

*Araştırma Makalesi – Research Article*

# İkili Tank Akışkan Seviye Sisteminin Kontrolü İçin Kayan Kipli Kontrolcü Tasarımı ve İleri Besleme + PI Kontrolcü Karşılaştırılması

## Sliding Mode Controller Design and Comparison with Feed Forward +PI Controller for Fluid Level System Control of Couple Tank

Sadrettin Gölcügezli<sup>1\*</sup>, Ahmet Dumlu<sup>2</sup>

*Geliş / Received: 07/04/2022*

*Revize / Revised: 08/06/2022*

*Kabul / Accepted: 15/08/2022*

### ÖZET

Bu makalede endüstri tesislerinde kullanılan akışkan seviye tank sisteminin tipik uygulaması olan İkili-Tank sistemine kayan kipli kontrol (SMC) uygulanarak kontrolü incelenmiştir. Doğrusal olmayan İkili-Tank sisteminin matematiksel modeli her iki tank sistemi için çıkarılmıştır. İkili-Tank sisteminin dinamik Denklemleri, kayan kipli kontrol ile birleştirilerek sistem tasarlanmıştır. SMC'nin önemli yönü, sistem durumlarının kayma yüzeyinde kalmasını sağlayan bir anahtarlama işlevi kullanarak dış bozuculara veya belirsizliklere maruz kalan doğrusal olmayan bir dinamik sistemi kontrol etmektir. Yazar tarafından kayan kipli kontrol (SMC), parametre değişimlerine ve bozulmalara karşı sağlamlığı nedeniyle tercih edilmiştir. Bu makalede istenmeyen çadırda etkisinden kaçınmak için ikinci dereceden SMC tekniği kullanılmıştır. Kayan kipli kontrol için kontrol işareti, anahtarlama kontrol işareti ile eşdeğer kontrol işaretinin toplamı olacak şekilde hesaplanmıştır. Doğrusal olmayan İkili-Tank sisteminin transfer fonksiyonu, Taylor serisi doğrusallaştırma yöntemiyle hesaplanmıştır. Bu makalede Tank 2 transfer fonksiyonu, sistemin giriş geriliminin akışkan seviyesine oranıyla belirlenmiştir. Transfer fonksiyonu için İkili-Tank sistemine uygulanan kayan kipli kontrol ile başka bir kontrol şekli olan ileri beslemeli PI denetleyicisi (FF-PI) karşılaştırılmıştır. Kayan kipli kontrol (SMC) uygulanarak tasarlanan İkili-Tank sisteminin MATLAB-Simulink simülasyon ortamında ölçülen akışkan seviyenin, referans akışkan seviyesine takibi ve ölçülen akışkan seviyesi ile istenilen akışkan seviyesi arasındaki hata tespiti incelenmiştir. Kayan kipli kontrol (SMC) ile tasarlanan sistem oldukça başarılı bir şekilde istenilen akışkan seviyesini takip edebildiği gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler-** *Kayan Kipli Kontrol, İleri Beslemeli PI, Akışkan Seviye Sistemleri, Doğrusal Olmayan Kontrol*

### ABSTRACT

In this article, sliding mode control (SMC) is applied to the Couple-Tank system, which is the typical application of the fluid level tank system used in industrial facilities and its control is examined. The mathematical model of the nonlinear Couple-Tank system was found out for both tank systems. The system was designed by combining

<sup>1\*</sup>Sorumlu yazar iletişimi: [sadrettin.golcugezli37@erzurum.edu.tr](mailto:sadrettin.golcugezli37@erzurum.edu.tr) (<https://orcid.org/0000-0002-6889-3947>)

Project Support Office, Atatürk University, 25240, Erzurum, Turkey

<sup>2</sup>İletişim: [ahmetdumlu@erzurum.edu.tr](mailto:ahmetdumlu@erzurum.edu.tr) (<https://orcid.org/0000-0002-2181-5386>)

Department of Electrical and Electronics Engineering, Erzurum Technical University, 25700, Erzurum, Turkey

the dynamic equations of the Couple-Tank system with the sliding mode control. The important aspect of SMC is to control a nonlinear dynamic system that is exposure to external disturbances or uncertainties using a switching function that ensures that the system states remain on the slip surface. The sliding mode control (SMC) was chosen by the author because of its robustness against parameter changes and distortions. In this article, the second order SMC technique is used to avoid the unwanted chattering effect. The control signal for the sliding mode control was calculated as the sum of the switching control signal and the equivalent control signal. The transfer function of the nonlinear Couple-Tank system was calculated by the Taylor series linearization method. In this article, the Tank 2 transfer function was determined by the ratio of the input voltage of the system to the fluid level. The sliding mode control applied to the Couple-Tank system and the feed forward PI controller (FF-PI), which is another type of control, are compared. The monitoring of the measured fluid level to the reference fluid level and error detection between the measured liquid level and the desired fluid level were examined in the simulation environment of the Couple-Tank system designed by applying the sliding mode control (SMC). It has been observed that the system designed with sliding mode control (SMC) can follow the desired fluid level quite successfully.

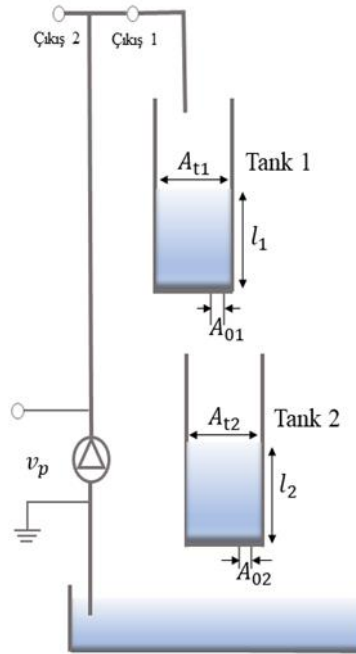
**Keywords-** *Sliding Mode Control, Feedforward PI, Fluid Level Systems, Nonlinear Control*

## I. GİRİŞ

Endüstri tesislerinde kullanılan proses işlemlerinden biri de akışkan seviye tank sistemleridir. Tipik bir proses kontrol temsilcisi, İkili-Tank (CT) akışkan seviye kontrol problemidir [1]. Akışkan seviye kontrolün; gıda işleme, içecek, süt ürünleri, filtrasyon, atık arıtma, nükleer enerji üretim tesisleri, ilaç endüstrileri, su arıtma sistemleri, endüstriyel kimyasal işleme, sprey kaplama, otomatik akışkan dağıtım ve iklim cihazları gibi endüstriyel uygulamaları vardır [2]. Akışkan seviyesinin hassas bir şekilde kontrol edilmesi proses endüstrilerinde önemli bir görev olmuştur. Genellikle akışkanlar tanklara pompalanır, daha sonraki proses işlemleri için tanklarda depolanır ve birleştirilmiş tanklardan akar [3]. Literatürde birçok çalışmada rapor edilen ikili tank sistemlerine çok sayıda doğrusal olmayan kontrol yöntemi uygulanmaktadır. Bozulma ve parametre değişimleri altında akışkan seviye sisteminin yüksek doğrulukta kontrolünü uygulamak için uyarlanabilir tabanlı ve dayanıklı kesirli dereceli denetleyici göz önünde bulundurulmuştur [4,5]. Deneysel çalışma ile bir akışkan seviye mekanizması için uyarlanabilir bir geri adımlı denetleyicide önerilmiştir [6]. Ek olarak, ikinci dereceden doğrusal olmayan akışkan seviye sistemi için küresel olarak asimptotik olarak kararlılık sağlamak için yüksek kazançlı bir gözlemci ile birleştirilmiş model tabanlı bir geri adımlı denetleyici önerilmiştir [7]. Model tabanlı kontrol yöntemlerinin dışında, bulanık mantık ve sensör hata toleranslı kontrolörlerin sistem doğrusalsızlıklarında, parametre değişimlerinde ve bozulmalarda yüksek hassasiyetli kontrol gibi gereksinimleri karşılaması önerilmiştir [8]. Fakat, büyük gecikme gibi belirli başka bir durum meydana geldiğinde, bulanık tabanlı denetleyici performansı bozulur. Bu kontrol teknikleri arasında doğrusal olmayan kayma kipli kontrol tekniği (SMC), belirsizlikler, bozulmalar ve modellenmemiş dinamikler ile doğrusal olmayan sistem için sağlam bir kontrol yöntemidir [9, 10]. SMC'nin önemli yönü, sistem durumlarının kayma yüzeyinde kalmasını sağlayan bir anahtarlama işlevi kullanarak dış bozuculara veya belirsizliklere maruz kalan doğrusal olmayan bir dinamik sistemi kontrol etmektir [11]. Uygulamada, SMC tekniğinin tipinin ve SMC'nin parametrelerinin seçimi çok önemlidir. Bunun nedeni, yüksek anahtarlama kazancı seçiminin, yüksek frekanslı salınım olarak bilinen istenmeyen bir çaturdama etkisine neden olabilmesidir [12]. Bu nedenle, çaturdama etkisinden kaçınmak için literatürde farklı tipte SMC teknikleri geliştirilmiştir. Örneğin, çaturdama etkisinden kaçınmak için ikinci dereceden SMC önerilmiştir [13]. Ayrıca, yüksek dereceli SMC (HOSMC) tekniği önerilmiştir [14]. Literatürde, akışkan seviye kontrol sistemine uygulanan birçok farklı SMC şeması kullanılır. Bu makalede akışkan seviye tank sisteminden istenilen prosesi sağlaması için gereken kontrol, ikinci dereceden kayan kipli kontrolcüyle sağlanmıştır. Kayan kipli kontrol (SMC) basitliği, parametre varyasyonlarına ve bozulmalara karşı sağlamlığı nedeniyle birçok bilimsel ve endüstriyel uygulamada kapsamlı bir şekilde çalışılmış ve yaygın olarak kullanılmaktadır [15]. Ayrıca, kayan kipli kontrol (SMC) modelleme ve performans arasındaki ödünleşimlerin basit bir şekilde ölçülmesine izin vererek, tüm tasarım sürecini aydınlatılabilir. Kayan kipli kontrol, makine mühendisliği, robotik, elektrik mühendisliği, kontrol sistemleri, ağ mühendisliği vb. gibi mühendisliğin çeşitli dallarında uygulamalara sahiptir [15].

## II. SİSTEMİN MATEMATİKSEL MODELİ

Endüstri tesislerindeki akışkan seviye tank prosesinin tipik bir uygulaması olan İkili-Tank sistemi Şekil 1'deki gibidir. İkili-Tank sistemi bir pompa, iki tank ve bir depodan oluşur. İkili-Tank kontrol sisteminde amaç, akışkanın sistemden talep edilen seviyede sabit tutulmasıdır. İkili-Tank sisteminden  $l_1$  ve  $l_2$  olmak üzere iki adet akışkan seviyesi mevcut olmasından dolayı iki ayrı denetleyiciye ihtiyaç duyulmuştur. Tank 1'in kontrolü, pompa vasıtasıyla Tank 1 içerisine aktarılan akışkanın istenilen seviyede tutulması, Tank 2'nin kontrolü ise Tank 1 tarafından Tank 2'nin içerisine aktarılan akışkanın istenilen seviyede tutulması ile sağlanmıştır. Sistemlerin kontrol aşamalarından biri transfer fonksiyonunun belirlenmesidir. İkili tank sistemi için Tank 1'in kontrolünde giriş pompa gerilimi, çıkış ise tutulması gereken akışkan seviyesi olacak şekilde alınmıştır. Tank 2'nin kontrolü için giriş Tank 1'den Tank 2'ye aktarılan akışkan, çıkış ise Tank 2'de tutulması gereken akışkanın seviyesi olacak şekilde belirlenmiştir. Bu makalede Tank 2'nin transfer fonksiyonu giriş gerilimi ile akışkan seviyesinin oranıyla belirlenmiştir. İkili tank sistemi için gerekli parametreler ve değerleri Tablo 1'de gösterilmiştir. Doğrusal olmayan İkili-Tank sistemin kontrolü için Tank 1 ve Tank 2 dinamik denklemleri çıkarılmıştır.



Şekil 1. İkili-Tank Sistemi

**Tablo 1.** Sistem değişkenleri ve sabitleri

	Tanım	Değer	Birim
$v_p$	Pompa Gerilimi		V
$k_p$	Pompa Sabiti	3,3	$\frac{cm^3}{s \cdot V}$
$g$	Yer Çekimi	981	$cm/s^2$
$l_{cs1}$	Tank 1 Çalışma Seviyesi	15	cm
$l_{cs2}$	Tank 2 Çalışma Seviyesi	15	cm
$l_1$	Tank 1 Akışkan Seviyesi	Değişken	cm
$l_2$	Tank 2 Akışkan Seviyesi	Değişken	cm
$A_{t1}$	Tank 1 Kesit Alanı	15,5179	$cm^2$
$A_{t2}$	Tank 2 Kesit Alanı	15,5179	$cm^2$
$A_{01}$	Tank 1 Çıkış Kesit Alanı	0,1781	$cm^2$
$A_{02}$	Tank 2 Çıkış Kesit Alanı	0,1781	$cm^2$
$q_{in1}$	Tank 1 Giriş Debi	Değişken	$cm^3/s$
$q_{in2}$	Tank 2 Giriş Debi	Değişken	$cm^3/s$
$q_{01}$	Tank 1 Çıkış Debi	Değişken	$cm^3/s$
$q_{02}$	Tank 2 Çıkış Debi	Değişken	$cm^3/s$
$v_{01}$	Tank 1 Çıkış Hızı	Değişken	$cm/s$
$v_{02}$	Tank 2 Çıkış Hızı	Değişken	$cm/s$

Tank sisteminde kullanılacak olan Tablo 1.'de verilen  $l_{cs1}$  ve  $l_{cs2}$  için sistemden istenilen çalışma seviyesi olarak tanımlanmıştır. Hacimsel akış hızı olarak  $q$  harfi kullanılmıştır. Sistemin transfer fonksiyonu elde edebilmek için doğrusal olmayan tank sisteminin hareket denklemleri, durgun bir çalışma noktası etrafında karakterize ( $l_{cs}$ ) edilmiştir.

Tank 1 içerisine aktarılan akışkanın debisi Denklem (1)'de verilmiştir.

$$q_{in1} = k_p v_p(t) \quad (1)$$

Tank 1 ve Tank 2'den çıkan akışkanın hız denkleminin elde edilmesi için Bernoulli Denklemi kullanılmıştır. Tank 1 ve Tank 2'nin sırasıyla denklemleri Denklem (2) ve Denklem (3)'de verilmiştir.

$$v_{01} = \sqrt{2gl_1(t)} \quad (2)$$

$$v_{02} = \sqrt{2gl_2(t)} \quad (3)$$

Denklem (2) ve Denklem (3)'de verilen Bernoulli Denklemleri yardımıyla Tank 1 ve Tank 2'den çıkış yapan akışkanın debi denklemleri Denklem (4) ve Denklem (5)'deki gibi elde edilmiştir.

$$q_{01} = A_{01} \sqrt{2gl_1(t)} \quad (4)$$

$$q_{02} = A_{02} \sqrt{2gl_2(t)} \quad (5)$$

Tank 1 ve Tank 2'deki akışkan seviyesinin değişimini veren denklemi elde etmek için süreklilik yasasından faydalanılmıştır. Burada akışkan sıkıştırılmaz (sabit yoğunluk) kabul edilmiştir. Tank 1 ve Tank 2 akışkan seviyesinin değişimi sırasıyla Denklem (6) ve Denklem (8)'de elde edilmiştir.

$$\frac{dl_1}{dt} = \frac{q_{in1}(t) - q_{01}(t)}{A_{t1}} = \frac{k_p v_p(t)}{A_{t1}} - \frac{A_{01} \sqrt{2gl_1(t)}}{A_{t1}} \quad (6)$$

Tank 1'den çıkan akışkan ile Tank 2'ye akan akışkan aynı olduğundan dolayı Tank 1'den çıkan akışkanın debisi ile Tank 2'ye akan akışkanın debisi birbirine eşittir.

$$q_{01} = q_{in2} \quad (7)$$

$$\frac{dl_2}{dt} = \frac{q_{in2}(t) - q_{02}(t)}{A_{t2}} = \frac{A_{01}\sqrt{2gl_1(t)}}{A_{t1}} - \frac{A_{02}\sqrt{2gl_2(t)}}{A_{t2}} \quad (8)$$

Doğrusal olmayan İkili-Tank sistemi, Taylor serisi yaklaşımıyla doğrusallaştırılabilir [16]. Doğrusallaştırma ile elde edilen Tank 1 ve Tank 2 sistemlerinin denklemleri elde edilmiştir ve her iki tank için transfer fonksiyonu hesaplanmıştır.

Doğrusallaştırma Denklem (9)'da verilen Taylor serisi yardımıyla elde edilmiştir.

$$f(l) = f(l_0) + (l - l_0)f'(l_0) + \dots + \frac{(l-l_0)^n}{n!} \cdot f^n(l_0) \quad (9)$$

Denklem 9 verilen  $l_0$  kararlı durum çalışma noktası olarak alınmıştır.

Denklem (6)'da ve Denklem (8)'de elde edilen matematiksel hesabı kolaylaştırmak için sırasıyla sabitler Denklem (10) ve Denklem (11)'deki gibi tanımlanmıştır.

$$x_1 = \frac{-A_{01}}{A_{t1}}\sqrt{2g}, y_1 = \frac{k_p}{A_{t1}} \quad (10)$$

$$x_2 = \frac{-A_{02}}{A_{t2}}\sqrt{2g}, y_2 = \frac{A_{01}}{A_{t2}}\sqrt{2g} \quad (11)$$

Denklem (10) ve Denklem (11), sırasıyla Denklem (6) ile Denklem (8)'de yerine yazıldığında Denklem (12) ve Denklem (13) elde edilmiştir.

$$\frac{dl_1}{dt} = x_1\sqrt{l_1(t)} + y_1v_p(t) \quad (12)$$

$$\frac{dl_2}{dt} = x_2\sqrt{l_2(t)} + y_2\sqrt{l_1(t)} \quad (13)$$

Denklem (9)'da verilen Taylor Denklemi Tank 1 ve Tank 2 için hesaplandığında sırasıyla Denklem (14) ve Denklem (15) elde edilmiştir.

$$\sqrt{l_1} \approx \sqrt{l_{cs1}} + \frac{1}{2\sqrt{l_{cs1}}}(l_1 - l_{cs1}) \quad (14)$$

$$\sqrt{l_2} \approx \sqrt{l_{cs2}} + \frac{1}{2\sqrt{l_{cs2}}}(l_2 - l_{cs2}) \quad (15)$$

Tank 1 ve Tank 2 akışkan seviyelerinin değişimleri, Denklem (14) ve Denklem (15)'de elde edilen Denklemler sırasıyla Denklem (12) ve Denklem (13)'de yerine yazıldığında Denklem (16) ve Denklem (17) elde edilmiştir.

$$\frac{dl_1}{dt} = x_1\left(\sqrt{l_{cs1}} + \frac{1}{2\sqrt{l_{cs1}}}(l_1(t) - l_{cs1})\right) + y_1v_p(t) \quad (16)$$

$$\frac{dl_2}{dt} = x_2\left(\sqrt{l_{cs2}} + \frac{1}{2\sqrt{l_{cs2}}}(l_2(t) - l_{cs2})\right) + y_2\sqrt{l_{cs1}} + \frac{y_2}{2\sqrt{l_{cs1}}}(l_1(t) - l_{cs1}) \quad (17)$$

Kararlı durum şartları altında  $l_{c1} = l_1$ ,  $l_{c2} = l_2$ ,  $v_{csp} = v_p$  alınmıştır. Kararlı durumda Denklem (16) ve Denklem (17)'de  $l_{c1} = l_1$ ,  $l_{c2} = l_2$ ,  $v_{csp} = v_p$  yazıldığında Denklem (18) ve Denklem (19) elde edilmiştir.

$$0 = x_1\sqrt{l_{cs1}} + y_1v_{csp} \quad (18)$$

$$0 = x_2\sqrt{l_{cs2}} + y_2\sqrt{l_{cs1}} \quad (19)$$

Denklem (16)'dan Denklem (18) ve Denklem (17)'den Denklem (19) matematiksel olarak çıkarma işlemi yapılmıştır. Yapılan çıkarma işlemi neticesinde Denklem (20) ve Denklem (21) elde edilmiştir. Denklem (20) ve Denklem (21)'de  $l'_1$ ,  $l'_2$  ve  $v'_p$  ifadeleri  $l'_1 = (l_1 - l_{cs1})$ ,  $l'_2 = (l_2 - l_{cs2})$ ,  $v'_p = (v_p - v_{csp})$  olarak alınmıştır.

$$\frac{dl'_1}{dt} = \frac{x_1}{2\sqrt{l_{cs1}}} l'_1(t) + y_1 v'_p(t) \quad (20)$$

$$\frac{dl'_2}{dt} = \frac{x_2}{2\sqrt{l_{cs2}}} l'_2(t) + \frac{y_2}{2\sqrt{l_{cs1}}} l'_1(t) \quad (21)$$

Tank 1 için transfer fonksiyonu Denklem (20) kullanılarak Laplace dönüşümüyle hesaplanmıştır.

$$L'_1(s)s = \frac{x_1}{2\sqrt{l_{cs1}}} L'_1(s) + y_1 V'_p(s) \quad (22)$$

$$G_1(s) = \frac{L'_1(s)}{V'_p(s)} = \frac{3,24}{15,237s+1} \quad (23)$$

Tank 2 için transfer fonksiyonu Denklem (21) kullanılarak Laplace dönüşümüyle hesaplanmıştır.

$$\frac{d^2 l'_2}{dt^2} = \frac{x_2}{2\sqrt{l_{cs2}}} \frac{dl'_2}{dt} + \frac{y_2}{2\sqrt{l_{cs1}}} \frac{dl'_1}{dt} \quad (24)$$

$$L'_2(s) \left( s^2 - \left( \frac{x_2}{2\sqrt{l_{cs2}}} + \frac{x_1}{2\sqrt{l_{cs2}}} \right) s + \frac{x_1 x_2}{4l_{cs2}} \right) = \frac{y_1 y_2 V'_p(s)}{2\sqrt{l_{cs2}}} \quad (25)$$

$$G_2(s) = \frac{L'_2(s)}{V'_p(s)} = \frac{13,9 \cdot 10^{-3}}{s^2 + 0,1313s + 4,31 \cdot 10^{-3}} \quad (26)$$

### III. DENETLEYİCİ TASARIMI

Bu makalede İkili-Tank akışkan seviye sisteminin kontrolü için kayan kipli kontrol uygulanmıştır. Kayan kipli kontrolde kayma yüzeyi fonksiyonu seçimi yapılmıştır. Ayrıca sistemin kontrolü için anahtarlama kontrol işareti ile eşdeğer kontrol işaretinin denklemi hesaplanmıştır. Sistemin kontrol işareti U, eşdeğer kontrol ile anahtarlama kontrol işaretinin toplamıdır [17].

$$U(t) = u_{eq}(t) + u_{sw}(t) \quad (27)$$

Bu makalede kontrol tasarımında kayma yüzeyi ve hata fonksiyonu olmak üzere iki fonksiyon üzerinden gidilmiştir. Kayma yüzeyi sistemin derecesine göre hesaplanmıştır. Tank 1 için hata fonksiyonu, referans akışkan seviyesi ile ölçülen akışkan seviyesi arasındaki fark alınarak hesaplanmıştır.

$$e = l_r(t) - l_1(t) \quad (28)$$

$$\dot{e} = \dot{l}_r(t) - \dot{l}_1(t) \quad (29)$$

Kayan kipli kontrol için kayma yüzeyi fonksiyonu Denklem (30)' da belirlenmiştir.

$$s(t) = \left( \frac{d}{dt} + \lambda_c \right)^{n-1} \cdot e(t) \quad (30)$$

Sistemin hatasını sıfıra yaklaştırmak için kayma yüzeyi sıfıra götürülmüştür.

$$s(t) = \dot{e}(t) + \lambda_c \cdot e(t) \quad (31)$$

$$s(t) = (\lambda_c \cdot e(t)) + \dot{l}_r(t) - \dot{l}_1(t) \quad (32)$$

Denklem (12)'de verilen Tank 1 akışkan seviyesi değişimi Denklem(32)'de yerine yazılmıştır.

$$s(t) = (\lambda_c \cdot e(t)) + \dot{l}_r(t) - (x_1 \sqrt{l_1(t)} + y_1 v_p(t)) \quad (33)$$

$$y_1 v_p(t) = (\lambda_c \cdot e(t)) + \dot{l}_r(t) - x_1 \sqrt{l_1(t)} \quad (34)$$

Tank 1 için eşdeğer kontrol işareti Denklem (35)'deki gibi hesaplanmıştır. Tank 1 için eşdeğer kontrol işareti ( $u_{eq1}$ ) sistemin girişi yani pompa gerilimine eşit olacak şekilde alınmıştır.

$$u_{eq1} = \frac{(\lambda_c \cdot e(t)) + \dot{l}_r(t) - x_1 \sqrt{l_1(t)}}{y_1} \quad (35)$$

Tank 2 için sistem ikinci dereceden olacak şekilde tasarlanmıştır. Denklem (13)'de verilen Tank 2 akışkan seviyesinin, ikinci mertebeden türev olacak şekilde Denklem (38)'de hesaplanmıştır.

$$\frac{d^2 l_2}{dt^2} = \frac{x_2}{2\sqrt{l_2(t)}} \cdot \frac{dl_2}{dt} + \frac{y_2}{2\sqrt{l_1(t)}} \cdot \frac{dl_1}{dt} \quad (36)$$

$$\frac{d^2 l_2}{dt^2} = \frac{x_2}{2\sqrt{l_2}} \cdot (x_2\sqrt{l_2(t)} + y_2\sqrt{l_1(t)}) + \frac{y_2}{2\sqrt{l_1(t)}} \cdot (x_1\sqrt{l_1(t)} + y_1 v_p(t)) \quad (37)$$

$$\frac{d^2 l_2}{dt^2} = \frac{x_2 y_2 \sqrt{l_1(t)}}{2\sqrt{l_2(t)}} + \frac{y_1 y_2}{2\sqrt{l_1(t)}} \cdot v_p(t) \quad (38)$$

İkinci dereceden Tank 2 sisteminin hatasını sıfır yapmak için kayma yüzeyinin türevi de sıfıra götürülmüştür.

$$e(t) = l_r(t) - l_2(t) \quad (39)$$

$$e\ddot{(t)} = l_r\ddot{(t)} - l_2\ddot{(t)} \quad (40)$$

$$s(t) = e\dot{(t)} + \lambda_c \cdot e(t) \quad (41)$$

$$s\dot{(t)} = e\ddot{(t)} + \lambda_c \cdot e\dot{(t)} \quad (42)$$

$$s\dot{(t)} = \lambda_c \cdot e\dot{(t)} + l_r\ddot{(t)} - l_2\ddot{(t)} \quad (43)$$

$$s\dot{(t)} = \lambda_c \cdot e\dot{(t)} + l_r\ddot{(t)} - \left( \frac{x_2 y_2 \sqrt{l_1(t)}}{2\sqrt{l_2(t)}} + \frac{y_1 y_2}{2\sqrt{l_1(t)}} \cdot v_p(t) \right) \quad (44)$$

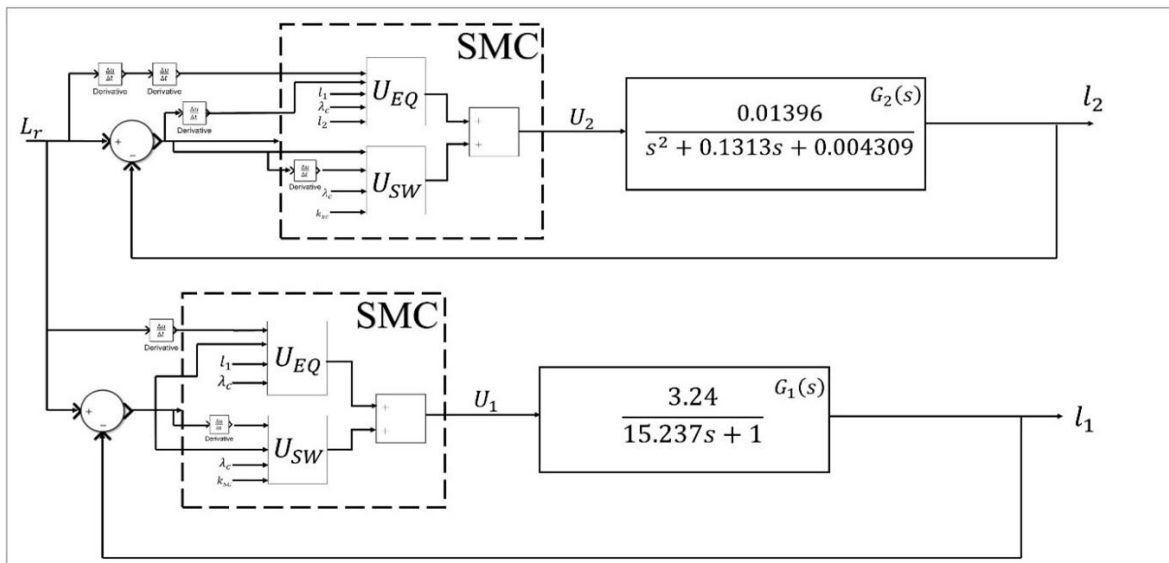
$$v_p(t) \frac{y_1 y_2}{2\sqrt{l_1(t)}} = \lambda_c \cdot e\dot{(t)} + l_r\ddot{(t)} - \frac{x_2 y_2 \sqrt{l_1(t)}}{2\sqrt{l_2(t)}} \quad (45)$$

Tank 2 için eşdeğer kontrol işareti Denklem (46)'daki gibi hesaplanmıştır.

$$u_{eq2} = \left( l_r\ddot{(t)} + (\lambda_c \cdot e\dot{(t)}) - \frac{x_2 y_2 \sqrt{l_1(t)}}{2\sqrt{l_2(t)}} \right) \cdot \left( \frac{2\sqrt{l_1(t)}}{y_1 y_2} \right) \quad (46)$$

$$u_{sw} = k_{sc} * sign(s(t)) \quad (47)$$

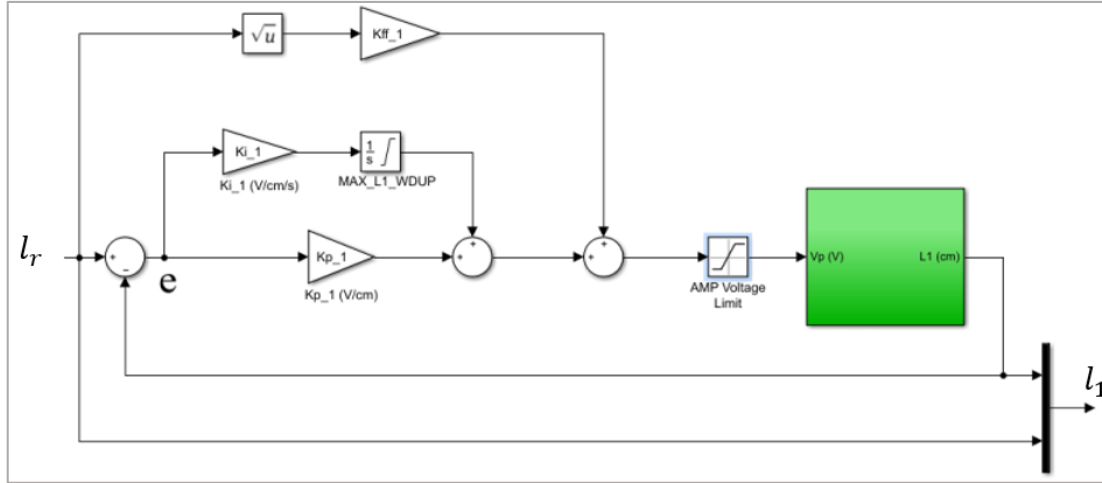
İkili-Tank sistemi elde edilen dinamik Denklemler, matematiksel model, anahtarlamalı kontrol işareti, eşdeğer kontrol işareti ve transfer fonksiyon kullanılarak tasarlanmıştır (Şekil 2).



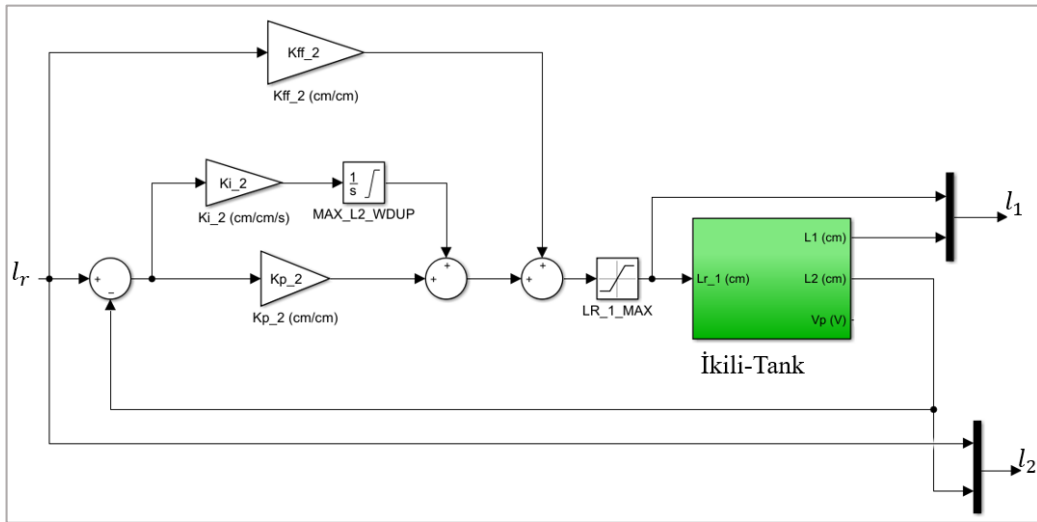
Şekil 2. SMC kontrol şeması



İkili tank sisteminin SMC kontrol yöntemi ile karşılaştırılması için FF-PI yöntemi kullanılmıştır. İleri beslemeli PI kontrol yönteminin Matlab/Simulink programında modellenen Tank 1 sisteminin tasarımı Şekil 3'te, Tank 2 sisteminin tasarımı Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 3. FF-PI Tank 1 kontrol şeması



Şekil 4. FF-PI Tank 2 kontrol şeması

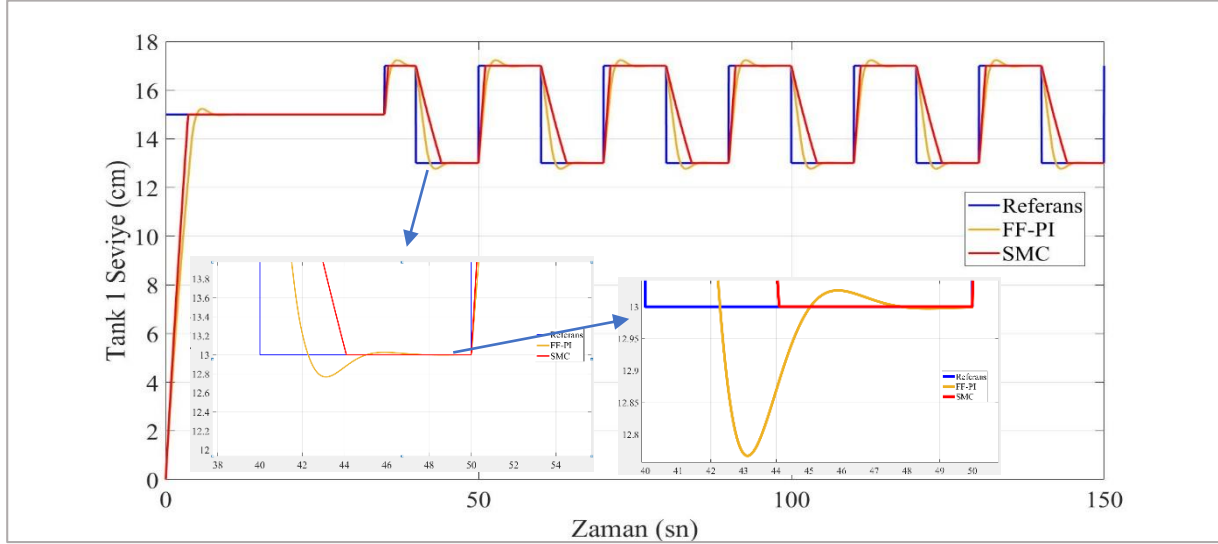
#### IV. BENZETİM SONUÇLARI

İkili-Tank sistemine uygulanan kayan kipli kontrol, Matlab/Simulink ortamında tasarlanmıştır. Simülasyon sonuçları ileri beslemeli PI kontrolcü ile karşılaştırılmıştır. İkili-Tank sistemi için tasarlanan kayan kipli kontrol Tank 1 ve Tank 2 sistemleri için ayrı ayrı incelenmiştir. Bu makalede kayan kipli kontrolün  $k_{sc}$  ve  $\lambda_c$  sabitleri yazar tarafından benzetim sonuçlarından elde edilen verilere göre belirlenmiştir. Belirlenmiş olan değerler neticesinde akışkan seviyesinin, referans sinyal takibi oldukça başarılı olduğu gözlemlenmiştir.

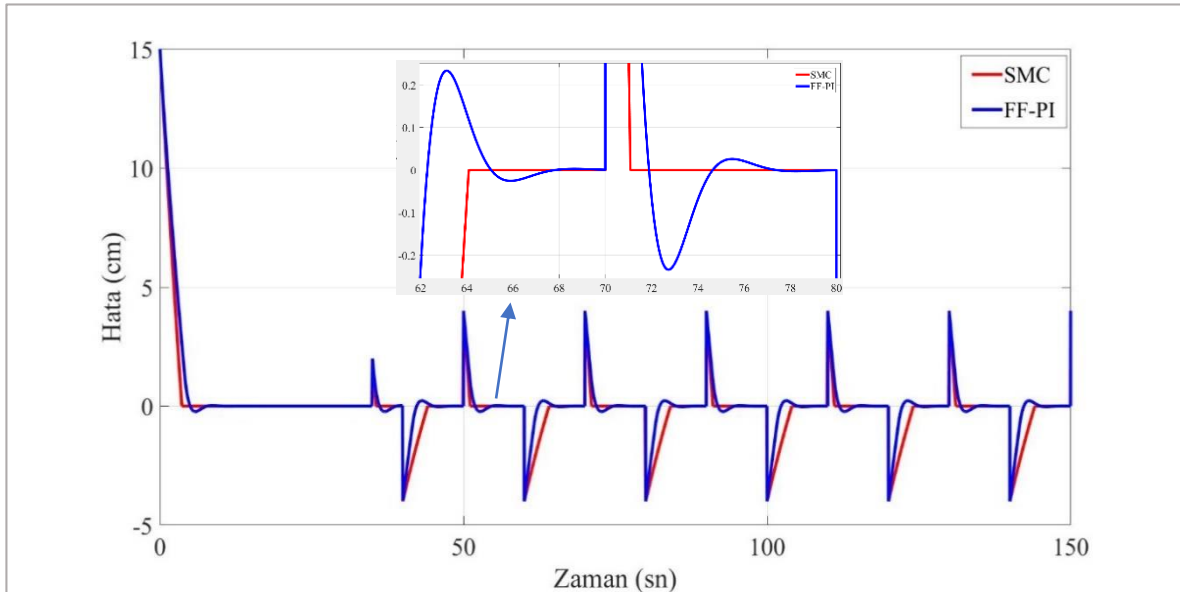
##### A. Tank 1 Seviye Kontrol

Kayan kipli kontrolcü ile tasarlanan Tank 1 sisteminin referans kare dalga sinyalini takibi, ileri beslemeli PI kontrolcüyle tasarlanan sisteme kıyasla daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5).



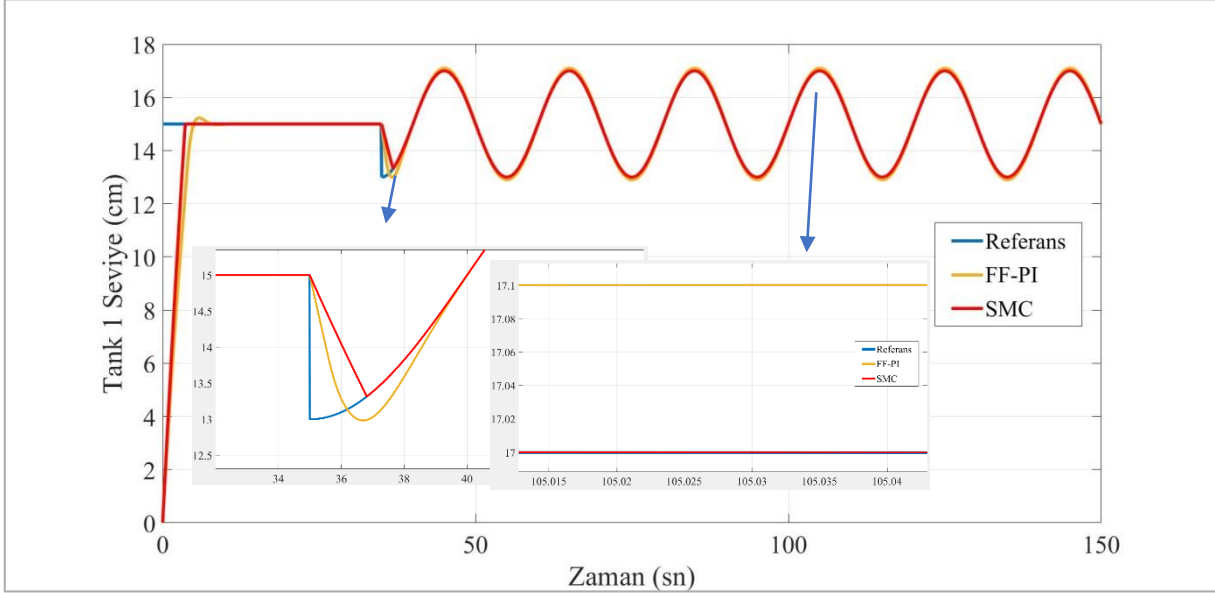


Şekil 5. Tank 1 akışkan seviye kare dalga formu

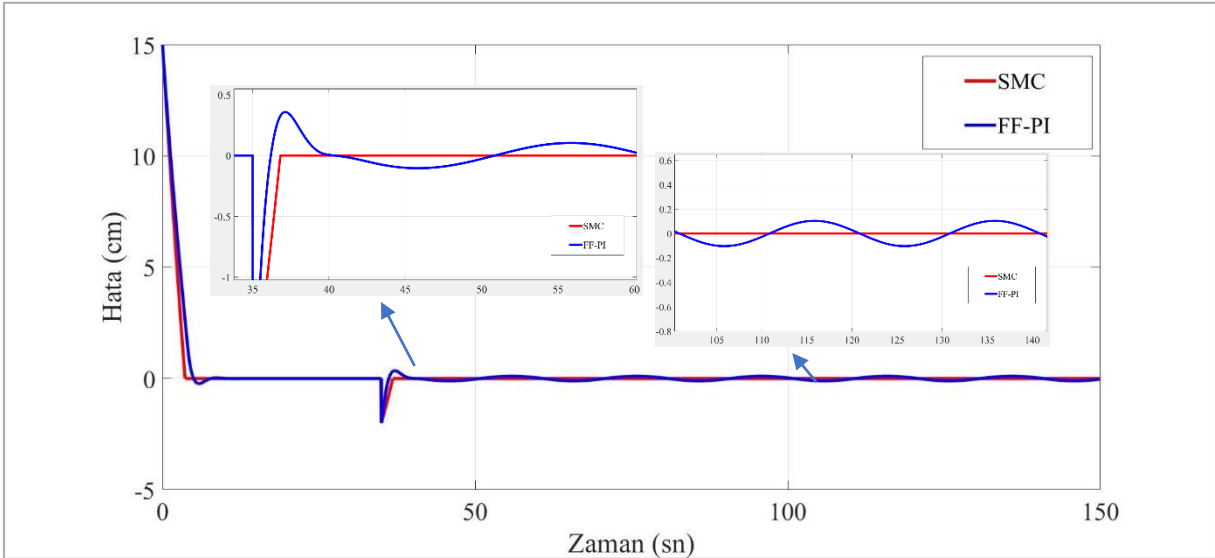


Şekil 6. Tank 1 kare dalga formuna göre hata

Tank 1 sisteminin sinüzoidal dalga şekline göre yanıtı Şekil 7’de elde edilmiştir. Kayan kipli kontrolün, ileri beslemeli PI kontrolcüye göre daha başarılı bir şekilde referans sinyalinin takip ettiği gözlemlenmiştir. Ayrıca Şekil 8’de Tank 1 sisteminin hatası grafiksel olarak incelenmiştir.



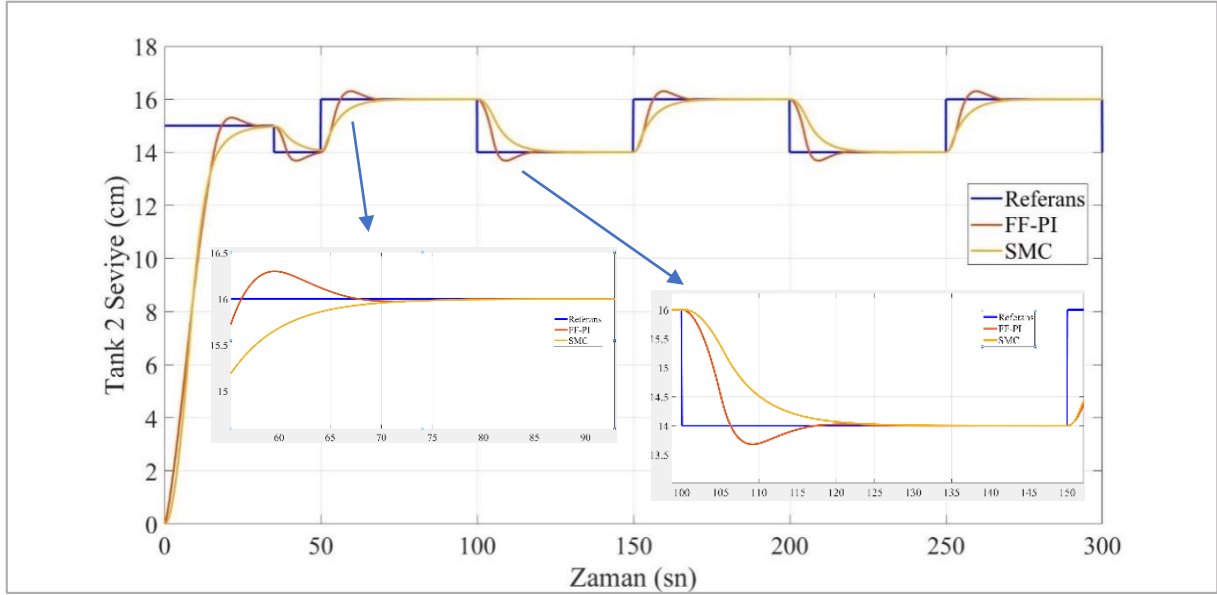
Şekil 7. Tank 1 akışkan seviye sinüzoidal dalga formu



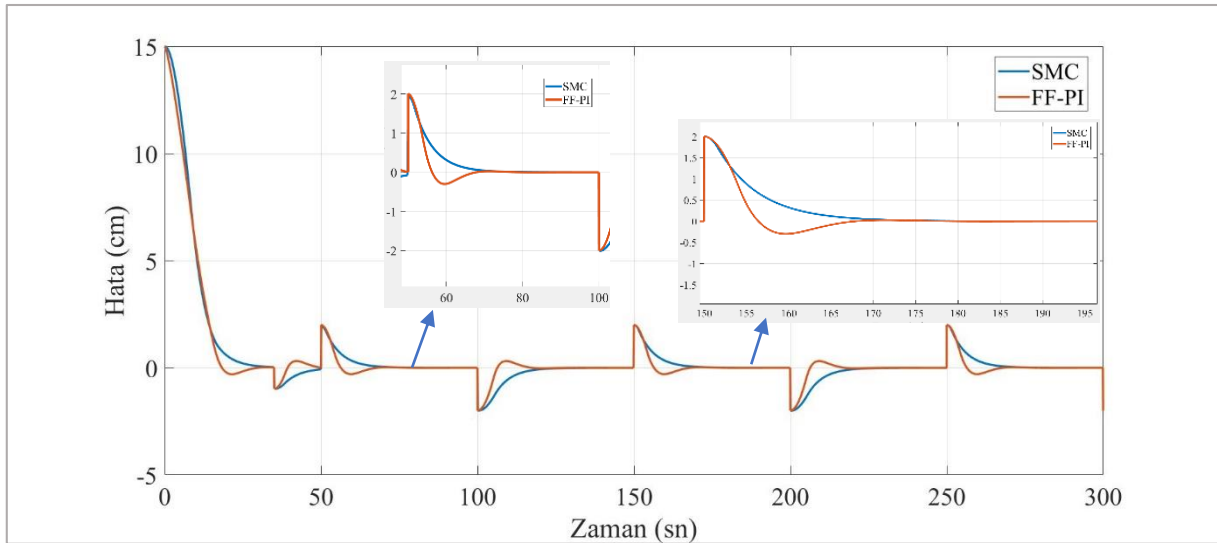
Şekil 8. Tank 1 sinüzoidal dalga formuna göre hata

### B. Tank 2 Seviye Kontrol

Tank 2 sistemi, ikinci dereceden kayan kipli kontrolcü olacak şekilde tasarlanmıştır. Simülasyon ortamında tasarlanan sistemin, referans kare dalga sinyal takibi Şekil 9’da verilmiştir. Tasarlanan sistemin hatası Şekil 10’da gösterilmiştir. İleri beslemeli PI kontrolüne göre kayan kipli kontrolün referans sinyalinin daha iyi takip ettiği gözlemlenmiştir.

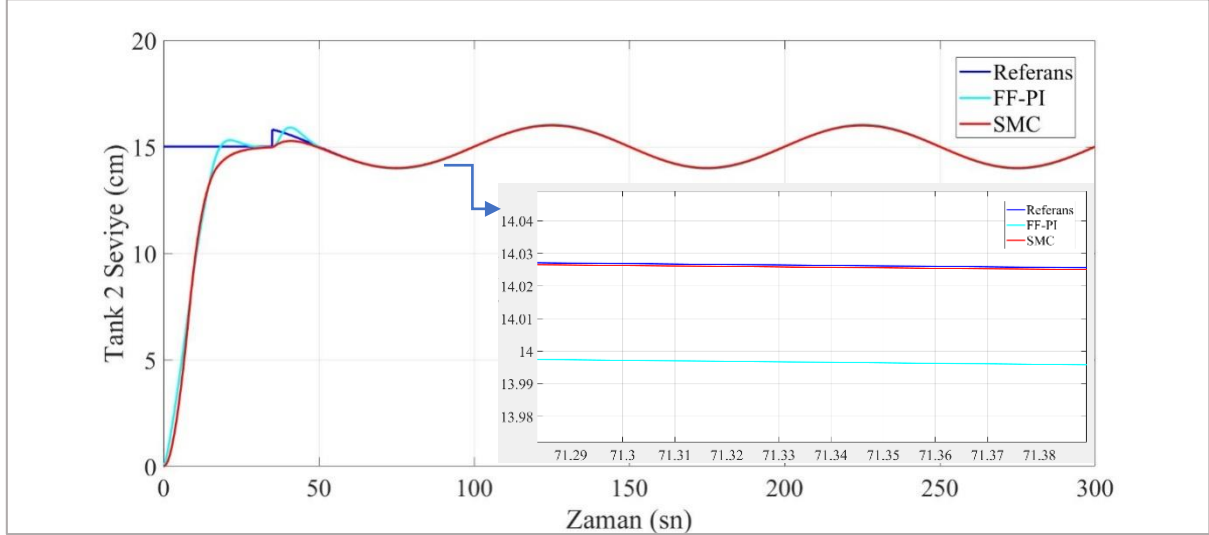


Şekil 9. Tank 2 akışkan seviye kare dalga formu



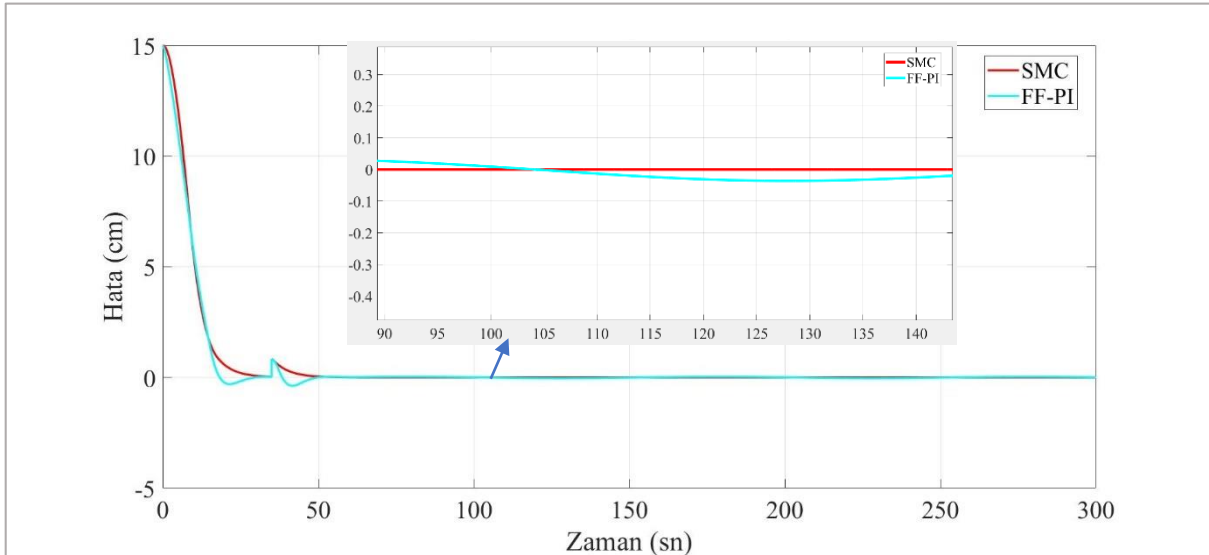
Şekil 10. Tank 2 kare dalga formuna göre hata

Bu makalede eşdeğer kontrol işaretini etkileyen  $\lambda_c$  değeri ve anahtarlama kontrol işaretini etkileyen  $k_{sc}$  değeri benzetim sonuçlarından elde edilen veriler neticesinde belirlenerek sistem kontrolü iyileştirilmiştir.

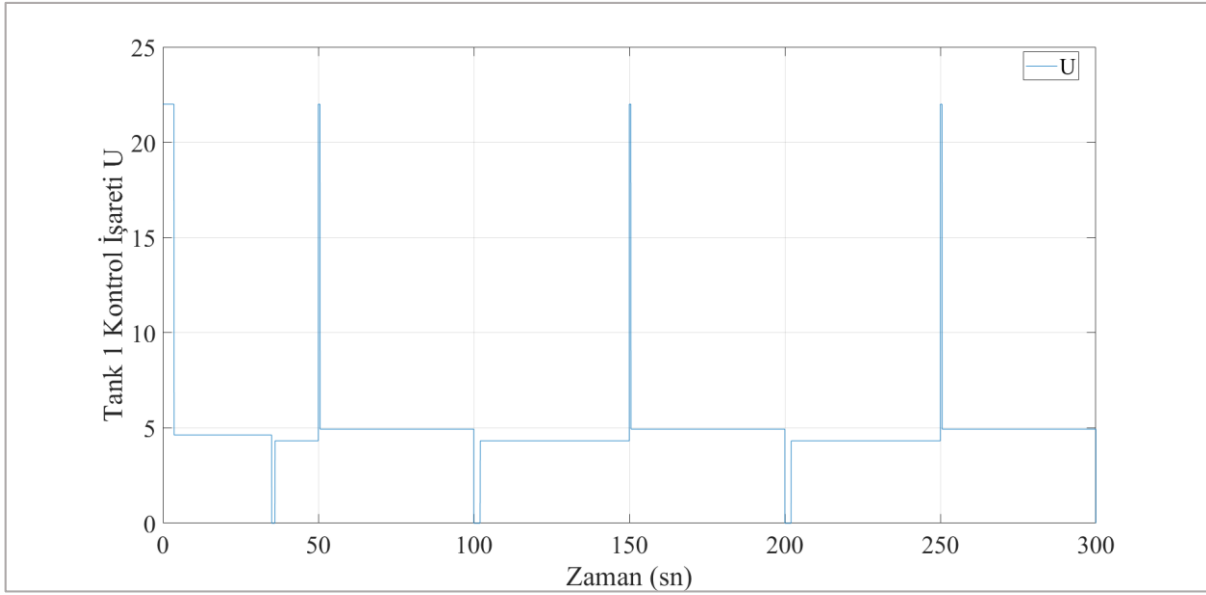


Şekil 11. Tank 2 sinüzoidal dalga formu

Tank 2 sisteminin sinüzoidal dalga formuna göre talep edilen akışkan seviyesinin referans sinyaline yaklaşımı Şekil 11’de, elde edilen hata Şekil 12’de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde sistemin hatasının SMC’de daha az olduğu neticesine varılmıştır.

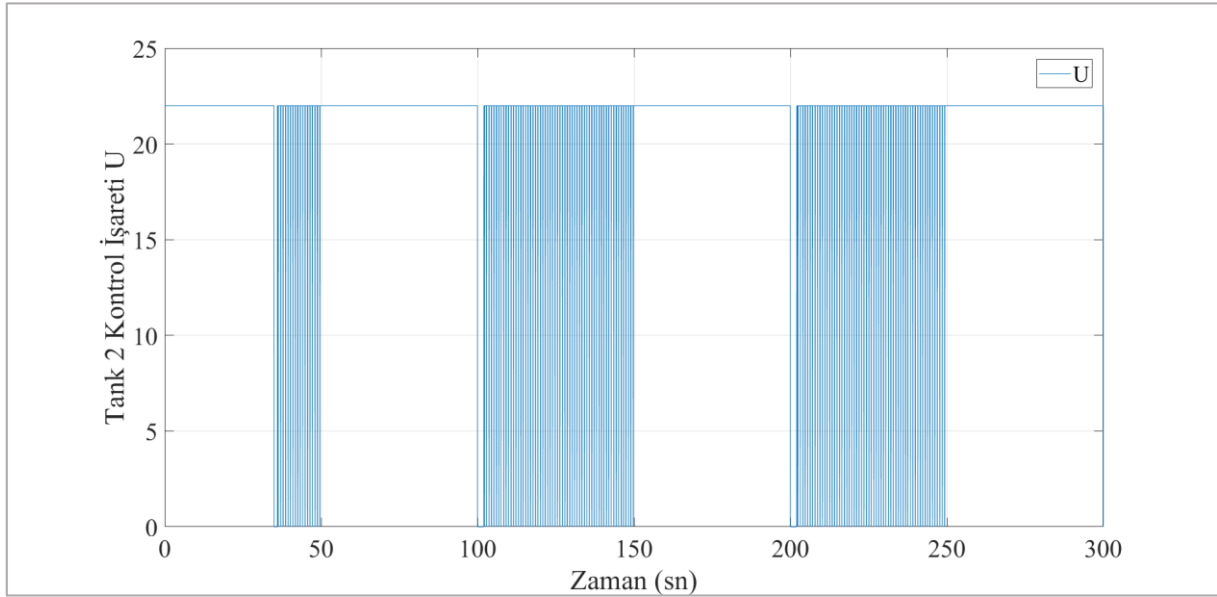


Şekil 12. Tank 2 sinüzoidal dalga formuna göre hata

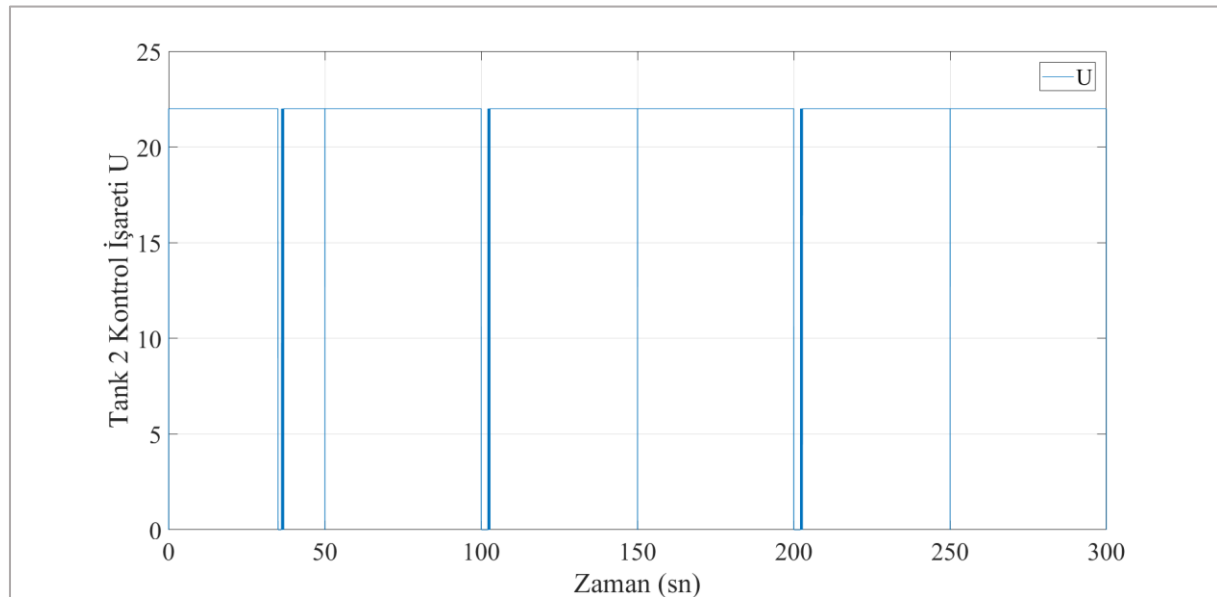


Şekil 13.Tank 1 kontrol işareti

SMC kontrol yönteminin dezavantajı olan kontrol işaretindeki çatlama etkisinden kaçınmak için ikinci dereceden kayan kipli yöntemi tercih edilmiştir. Tank 2 sisteminde ikinci dereceden kayan kipli yöntemi kullanılmadan sistem tasarlandığında kontrol işareti Şekil 14'teki gibi elde edilmiştir.



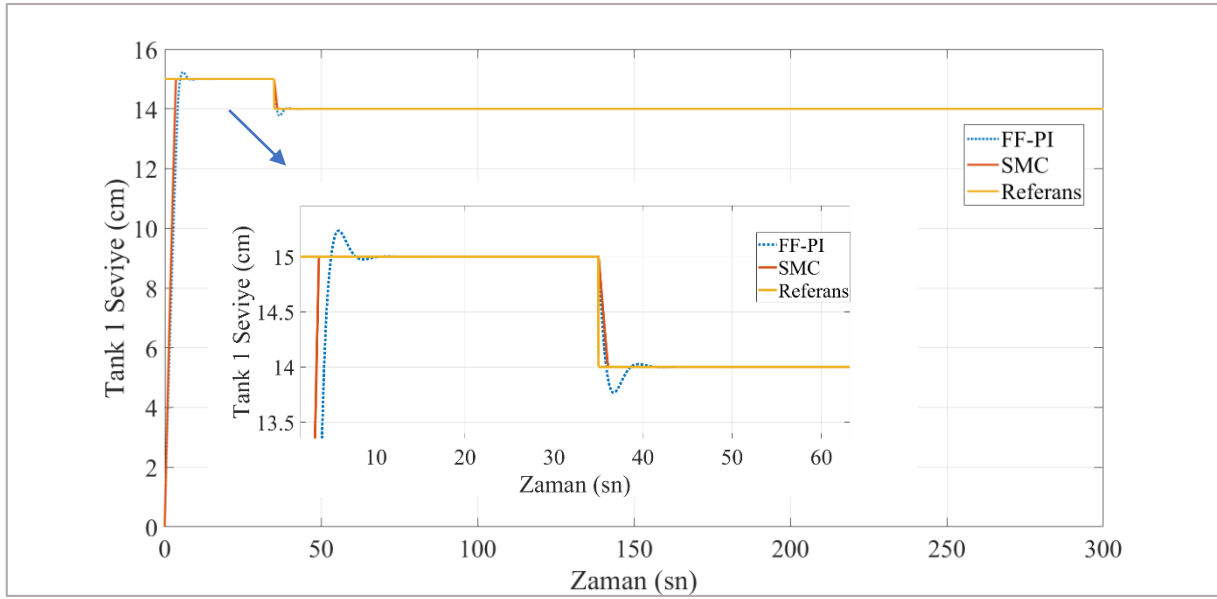
Şekil 14. İkinci dereceden SMC kontrol tekniğinin kullanılmadığı Tank 2 kontrol işareti



Şekil 15. İkinci dereceden SMC kontrol tekniğinin kullanıldığı Tank 2 kontrol işareti

Tablo 2. Tank 1 benzetim sonuçları

Denetleyici	$t_s$	$M_p$	ITAE	IAE	ISE	ITSE
FF-PI	13.145	1.55866	77.54	32.8	301.6	331.7
SMC	3.607	0.00066	53.14	26.49	254.7	232.9

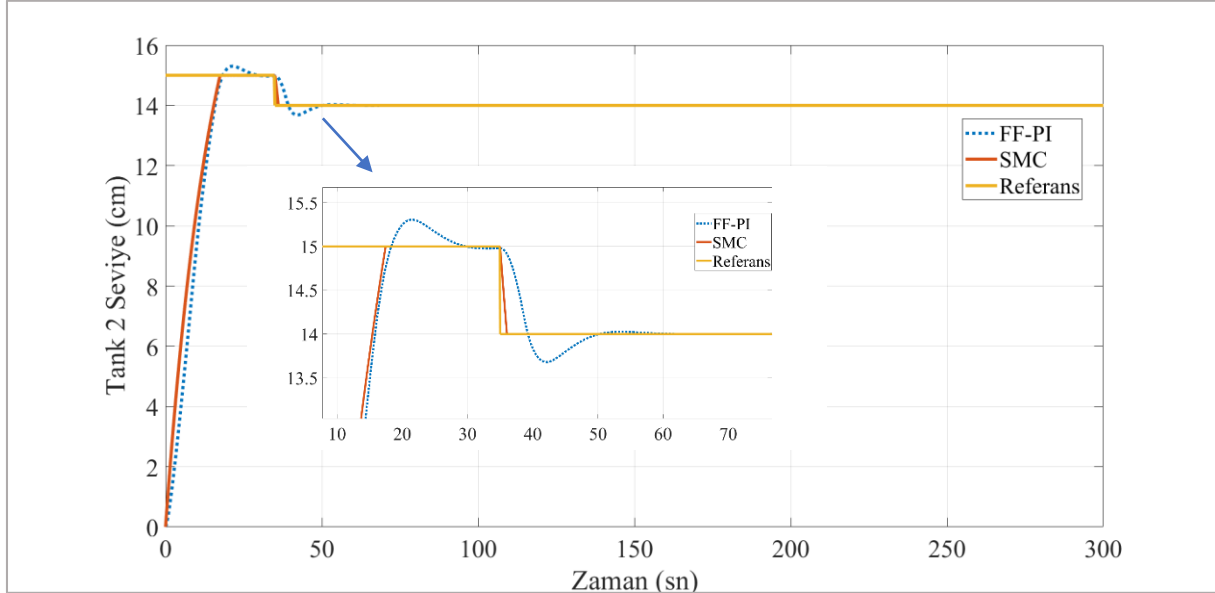


Şekil 16. Tank 1 basamak yanıtı

Tablo 3. Tank 2 benzetim sonuçları

Denetleyici	$t_s$	$M_p$	ITAE	IAE	ISE	ITSE
FF-PI	62.45	2.03	930	133.5	1309	5355
SMC	17.63	0.0026	594.1	107.1	969.6	3505





Şekil 17. Tank 2 basamak yanıtı

## V.SONUÇLAR

Bu çalışmada, doğrusal olmayan İkili-Tank sistemini kontrol etmek için kayan kipli kontrol (SMC) önerilmiştir. Yüksek frekanslı salınım olarak adlandırılan istenmeyen çadırma etkisinden kaçınmak için ikinci dereceden SMC tekniği kullanılmıştır. Benzetim sonuçlarından elde edilen Şekil 15 ile Şekil 16'da verilen Tank 2 sisteminin kontrol işareti incelendiğinde ikinci dereceden kayan kipli yönteminin kullanıldığı sistemde çadırma etkisinin giderildiği gözlemlenmiştir. Kayan kipli kontrolcü ile tasarlanan İkili-Tank sistemi, referans akışkan seviye sinyalini başarılı bir şekilde takip ettiği simülasyon ortamında elde edilen grafikler neticesinde gözlemlenmiştir. Benzetim sonuçlarından elde edilen Tablo 2 ve Tablo 3'teki yerleşim süresi ( $t_s$ ), maksimum tepe aşım değeri ( $M_p$ ) ve mutlak hataların toplamı (IAE), hataların karelerinin toplamı (ISE), ağırlıklı mutlak hataların toplamı (ITAE), ağırlıklı hataların karelerinin toplamı (ITSE) kriterlerine göre kayan kipli kontrolün ileri beslemeli PI denetleyicisine kıyasla sistemi daha iyi kontrol edebildiği sonucuna varılmıştır.

## KAYNAKLAR

- [1] Liang, L. (2011, September). The application of fuzzy PID controller in coupled-tank liquid-level control system. In *2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC)* (pp. 2894-2897). IEEE.
- [2] Pan, H., Wong, H., Kapila, V., & de Queiroz, M. S. (2005). Experimental validation of a nonlinear backstepping liquid level controller for a state coupled two tank system. *Control Engineering Practice*, *13*(1), 27-40.
- [3] Ramli, M. S., Ahmad, M. A., & Ismail, R. M. T. R. (2009, November). Comparison of swarm adaptive neural network control of a coupled tank liquid level system. In *2009 International Conference on Computer Technology and Development* (Vol. 1, pp. 130-135). IEEE.
- [4] Bhuvaneshwari, N. S., Uma, G., & Rangaswamy, T. R. (2009). Adaptive and optimal control of a non-linear process using intelligent controllers. *Applied soft computing*, *9*(1), 182-190.
- [5] Delavari, H., Ranjbar, A. N., Ghaderi, R., & Momani, S. (2010). Fractional order control of a coupled tank. *Nonlinear Dynamics*, *61*(3), 383-397.
- [6] Pan, H., Wong, H., Kapila, V., & de Queiroz, M. S. (2005). Experimental validation of a nonlinear backstepping liquid level controller for a state coupled two tank system. *Control Engineering Practice*, *13*(1), 27-40.

- [7] Gouta, H., Said, S. H., Barhoumi, N., & M'Sahli, F. (2015). Observer-based backstepping controller for a state-coupled two-tank system. *IETE Journal of Research*, 61(3), 259-268.
- [8] Abdullah, A., & Zribi, M. (2012). Sensor-fault-tolerant control for a class of linear parameter varying systems with practical examples. *IEEE transactions on industrial Electronics*, 60(11), 5239-5251.
- [9] Mobayen, S. (2016). A novel global sliding mode control based on exponential reaching law for a class of underactuated systems with external disturbances. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 11(2).
- [10] Mobayen, S. (2015). An adaptive fast terminal sliding mode control combined with global sliding mode scheme for tracking control of uncertain nonlinear third-order systems. *Nonlinear Dynamics*, 82(1), 599-610.
- [11] Edwards, C., & Spurgeon, S. K. (1995). Sliding mode stabilization of uncertain systems using only output information. *International Journal of Control*, 62(5), 1129-1144.
- [12] Boiko, I., & Fridman, L. (2005). Analysis of chattering in continuous sliding-mode controllers. *IEEE transactions on automatic control*, 50(9), 1442-1446.
- [13] Bartolini, G., Ferrara, A., & Usai, E. (1998). Chattering avoidance by second-order sliding mode control. *IEEE Transactions on automatic control*, 43(2), 241-246.
- [14] Fridman, L., & Levant, A. (2002). Higher order sliding modes. *Sliding mode control in engineering*, 11, 53-102.
- [15] Azar, A. T., & Zhu, Q. (Eds.). (2015). *Advances and applications in sliding mode control systems*. Cham: Springer International Publishing, 6-9.
- [16] Tijjani, A. S., Shehu, M. A., Alsabari, A. M., Sambo, Y. A., & Tanko, N. L. (2017). Performance analysis for coupled-tank system liquid level control using MPC, PI and PI-plus-Feedforward Control Scheme. *Journal of Robotics and Automation*, 1(1), 42-53.
- [17] Eker, I. (2010). Second-order sliding mode control with experimental application. *ISA transactions*, 49(3), 394-405.