



## Control of 2-Dof TRMS MIMO system using FOPID & FOSTSMC method

Yusuf Abukan\*<sup>ID</sup>, M. Nuri Almalı<sup>ID</sup>

Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Van Yuzuncu Yil University, 65040, Tuşba, Van, Türkiye

### Highlights:

- Different controllers are used for both pitch rotor and yaw rotor system.
- Using fractional order control methods,
- First time use of general system working with two different fractional order controllers

### Keywords:

- Twin rotor multi-input and multi-output system,
- Sliding mode control,
- Super-twist sliding mode control,
- Fractional order super-twist sliding mode control,
- Fractional order proportional-integral-derivative control

### Article Info:

Research Article

Received: 02.06.2021

Accepted: 02.03.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.947168

### Correspondence:

Author: Yusuf Abukan

e-mail:

yusufabukan@gmail.com

phone: +90 554 696 1113

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, different control methods were simulated in MATLAB/Simulink program to provide stable control in TRMS. Experimental studies was carried out by applying the most suitable methods found in the simulation studies to the TRMS MIMO system of the Feedback Company in the laboratory of our university. It has been seen that the control of the system gives better results when each rotor is controlled with different controllers. The variation of the errors obtained for the main and tail propeller angles in the studied method is given in Table A.

**Table A.** Variation of errors obtained for main and tail propeller for the studied methods

Control Method	Rotor	ISE	IAE	ITSE
PID	Main	0,3675	1,6880	0,8208
	Tail	0,5764	2,6860	2,3730
FOPID	Main	0,1341	0,7336	0,1604
	Tail	0,0965	1,2370	0,4564
SMC	Main	6,1950	24,730	291,5000
	Tail	0,1580	2,1650	1,7190
STSMC	Main	6,9800	8,9410	37,9600
	Tail	0,4512	1,9070	0,9028
FOSTSMC	Main	4,2570	6,7790	17,7400
	Tail	0,0938	0,6647	0,1092
FOPID & FOSTSMC	Main	0,1337	0,7242	0,1534
	Tail	0,0638	0,3796	0,0350

### Purpose:

The control design of a twin rotor multiple-input and multiple-output (TRMS) nonlinear helicopter model with two degree of freedom is a very complex task. In this study, it is aimed to find suitable control methods by trying different control methods with simulation and experimental studies in order to ensure that the TRMS system works in balance.

### Theory and Methods:

In this study, proportional-integral-derivative (PID), fractional order PID (FOPID), sliding mode (SMC), Super twisting sliding mode (STSMC) and Fractional order super twisting sliding mode (FOSTSMC) are used to provide stable control in a TRMS MIMO System. In order to adjust the pitch and yaw angles, the speed control of the DC motors connected with the rotors has been performed. The reference angle was taken as 0.5 radian. Different control blocks were applied into each device angle. The control parameters were obtained with regards to ISE, IAE and ITSE of variation of errors. The results were also analyzed in terms of transient responses of each controller such as rise time, settling time and maximum overshoot. First of all, the simulation study was done in MATLAB/Simulink program. Then, the experimental study was carried out using the best control parameters from the best simulation study.

### Results:

As a result of the simulation study, it is seen that the most successful method for the main rotor in rising time, maximum overshoot and settling time is FOPID, and for the tail rotor, the FOSTSMC method. Based on these results, instead of using the same controller for both rotors, a mixed method was created by using the FOPID method for the main rotor and the FOSTSMC method for the tail rotor. For the best controller proposed, it was observed that the rising time was 0.77 s and 0.55 s, the setting time was 4.5 s and 4.2 s for the pitch and yaw angle respectively. The maximum overshoot was not occurred for both rotors.

### Conclusion:

It has been seen that the mixed control method FOPID & FOSTSMC proposed to control the TRMS-nonlinear helicopter is more successful than the methods using the same controller for both. rotors.



## İki serbestlik dereceli TRMS MIMO sistemin FOPID ve FOSTSMC yöntemi kullanılarak kontrolü

Yusuf Abukan\*<sup>ID</sup>, M. Nuri Almalı<sup>ID</sup>

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 65040, Tuşba Van, Türkiye

### Ö N E Ç I K A N L A R

- Hem ana pervane hem de kuyruk pervane sistemi için farklı kontrolcüler kullanılmıştır
- Kesir dereceli kontrol yöntemleri kullanılması
- Genel sistemin farklı iki kesir dereceli kontrolcü ile çalışmasının ilk defa kullanılması

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 02.06.2021

Kabul: 02.03.2022

DOI:

### Anahtar Kelimeler:

İkiz pervaneli çok girişli ve çok çıkışlı sistem, Kayan kip kontrol, Süper bükümlü kayan kip kontrol, Kesirli dereceli süper bükümlü kayan kip kontrol, Kesirli dereceli oransal-integral-türev kontrol

### ÖZ

Helikoptere benzeyen ikiz pervaneli çoklu girişli ve çoklu çıkışlı iki serbestlik dereceli (TRMS) doğrusal olmayan bir sistemin kontrol tasarımı çok karmaşık bir iştir. TRMS sistemi, bir kiris ile birbirlerine bağlantılı olan ana ve kuyruk pervanelerinden oluşmaktadır. TRMS sisteminin dengesinin sağlanması için her iki pervane açıları, pervanelerin bağlı bulunduğu DC motorların hızları değiştirilerek yapılır. TRMS sisteminin dengede çalışmasını sağlamak amacıyla oransal-integral-türev (PID), kesir dereceli PID (FOPID), kayan kip (SMC), Süper bükümlü kayan kip (STSMC) ve Kesirli dereceli süper bükümlü kayan kip (FOSTSMC) kontrol yöntemleri kullanılmıştır. Kontrol parametrelerinin belirlenmesi için MATLAB/Simulink programında benzetim çalışmaları yapılmıştır. Benzetim çalışmalarında bulunan en başarılı yöntemler kullanılarak, deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Benzetim ve deneysel çalışmalarının her ikisinde de ana pervane FOPID ve kuyruk pervanesi FOSTSMC yöntemi ile kontrolü diğer kontrol yöntemlerine göre en iyi sonucu vermiştir.

## Control of 2-Dof TRMS MIMO system using FOPID & FOSTSMC method

### H I G H L I G H T S

- Different controllers are used for both pitch rotor and yaw rotor system.
- Using fractional order control methods,
- First time use of general system working with two different fractional order controllers

### Article Info

Research Article

Received: 02.06.2021

Accepted: 02.03.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.947168

### Keywords:

Twin rotor multi-input and multi-output system, Sliding mode control, Super-twist sliding mode control, Fractional order super-twist sliding mode control, Fractional order proportional-integral-derivative control

### ABSTRACT

The control design of a helicopter twin rotor multiple-input and multiple-output (TRMS) nonlinear System with two degree freedom is a very complex work. The TRMS system consists of the main and tail rotors connected by a beam. In order to balance the TRMS system, both rotors angles are made by changing the speeds of the DC motors to which the rotors are connected. In order to ensure that the TRMS system works in balance, Proportional-integral-derivative (PID), Fractional order PID (FOPID), Sliding mode (SMC), Super twisting sliding mode (STSMC) and Fractional order super twisting sliding mode (FOSTSMC) control methods was used. Simulation studies were carried out in the MATLAB/Simulink program to determine the control parameters. Experimental studies were carried out using the most successful methods found in simulation studies. In both simulation and experimental studies, the main propeller FOPID and tail propeller FOSTSMC method gave the best results compared to other control methods.

## 1. Giriş (Introduction)

Son zamanlarda helikopter gibi hava araçlarının düzgün uçuşu için bozucu girişten daha az etkilenen çeşitli yaklaşımların geliştirildiğine tanık olmaktadır. Pervaneler arasındaki önemli bağlantı etkisi ve bazı sistem durumlarının bulunmaması nedeniyle hava araçları dinamiklerinin modellenmesi zordur. Model parametrelerinin belirsizliği ve yük bozuklukları ile başa çıkmada uygun bir dayanıklılık elde edebilmek için sağlam bir kontrol sistemi şarttır. Laboratuvar kurulumu, ikiz pervaneli MIMO sistemi (TRMS), bir helikopterin uçuşuna benzemesinden dolayı kolaylıkla kullanılmaktadır [1]. TRMS temelde bir helikopterin prototip modeli olmasına rağmen, helikopterin ve TRMS kontrolünde önemli bir fark vardır. Helikopteri istenilen şekilde kontrol edebilmek için pervanelerin açıları, TRMS'de ise pervanelerin hızı değiştirilerek yapılır [2]. TRMS farklı deneyler için bir araç görevi görmesi ve bir hava aracının gerçek zamanlı ortamını sağlamasından dolayı, farklı kontrol yöntemlerinin denenmesi için gerçek zamanlı bir deneme ortamı sağlamaktadır.

TRMS, DC motorlar tarafından tahrik edilen uçlarına bağlı iki pervaneli bir kirişten oluşur ve bu kiriş, ucunda ağırlık bulunan bir kolla dengelenir [3]. Hem yatay hem de dikey yönde hareketleri kolaylaştıran iki serbestlik derecesine sahiptir. İki pervane arasındaki yüksek kaplin etkisi, kararsız ve doğrusal olmayan dinamikler nedeniyle TRMS'nin kontrol problemi çok dikkat çekmiştir. Bu amaçla birçok benzetim ve deneysel çalışmalarda farklı kontrol yöntemleri kullanılmıştır.

Bir TRMS kontrolünü sağlamak için türev filtre katsayısına sahip PID kontrolcüsü [4], doğrusal ve doğrusal olmayan bir PID kontrol algoritma aracılığıyla belirli bir konumda tutma ve etkili yönlüme izleme sağlayıp sağlamadıklarını araştırmışlardır [5]. Çok değişkenli kendinden ayarlı PID kontrolcünün, dış bozucu etkiler altında sabit kazançlı PID kontrolörüne göre üstün olduğu göstermişlerdir [6]. İki serbestlik derecesi (2-DOF), PID kontrolörü kullanmışlardır. Farklı giriş sinyalleri için benzetim sonuçlarında TRMS'nin performans değerlendirmesini gösteren PID kontrolcüsünün sistem ve kontrol çıkışı hatalarını sunmuşlardır [7]. Bir başka çalışmada ise PID bulanık kayan kip kontrolü (PIDFSMC) kullanmışlardır [8]. TRMS'nin stabilizasyonu ve bir yörüngenin etkili ve verimli bir şekilde izlenmesi, önceden belirlenmiş bir arama aralığına sahip gerçek değerli genetik algoritma kullanılarak PID ayarlamasıyla gerçekleştirmişlerdir [9]. Birden fazla makinalı güç sisteminde iyimser sonuçlar bulmak için güçlü özelliklere sahip parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) ve yapay arı kolonisine (ABC) dayalı HPA tekniği adıyla yeni bir hibrit yaklaşımı tanımlamıştır [10]. Yeni bir sezgisel-üstü metod olan sinüs kosinüs algoritması (SCA) güç sistemlerinde optimal tasarım için önerilmiştir [11]. P Kesirli PID sistemini ve Opampları kullanarak bir Maglev tren sistemini kontrol edilebilirliğini göstermişlerdir. Çalışmalarında PID yerine FOPID kullanmalarının sebebinin 3 yerine 5 parametreyle daha hassas bir kontrol aralığının yakalanabilir olduğunu belirtmişlerdir [12]. Yakıt hücresi hava tedarik sistemi için bilinmeyen girişli doğrusal olmayan gözlemciye dayalı FOPID kontrolcüsü önermişlerdir [13]. Sabit mıknatıslı doğrusal senkron motor (PMLSM) için geçerli ikinci derece kayan kip kontrol (SOSMC) ve tekrarlayan radyal temel işlevli sinir ağını (RRBFNN) birleştiren akıllı bir SMC önermişlerdir [14]. Zaman gecikmesi tahmin tekniğini baz alarak ve ikinci dereceden empedans filtresiyle referans noktalarını oluşturdukları sistemin bu noktaları sürekli izlemesi için SMC tercih etmişler, benzetim ve deney sonuçlarıyla da bu sistemin başarılı olduğunu kanıtlamışlardır [15]. Farklı belirsizliklere sahip belirsiz anahtarlamalı sistemler için yeni bir anahtarlamalı sağlam entegre kayan kip kontrol (SRISMC) üzerine çalışmışlardır [16]. DC motorlarda çatırdamaları azaltmak için

SMC ve yeni bir algoritma olan durum geri besleme denetleyicisine dayalı kayan kip kontrolör (SMSFC) tasarımını sunmuşlardır. Birincisi büyük bozulma değerlerinde sistemi kararlı duruma yaklaştırmak için, ikincisinde ise kararlı duruma yakın durumda devreye sokarak, dar kapsamda da olsa çatırtıyı bu şekilde azaltabilmişlerdir [17]. TRMS için sezgisel bir bulanık kontrol yöntemi önermektedir. Ana ve kuyruk pervaneleri için ayrı ayrı olmak üzere iki sezgisel bulanık kontrolör tasarlanmış ve ardından bu kontrolcülerin çıktılarını birleştirmiştir. Önerilen yöntemin kararlılık ve performans açısından klasik optimal PID yöntemi ile karşılaştırmışlardır [18]. Okyanus akıntı türbinleri (OCT) tarafından çalıştırılan kalıcı mıknatıs senkron jeneratörleri (PMSG) için yeni bir uyarlanabilir süper bükümlü kayan kip kontrol stratejisini önermişlerdir [19]. Yüksek hassasiyetli konumlandırma elde etmek ve Sabit Mıknatıslı Senkron Motor 'da (PMSM) stabiliteyi ve sağlam izlemeyi garanti eden Fonksiyon-Bağlantı Aralığı tip-2 Petri Bulanık-Sinir Ağı (FLIT2PFNN) aracılığıyla bir sağlam uyarlanabilir süper bükümlü kayan kip kontrolü (RASTSMC) önermişlerdir [20]. Belirsiz esnek hareket sistemlerinin izleme hatasını azaltmak için 2-DoF modelsiz denetleyiciyi tasarlamak için yinelemeli bir STSMC yaklaşımını geliştirmişlerdir [21]. Newton Euler denklemleri kullanılarak geliştirdikleri 6-DoF helikopterin matematiksel modeli, LQR kontrolü ile birlikte STSMC uygulamak için kullanmışlardır [22]. STSMC algoritması tabanlı kayma modu gözlemcisi (STASMO) ile hassas bir tork kapalı döngü kontrol yöntemi üretmişlerdir [23]. STSMC 'nin süper bükümlü gözlemciye (STO)'ya dayalı olarak uygulandığı zaman, seçilen kayan yüzey üzerinde sürekli kontrol kullanılarak ikinci dereceden kayma moduna ulaşmanın mümkün olmadığını göstermişlerdir [24]. Otonom bir su altı planörünün (AUG) sağlam bir şekilde izlenmesi ve bozulma reddi için STSMC tasarlanmış ve önermişlerdir [25]. Doğrusal olmamanın Bouc-Wen modeli ile uygulandığı Hammerstein sistemi için değişken kazançlı STSMC önermişlerdir [26]. Dağıtılmış üretim kaynaklarının yüksek frekans kontrolünde FOPID kontrol metodunu uygulamışlardır. FOPID kontrolörü kullanılarak termal ve hidro ünitelerin modellenmesi üzerinde kontrol metodu uygulanmış, kontrollü kazanç parametreleri, parametresiz optimizasyon sayesinde daha yüksek kararlılık ve daha hızlı yakınsama ile optimizasyon yapılabildiğini belirtmişlerdir [27]. Çeşitli çalışma koşulları altında BLDC motor kontrolü için yaygın olarak FOSTA olarak bilinen kesirli bir akıllı kontrolör önermişlerdir [28]. Kontrol sonucu oluşan çatırtıyı bastırmak ve sistem sağlamlık performansını iyileştirmek için bir PMSM vektör kontrol sisteminde kesirli dereceli kayan kip kontrolüne ve bozulma gözlemcisine dayalı bir bileşik strateji kullanılmışlardır [29]. Mikro jiroskop kontrolü için çift döngülü bulanık sinir ağını (DLFNN) ve FOSTSMC birlikte kullanmışlardır [30]. FOSTSMC formüle etmek için bir DC mikro ızgara dönüştürücüler sisteminin genelleştirilmiş doğrusal olmayan bir modelini geliştirmişlerdir [31]. Kalıcı mıknatıslı senkron motorun (PMSM) hız kontrolü için genişletilmiş durum gözlemcisi (ESO) kullanan yeni bir uyarlanabilir süper bükümlü doğrusal olmayan Kesirli dereceli PID kayma modu kontrolü stratejisi önermektedirler [32].

Yapılan çalışmada bir TRMS'de kararlı bir kontrol sağlamak için farklı kontrol yöntemlerini MATLAB/Simulink programında benzetim çalışmaları yapılmıştır. Yapılan benzetim çalışmalarında bulunan en uygun yöntemler, üniversitemiz bünyesinde bulunan laboratuvarında, Feedback firmasına ait TRMS MIMO sisteminde uygulanarak deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Genel olarak bu çalışma mevcut çalışmalara göre farklılıkları sırasıyla şu şekilde verilmiştir. Hem ana pervane hem de kuyruk pervane sistemi için farklı kontrolcüler kullanılması, kesir dereceli kontrol yöntemleri kullanılması ve sistemin farklı iki kesir dereceli kontrolcü ile çalışmasının ilk defa bu sistemde tercih edilmesi önemli noktalarından başlıcalarıdır.

Çalışmanın ileriki bölümünde TRMS sisteminin matematiksel modeli sunulmuş, kullanılan kontrol yöntemleri ve uygulanacak sistem tanımlanmıştır. Daha sonra deneysel ve benzetim çalışmalarına ait bulguları sunulmuştur. Son bölüm de ise çalışmanın sonuçları değerlendirilmiştir.

## 2. Teorik Ve Deneysel Metot (Theoretical and Experimental Method)

### 2.1. TRMS Sistemi Genel Tanımı ve Matematiksel Modeli (Mathematical Modelling of TRMS)

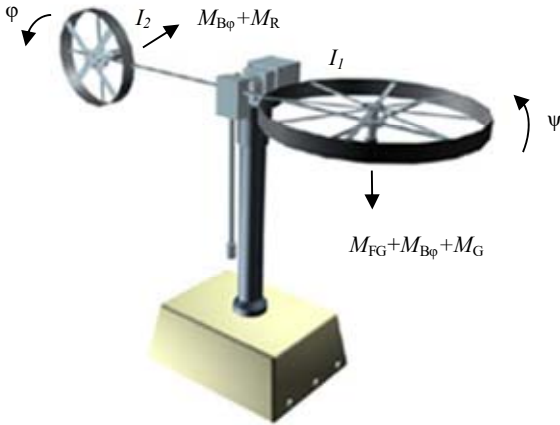
TRMS davranışı bir helikopterinkine benzeyen bir laboratuvar düzeneğidir. Ana parçalar; ana ve kuyruk pervaneleri ile karşı dengeyi sağlamak için asılan sarkaçtır. Çalışmada kullanılan TRMS laboratuvar deney düzeneği Şekil 1'de görülmektedir. Bu sistem matematiksel model kullanılarak, Matlab GUI arayüzü ile kontrol edilebilmektedir. Çalışmada ele alınan kontrol yöntemleri bu sayede hem benzetim hem de deneysel çalışmaların yapılması için elverişlidir.



Şekil 1. TRMS-MIMO laboratuvar deney düzeneği  
(TRMS-MIMO laboratory experiment setup)

Şekil 1'de verilen TRMS sistemi, yerçekimi, itme, merkezkaç, sürtünme ve bozucu tork gibi kuvvetlerin pervanelerin hareketi üzerindeki etkisini kapsayan iki pervane ile tasarlanmıştır. Bu kuvvetlerin etkilerinin üstesinden gelmek için motorlar aracılığıyla kontrol girişi sağlanmaktadır. Sistemde, ana ve kuyruk pervane açıları ölçülebilir çıktılardır ve kararlılığı, kontrolörün tasarımının ana amacıdır.

TRMS sistemine ait mekanik-elektriksel modeli Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. TRMS sistem mekanik-elektriksel modeli  
(TRMS system mechanical-electrical model)

Şekil 2'de verilen TRMS sistemi birbirine dik iki pervaneden meydana gelir. Tabanı üzerinde döndürülen bir kiriş ile birleştirilmiştir. Sistem hem dikey hem de yatay yönde serbestçe dönebilir. Bu nedenle bu sistem iki serbestlik derecesine sahiptir. Her iki pervane de DC motor ile tahrik edilmekte ve motorlara verilen gerilim değiştirilerek pervanelerin dönüş hızı kontrol edilmektedir. Kirişi kararlı durumda dengelemek için sisteme karşı ağırlık bağlanmıştır. Çevresel etkileri en aza indirilebilmek için her iki pervane de korumalıdır. Tüm ünite, güvenli helikopter kontrol deneyleri sağlayan kuleye bağlanmıştır. Elektrik ünitesi, TRMS ile PC arasındaki iletişimden sorumlu kulenin altına yerleştirilmiştir. Elektrik ünitesi, sensörler tarafından ölçülen sinyalin PC'yle haberleşmesinden ve kontrol sinyalinin I/O kartı ile aktarılmasından sorumludur. Ana pervane için kullanılan motor, TRMS'nin dikey yönde uçuşunu kontrol ederken kuyruk pervanesi için kullanılan motor da TRMS'nin yatay yönde uçuşunu kontrol etmektedir.

Mekanik birim söz konusu olduğunda, TRMS'nin adım hareketi için aşağıdaki doğrusal olmayan momentum eşitlikleri yazılabilir [33].

Dikey düzlem (ana pervane) için ilgili ifade Eş. 1'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} I_1 \ddot{\psi} &= M_1 - M_{FG} - M_{B\psi} - M_G \\ M_1 &= a_1 \tau_1^2 + b_1 \tau_1 \\ M_{FG} &= M_g \sin(\psi) \\ M_{B\psi} &= B_{1\psi} \dot{\psi} + B_{2\psi} \text{sign}(\dot{\psi}) \\ M_G &= K_{gy} M_1 \dot{\psi} \cos(\psi) \end{aligned} \quad (1)$$

Burada  $a_1$  ve  $b_1$  sabit katsayılar, Burada  $M_1$  doğrusal olmayan durum karakteristiğidir.  $M_G$  jiroskopik momentumdur ve  $M_{FG}$  yerçekimi momentumudur. Ana pervane momentumu  $\tau_1$  ifadesi Eş. 2'de gösterilmiştir.

$$\tau_1 = \frac{k_1}{T_{11}s + T_{10}} u_1 \quad (2)$$

Benzer şekilde, kuyruk pervanesi için aynı yöntem kullanılırsa Eş. 3 elde edilir.

$$\begin{aligned} I_2 \ddot{\phi} &= M_2 - M_{B\phi} - M_R \\ M_2 &= a_2 \tau_2^2 + b_2 \tau_2 \\ M_{B\phi} &= B_{1\phi} \dot{\phi} + B_{2\phi} \text{sign}(\dot{\phi}) \\ M_R &= \frac{k_c(T_0s+1)}{(T_{ps}+1)} \tau_1 \end{aligned} \quad (3)$$

Burada,  $M_R$  reaksiyon momentumudur ve kuyruk rotor momentumu  $\tau_2$  ifadesi Eş. 4'deki gibi verilir.

$$\tau_2 = \frac{k_2}{T_{21}s + T_{10}} u_2 \quad (4)$$

TRMS matematiksel modelinde kullanılan sabit katsayılar, çalışmada kullanılan sisteme göre Tablo 1'de verilmiştir.

### 2.2. Kontrol Tasarım Stratejileri (Control Design Strategies)

#### 2.2.1. PID tasarımı (Design of PID)

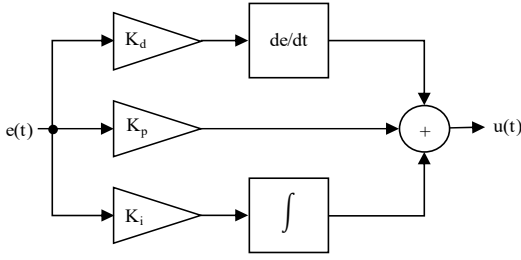
PID denetleyici üç parametreden oluşur ve bu parametreler Oransal ( $K_p$ ), Diferansiyel ( $K_d$ ) ve integral ( $K_i$ ) kazancıdır. PID kontrolör eşitliği Eş. 5'de yazılmıştır.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

PID kontrol blok şeması Şekil 3'de verilmiştir.

**Tablo 1.** TRMS doğrusal olmayan model parametreleri (TRMS nonlinear model parameters)

Parametre	Değer
$I_1$ -Ana pervanesi atalet momenti	$6,8 \cdot 10^{-2} kg \cdot m^2$
$I_2$ -Kuyruk pervanesi atalet momenti	$2 \cdot 10^{-2} kg \cdot m^2$
$a_1$ -Statik karakteristik parametresi	0,0135
$b_1$ -Statik karakteristik parametresi	0,0924
$a_2$ -Statik karakteristik parametresi	0,02
$b_2$ -Statik karakteristik parametresi	0,09
$M_G$ -Jiriskop momentumu	0,32 Nm
$B_{1\psi}$ -Sürtünme momentum fonksiyon parametresi	$6 \cdot 10^{-3} Nm/rad$
$B_{2\psi}$ -Sürtünme momentum fonksiyon parametresi	$1 \cdot 10^{-3} Nm/rad$
$B_{1\varphi}$ -Sürtünme momentum fonksiyon parametresi	$1 \cdot 10^{-1} Nm/rad$
$B_{2\varphi}$ -Sürtünme momentum fonksiyon parametresi	$1 \cdot 10^{-2} Nm/rad$
$K_{gy}$ -jiroskop momentum parametresi	0,05 rad/s
$k_1$ - 1. motor kazancı	1,1
$k_2$ - 2. motor kazancı	0,8
$T_{11}$ - 1. Motor payda parametresi	1,1
$T_{10}$ - 1. Motor payda parametresi	1
$T_{21}$ - 2. Motor payda parametresi	1
$T_{20}$ - 2. Motor payda parametresi	1
$T_p$ -Çapraz reaksiyon momentum parametresi	2
$T_0$ -Çapraz reaksiyon momentum parametresi	3,5
$k_c$ -Çapraz reaksiyon momentum kazancı	-0,2

**Şekil 3.** PID kontrol blok şeması (PID control block diagram)

Yapılan çalışmada her iki pervanesinin kontrolü için Şekil 3'te verilen kontrol bloğu kullanılmıştır.

Burada Sistem TRMS modeli ile PID kontrolörü birlikte kullanılarak tasarlanmıştır. Yatay ve dikey hareketli çıkışı, karşılaştırıcı kullanılarak istenen pozisyon çıkışı ile karşılaştırılır ve ardından hata, PID kontrolörüne işlenir. Daha sonra, PID kontrolörünün kontrollü çıkışı, her iki tesise de verilerde elde edilir ve böylece istenen pozisyon elde edilmiş olur [34].

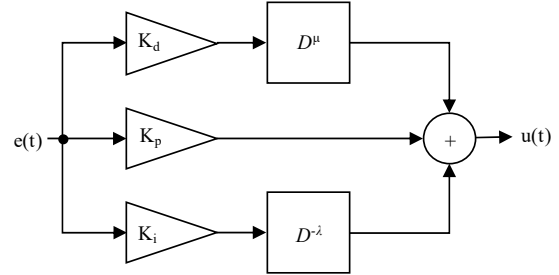
### 2.2.2. Kesirli düzen PID modunun tasarımı (Design of fractional order PID mode)

Kesir dereceli PID (FOPID) kontrol sistemlerinde kullanılan yöntemlerden biridir. PID'den farklı olarak kesirli derece matematiksel denklemi yani tamsayı olmayan türev ve integrali kullanır. FOPID denetleyici tasarımı bu nedenle zordur. Ancak PID kontrol mekanizmasına iki farklı parametre katarak bu kontrolcünün daha hassas ve sağlam olmasını sağlar. Bu da nonlineer davranışlı sistemleri kontrol edebilmeyi kolaylaştırır. FOPID denetleyicisinin ifadesi Eş. 6'da verilmiştir;

$$u(t) = K_p e(t) + K_i D^{-\lambda} e(t) + K_d D^{\mu} e(t) \quad (6)$$

Kesirli mertebeden türev ve integral parametresi  $\lambda$  ve  $\mu$ 'dür. FOPID kontrolörünün parametre değerleri için  $\lambda$  ve  $\mu$ , 0 ile 1 arasında değişir [39].

FOPID kontrol blok şeması Şekil 4'de verilmiştir.

**Şekil 4.** FOPID kontrol blok şeması (FOPID control block diagram)

### 2.2.3. Kayma kipli modun tasarımı (Design of sliding mode)

Kayma kipli kontrol (SMC) yöntemi hem doğrusal heme doğrusal olmayan sistemlerde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır [35]. Kayma kipli modun matematiksel kontrol ifadeleri Eş. 7 ve Eş. 8'deki gibidir.

$$\begin{aligned} e &= e_2 - e_1 \\ \dot{s} &= -f(s) \\ s &= \dot{e} + \lambda e \end{aligned} \quad (7)$$

$$u(t) = u_0 \tanh(s) \quad (8)$$

Burada  $e_2$  referans açısı,  $e_1$  gerçek açısı,  $e$  açısı hatası,  $s$  kayma yüzeyi,  $\dot{s}$  kayma yüzeyinin türevi,  $\lambda$  hata katsayısı,  $u_0$  çıkışın ilk değeri ve  $u(t)$  çıkış değeridir.

SMC sistemlerdeki bozulmaları telafi etmek için çok etkili bir yöntemdir. Ayrıca, sisteme ait belirsizliklere yani doğrusal olmayan değişkenlere karşı da çok sağlamdır. Özellikle doğal sağlamlığı nedeniyle belirsizlikleri ve rahatsızlıkları sınırlandırmak için birçok uygulamada kullanılmıştır. SMC kontrol blok şeması Şekil 5'te verilmiştir.

2.2.4. Süper bükümlü kayan modun tasarımı  
(Design of super-twisting sliding mode)

Süper bükümlü kayan kipi (STSMC), bire eşit bir görece dereceyi işleyen en güçlü ikinci dereceden sürekli kayan kip kontrol algoritmalarından biridir. Bu sınır bilindiğinde, sınırlı gradyanlı düzgün eşleşmiş bozuklukların varlığında kayan değişkeni ve türevini sonlu zamanda sifıra süren sürekli kontrol fonksiyonunu üretir. STSMC kontrol algoritmasının temel dezavantajı, bozulma gradyanının sınırları hakkında bilgi gerektirmesidir. Birçok pratik durumda bu sınır kolayca tahmin edilemez [36].

Tehlikeli çatlama etkisi, geleneksel SMC'nin pratikte yaygın olarak kullanılmasını engeller. Bunun yerine kullanılan STSMC kontrol blok şeması, kayan değişkenin herhangi bir türevinin bilgisini gerektirmeyen, değiştirilmiş bir ikinci derece SMC şemasıdır. Ancak bu kontrol metodunda tam anlamıyla çatlattıyı ortadan kaldırmaz, yalnızca bastırır [37, 38].

Eş. 9'daki yapının dinamik sistemini düşünün;

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ x_2 &= u + \rho_1 \\ y &= x_1 \end{aligned} \quad (9)$$

Burada  $x_1$  ve  $y$  sistemin bir çıktısı,  $u$  sistemin girişi,  $\rho_1$  bir bozucudur.  $s$  kayma yüzeyi ve türevi Eş. 10'da verilmiştir.

$$s = c_1 x_1 + x_2 \quad (10)$$

Burada,  $c_1$  çıkış katsayısıdır. Durum denklemlerinin var olduğunu varsayıp kontrol edebilmek için  $s$ 'in Eş. 11'deki gibi türevini almamız gerekir;

$$\dot{s} = c_1 \dot{x}_1 + \dot{x}_2 \quad (11)$$

$s=0$  olduğunda  $X_2$  asimptotik olarak sifıra yakınsar [39].  $u$  kontrol çıkışı denklemi Eş. 12'de verildiği gibi olur.

$$u(t) = -k_1 |s|^{1/2} \tanh(s) - \int_0^t k_2 \tanh(s(\tau)) d\tau \quad (12)$$

Yukarıda verilen Eş. 12'ye göre oluşturduğumuz STSMC kontrol blok şeması Şekil 6'da verilmiştir.

2.2.5. Kesirli düzen süper bükümlü kayan modun tasarımı  
(Design of fractional order super twisting sliding mode)

Kesirli hesap, integrallerin ve türevlerin sadece tamsayı değil, aynı zamanda kesirli mertebeli olduğu bir durum için geleneksel diferansiyel hesabın bir genellemesidir. Bu genelleme, daha doğru modeller veya daha verimli kontrol algoritmaları tanıtmak için kullanılabilir.

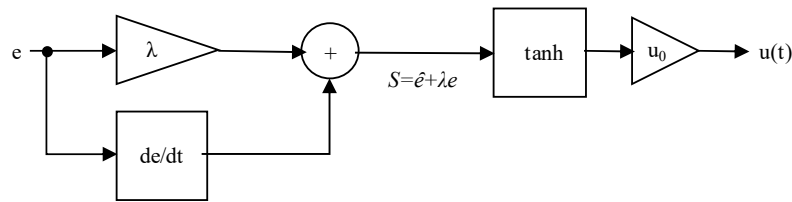
STSMC'nin bu avantajını kesirli modla sağlamlaştırmak için birleşik matematik teorisi oluşturulabilir [29]. Parametre varyasyonları ve yük değişiklikleri dikkate alınmadan, kesirli kayma modu yüzeyi eşitliği Eş. 13'teki gibi yazılabilir;

$$s = {}_0 D_t^\alpha x_1 + x_1 + c_1 x_1 \quad (13)$$

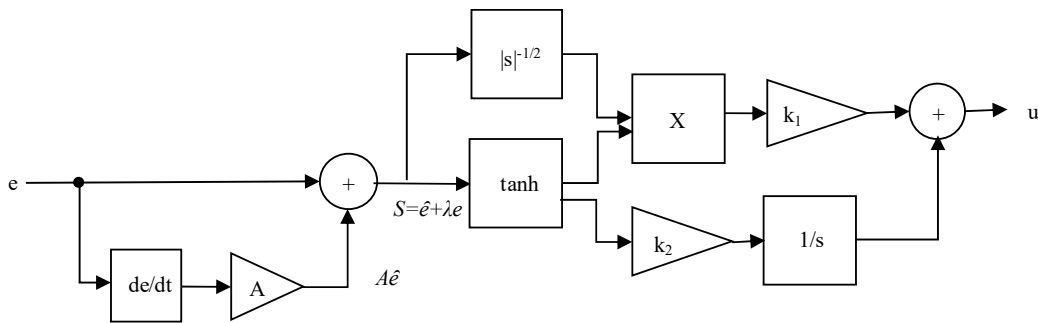
$C_1$  kazanç parametresidir,  ${}_0 D_t^\alpha$  kesirli hesap operatörüdür. Eş. 13'te verilen  ${}_0 D_t^\alpha$  sembolü yerine Eş. 14'te verilen  $D^\alpha$  sembolü kullanılır.

$${}_0 D_t^\alpha = D^\alpha = \begin{cases} \frac{d^\alpha}{dt^\alpha}, R(\alpha) > 0 \\ 1, R(\alpha) = 0 \\ \int_0^t (d\tau)^{-\alpha}, R(\alpha) < 0 \end{cases} \quad (14)$$

Yüksek sıralı kayan mod algoritması, sinyal fonksiyonunu kayan mod değişkeni yüksek dereceli türeve uygulanabilir, bu da çatlattıyı etkili bir şekilde bastırabilir [39]. Süper twisting algoritması, yüksek dereceli bir kayma modu algoritmasıdır ve yalnızca kontrolör yapısını basitleştirmek için yararlı olan kayma modu değişkenine ihtiyaç vardır. Yukarıdaki bilgilere dayanarak,  $u(t)$  çıkış fonksiyonu Eş. 15'teki gibi olur.



Şekil 5. SMC kontrol blok şeması (SMC control block diagram)



Şekil 6. STSMC kontrol blok şeması (STSMC control block diagram)

$$u(t) = -k_1|s|^\rho \text{sign}(s) - \int_0^t k_2 \text{sign}(s) dt \quad (15)$$

Burada  $k_1$  ve  $k_2$  anahtarlama kazançları,  $\rho$  normal sayıdır ve kesir derecesini ifade eder. Eş. 19'daki  $\text{sign}(s)$  fonksiyonu Sliding Mod Kontrolün çatırdamasını şiddetlendirmektedir. Anahtarlama işlevinin yapısını sigmoidden tanjant hiperbolige ( $\tanh(s)$ ) dönüştürünce sınır tabakası geçiş aşamasının düzgünlüğünü iyileştirebiliriz. Normal süper twisting kontrol sisteminde bu 0.5'dir. Ancak biz bu değeri değiştirerek daha hassas bir kontrol tasarlayabiliriz. FOSTSMC için  $u(t)$  çıkış fonksiyonu Eş. 16'daki gibi yazılır.

$$u(t) = -k_1|s|^\rho \tanh(s) - \int_0^t k_2 \tanh(s) dt \quad (16)$$

Eş. 16'ya göre oluşturduğumuz FOSTSMC kontrol blok şeması Şekil 7'de verilmiştir.

### 3. Bulgular (Results)

#### 3.1. TRMS'ye Uygulanan Kontrolcü Simülasyon Sonuçları (The Simulation Results of TRMS)

Matlab/Simulink altyapısını kullanarak sırasıyla PID, SMC, STSMC, FOSTSMC ve FOPID kontrol yöntemlerine ait oluşturulan kontrol blokları TRMS kontrol bloğuyla birleştirilmiştir. Çalışmaya ait kontrol blok şeması Şekil 8'de verilmiştir.

Şekil 8'de ana ve kuyruk pervane açılarının ayarlamak için bu pervanelerin bağlı olduğu DC motorların hız kontrolü yapılmıştır. Referans açısı (radyan) değeri 0.5 olarak alınmıştır. Her bir açı değeri için farklı kontrol blokları kullanılmıştır. Kontrol blokları çıkışından elde edilen kontrol sinyalleri TRMS bloğunda ana ve kuyruk açıların istenilen değere getirmek için kullanılmıştır. TRMS bloğu verilen matematiksel model ve Tablo 1'de verilen sabit katsayı değerlerine göre tasarlanmıştır. TRMS bloğunda alınan örneklem ile referans değer karşılaştırılarak elde edilen hata kontrolcülere uygulanmıştır. Kullanılan farklı kontrolcülere ait katsayı ve kesir dereceleri deneme yanılma yöntemiyle bulunmuştur.

Şekil 8'de verilen TRMS kontrol blok şemasında ana ve kuyruk pervane kontrolcülere sırasıyla PID, FOPID, SMC, STSMC, FOSTSMC, ve önerdiğimiz ana pervane için FOPID, kuyruk pervanesi için FOSTSMC birlikte kullandığımız FOPID-FOSTSMC kontrolcüsü uygulanmıştır. Benzetim sonuçları ana pervane açısı için Şekil 9, kuyruk pervane açısı için Şekil 10'da verilmiştir.

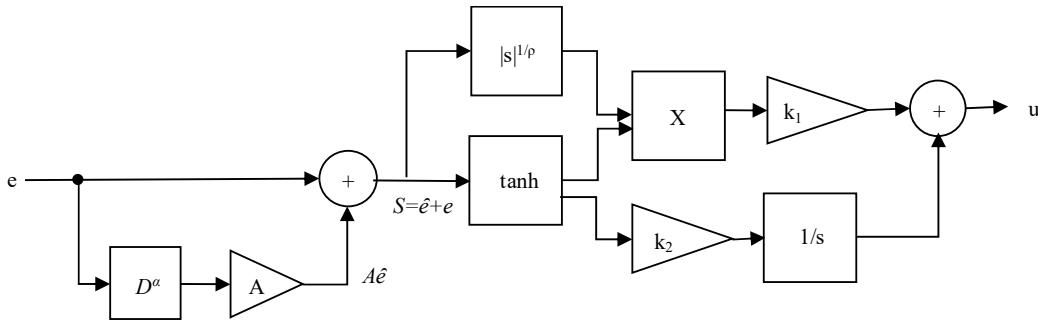
Şekil 9 ve Şekil 10'da verilen benzetim sonuçları incelendiğinde önerilen yöntemin en iyi sonuç verdiği gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar her bir kontrolcü çıkış dalga tepkileri (yükselme zamanı, yerleşme zamanı, maksimum aşma değeri) açısından incelenmiş ve sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2'de görüldüğü gibi Ana Pervane açısı için yükselme zamanında, yerleşme zamanında ve maksimum aşma değerinde FOPID yönteminin en başarılı olduğu görülmektedir. Benzer şekilde kuyruk pervane açısı için yükselme zamanı, yerleşme zamanında ve maksimum aşmada da FOSTSMC yönteminin en başarılı olduğu görülmüştür. Önerdiğimiz ana pervane için FOPID, kuyruk pervanesi için FOSTSMC kontrol yönteminden oluşan karma yöntemde ise hem ana hem de kuyruk pervanesi için elde edilen değerlerin en düşük değerler olduğu görülmektedir.

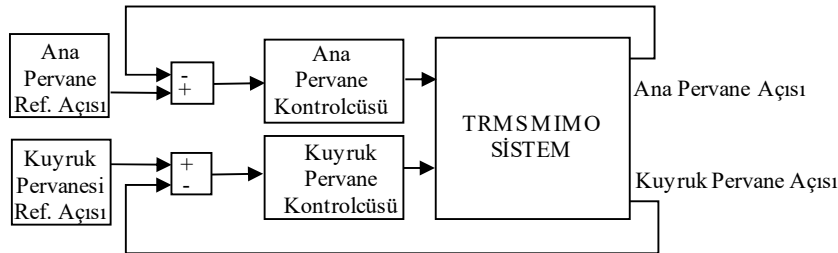
En iyi erişim süresini ve maksimum aşmayı bulmak için sırasıyla Eş. 17-19'da verilen hata kareleri toplamı (integral square error -ISE), hataların mutlak değerleri toplamı (integral absolute error-IAE), toplam zamana bağlı hata (integral time squared error-ITSE) değerleri performans kriteri olarak seçilmiştir.

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (17)$$

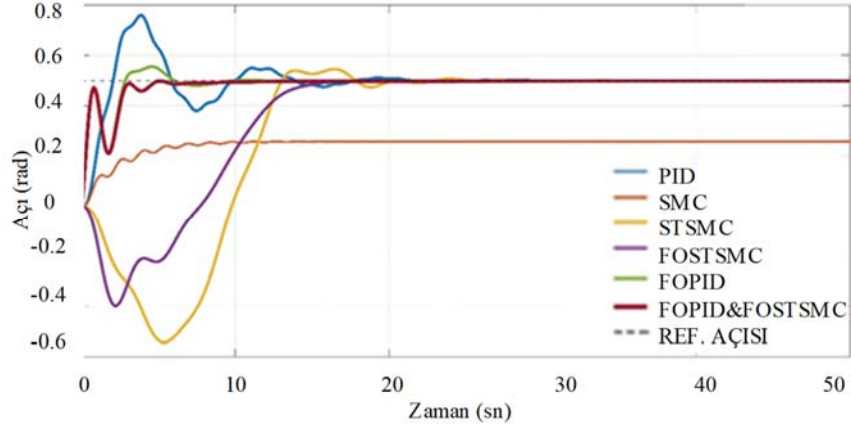
$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (18)$$



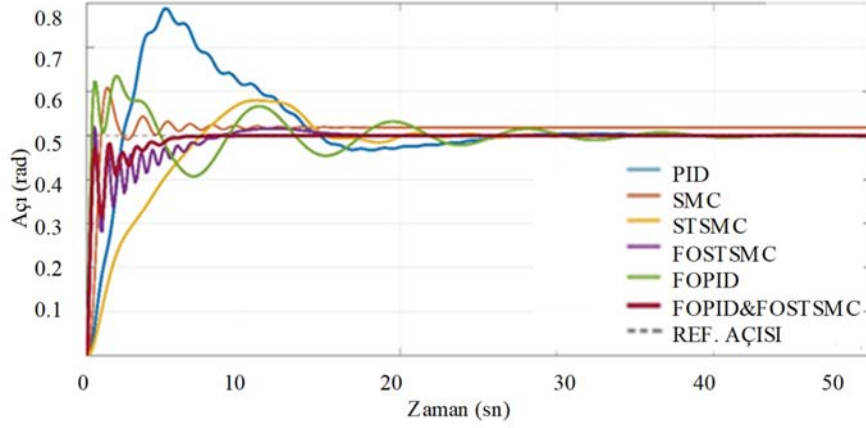
Şekil 7. FOSTSMC kontrol blok şeması (FOSTSMC control block diagram)



Şekil 8. TRMS kontrol blok şeması (TRMS control block diagram)



Şekil 9. Ana pervane açısı için benzetim sonuçları (Simulation results for pitch angle)



Şekil 10. Kuyruk pervane açısı için benzetim sonuçları (Simulation results for yaw angle)

Tablo 2. Kontrolcülerin Çıkış Dalga Tepkileri (Output Wave Responses of Controllers)

Pervane Türü	Özellik	Kontrolcü Türleri					
		PID	FOPID	SMC	STSMC	FOSTSMC	FOPID&FOSTSMC
Ana	Yükselme Zamanı	2 sn	0,78 sn		12,8 sn	13,25 sn	0,77 sn
	Yerleşme Zamanı	21,2 sn	9,9 sn		25,8 sn	20 sn	4,5 sn
	Maksimum Aşma (%)	46,64	11,02		9,14	0,04	0,00
Kuyruk	Yükselme Zamanı	2,2 sn	0,5sn		6,1 sn	0,49 sn	0,55 sn
	Yerleşme Zamanı	30 sn	21,9 sn	Kalıcı Durum hatası	35,1 sn	8,4 sn	4,2 sn
	Maksimum Aşma (%)	57,60	27,02		15,94	1,82	0,00

$$ITSE = \int_0^{\infty} e^2(t) t dt \quad (19)$$

Performans kriterlerini değerlendirmek için ana ve kuyruk pervanelerinden elde edilen hataların değişimi ayrı ayrı değerlendirilir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki Tablo 3'de özetlenmiştir.

Tablo 3'de önerilen FOPID&FOSTSMC yönteminin tüm ölçütlerde daha düşük hatalar elde ettiği açıkça anlaşılmaktadır.

Tablo 4'de uyguladığımız tüm kontrolcüler için kullanılan parametre değerleri verilmiştir. Kontrol parametreleri deneme yanılma yöntemi ile belirlenmiştir.

### 3.2. TRMS'ye Uygulanan Kontrolcü Deney Sonuçları (The Experimental Results of TRMS)

Benzetim sonuçlarında da görüldüğü gibi ana pervane için FOPID, kuyruk pervanesi için FOSTSMC kontrol yöntemini kullanıldığında en başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Deneysel çalışmada FOPID & FOSTSMC karma yöntemi kullanılmıştır. TRMS deney setinde önerilen yöntemle yapılan uygulama ve benzetim çalışmasında elde

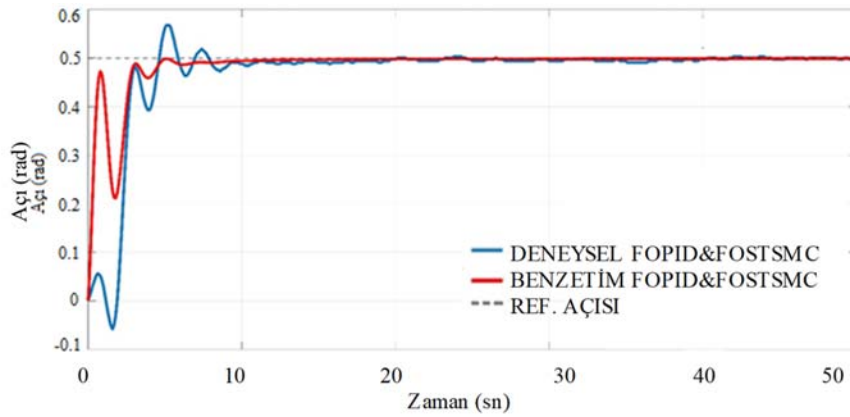


**Tablo 3.** Ana ve kuyruk pervanesi için elde edilen hataların değişimi (Variation of errors obtained for pitch and yaw rotors)

Kontrolcü	Pervane	Hata Değerleri		
		ISE	IAE	ITSE
PID	Ana	0,3675	1,6880	0,8208
	Kuyruk	0,5764	2,6860	2,3730
FOPID	Ana	0,1341	0,7336	0,1604
	Kuyruk	0,0965	1,2370	0,4564
SMC	Ana	6,1950	24,730	291,5000
	Kuyruk	0,1580	2,1650	1,7190
STSMC	Ana	6,9800	8,9410	37,9600
	Kuyruk	0,4512	1,9070	0,9028
FOSTSMC	Ana	4,2570	6,7790	17,7400
	Kuyruk	0,0938	0,6647	0,1092
FOPID & FOSTSMC	Ana	0,1337	0,7242	0,1534
	Kuyruk	0,0638	0,3796	0,0350

**Tablo 4.** Kontrolcülerin parametre değerleri (Parameter values of controllers)

Kontrolcü	Pervane	Kp	Ki	Kd	$\lambda$	$\mu$
		PID	Ana Pervane	3		
	Kuyruk Pervanesi	2	0,5	5		
FOPID	Ana Pervane	Kp	Ki	Kd	$\lambda$	$\mu$
	Kuyruk Pervanesi	3	3,2	3	0,97	1,4
SMC	Ana Pervane	2	5	8	0,99	0,96
	Kuyruk Pervanesi	$\lambda$	$u_0$			
STSMC	Ana Pervane	0,3	10			
	Kuyruk Pervanesi	3,1	4,1			
FOSTSMC	Ana Pervane	$c_1$	$k_1$	$k_2$		
	Kuyruk Pervanesi	-1	-1	-1		
FOPID & FOSTSMC	Ana Pervane	$\rho$	$c_1$	$k_1$	$k_2$	
	Kuyruk Pervanesi	-0,6	-0,2	-4	0,3	
FOPID & FOSTSMC	Ana Pervane	0,73	7	8	1,6	
	Kuyruk Pervanesi	Kp	Ki	Kd	$\lambda$	$\mu$
		4	2,2	2,85	0,97	1,4
		$\rho$	$c_1$	$k_1$	$k_2$	
		0,73	10	4,5	0,95	

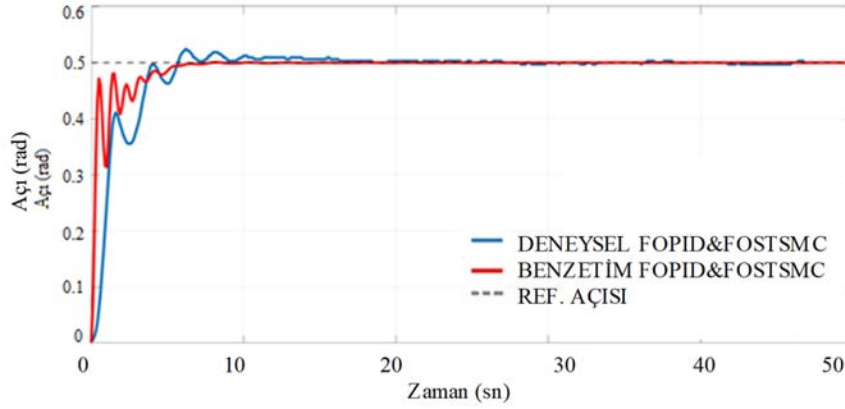
**Şekil 11.** Benzetim ve deneysel çalışmada FOPID & FOSTSMC kontrolcüsü için ana pervane açı değerleri (Pitch rotor angle values for FOPID & FOSTSMC controller in simulation and experimental setup)

edilen sonuçlar ana pervane için Şekil 11 ve kuyruk pervanesi için de Şekil 12'de verilmiştir.

Şekil 11 ve Şekil 12'de görüldüğü gibi deneysel çalışmada çok az da olsa bir aşma meydana gelmiştir. Yükselme ve oturma zamanları birbirine çok yakın değerlerdedir.

#### 4. Simgeler (Symbols)

- $\mu$  : kesir derecesi katsayısı
- $A$  : Süper büküm kayan mod katsayısı
- $K_1$  : Kayan mod ilk katsayı
- $K_2$  : Kayan mod ikinci katsayı



Şekil 12. Benzetim ve deneysel çalışmada FOPID & FOSTSMC kontrolcüsü için kuyruk pervane açısı değerleri (Yaw rotor angle values for FOPID & FOSTSMC controller in simulation and experimental setup)

K<sub>d</sub> : Diferansiyel kazanç katsayısı  
 K<sub>i</sub> : İntegral kazanç katsayısı  
 K<sub>p</sub> : Oransal kazanç katsayısı  
 λ : kesir derecesi katsayısı

## 5. Sonuçlar (Conclusions)

Yapılan çalışmada bir TRMS'de kararlı bir kontrol sağlamak için oransal-integral-türev (PID), kesir dereceli PID (FOPID), kayan kip (SMC), Süper bükümlü kayan kip (FOSTSMC) ve Kesirli dereceli süper bükümlü kayan kip (FOSTSMC) kontrol yöntemleri kullanılmıştır. MATLAB/Simulink programında benzetim çalışmaları yapılmıştır. Yapılan benzetim çalışmalarında elde edilen ana ve kuyruk pervanelerine ait açı değerlerine ait grafik yükselme zamanı, oturma zamanı, aşma değeri ve hata değerleri incelenerek en iyi kontrol yöntemi bulunmaya çalışılmıştır. Tablo 2. ve Tablo 3. incelendiğinde ana pervane için yükselme, aşma ve oturma zamanı açısından en başarılı yöntemin FOPID, kuyruk pervanesi için de FOSTSMC yöntemi olduğu görülmektedir. Bu sonuçlardan yola çıkarak her iki pervane için aynı kontrolcü kullanmak yerine ana pervane için FOPID, kuyruk pervanesi için de FOSTSMC yöntemini kullanarak bir karma yöntem oluşturulmuştur. Tablo 2. ve 3 incelendiğinde önerilen yöntemde hem ana pervane hem de kuyruk pervanesinde en başarılı sonuçların elde edildiği görülmektedir. Bu nedenle deneysel çalışmada FOPID & FOSTSMC karma yöntemi kullanılmıştır. Bu karma yöntem üniversitemiz laboratuvarında bulunan Feedback firmasına ait TRMS MIMO sisteminde uygulanarak deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada da benzetim çalışmasına yakın değerler elde edilmiştir.

Bu çalışmada önerdiğimiz FOPID & FOSTSMC karma yönteminin TRMS MIMO sistem kontrolünde rahatlıkla kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Bundan sonraki deneysel çalışmalarda sisteme rüzgar gibi bozucu etkiler oluşturarak sistemin davranışı test edilebilir.

## Kaynaklar (References)

1. M. Twin Rotor, System Manual, Feedback Instruments, Crowborough, UK, 2002.
2. Rahideh, A., & Shaheed, M. H. Robust model predictive control of a twin rotor MIMO system. In 2009 IEEE International Conference on Mechatronics, Malaga-Spain, 1-6, April 2009.
3. Bajodah, A.H., Rahideh, A., Shaheed, M.H., Real time adaptive nonlinear model inversion control of a twin rotor MIMO system using neural networks, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 25 (6), 1289-1297, 2012.
4. Pandey, S. K., Laxmi, V., Control of Twin Rotor MIMO System using PID controller with derivative filter coefficient, IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science, Bhopal, India, 1-6, 1-2 Mart 2014.
5. Cajo, R., Agila, W., Evaluation of algorithms for linear and nonlinear PID control for Twin Rotor MIMO System, Asia-Pacific Conference on Computer Aided System Engineering, Quito-Ecuador. 214-219, 14-16 July 2015.
6. Sahu, P., Pradhan, S. K., Multi Variable Self Tuning PID Control of a Twin Rotor MIMO System, In: IEEE International Conference on Advanced Communications, Control and Computing Technologies, Ramanathapuram-India, 381-385, 8-10 May 2014.
7. Ramalakshmi, A.P.S., Manoharan, P.S., Non-linear Modeling and PID Control of Twin Rotor MIMO System, In: IEEE International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT), Ramanathapuram-India. 366-369, 23-25 August 2012.
8. Huang, Y. J., Wu, H. W., Kuo, T. C., PID-based fuzzy sliding mode control for twin rotor multi-input multi-output systems, IEEE Tencon – Spring, Sidney- Australia. 204-207, 17-19 April 2013.
9. Prasad, G.D., Manoharan, P.S., Ramalakshmi, A.P.S., PID Control Scheme for Twin Rotor MIMO System using a Real Valued Genetic Algorithm with a Predetermined Search Range, International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC), Sri Rangalatchum Dindigul-India. 443-448, 6-8 February 2013.
10. Ekinci, S., & Hekimoglu, B. Multi-machine power system stabilizer design via HPA algorithm. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (4), 1271-1285, 2017.
11. Ekinci, S. Optimal design of power system stabilizer using sine cosine algorithm. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (3), 1329-1350, 2019.
12. Bertias, P., Kamilaris, T., Psychalinos, C., Baranowski, J., Bauery, W., Piateky, P., Tutaj, A., Design of Operational Amplifier Based Fractional-Order Controller for a MAGLEV System, IEEE 43rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), Milano- Italy, 221-224, 7-9 July 2020.
13. Zhao, D., Li, F., Ma, R., Zhao, G., Huangfu, Y., An Unknown Input Nonlinear Observer Based Fractional Order PID Control of FuelCell Air Supply System, IEEE Transactions on Industry Applications, 56 (5), 5523-5532, 2020.
14. Zhao, X., Wang, T., Jin, H., Intelligent second-order sliding mode control for permanent magnet linear synchronous motor servo systems with robust compensator, IET Electr. Power Appl., 14 (9), 1661-1671, 2020.
15. Rayguru, M.M., Elara, M.R., Gómez, B.F., Ramalingam, B., A Time Delay Estimation Based Adaptive Sliding Mode Strategy for Hybrid Impedance Control, IEEE Access, 8, 155352-155361, 2020.
16. Zhang, X., Xiao, L., Li, H., Robust Control for Switched Systems with Unmatched Uncertainties Based on Switched Robust Integral Sliding Mode, IEEE Access, 8, 138396 – 138405, 2020.

17. Rawi A.A., Ahmad R.B., Tahir H., Chatter-less Sliding-Mode Controller for DC Motor, IEEE Student Conference on Research and Development Electronic, Putrajaya-Malaysia, 54-59, December 2013.
18. Castillo, Oscar, Kutlu, F., Atan, Ö., Intuitionistic fuzzy control of twin rotor multiple input multiple output systems, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 38 (1), 821-833, 2020.
19. Tang, Y., Zhang, Y., Hasankhani, A., Vanzwieten, J., Adaptive Super-Twisting Sliding Mode Control for Ocean Current Turbine-Driven Permanent Magnet Synchronous Generator, American Control Conference (ACC), Denver-USA. 211-217, 1-3 July 2020.
20. Amin, M.M., El-sousy, F.F.M., Abdelaziz, G.A., Mohammed, O.A., Robust Adaptive Neural-Network Super-Twisting Sliding-Mode Control for PMSM Driven Linear Stage with Uncertain Nonlinear Dynamics, IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC), Chicago-USA. 87-92, 23-26 June 2020.
21. Wang, W., Ma, J., Li, X., Zhu, H., Teo, C.S., Lee, T.H., Iterative Super-Twisting Sliding Mode Control: A Case Study on Tray Indexing, 2020 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Boston-USA. 1811-1815, 6-9 July 2020.
22. Issac, T., Thomas, F., Mija, S.J., Trajectory Tracking of Unmanned Helicopter Using Super Twisting Control, International Conference for Emerging Technology (INCET), Belgaum-India, 1-4, 5-7 June 2020.
23. Zhao, K., Leng, A., She, J., Zhang, C., He, J., Li, T., Closed-loop Torque Control for Permanent Magnet Synchronous Motor by Super Twisting Algorithm Based Sliding-Mode Observer Considering Demagnetization, IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Delft-Holland. 1566-1571, 17-19 June 2020.
24. Chalanga, A., Kamal, S., Fridman, L.M., Bandyopadhyay, B., Moreno, J.A., Implementation of Super-Twisting Control: Super-Twisting and Higher Order Sliding-Mode Observer-Based Approaches, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63 (6), 3677-3685, 2016.
25. Mat-noh, M., Arshad, M.R., Mohd-mokhtar, R., Nonlinear control of autonomous underwater glider based on super-twisting sliding mode control (STSMC), 7th IEEE International Conference on System Engineering and Technology (ICSET), Shah Alam-Malaysia. 71-76, 17-19 June 2017.
26. Xuehui, G., Yingjian, L., Xuemei, R., Changsheng, Z., Variable Gain Super-Twisting Sliding Mode Control for Hammerstein System with Bouc-Wen Hysteresis Nonlinearity, 35th Chinese Control Conference (CCC), Chengdu-China. 3369-3372, 27-29 July 2016.
27. Jena, C., Pahadasingh, S., Panigrahi, C.K., Incorporation of Distributed Generation Resources for Three Area Load Frequency Control Using Fractional Order PID Controller, 2020 International Conference on Renewable Energy Integration into Smart Grids: A Multidisciplinary Approach to Technology Modelling and Simulation (ICREISG), Bhubaneswar-India. 186-191, 14-15 February 2020.
28. Venu, G., Kalyani, S.T., Design of Fractional Order based Super Twisting Algorithm for BLDC motor, 3rd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI), Tirunelveli-India, 271-277, 23-25 April 2019.
29. Li, W., Du, Z., Wang, W., Wu, W., Composite Fractional Order Sliding Mode Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Disturbance Observer, Chinese Automation Congress (CAC), Hangzhou-China, 4012-4016, 22-24 November 2019.
30. Fei, J., Feng, Z., Fractional-Order Finite-Time Super-Twisting Sliding Mode Control of Micro Gyroscope Based on Double-Loop Fuzzy Neural Network, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 51 (12), 7692-7706, 2020.
31. Alharbi, Y.M., Al-ahmadi, A.A., Ulla, N., Abeida, H., Soliman, M., Khraisat, Y.S.H., Super Twisting Fractional Order Energy Management Control for a Smart University System Integrated DC Micro-Grid, *IEEE Access*, 8, 128692 – 128704, 2020.
32. Gao, P., Zhang, G., Ouyang, H., Mei, L., An Adaptive Super Twisting Nonlinear Fractional Order PID Sliding Mode Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Speed Regulation System Based on Extended State Observer, *IEEE Access*, 8, 53498 – 53510, 2020.
33. Chaudhary, S., Kumar, A., Control of Twin Rotor MIMO System Using 1-Degree-of-Freedom PID, 2-Degree-of-Freedom PID and Fractional order PID Controller, 2019 3rd International conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), Coimbatore-India, 746-751, 12-14 June 2019.
34. Ramalakshmi, A.P.S., Manoharan, P.S., Non-linear Modeling and PID Control of Twin Rotor MIMO System, In: IEEE International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT), Ramanathapuram- India, 366-369, 23-25 August 2012.
35. Utkin V.I., Variable Structure Systems with Sliding Modes, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 22 (2), 212–222, 1977.
36. Shtessel, Y.B., Moreno, J.A., Plestan, F., Fridman, L.M., Poznyak, A.S., Super-twisting Adaptive Sliding Mode Control: a Lyapunov Design, 49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), Atlanta-USA. 5109-5113, 15-17 December 2010.
37. Levant, A., Sliding order and sliding accuracy in sliding mode control, *International journal of control*, 58 (6), 1247-1263, 1993.
38. Sheng, S., Xu, D., Super-Twisting-Algorithm-Based Terminal Sliding Mode Control for a Bioreactor System, *Hindawi Publishing Corporation Abstract and Applied Analysis*, 2014, 1-9, 2014.
39. Zhengguang, S., Changliang, X., Zhiqiang, W., Tingna, S., Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Super-Twist Algorithm, *Transactions of China Electrotechnical Society*, 32 (15), 89-99, 2017.

