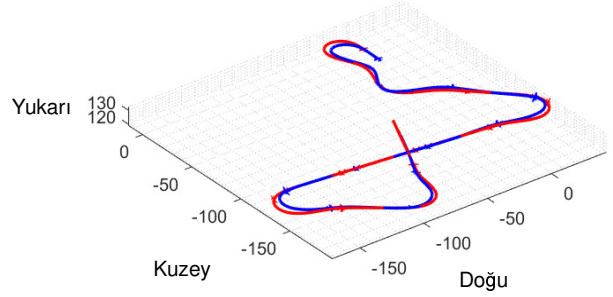
Woo vd [20] tarafından önerilen fonksiyon uyarlayıcı yapısı geliştirilerek tüm kontrolör parametreleri için uyarlanmıştır. Böylece, K_{de} ve β parametrelerine ek olarak, K_e ve α kontrolör parametreleri aşağıdaki gibi uyarlanabilir.

$$\begin{aligned} k(e(t)) &= d_1|e(t)| + d_2 \\ h(e(t)) &= c_1(1 - |e(t)|) + c_2 \\ K_{e_s}(e(t)) &= K_e k(e(t)) \\ \alpha_s(e(t)) &= \alpha h(e(t)) \end{aligned} \quad (4)$$

Bu yaklaşımla, tüm kontrolör parametrelerinin adaptif hale getirilmesi, kontrolörün esnekliğinin artırılarak kontrol performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

3.4. Levenberg-Marquardt tabanlı Uyarlamalı Bulanık PID Kontrolör

Fonksiyon uyarlayıcı mekanizmaları, doğrudan izleme hatasına bağlı olarak kontrolör parametrelerinin uyarlanmasını sağ-



Şekil 6: Levenberg Marquardt Algoritması Tabanlı PID Kontrolör ile SIHA'nın 3 Boyutlu İzleme Performansı.

lamaktadır. Kontrolör parametrelerinin optimal değerlerine yakınsamaları için, türev tabanlı bir optimizasyon metodu olan Levenberg-Marquardt tabanlı Uyarlamalı Bulanık PID Kontrolör mimarisi kullanılabilir. Kontrolör parametrelerinin optimize edilmesi için aşağıdaki amaç fonksiyonu minimize edilmesi amaçlanmaktadır.

$$J = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} e_{n+1}^2 \quad (5)$$

Denklem (5) de verilen amaç fonksiyonunun, ölçekleme katsayılarına göre optimize edilmesiyle, aşağıdaki adaptasyon kuralları elde edilebilir.

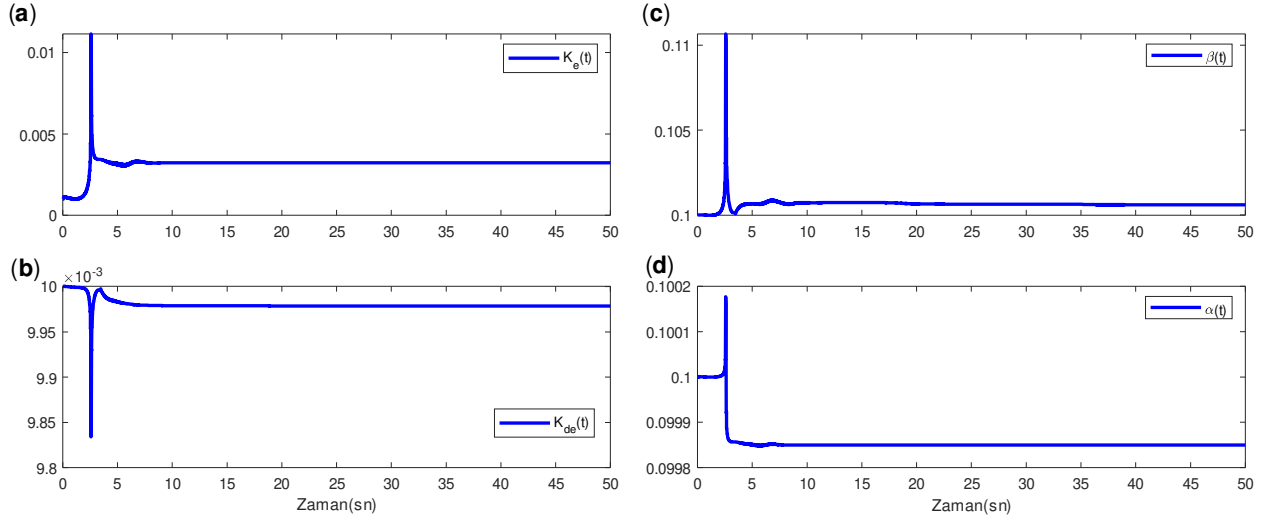
$$\begin{bmatrix} K_e^{yeni} \\ K_{de}^{yeni} \\ \alpha^{yeni} \\ \beta^{yeni} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_e^{eski} \\ K_{de}^{eski} \\ \alpha^{eski} \\ \beta^{eski} \end{bmatrix} - (\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \mu \mathbf{I})^{-1} \mathbf{J}^T \hat{e} \quad (6)$$

Yukarıda denklem (6)'da gösterilen μ , steepest descent ve Gauss-Newton algoritmaları arasında geçiş sağlayan bir parametredir[19][21]. Burada \mathbf{J} jacobian matrisini göstermektedir. Jacobian matrisinin inşa edilebilmesi için, sistemin jacobian bilgisine ihtiyaç bulunmaktadır. Bu bilgi ayrıık türevle kestirilebilir. Böylece bir sistem modeline ihtiyaç kalmamaktadır. Jacobian matrisi aşağıda (7) denkleminde belirtilmiştir.

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \tilde{e}_{n+1}}{\partial K_{e_n}} & \frac{\partial \tilde{e}_{n+1}}{\partial K_{de_n}} & \frac{\partial \tilde{e}_{n+1}}{\partial \alpha} & \frac{\partial \tilde{e}_{n+1}}{\partial \beta} \end{bmatrix} \quad (7)$$

4. Simülasyonlar ve Kıyaslama

Bulanık PID kontrolörlerin performansları, it dalaşı problemi üzerinde 4 farklı kontrolör yapısı ve 4 farklı senaryo için incelenmiştir. Bu kontrolör yapıları: sabit katsayılı Bulanık PID kontrolör, K_{de} ve β parametrelerinin adaptif olduğu Bulanık PID kontrolör, tüm kontrolör parametrelerinin (K_e , K_{de} , α , β) adaptif olduğu Bulanık PID Kontrolör yapısı ve LM tabanlı bulanık PID kontrolör mimarileridir. Bu senaryoların ilki, takipçi uçak hedef uçağın hemen arkasında ve kuyruğuna bakıyor olduğu bir senaryo. İkinci senaryoda, takipçi uçak ile hedef uçak birbirlerine karşılıklı bakıyor olduğu bir senaryo. Üçüncü senaryo, takipçi uçak hedef uçağın önünde ve arkası dönük halde



Şekil 7: Levenberg Marquardt Algoritması Tabanlı Bulanık PID Kontrolör Parametreleri-Giriş Ölçekleme Katsayıları(a,b) ve Çıkış Ölçeklendirme Katsayıları(c,d).

Tablo 1: Farklı senaryolar ve kontrolör yapıları için performans ölçümleri

Kontrolör Tipi \ Senaryolar	Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3	Senaryo 4
Sabit Katsayılı Bulanık PID	1194.0	1672.0	1851.0	1561.0
Fonksiyon Uyarlayıcı Tabanlı Adaptif Bulanık PID(2 Parametre)	131.2	1260.0	1868.0	1576.0
Fonksiyon Uyarlayıcı Tabanlı Adaptif Bulanık PID(4 Parametre)	134.6	1359.0	1880.0	1590.0
Levenberg Marquardt Tabanlı Adaptif Bulanık PID	124.2	234.5	679.0	461.4

olduğu bir senaryo. Dördüncü ve son senaryo ise hem takipçi uçağın hem hedef uçağın birbirlerine arkası dönük olduğu senaryodur. Her senaryo için en iyi performans Levenberg Marquardt tabanlı bulanık PID kontrolör mimarisinde elde edilmiştir. Şekil 6'da LM tabanlı bulanık PID kontrolörün izleme performansı sunulmuştur. Şekil 7'de LM kontrolör mimarisinin parametrelerinin zamanla değişimi sunulmuştur. Dört farklı senaryo için ilgili kontrolörlerin performansları aşağıdaki performans fonksiyonu ile kıyaslanmış ve Tablo 1 oluşturulmuştur.

$$J_c = \int_{t=0}^{t=t} |e(t)| dt \quad (8)$$

Tablo 1'den, nümerik olarak açık bir şekilde görülebileceği gibi, LM algoritması, ilgili bulanık PID kontrolörün performansını oldukça iyileştirmekte ve incelenen bulanık PID kontrolörler arasında en iyi kontrolör olmasını sağlamaktadır.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, fonksiyon uyarlayıcı tabanlı uyarlamalı bulanık PID kontrolör mekanizmaları ve Levenberg-Marquardt tabanlı uyarlamalı bulanık PID kontrolör mekanizması araştırılmış ve geliştirilmiştir. İlgili kontrolörlerin performansları it dalaşı probleminde 4 farklı senaryo üzerinde test edilmiştir. Elde edilen bulgular, fonksiyon uyarlayıcı tabanlı bulanık PID kontrolör mimarilerine göre, LM tabanlı adaptasyon mekanizmasının daha iyi bir hız kontrol performansı sunduğu göstermektedir.

dir. Gelecek çalışmalar olarak, pekiştirmeli öğrenme tabanlı hız kontrol mimarilerinin incelenmesi amaçlanmaktadır.

6. Teşekkür

Bu çalışma, 1919B012216410 başvuru numarasına sahip TÜBİTAK-BİDEB 2209-A- Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı(2022/2.dönem) tarafından desteklenmektedir.

7. Kaynakça

- [1] K. Ummah, H. Setiadi, H. M. Pasaribu, and D. Anandito, "A simple fight decision support system for bvr air combat using fuzzy logic algorithm," *AVIA*, vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] D. Hu, R. Yang, J. Zuo, Z. Zhang, J. Wu, and Y. Wang, "Application of deep reinforcement learning in maneuver planning of beyond-visual-range air combat," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 32 282–32 297, 2021.
- [3] D. Hu, R. Yang, Y. Zhang, L. Yue, M. Yan, J. Zuo, and X. Zhao, "Aerial combat maneuvering policy learning based on confrontation demonstrations and dynamic quality replay," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 111, pp. 1–15, 2022.
- [4] H. Isci and G. O. Gunel, "Fuzzy logic based air-to-air combat algorithm for unmanned air vehicles," *International Journal of Dynamics and Control*, vol. 10, no. 1, p. 230–242, Feb 2022.

- [5] X. Lei, A. Huang, T. Zhao, Y. Su, and C. Ren, "A new machine learning framework for air combat intelligent virtual opponent," in *Journal of Physics: Conference Series*, Aug 2018.
- [6] E. Berki and C. Hava, "Air combat with particle swarm optimization and genetic algorithm," *JOURNAL OF AERONAUTICS AND SPACE TECHNOLOGIES*, vol. 7, no. 1, p. 23–35, Jan 2014.
- [7] H. Wang, Z. Guan, L. Yu, and B. Zhang, "Research on fuzzy guidance law for unmanned aerial vehicle," in *International Conference on Advanced Computer Science and Electronics Information (ICACSEI 2013)© 2013. The authors - Published by Atlantis Press127*, Aug 2013, pp. 127–129.
- [8] S. M. Akbari and h. Menhaj, "A fuzzy guidance law for modeling offensive air-to-air combat maneuver," in *Proceedings Joint 9th IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference*, 2001, pp. 3027–3031.
- [9] H. Changqiang, D. Kangsheng, H. Hanqiao, T. Shangqin, and Z. Zhuoran, "Autonomous air combat maneuver decision using bayesian inference and moving horizon optimization," *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 29, no. 1, p. 86–97, Feb 2018.
- [10] S. Akabari, M. B. Menhaj, and S. K. Nikravesh, *Fuzzy Modeling of Offensive Maneuvers in an Air-To-Air Combat*. B., Reusch, 2005, vol. 33.
- [11] R. E. Smith, B. A. Dike, B. Ravichandran, A. El-Fallah, and R. K. Mehra, *Two-Sided, Genetics-Based Learning to Discover Novel Fighter Combat Maneuvers*. Boers, E.J.W, 2001, vol. 2037.
- [12] L. Zhang, X. Song, and Y. Wu, *Theory, Methodology, Tools and Applications for Modeling and Simulation of Complex Systems*, 16th ed. Wu, Yunjie, 2016, vol. 644.
- [13] A. Stefek and P. Frantis, "Optimization of fuzzy logic based virtual pilot for wargaming," *Mathematics*, vol. 9, no. 24, p. 1–17, Dec 2021.
- [14] J. S. McGrew, J. P. How, B. Williams, and N. Roy, "Air-combat strategy using approximate dynamic programming," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 33, no. 5, p. 1641–1654, 2010.
- [15] L. A. Zhang, J. Xu, D. Gold, J. Hagen, A. K. Kochhar, A. J. Lohn, and O. A. Osoba, "Air dominance through machine learning : A preliminary exploration of artificial intelligence-assisted mission planning," Jan 2020.
- [16] T.-Y. Sun, S.-J. Tsai, Y.-N. Lee, S.-M. Yang, and S.-H. Ting, "The study on intelligent advanced fighter air combat decision support system," in *2006 IEEE International Conference on Information Reuse Integration*. IEEE, Sep 2006, pp. 39–44.
- [17] D. Chen, Y. Feng, and Y. Liu, "Threat assessment for air defense operations based on intuitionistic fuzzy logic," in *Procedia Engineering*, 2012, pp. 3302–3306.
- [18] H. Isci, "A fuzzy logic based real-time air-to-air attack algorithm for unmanned combat air vehicles," MSc Thesis, Istanbul Technical University, Istanbul, September 2019.
- [19] K. UCAK and G. OKE, "Adaptive fuzzy pid controller based on online lssvr," *2012 International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications*, 2012.
- [20] Z. W. Woo, H. Y. Chung, and J. J. Lin, "A pid type fuzzy controller with self-tuning scaling factors," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 115, no. 2, pp. 321–326, 2000.
- [21] S. Iplikci, "A comparative study on a novel model-based pid tuning and control mechanism for nonlinear systems," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 20, no. 13, pp. 1483–1501, Sep 2010.