

# TRIGLIDE ROBOTUN DİNAMİK DENKLEMLERİ KULLANILARAK KAYAN KIPLİ DENETLEYİCİ İLE DENETİMİ

**Muhammet AYDIN<sup>1\*</sup>, Oğuz YAKUT<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Elazığ, 23119, Türkiye

<sup>2</sup>Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Elazığ, 23119, Türkiye

Geliş tarihi: 04.06.2017      Kabul tarihi: 10.10.2017

## ÖZET

Bu çalışmada, delta paralel robot ailesinden olan üç serbestlik dereceli triglide paralel robotun ters ve düz kinematik denklemleri ile dinamik denklemleri kullanılarak kayan kipli denetleyici ile denetimi gerçekleştirilmiştir. Kayan kipli denetleyicinin katsayıları Matlab Toolbox ında yer alan hazır genetik algoritma kodları kullanılarak optimizasyonla bulunmuştur. Kayan kipli denetleyicinin paralel robot üzerindeki başarısını ortaya koymak amacıyla üç farklı referans noktası için denetimler tekrarlanmıştır. Kayan kipli denetleyicinin yapısında yer alan sign işaret fonksiyonunun yol açtığı çatlama problemi, saturasyon fonksiyonu kullanılarak azaltılmaya çalışılmıştır. Sayısal çözümler için Matlab paket programı kullanılmıştır. Triglide paralel robota uygulanan denetimlerle sistem cevapları grafiksel olarak elde edilmiş ve sonuçlar irdelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** *Dinamik, Genetik algoritma, Kayan kipli denetim, Kinematik, Triglide*

## CONTROL BY SLIDING MODE CONTROL METHOD USING DYNAMIC EQUATIONS OF TRIGLIDE ROBOT

### ABSTRACT

In this paper, triglide parallel robot which is family of delta parallel robot has been realized control by using sliding mode controller via the obtained inverse-forward kinematics equations and dynamic equations of it. The coefficients of the sliding mode controller were calculated with optimization by using genetic algorithm method which is available in Matlab Toolbox. The controls have been repeated for three different reference points to demonstrate the success of the sliding mode controller on triglide parallel robot. The chattering problem caused by the sign function in the structure of the sliding mode controller has been tried to reduce using saturation function. Matlab package program has been used for numerical solutions. The system responses have been obtained graphically with the controls applied to the triglide parallel robot and the results have been examined.

**Keywords:** *Dynamics, Genetic algorithm, Kinematics, Sliding mode control, Triglide*

### 1. Giriş

Paralel manipulatörler birkaç avantaj ve dezavantaj sergilerler. Paralel robotların dezavantajları sınırlı çalışma hacmi, düşük beceri kabiliyeti, karmaşık direk kinematik çözüm ve tekilliklerdir. Ancak paralel robotlar yüksek rijitlik, ters kinematik çözümün kolaylığı, hafiflik, yüksek doğruluk, hareketli

\* e-posta: [muhammeta@firat.edu.tr](mailto:muhammeta@firat.edu.tr)

bölgelerin düşük ataleti ve yüksek çeviklik gibi avantajlara sahiptir. Ters kinematik çözümün kolay olması kontrol edebilme kolaylığı sağlamaktadır [1].

Seri yapılarla karşılaştırıldıkları zaman paralel yapıların başka bir avantajını kullanmak mümkündür. Paralel yapılar ölçeklendirme etkisine çok daha az hassastır, bu nedenle mikro robotlar için uygundur. Tıbbi uygulamalar için, özellikle endoskopi için bu durum uygundur [2].

Eğer doğru tasarlanırsa paralel robotların kısmen küçük çalışma hacmi önemli bir güvenlik vasfı ortaya çıkarabilir. Paralel robotlar güvenli bir şekilde yakın tekillikle hareket eder. Robot tekil bir konuma doğru bir yol izlediği zaman, motorlardan ihtiyaç duyulan kuvvetler yüksek değerlere ulaşır. Seri robotlarda tekil konumlar mafsallarda hızlarının çok yüksek değerleriyle birlikte anılır. Bu durum tehlikeli bir unsuru ortaya çıkarır. Paralel robotlar, aynı duyarlılığa sahip seri robotlarla karşılaştırıldığı zaman daha düşük fiyatlarla duyarlılığı sağlar. Bazı duyarlılık bölümleri seri robotlarla başarılamayabilir [3-6].

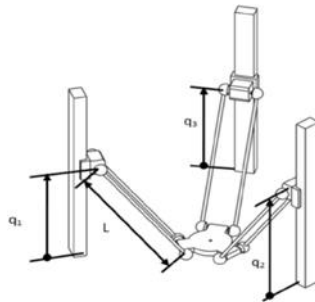
Aktarmada 3 serbestlik dereceli paralel robotlar toplama ve yerleştirme, makine işlemleri gibi durumlarda çoğunlukla kullanılırlar.



Şekil 1. Delta paralel robot [7].

Üç serbestlik dereceli en popüler robot Şekil 1’de gösterilen deldadır. İlk olarak bu robot Clavel tarafından Ecole Polytechnique Lausanne de geliştirilmiştir.

Delta robot son yıllarda dünyada yoğun uygulama alanı bulmuş olan paralel manipülatör türlerinden biridir. Delta robot sisteminde, sabit bir uzuv üzerine monte edilmiş 3 motor vasıtasıyla bir plakanın (uç işlevci) çalışma uzayı içerisindeki herhangi bir konuma (x,y,z) hareketi sağlanabilmektedir. Her motora bağlanan kol tahrik edilmektedir ve kollar uç işlevci plakasına paralelogram mekanizmaları ile bağlıdır. Dolayısı ile sabit düzlem ile hareketli plaka her zaman paralel olmak durumundadır. Motorların küçük bir hareketi ile sistem yüksek ivmelere çıkabilir ve çok hızlı konumlanabilir. Sistemin rijitliği seçilen kolların rijitliğine ve mafsallardaki boşluklara bağlıdır. İmalat kalitesindeki en küçük sapmalar sistemin tekrarlama hassasiyetini yüksek miktarda etkiler. Triglide, delta robotun biraz daha basitleştirilmiş hali olup 3 serbestlik dereceli paralel bir robottur. Triglide paralel robotta 3 kol mevcut olup, bu kollar lineer motorlarla hareket ettirilebilmektedir. Şekil 2’de triglide paralel robot görülmektedir. Triglide paralel robotun en büyük avantajı z yönünde sonsuz bir hareket alanına imkan vermesidir. x ve y yönünde sınırlı bir alanda hareket edebilmesine rağmen, lineer delta robot kullanım amacına göre uygun bir robot tercihi olabilir [6-8].

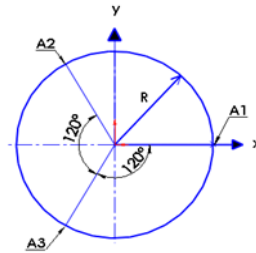


Şekil 2. Triglide paralel robot [8].

Bu çalışmada üç serbestlik dereceli paralel robot triglide için ters ve düz kinematik çözümler ile dinamik denklemler kullanılarak kayan kipli denetleyici ile denetimler sağlanmıştır. Uygulanan kayan kipli denetleyicinin gerekli olan denetim katsayıları, genetik algoritma tekniği kullanılarak optimize edilmiştir. Bunun için Matlab paket programının genetik algoritmalar araç kutusundan faydalanılmıştır. Katsayıları optimize edilmiş kayan kipli denetleyicinin sistem üzerindeki başarısını ortaya koyabilmek için robotun üç farklı referans konumuna yönelik denetimler tekrarlanarak gerçekleştirilmiştir. Kayan kipli denetleyici, yapısında yer alan sign işaret fonksiyonu ile sisteme uygulanmış ve sistem cevapları grafiksel olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlarla çatırdamalı sistem cevapları bu denetleyicinin pratikteki uygulamalarda bir dezavantajı olarak karşımıza çıkmaktadır. Çatırdama problemini azaltmak ve pratikte kullanılabilirliğini arttırmak amacıyla kayan kipli denetleyici, saturasyon fonksiyonu kullanılarak sisteme yeniden uygulanmıştır. Matlab ortamında hazırlanan program ile sayısal çözümler yapılarak sistemin grafiksel sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen grafiksel sonuçlarla denetleyicinin başarısı irdelenerek yorumlanmıştır.

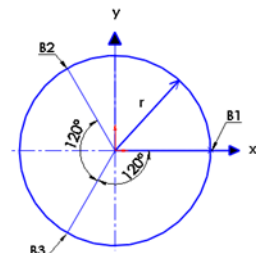
## 2. Triglide Paralel Robotun Kinematığı

Şekil 3’de gösterilen sabit platform, lineer motorların hareket ettiği sabit direklerin en alt noktası olarak seçilmiştir. Sabit eksen takımı ise sabit platformun orta noktasına Şekil 3’de gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. z yönü yerçekimine ters doğrultuda seçilmiştir.



Şekil 3. Sabit platform.

Sabit ve hareketli platform üzerindeki 1, 2 ve 3 indisleri Şekil 2’de gösterilen  $q_1$ ,  $q_2$  ve  $q_3$  değişkenlerinin bulunduğu sabit direklere paralel olarak seçilmiştir. Sabit direkler aralarında  $120^\circ$  lik açı olacak şekilde konumlandırılmıştır.



Şekil 4. Hareketli platform.

Sabit platformun oluştururken takip edilen yöntemin benzeri şekil 4 deki hareketli platform içinde uygulanmıştır. Sabit ve hareketli platform üzerindeki noktalar yardımıyla daha önce yapılan çalışmalarda Triglide paralel robot için kinematik denklemler elde edilerek yayınlanmıştır [9]. Elde edilen düz ve ters kinematik çözümler aşağıda verilmiştir.

Ters kinematik çözümler;

$$q_1 = z_p + \sqrt{L^2 - (r - R + x_p)^2 - y_p^2} \quad (1)$$

$$q_2 = z_p + \sqrt{L^2 - \left(\frac{(R-r)}{2} + x_p\right)^2 - \left(\frac{\sqrt{3}(r-R)}{2} + y_p\right)^2} \quad (2)$$

$$q_3 = z_p + \sqrt{L^2 - \left(\frac{(R-r)}{2} + x_p\right)^2 - \left(\frac{\sqrt{3}(R-r)}{2} + y_p\right)^2} \quad (3)$$

Düz kinematik çözümler;

$$x_p = \frac{2q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 - (4q_1 - 2q_2 - 2q_3)z_p}{6(R-r)} \quad (4)$$

$$y_p = \frac{q_2^2 - q_3^2 + 2(q_3 - q_2)z_p}{2\sqrt{3}(R-r)} \quad (5)$$

$$z_{p1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (6)$$

Denklem (6)'daki a, b ve c ifadeleri sırasıyla aşağıda verilmiştir.

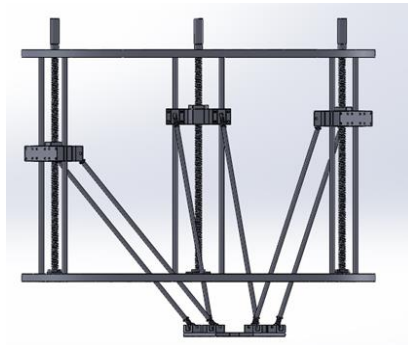
$$a = 1 + \frac{(4q_1 - 2q_2 - 2q_3)^2}{36(R-r)^2} + \frac{(q_1 - q_2)^2}{3(R-r)^2} \quad (7)$$

$$b = \frac{2(-q_1 - q_2 - q_3)}{3} - \frac{(2q_1^2 - q_2^2 - q_3^2)(2q_1 - q_2 - q_3)}{9(R-r)^2} + \frac{(q_2^2 - q_3^2)(q_3 - q_2)}{3(R-r)^2} \quad (8)$$

$$c = -L^2 + (R-r)^2 + \frac{(q_1^2 + q_2^2 + q_3^2)}{3} + \frac{(2q_1^2 - q_2^2 - q_3^2)^2}{36(R-r)^2} + \frac{(q_2^2 - q_3^2)^2}{12(R-r)^2} \quad (9)$$

### 3. Triglide Paralel Robotun 3B Tasarımı

Triglide paralel robotun Solidworks programında katı modellemesi yapılmıştır. Şekil 5 ve Şekil 6'da bu katı modellemeye ait üstten ve yandan görünüşler görülmektedir. Robotun bu tasarım boyutları kullanılarak kontrolü yapılmıştır.



Şekil 5. Triglide paralel robotun Solidworks’de katı modellemesinin yandan görünüşü.



Şekil 6. Triglide paralel robotun Solidworks’de katı modellemesinin üstten görünüşü.

#### 4. Triglide Paralel Robotun Dinamiği

Çizelge 1. Triglide paralel robot uzuvlarının ağırlık merkezi koordinatları.

1.Motor	$(R, 0, q_1)$
2.Motor	$\left(-\frac{R}{2}, \frac{R\sqrt{3}}{2}, q_2\right)$
3.Motor	$\left(-\frac{R}{2}, -\frac{R\sqrt{3}}{2}, q_3\right)$
1.Paralelogram	$\left(\frac{(x_p + r + R)}{2}, \frac{y_p}{2}, \frac{(z_p + q_1)}{2}\right)$
2.Paralelogram	$\left(\frac{(2x_p - R - r)}{4}, \frac{(2y_p + R\sqrt{3} + r\sqrt{3})}{4}, \frac{(z_p + q_2)}{2}\right)$
3.Paralelogram	$\left(\frac{(2x_p - R - r)}{4}, \frac{(2y_p - R\sqrt{3} - r\sqrt{3})}{4}, \frac{(z_p + q_3)}{2}\right)$
Hareketli Platform	$(x_p, y_p, z_p)$

Çizelge 1’de Triglide paralel robot için ağırlık merkezi koordinatları verilmiştir. Sistemin dinamiği, uzuvların ağırlık merkezi koordinatları kullanılarak Lagrange yöntemiyle elde edilmiştir. Sürtünmeler ihmal edilmiştir.

Toplam kinetik enerji motorlar, paralelogramlar ve hareketli platform dikkate alınarak çıkarılmıştır.

$$T = \frac{1}{8}m_p(3(\dot{x}_p^2 + \dot{y}_p^2 + \dot{z}_p^2) + 2\dot{z}_p(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3) + \dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2 + \dot{q}_3^2) + \frac{1}{2}m_{motor}(\dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2 + \dot{q}_3^2) + \frac{1}{2}m_{tabla}(\dot{x}_p^2 + \dot{y}_p^2 + \dot{z}_p^2) \quad (10)$$

Aynı şekilde toplam potansiyel enerji denklem (11) de olduğu gibi hesaplanmıştır.

$$V = m_{motor}g(q_1 + q_2 + q_3) + m_p g \left( \frac{q_1 + q_2 + q_3}{2} + \frac{3z_p}{2} \right) + m_{tabla}gz_p \quad (11)$$

Bu aşamadan sonra robot için Lagrange fonksiyonu oluşturularak gerekli ifadelerle ait kısmi ve zamana göre türevler alındıktan sonra robotun 1. kolu için hareket denklemi aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} m_{motor}\ddot{q}_1 + \frac{3}{4}m_p\ddot{x}_p \frac{\partial \dot{x}_p}{\partial \dot{q}_1} + \frac{3}{4}m_p\ddot{y}_p \frac{\partial \dot{y}_p}{\partial \dot{q}_1} + \frac{3}{4}m_p\ddot{z}_p \frac{\partial \dot{z}_p}{\partial \dot{q}_1} + \frac{1}{4}m_p \frac{\partial \dot{z}_p}{\partial \dot{q}_1}(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3) + \frac{1}{4}m_p\ddot{z}_p + \frac{1}{4}m_p\ddot{q}_1 + m_{tabla}\ddot{x}_p \frac{\partial \dot{x}_p}{\partial \dot{q}_1} \\ + m_{tabla}\ddot{y}_p \frac{\partial \dot{y}_p}{\partial \dot{q}_1} + m_{tabla}\ddot{z}_p \frac{\partial \dot{z}_p}{\partial \dot{q}_1} + A_1 = F_1 \end{aligned} \quad (12)$$

$$A_1 = \frac{3}{4}m_p \left( \dot{x}_p \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \dot{x}_p}{\partial \dot{q}_1} \right) + \dot{y}_p \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \dot{y}_p}{\partial \dot{q}_1} \right) + \dot{z}_p \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \dot{z}_p}{\partial \dot{q}_1} \right) \right) + \frac{1}{4}m_p \left( \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \dot{z}_p}{\partial \dot{q}_1} \right) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3) \right)$$

$$+ \frac{1}{4}m_p \left( \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \dot{z}_p}{\partial \dot{q}_1} \right) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3) \right) + m_{tabla} \left( \dot{x}_p \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \dot{x}_p}{\partial \dot{q}_1} \right) + \dot{y}_p \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \dot{y}_p}{\partial \dot{q}_1} \right) + \dot{z}_p \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \dot{z}_p}{\partial \dot{q}_1} \right) \right)$$

$$- m_{tabla} \left( \dot{x}_p \frac{\partial \dot{x}_p}{\partial \dot{q}_1} + \dot{y}_p \frac{\partial \dot{y}_p}{\partial \dot{q}_1} + \dot{z}_p \frac{\partial \dot{z}_p}{\partial \dot{q}_1} \right) - \frac{1}{4}m_p \left( 3 \left( \dot{x}_p \frac{\partial \dot{x}_p}{\partial \dot{q}_1} + \dot{y}_p \frac{\partial \dot{y}_p}{\partial \dot{q}_1} + \dot{z}_p \frac{\partial \dot{z}_p}{\partial \dot{q}_1} \right) + \frac{\partial \dot{z}_p}{\partial \dot{q}_1} (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3) \right)$$

$$+ m_{motor}g + m_p g \left( \frac{1}{2} + \frac{3}{2} \frac{\partial z_p}{\partial q_1} \right) + m_{tabla}g \frac{\partial z_p}{\partial q_1} \quad (13)$$

Gerekli işlemler yapıldığı takdirde kısaltmalar kullanılarak (14) nolu denklem aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$a_1\ddot{q}_1 + b_1\ddot{q}_2 + c_1\ddot{q}_3 = d_1 \quad (14)$$

Triglilde paralel robotun diğer kolları içinde benzer adımlar yapıldığı takdirde aşağıdaki denklemler elde edilebilir.

$$a_2\ddot{q}_1 + b_2\ddot{q}_2 + c_2\ddot{q}_3 = d_2 \quad (15)$$

$$a_3\ddot{q}_1 + b_3\ddot{q}_2 + c_3\ddot{q}_3 = d_3 \quad (16)$$

Bu üç denklem kullanılarak ivme ifadelerini veren denklemler elde edilebilir.

$$\ddot{q}_1 = \frac{d_3(b_1c_2 - b_2c_1) - d_2(b_1c_3 - b_3c_1) + d_1(b_2c_3 - b_3c_2)}{(a_1b_2c_3 - a_1b_3c_2 - a_2b_1c_3 + a_2b_3c_1 + a_3b_1c_2 - a_3b_2c_1)} \quad (17)$$

$$\ddot{q}_2 = \frac{d_2(a_1c_3 - a_3c_1) - d_3(a_1c_2 - a_2c_1) - d_1(a_2c_3 - a_3c_2)}{(a_1b_2c_3 - a_1b_3c_2 - a_2b_1c_3 + a_2b_3c_1 + a_3b_1c_2 - a_3b_2c_1)} \quad (18)$$

$$\ddot{q}_3 = \frac{d_3(a_1b_2 - a_2b_1) - d_2(a_1b_3 - a_3b_1) + d_1(a_2b_3 - a_3b_2)}{(a_1b_2c_3 - a_1b_3c_2 - a_2b_1c_3 + a_2b_3c_1 + a_3b_1c_2 - a_3b_2c_1)} \quad (19)$$

Triglide paralel robotun dinamiği ile ilgili olarak daha önceden yapılmış yayınlarda daha detaylı bilgilere ulaşılabılır. Yukarıdaki kısaltma ifadeleri bu yayınlarda açık bir şekilde ifade edilmiştir[10].

## 5. Triglide Robotun Kayan Kipli Denetleyici ile Denetimi

Kayan kipli denetim yüksek hızlı, doğrusal olmayan bir geri besleme ile önceden belirlenen bir kayma yüzeyi üzerinde zamanda süreksiz bir şekilde anahtarlama yapılarak elde edilen, belirgin, doğrusal olmayan, dayanıklı bir denetim yöntemidir [11]. Bir sisteme ait parametreler değişken olduğu veya modellenemediği için tam ölçülemiyorsa ve sisteme dışarıdan etki eden bozucular varsa kayan kipli denetim bunların sınır değerleri bilindiği sürece dayanıklı denetim sağlar.

Kayan kipli denetleyici tasarımı süreci iki adımlı bir yordam olarak düşünülebilir. Bu adımlar sırasıyla; kayma yüzeyinin belirlenmesi ve belirlenen kayma yüzeyine ulaşmayı sağlayan bir denetim kuralının elde edilmesidir. Kayma yüzeyine ulaşmak için geçen süre ulaşma zamanı ve faz yörüngesinin bu bölgesi ise ulaşma kipi olarak adlandırılır. Ulaşma kipinde sistem, parametre belirsizlikleri ve dış bozuculara karşı duyarlıdır [12]. Kayma yüzeyine ulaşıldığı zaman sistem yörüngelerinin parametre belirsizlikleri ve dış bozuculara karşı duyarsız olduğu kayma kipi başlar. Kayan kipli denetim uygulamalarından meydana gelen çatırtı, sistemin ulaşmak istediği denge noktası etrafında meydana gelen osilasyonlardan kaynaklanır ve sistemin modellenmemiş yüksek frekanslı dinamiklerini ortaya çıkarır [13].

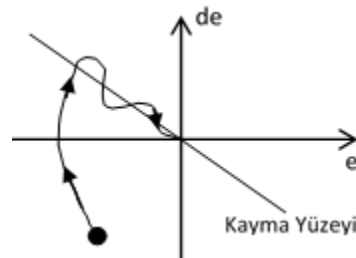
Bir işaret fonksiyonuna sahip kayan kipli denetim ifadesi;

$$U = -K \text{sign}(S) \quad (20)$$

olarak yazılabilir. Burada  $S$  ifadesi kayma yüzeyi fonksiyonudur ve sistem cevabından alınan hata ( $e$ ) ve hatanın zamana göre değişimine ( $de$ ) bağlı olarak aşağıdaki gibi yazılabilir. Buradaki  $K$  değeri 600 olarak alınmıştır.

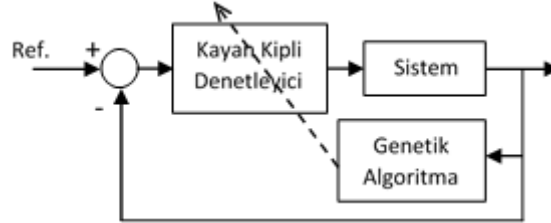
$$S = Ce + de \quad (21)$$

Kayma yüzeyi Şekil 7'de görüldüğü gibi belirli bir eğime sahip olur. Bu eğim (21) nolu denklemde yer alan  $C$  katsayısı ile belirtilir.



Şekil 7. Kayma yüzeyi

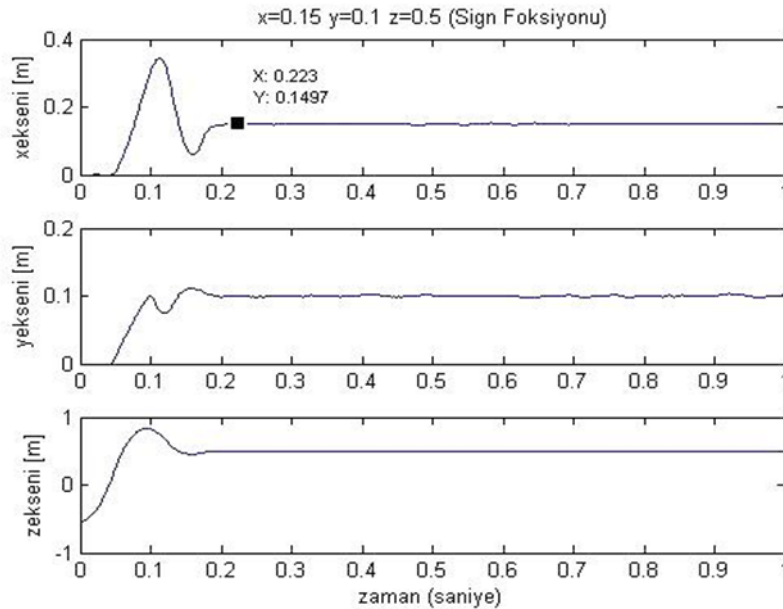
Denetleyicinin başarısı, belirtilen bu eğimin en uygun değerinin tespit edilmesi ile sağlanır. Bu çalışmada kayan kipli denetleyicinin bu kayma yüzeyi eğim katsayıları genetik algoritma kullanılarak optimize edilmiştir. Şekil 8’de denetleyiciye ait katsayıların genetik algoritma tekniği ile optimize edildiği gösterimin blok şeması yer almaktadır.



Şekil 8. Denetleyici katsayılarının optimizasyonu blok şeması.

Optimizasyon için Matlab paket programında yer alan genetik algoritmalar araç kutusundan yararlanılmıştır. Rastgele belirlenen bir referans nokta için sistemin çıkışlarından elde edilen hataların karelerinin toplamını sıfıra götürecek bir fonksiyon, genetik algoritmaya amaç fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Denetleyiciye ait katsayıların optimum değerleri bu yöntemle tespit edildikten sonra genetik algoritma devre dışı bırakılarak denetleyici uygulamaya hazır hale getirilmiştir.

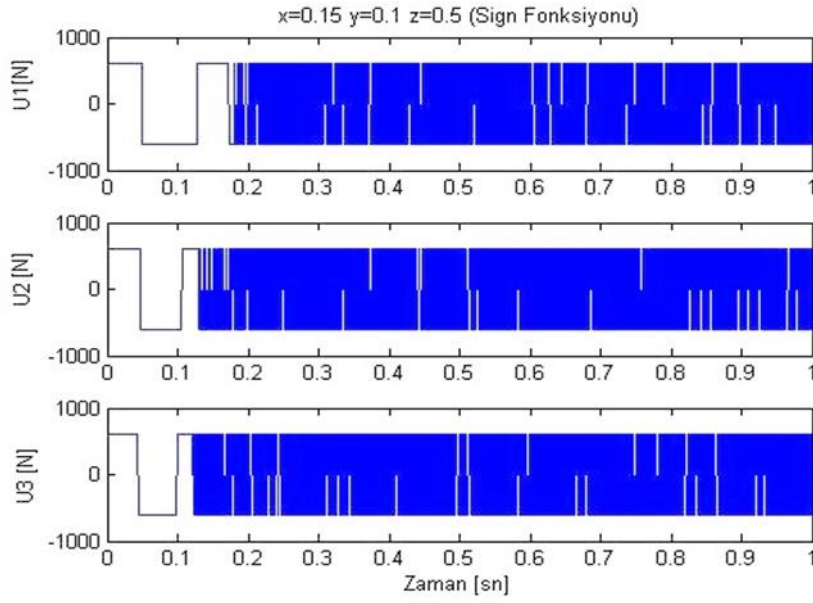
Robotumuz 3 eksenli olduğundan her bir motora uygulanan kayan kipli denetimin katsayıları sırasıyla 21 nolu denkleme göre  $C1=96.7157$ ,  $C2= 93.8287$  ve  $C3= 96.2995$  olarak tespit edilmiştir. Bu katsayılarla kayan kipli denetleyici sisteme 3 farklı referans konum için uygulanmış ve sistem cevapları grafiksel olarak elde edilmiştir. İlk uygulamada robot ucunu  $x=0.15$  m,  $y=0.1$  m ve  $z=0.5$  m referans konumlarına götürmek için kayan kipli denetim uygulandığında sistemin deplasman cevapları Şekil 9’da görüldüğü gibi grafiksel olarak elde edilmiştir. Şekil 10’da her bir motorun uygulaması gereken kontrol kuvvetlerinin zamana göre değişimini veren grafik yer almaktadır.



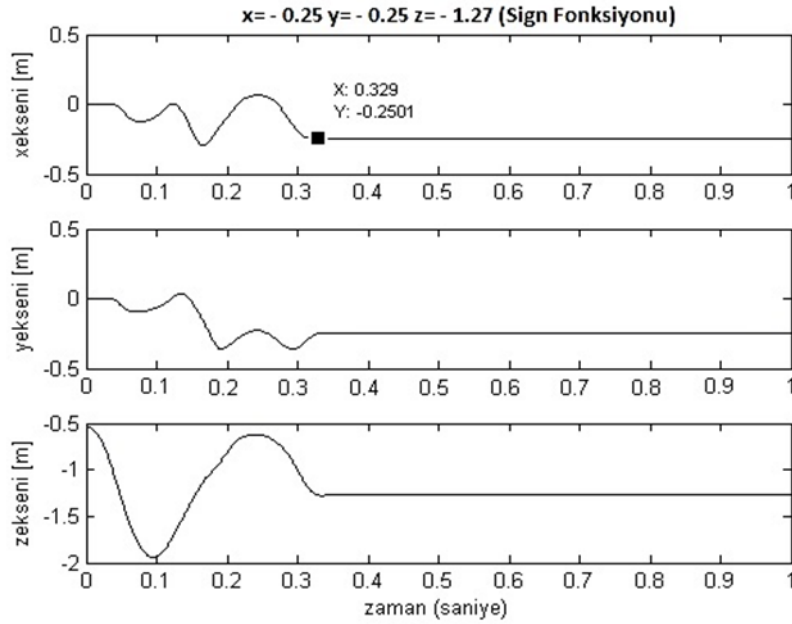
Şekil 9. Birinci uygulama için sistemin deplasman cevapları (Sign Fonksiyonu).

Benzer olarak ikinci uygulamada robot ucunu  $x= -0.25$  m,  $y= -0.25$  m ve  $z= -1.27$  m referans konumlarına götürmek için kayan kipli denetim uygulanmıştır. Buna göre Şekil 11’de sistemin deplasman cevapları ve Şekil 12’de uygulanan kontrol kuvvetlerinin zamana göre değişimini veren grafiksel sonuçlar görülmektedir.



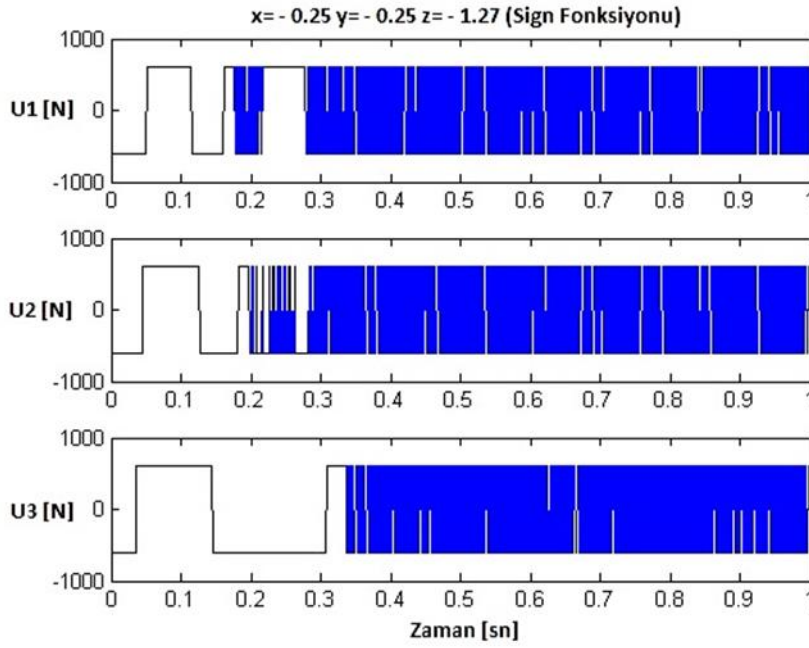


**Şekil 10.** Birinci uygulama için sisteme uygulanan kontrol kuvvetleri (Sign Fonksiyonu)

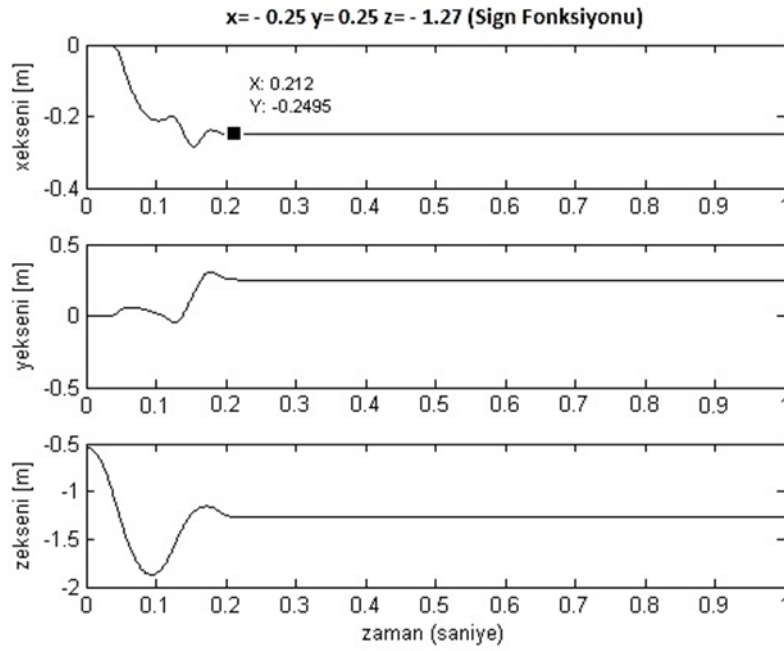


**Şekil 11.** İkinci uygulama için sistemin deplasman cevapları (Sign Fonksiyonu)

Üçüncü uygulamada robot ucunu  $x = - 0.25$  m,  $y = 0.25$  m ve  $z = - 1.27$  m referans konumlarına götürmek için kayan kipli denetim uygulanmıştır. Buna göre Şekil 13’de sistemin deplasman cevapları ve Şekil 14’de uygulanan kontrol kuvvetlerinin zamana göre değişimini veren grafiksel sonuçlar görülmektedir.

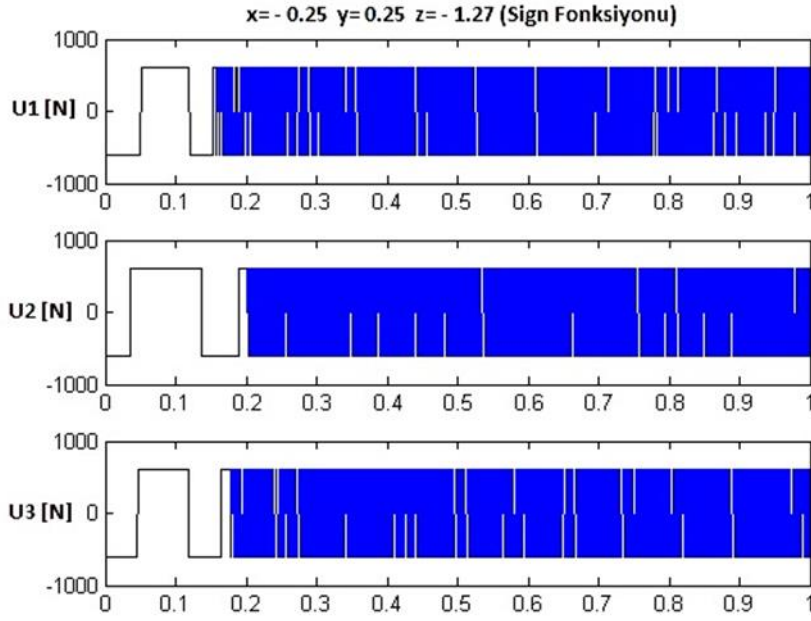


Şekil 12. İkinci uygulama için sisteme uygulanan kontrol kuvvetleri (Sign Fonksiyonu).



Şekil 13. Üçüncü uygulama için sistemin deplasman cevapları (Sign Fonksiyonu)

Kayan kipli denetim algoritması ile oldukça başarılı sonuçların elde edildiği açıkça görülmektedir. Ancak grafiklerden de görüldüğü gibi denetim sinyallerinde çok sık frekansta çatırdamalar oluşmaktadır. Bu çatırdamaların sıklığı denetleyicinin pratikte kullanılabilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu da kayan kipli denetimin dezavantajı olarak karşımıza çıkmaktadır.



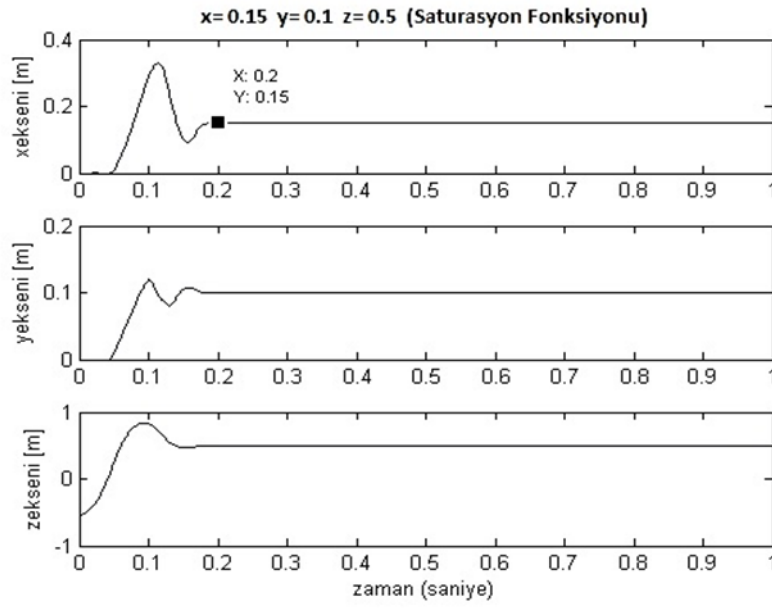
Şekil 14. Üçüncü uygulama için sisteme uygulanan kontrol kuvvetleri (Sign Fonksiyonu).

Kayan kipli denetleyicinin bu dezavantajını gidermeye yönelik birçok teknik kullanılabilir. Bu tekniklerden en yaygın olanı, işaret fonksiyonunun yerine saturasyon fonksiyonunun kullanımıdır. Saturasyon fonksiyonunda kayma yüzeyi boyunca  $\varepsilon$  genişliğinde bir bant tanımlanır. Bu durumda kayan kipli denetimin ifadesi;

$$U = -ksat(S/\varepsilon) \quad (22)$$

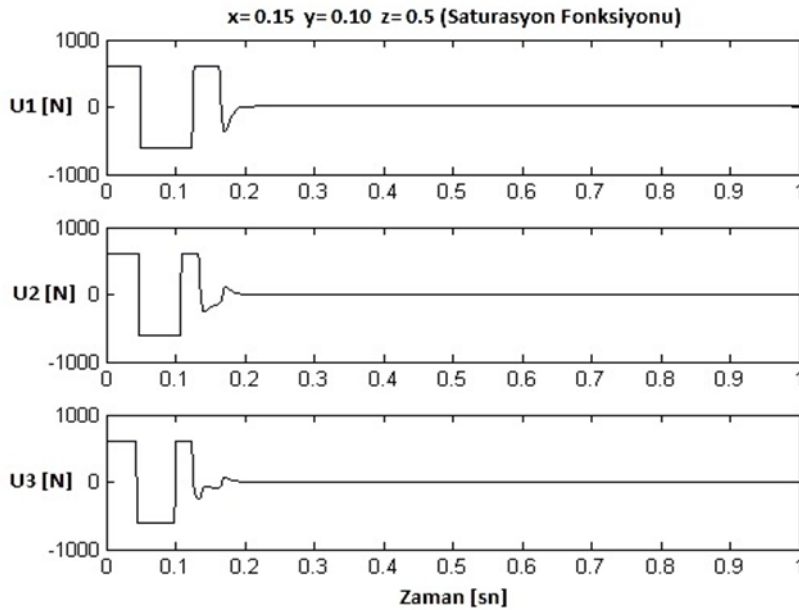
biçiminde yazılabilir. Bu bant genişliği yeterince büyük seçildiğinde çatırdama frekansında ciddi bir azalma oluşacak ve denetleyicinin pratikte uygulanabilirliği artırılmış olacaktır. Ancak denetim başarısında bir miktar düşüş yaşanması da beklenecektir.  $k$  değeri 600,  $\varepsilon$  değeri 0.3873 olarak alınmıştır.

İlk uygulamada robot ucunu  $x=0.15$  m,  $y=0.1$  m ve  $z=0.5$  m referans konumlarına götürmek için saturasyon fonksiyonuna sahip kayan kipli denetim uygulandığında sistemin deplasman cevapları Şekil 15’de görüldüğü gibi grafiksel olarak elde edilmiştir.



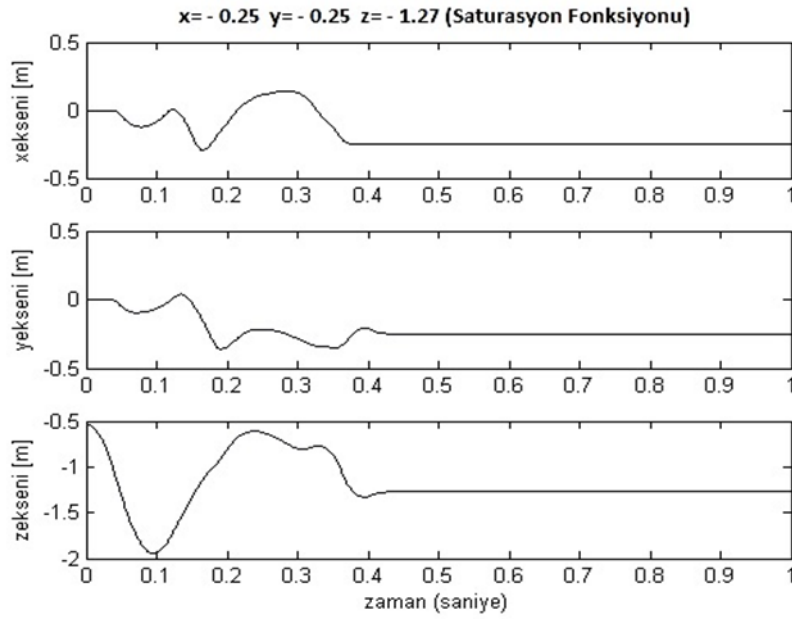
**Şekil 15.** Birinci uygulama için sistemin deplasman cevapları (Saturasyon Fonksiyonu).

Şekil 16’da her bir motorun uygulaması gereken kontrol kuvvetlerinin zamana göre değişimini veren grafik yer almaktadır.

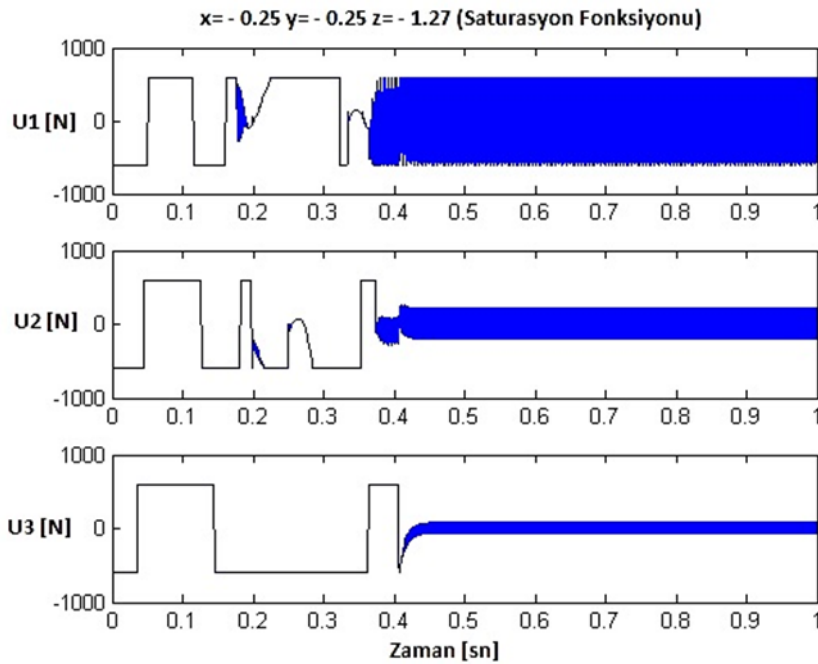


**Şekil 16.** Birinci uygulama için sisteme uygulanan kontrol kuvvetleri (Saturasyon Fonksiyonu).

İkinci uygulamada robot ucunu  $x = -0.25$  m,  $y = -0.25$  m ve  $z = -1.27$  m referans konumlarına götürmek için saturasyon fonksiyonlu kayan kipli denetim uygulanmıştır. Buna göre Şekil 17’de sistemin deplasman cevapları ve Şekil 18’de uygulanan kontrol kuvvetlerinin zamana göre değişimini veren grafiksel sonuçlar görülmektedir.

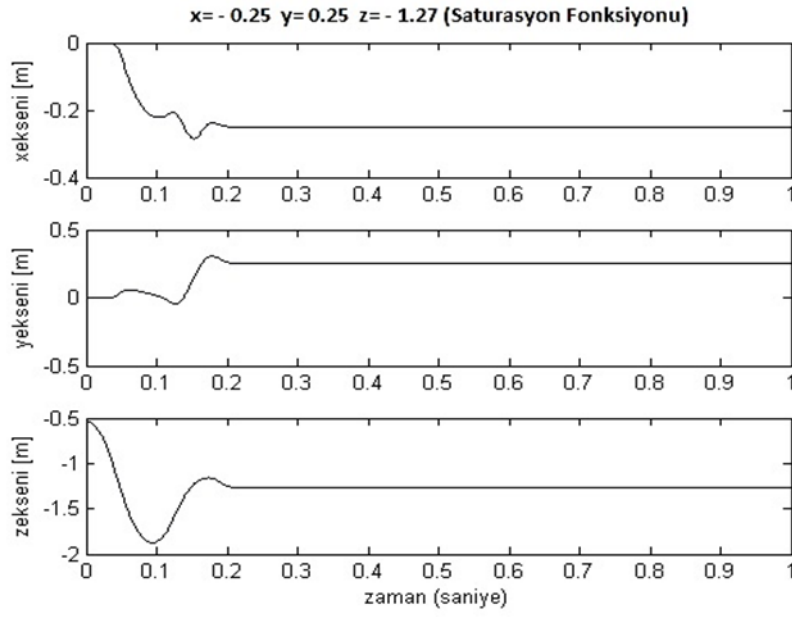


Şekil 17. İkinci uygulama için sistemin deplasman cevapları (Saturasyon Fonksiyonu).

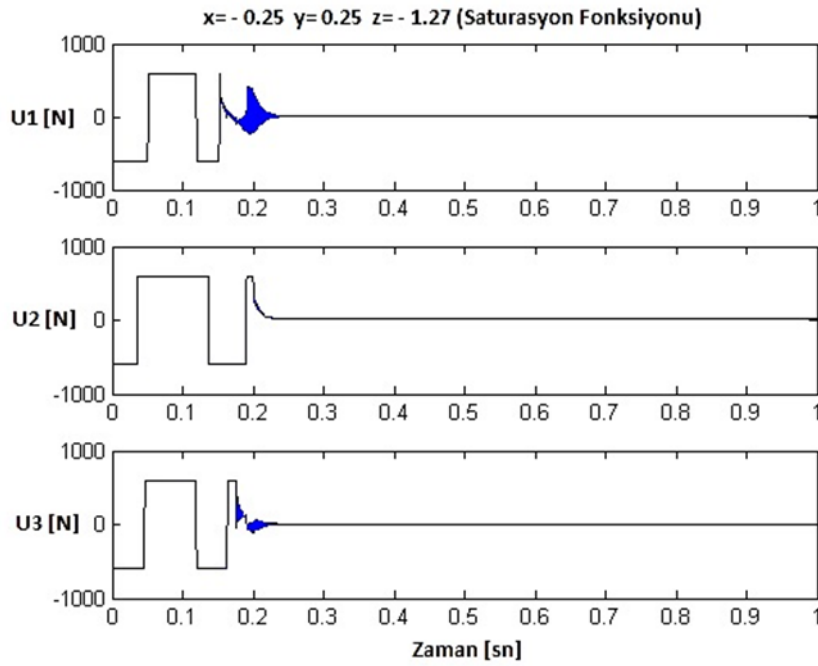


Şekil 18. İkinci uygulama için sisteme uygulanan kontrol kuvvetleri (Saturasyon Fonksiyonu).

Üçüncü uygulamada robot ucunu  $x = - 0.25$  m,  $y = 0.25$  m ve  $z = - 1.27$  m referans konumlarına götürmek için saturasyon fonksiyonlu kayan kipli denetim uygulanmıştır. Buna göre Şekil 19 ve 20’de sistemin deplasman cevapları ile uygulanan kontrol kuvvetlerinin zamana göre değişimini veren sonuçlar görülmektedir.



Şekil 19. Üçüncü uygulama için sistemin deplasman cevapları (Saturasyon Fonksiyonu).



Şekil 20. Üçüncü uygulama için sisteme uygulanan kontrol kuvvetleri (Saturasyon Fonksiyonu).

Kayan kipli denetimde saturasyon fonksiyonunun kullanılması ile gerçekleştirilen denetimlerde elde edilen kontrol kuvveti grafikleri incelendiğinde çarptamanın çok büyük oranda azaldığı açıkça görülmektedir. Bununla birlikte deplasman cevaplarına bakıldığında denetleyicinin oldukça başarılı bir biçimde sistemi kontrol edebildiği görülmektedir.

## 6. Sonuçlar

Triglide paralel robotun kayan kipli denetim sonuçları incelendiği zaman  $x$ ,  $y$  ve  $z$ 'nin istenilen referans değerlere yaklaşık 0.2 ile 0.5 sn aralıklarında değişen sürelerde ulaştığı görülmektedir.

Kayan kipli denetleyicinin yapısında sign işaret fonksiyonunun kullanılması ile kontrol kuvveti grafiklerinde büyük oranda çarırdamalar görülmüştür. Bu sonuç denetleyicinin pratikte uygulanabilirliğini kötüleştirmektedir. Kayan kipli denetleyicide saturasyon fonksiyonunun kullanılması ile kontrol kuvveti grafiklerinde çarırdamalar büyük oranda azaltılmış ve böylece denetleyicinin pratikte kullanılabilirliğinin iyileştirildiği görülmüştür.

Bu çalışma triglide paralel robotun daha önceki çalışmalarda elde edilmiş olan kinematik ve dinamik çözümleri kullanılarak kayan kipli denetleyici ile denetimi gerçekleştirilmiştir. Sisteme kayan kipli denetleyici uygulanırken genetik algoritma ile denetleyici katsayıları optimize edilmiştir. Signum ve saturasyon fonksiyonları denetleyicide ayrı ayrı kullanılarak sisteme etkisi gözlemlenmiştir. Literatüre Triglide robotun denetiminin kayan kipli denetim yöntemi ile gerçekleştirilmesi konusunda katkı sağlanmıştır.

## Kaynaklar

- [1] Sciavicco L, Siciliano B. Modeling and Control of Robot Manipulator. 2nd ed. London: Springer; 2000.
- [2] Merlet JP. Parallel Robots. 2nd ed. The Netherlands: Springer, 2006, p. 75-76.
- [3] Merlet JP. On the infinitesimal motion of parallel manipulators in singular configurations. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nice, France, 1992.
- [4] Bi ZM, Lang SYT. Joint workspace of parallel kinematic machines. Robotics and Computer Integrated Manufacturing 2009; 25:57-63.
- [5] Merlet JP. Determination of the orientation workspace of parallel manipulators. Journal of Intelligent and Robotic Systems 1995; 13: 143-160.
- [6] Mustafa M, Misuari R, Daniyal H. Forward kinematics of 3 degrees of freedom delta robot. In: The 5th Student Conference on Research and Development, Malasia, 11-12 December 2007.
- [7] <http://www.parallelic.org/Reviews/Review002.html>, Delta Parallel Robot, 6 Mayıs 2001.
- [8] Merlet JP. Parallel Robots. 2nd ed. The Netherlands: Springer, 2006, p. 31-34.
- [9] Aydın M, Alli H. Üç serbestlik dereceli Triglide paralel robotun ters ve düz kinematik çözümlerinin analitik olarak elde edilmesi. TOK2012, Nigde, Turkey, 2012.
- [10] Aydın M, Alli H. The Obtaining of Dynamic Equations for Three Degree of Freedom Parallel Robot. In: Proc. of the International Conference on Advances in Mechanical and Automation Engineering - MAE 2016, Roma, İtaly, 2016.
- [11] Young, K.D., Utkin, V.I., Ozguner, U. A Control Engineer's Guide to Sliding Mode Control. IEEE Transactions on Control Systems Technology 1999; 7 (3): 328-342
- [12] Edwards C, Spurgeon S K. Sliding Mode Control: Theory and Applications. London: Taylor and Francis; 1998.
- [13] Aydın M, Yakut O, Alli H. Yapay Sinir Ağı Kayan Kipli Kontrolün Dönel Ters Sarkaç Sistemine Uygulanması. Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi 2013; Özel sayı 5:39-50.