

## **KARADA VE SUALTINDA ÇALIŞAN ESNEK UZUVLU ROBOT KOLLARININ BULANIK MANTIKLA KONTROLÜ**

**Nurhan GÜRSEL<sup>1</sup>, Levent GÜMÜŞEL<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü-TRABZON  
[gnurhan@ktu.edu.tr](mailto:gnurhan@ktu.edu.tr)

<sup>2</sup> Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü-TRABZON  
[gumusel@ktu.edu.tr](mailto:gumusel@ktu.edu.tr)

### **Özet**

Bu çalışmada, iki döner eklemlili ilk uzvu katı ikincisi esnek bir robot kolunun kara ve su altı şartlarındaki davranışları incelenmiş, ayrıca su altı ortamında var olan direnç kuvvetinin sistemin performansına etkisi incelenmiştir. Sistemin hareket denklemleri Hamilton Prensipleri'nden ve özdeğer problemi yaklaşımından faydalanılarak türetilmiştir. MATLAB dilinde geliştirilen benzetim programı sistemin dinamiğini tanımlayan doğrusal olmayan adi diferansiyel denklemleri Runge-Kutta algoritmasını kullanarak çözmektedir.

Esnek uzuvlu robotların kontrolünde ana yaklaşım, kolların verilen görevi en hızlı ve uç titreşimleri en az olacak şekilde yerine getirmeleridir. Bu nedenle klasik kontrol yöntemlerinden PD kontrol metodu ve akıllı kontrol yöntemlerinden Bulanık (Fuzzy) Mantıkla (BMD) kontrol uygulanarak sistemin cevabı değerlendirilmiş, uygulanan kontrol yöntemleri karşılaştırılarak, mevcut sistem için en ideal kontrol metoduna karar verilmiştir.

*Anahtar Kelimeler: Esnek uzuvlu robot kollar, Sualtı robotları, Bulanık Mantıkla Kontrol*

### **Abstract**

In this study, modeling and control of a two link terrestrial and subsea robotic manipulator whose first link rigid and the second one flexible is considered and also the effect of drag force to the system occurring in the water is considered. Governing equations of the systems are derived from Hamilton Principle and eigenvalue approximation method. The code that is written in MATLAB for system simulation has solved nonlinear ordinary differential equations defining the system dynamics by using Runge - Kutta algorithm.

The main approximation in control of flexible arms is to do the given task as soon as possible and at the same time with the minimum tip deflections. For this reason, the response of the system is evaluated by applying PD control which is one of the classical control methods and Fuzzy control one of the intelligent control methods. By comparing the responses to both methods, the optimum control method is chosen.

*Key Words: Flexible manipulators, Sub-sea robots, Fuzzy control*

## 1. GİRİŞ

Robotlarla ilgili çalışmalar çok geniş bir araştırma alanı oluşturmaktadır. İnsanlığı ilgilendiren her alanda, uzay araştırmalarında, deniz diplerinin araştırılmasında, sanayide, tıpta ve daha pek çok alanda kapsamlı çalışmalar sürdürölmektedir. Bu çalışmada konu edilen esnek robot kolları, rijit uzuvlu robot kollarının hareketlerinin yetersiz kalması, küçük tahrik gücüne ihtiyaç duyulması, daha yüksek işlem hızları, düşük maliyet, gerekli kalkış kuvvetinin düşüklüğü, manipölatörün indirgenmiş ataletinden dolayı daha emniyetli işletim sağlaması, yükün manipölatör kütlesine oranının daha fazla olması gibi üstünlüklere sahiptir [1-4]. Fakat esneklik beraberinde doğrusal olmamayı da getirdiğinden, bu tür kolların kontrolünde dikkatli olunması gerekmektedir. Rijit eklemli robot kollarının modellenmesinde mevcut standart yöntemler izlenebilmesine rağmen, esnek kolların modellenmesinde bu mümkün olmamaktadır. Esnek kollu robotların aktif sönüm kontrolünde sanal bir yay-sönüm sisteminden faydalanılabilir [5]. Araştırmacılar esnek kolların kontrolüne yönelik pek çok kontrol metodu üzerinde çalışmışlardır. Adaptif kontrol, gürbüz kontrol, doğrusal kontrol, akıllı kontrol bunlardan bazılarıdır. Akıllı kontrol yöntemlerinden bulanık mantık modeli, doğrusal olmayan sistemlerin tanımlanmasında üstün bir yeteneğe sahiptir ayrıca karmaşık ve belirsiz sistemlerin çözümlenmesinde mükemmel uygunluk gösterir [6].

Bulanık küme kavramı üzerine ilk çalışma, bugün alanında bir numara olarak kabul edilen Zadeh' e [7] aittir. 1975 yılında Mamdani, bu düşünceler ışığında küçük bir buharlı motor modeli üzerinde Bulanık Mantıkla kontrolün uygulanabilirliğini göstermiştir. Bu öncü uygulamanın ardından, bulanık mantık kontrollü uygulamalar hayatımızın her alanında artarak devam etmektedir. Pek çok bulanık mantık modellerinin yanı sıra Takagi-Sugeno bulanık modeli, çok az kuralla problemi tanımlayabildiğinden ve diğer konvansiyonel kontrol metotlarıyla etkileştirilebildiğinden, en yaygın kullanıma sahiptir [8]. Esnek kollu robotların kontrolünde bazı araştırmacılar adaptif fuzzy kontrolcü tasarlamış, frekans ve zaman tanım kümelerinde hibrit bir teknik geliştirmişlerdir [9]. Uzaktan kumandalı su altı araçlarının geliştirilmesiyle birlikte, bu alanda da kontrol tekniklerinde hızlı gelişmeler kaydedilmiştir. Otomatik sualtı araçlarının görüntü algılama, konum kontrol ve çarpışma önlemeye yönelik kontrolü için bulanık mantık modeli geliştirilmiştir [10].

Bu çalışmada, ilki katı ikincisi esnek olan iki uzuvlu bir robot kola ait matematiksel model hem karada hem de su altında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Karakteristik denklemler [11]'de geliştirilen ilk ikisi katı, üçüncüsü esnek üç uzuvlu bir robot kolun denklemleri baz alınarak türetilmiş, MATLAB dilinde hazırlanan bir bilgisayar programı yardımıyla, doğrusal olmayan, zamanla değişen dinamik denklemlerin çözümü 4. dereceden Runge-Kutta algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sisteme farklı yük değerleri için bulanık mantık kontrol stratejileri uygulanarak, modelin performans karakteristikleri incelenmiştir. Sonuçlar daha önce elde edilen PD (orantı+türevsel) kontrol sonuçlarıyla karşılaştırılarak, en uygun kontrol metoduna karar verilmiştir.

### 1. Esnek Uzuvlu Robot Kolun Modellenmesi

$L_1$ , katı uzvun uzunluğunu,  $L_2$  esnek uzvun uzunluğunu,  $M_1$  katı uzvun kütlesini,  $M_2$  esnek uzvun kütlesini,  $m_a$  ikinci eklemdaki motorun kütle değerini,  $m_{yük}$  esnek uzvun ucundaki yükün kütlesini göstermek üzere, robot kolun uzuvlarının katı hal açısai konumları sırasıyla  $\theta$ ,  $\varphi$  şeklindedir.  $\vec{r}_i(x, t)$  her bir uzuv üzerindeki  $x$  noktasının pozisyon vektörüdür. İki uzuvlu ilki katı, ikincisi esnek olan robot kol sistemine ait dinamik denklemlerin elde edilmesinde Hamilton Prensibi kullanılabilir.

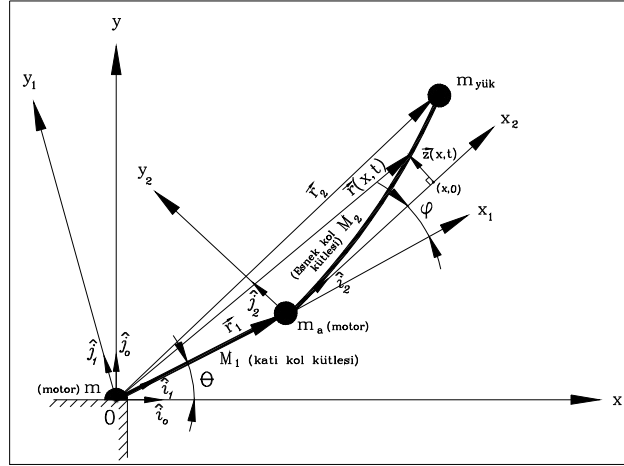
$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta T - \delta V + \delta \bar{W}_{nc}) dt = 0, \quad \delta r_i = 0, \quad (1)$$

Sistemdeki kinetik enerji, potansiyel enerji ve korunmayan kuvvetler tarafından yapılan işler Hamilton ifadesine yerleştirilir.

$$\begin{aligned}
& -\int_{t_1}^{t_2} \left\{ \int_0^{L_2} [\rho_2 + m_{yuk} \delta_o(x-L_2)] \frac{\partial}{\partial t} \left[ L_1^2 \dot{\theta} + x^2 \left( \dot{\theta} + \dot{\varphi} \right) + L_1 x \left( 2\dot{\theta} + \dot{\varphi} \right) \cos(\varphi) \right. \right. \\
& - L_1 \left. \left( 2\dot{\theta} + \dot{\varphi} \right) z(x,t) \sin(\varphi) + L_1 z_t(x,t) \cos(\varphi) + x z_x(x,t) \right] dx \\
& + \frac{\partial}{\partial t} \left[ \left( I_{h1} + I_{h2} \right) \dot{\theta} + I_{h2} \dot{\varphi} + \frac{1}{3} M_1 L_1^2 \dot{\theta} + m_a L_1^2 \dot{\theta} \right] - \left( \tau_1 - \beta_1 \dot{\theta} \right) \delta\theta \\
& + \left( \int_0^{L_2} [\rho_2 + m_{yuk} \delta_o(x-L_2)] \frac{\partial}{\partial t} \left[ x^2 \left( \dot{\theta} + \dot{\varphi} \right) + L_1 x \dot{\theta} \cos(\varphi) - L_1 \dot{\theta} z(x,t) \sin(\varphi) \right. \right. \\
& + x z_x(x,t) \left. \right] dx + \int_0^{L_2} [\rho_2 + m_{yuk} \delta_o(x-L_2)] \left[ L_1 x \dot{\theta} \left( \dot{\theta} + \dot{\varphi} \right) \sin(\varphi) \right. \\
& + L_1 \dot{\theta} \left( \dot{\theta} + \dot{\varphi} \right) z(x,t) \cos(\varphi) + L_1 \dot{\theta} z_t(x,t) \sin(\varphi) \left. \right] dx + \frac{\partial}{\partial t} \left[ I_{h2} \left( \dot{\theta} + \dot{\varphi} \right) \right] - \left( \tau_2 - \beta_2 \dot{\varphi} \right) \delta\varphi \\
& + \left( \int_0^{L_2} \rho_2 \frac{\partial}{\partial t} \left[ L_1 \dot{\theta} \cos(\varphi) + x \left( \dot{\theta} + \dot{\varphi} \right) + z_t(x,t) \right] dx + \int_0^{L_2} \rho_2 \left[ L_1 \dot{\theta} \left( \dot{\theta} + \dot{\varphi} \right) \sin(\varphi) \right] dx \right. \\
& + \left. \int_0^{L_2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ EI_a z_{xx}(x,t) \right] dx \right) \delta z(x,t) + \left( m_{yuk} \frac{\partial}{\partial t} \left[ L_1 \dot{\theta} \cos(\varphi) + L_2 \left( \dot{\theta} + \dot{\varphi} \right) + z_t(L_2,t) \right] \right. \\
& + m_{yuk} \left[ L_1 \dot{\theta} \left( \dot{\theta} + \dot{\varphi} \right) \sin(\varphi) \right] \left. \right) \delta z(L_2,t) + \left( -EI_a z_{xxx}(L_2,t) \delta z(L_2,t) + EI_a z_{xxx}(0,t) \delta z(0,t) \right. \\
& \left. + EI_a z_{xx}(L_2,t) \delta z_x(L_2,t) - EI_a z_{xx}(0,t) \delta z_x(0,t) \right) \left. \right\} dt = 0 \tag{2}
\end{aligned}$$

$\theta$ ,  $\varphi$ ,  $z(x,t)$ ,  $z(L_2,t)$  ve  $z_x(L_2,t)$  sistemin bağımsız değişkenleridir. Esnek uzvun katı uzva bağlandığı noktada  $z(x,t)$  ve  $z_x(x,t)$ 'nin değişimleri sıfır olduğundan  $\delta z(0,t) = 0$  ve  $\delta z_x(0,t) = 0$  alınır. O halde (2) denkleminin sağlanabilmesi için,  $\delta\theta$ ,  $\delta\varphi$ ,  $\delta z(x,t)$ ,  $\delta z(L_2,t)$  ve  $\delta z_x(L_2,t)$ 'nin çarpanlarının sıfır değerini vermesi gerekir. Gerekli düzenlemeler yapılarak birinci eklem açısının ve ikinci eklem açısının dinamiğini temsil eden eşitlikler bulunur. (2) denklemdeki  $\delta z(x,t)$ 'in çarpanının sıfır olması halinde; bu denklemdeki kısmi türevler alınmak suretiyle esnek kolun dinamiğini tanımlayan kısmi diferansiyel denklem (3) eşitliğindeki gibi elde edilir.

$$z_{tt}(x,t) + \frac{EI_a}{\rho_2} z_{xxxx}(x,t) = -x(\ddot{\theta} + \ddot{\varphi}) - L_1 \cos(\varphi) \ddot{\theta} - L_1 \dot{\theta}^2 \sin(\varphi) \tag{3}$$



Şekil 1. İki eklemli katı-esnek robot kolunun gösterimi

Sonuç olarak esnek uzvun dinamiğini tanımlayan (2) denklemini, vektör-matris formunda aşağıdaki gibi yazılır.

$$a\ddot{\eta}(t) + a\Lambda\dot{\eta}(t) + \left( \ddot{\theta} + \ddot{\varphi} \right) \gamma^a + \left\{ [L_1 \cos(\varphi)] \ddot{\theta} + L_1 \dot{\theta}^2 \sin(\varphi) \right\} \gamma^b = 0 \quad (4)$$

İlki katı ikincisi esnek iki uzuvdan oluşan sistemin dinamik denklemleri, esnek uzvun sadece ilk iki modu dikkate alınarak vektör-matris formunda aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\varphi} \\ \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 - f_1 \\ \tau_2 - f_2 \\ -f_3 \\ -f_4 \end{bmatrix} \quad (5)$$

## 2.1 Esnek Uzunlu Robot Kolun Su Altı Ortamındaki Davranışının Modellenmesi

İki uzuvlu robot kola ait dinamik denklemler elde edildikten sonra, su altında hareket eden ilk uzvu katı ikincisi esnek bir robot kolun yatay düzlemde yaptığı hareketin incelenmesinde bu denklemlerden faydalanılır. Esnek uzvun su altındaki davranışı modellenirken katı uzuv gibi düşünülmüştür. Su altında çalışan robotlara suyun kaldırma kuvveti (*buoyant force*), direnç kuvveti (*drag force*), taşıma kuvveti (*lift force*) ve ağırlık kuvveti (*gravity force*) olmak üzere 4 farklı kuvvet etmektedir. Bu kuvvetlerden direnç ve taşıma kuvvetleri hareketli cismin hız vektörüne göre tanımlanırlar.

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A V^2 \quad (6), \quad F_L = \frac{1}{2} C_L \rho A V^2 \quad [11,12] \quad (7)$$

Burada;

$$\begin{aligned} C_D &= \text{Direnç katsayısı,} & A &= \text{Karakteristik alan, (m}^2\text{)} \\ C_L &= \text{Kaldırma katsayısı,} & V &= \text{Akış hızı, (m/s)} \\ \rho &= \text{suyun yoğunluğu, (kg/m}^3\text{)} \end{aligned}$$

olarak tanımlanmaktadır. Direnç ve taşıma kuvvetlerinin değeri uzvun geometrisi ile yakından ilgilidir. Türbülans oluşturmayacak bir hızda yatay düzlemde hareket eden silindirik bir yüzeyde

oluşan taşıma kuvvetinin değeri direnç kuvvetinin değerinden çok daha düşüktür. Düzlemsel bir harekette, direnç kuvveti hız vektörüne ters yönde olup yatay düzlemin içinde bulunmaktadır. Taşıma kuvveti ise yatay düzlemden dışarı doğru olup hız vektörüne dik yöndedir. Bu nedenle robot kol sisteminin yatay düzlemdeki hareketini temsil eden denklemlerde taşıma kuvvetinden kaynaklanan terim bulunmaz. Ağırlık kuvveti ve kaldırma kuvveti yatay düzlemden dışarı doğru olup birbirlerine zıt yöndedirler ve bu kuvvetler de yatay düzlemde hareket eden robot kollarının dinamik denklemlerinde yer almazlar.

O halde, suyun içinde yatay düzlemde hareket eden uzuvlara sadece  $F_D$  direnç kuvvetinin neden olduğu, uzvun açısal hızına ters yönde oluşan  $M_D$  direnç momenti etkimektedir.

$$M_D = \frac{1}{2} C_D \rho h \int_0^L x V_x^2 dx \quad (8)$$

(1) nolu hareket denkleminde su direnci momenti ilave edilerek (9) nolu denklem elde edilir.

$$\begin{aligned} & -\int_{t_1}^{t_2} \left\{ \int_0^{L_2} [\rho_2 + m_{yük} \delta_o(x-L_2)] \frac{\partial}{\partial t} \left[ L_1^2 \dot{\theta} + x^2 (\dot{\theta} + \dot{\varphi}) + L_1 x (2\dot{\theta} + \dot{\varphi}) \cos(\varphi) + L_1 z_i(x,t) \cos(\varphi) \right. \right. \\ & - L_1 (2\dot{\theta} + \dot{\varphi}) z(x,t) \sin(\varphi) + x z_i(x,t) \left. \right] dx + \frac{\partial}{\partial t} \left[ (I_{h1} + I_{h2}) \dot{\theta} + I_{h2} \dot{\varphi} + \frac{1}{3} M_1 L_1^2 \dot{\theta} + m_a L_1^2 \dot{\theta} \right] \\ & - \left( \tau_1 - \beta_1 \dot{\theta} - M_{D1} \right) \left. \right\} \delta \theta + \left\{ \int_0^{L_2} [\rho_2 + m_{yük} \delta_o(x-L_2)] \frac{\partial}{\partial t} \left[ x^2 (\dot{\theta} + \dot{\varphi}) + L_1 x \dot{\theta} \cos(\varphi) \right. \right. \\ & - L_1 \dot{\theta} z(x,t) \sin(\varphi) + x z_i(x,t) \left. \right] dx \left. \right\} + \left\{ \int_0^{L_2} [\rho_2 + m_{yük} \delta_o(x-L_2)] \left[ L_1 x \dot{\theta} (\dot{\theta} + \dot{\varphi}) \sin(\varphi) \right. \right. \\ & + L_1 \dot{\theta} z_i(x,t) \sin(\varphi) + L_1 \dot{\theta} (\dot{\theta} + \dot{\varphi}) \cos(\varphi) \left. \right] dx + \frac{\partial}{\partial t} \left[ I_{h2} (\dot{\theta} + \dot{\varphi}) - (\tau_2 - \beta_2 \dot{\varphi} - M_{D2}) \right] \left. \right\} \delta \varphi \\ & + \left\{ \int_0^{L_2} \rho_2 \frac{\partial}{\partial t} \left[ L_1 \dot{\theta} \cos(\varphi) + x (\dot{\theta} + \dot{\varphi}) + z_i(x,t) \cos(\varphi) + x \dot{\varphi} + z_i(x,t) \right] dx \right. \\ & + \left. \left\{ \int_0^{L_2} \rho_2 \left[ L_1 \dot{\theta} (\dot{\theta} + \dot{\varphi}) \sin(\varphi) \right] dx + \int_0^{L_2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} [E I_a z_{xx}(x,t)] dx \right\} \delta z(x,t) \right. \\ & + \left. \left\{ m_{yük} \frac{\partial}{\partial t} \left[ L_1 \dot{\theta} \cos(\varphi) + L_2 (\dot{\theta} + \dot{\varphi}) + z_i(L_2,t) \right] + m_{yük} \left[ L_1 \dot{\theta} (\dot{\theta} + \dot{\varphi}) \sin(\varphi) \right] \right\} \delta z(L_2,t) \right. \\ & + \left. \left\{ -E I_a z_{xxx}(L_2,t) \delta z(L_2,t) + E I_a z_{xxx}(0,t) \delta z(0,t) \right. \right. \\ & \left. \left. + E I_a z_{xx}(L_2,t) \delta z_x(L_2,t) - E I_a z_{xx}(0,t) \delta z_x(0,t) \right\} dt = 0 \right. \end{aligned} \quad (9)$$

Burada

$M_{D1}$  : Esnek uzuv sabitlenip birinci uzuvla birlikte O noktası etrafında sadece  $\dot{\theta}$  açısal hızıyla döndüğünde meydana gelen direnç momenti

$M_{D2}$  : İkinci uzuv A noktası etrafında  $\dot{\varphi}$  açısal hızıyla döndüğünde meydana gelen direnç momentidir.

$M_{D1}$ 'in hesaplanması iki uzvun alacağı iki farklı konfigürasyona bağlı olarak yapılmalıdır. Bu durum esnek uzvun uç noktasının O orijinine uzaklığı olan  $L_{bo}$  mesafesinin  $L_1$  ile mukayesesi sonucunda ortaya çıkmaktadır.

- $L_{bo} \geq L_1$  hali

$$M_{D1} = M_{D1a} + M_{D1b}$$

$$M_{D1} = \frac{1}{8} C_D \rho h_1 L_1^2 V_{ao}^2 + \frac{1}{8} C_D \rho h_2 (L_{bo}^2 V_{bo}^2 - L_1^2 V_{ao}^2) \quad (10)$$

- $L_{bo} < L_1$  hali

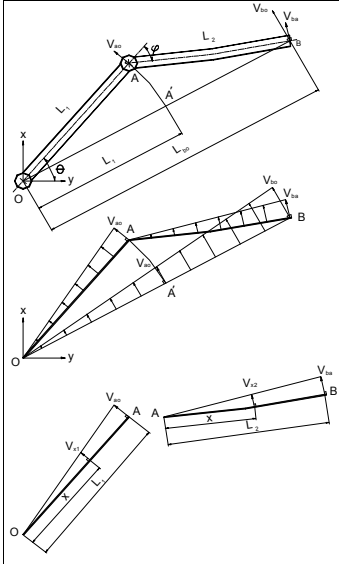
$$M_{D1} = \frac{1}{8} C_D \rho h_1 L_1^2 V_{ao}^2 + \frac{1}{8} C_D \rho h_2 (L_1^2 V_{ao}^2 - L_{bo}^2 V_{bo}^2) \quad (11)$$

Her iki durumda  $M_{D2}$ 'nin hesaplanması aynı şekildedir.

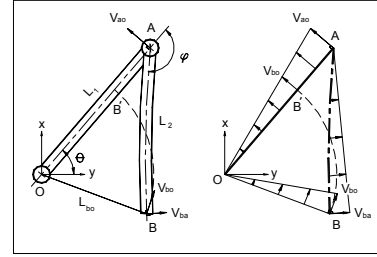
$$M_{D2} = \frac{1}{8} C_D \rho h_2 L_2^2 V_{ba}^2 \quad (13)$$

$V_{ao}$  : Birinci uzuv O noktası etrafında sadece  $\dot{\theta}$  açısal hızıyla döndürüldüğünde birinci uzvun A ucunda oluşan çizgisel hızdır.  $V_{ao}$  hız vektörü birinci uzva A noktasında diktir.

$V_{ba}$  : Esnek uzuv A noktası etrafında sadece  $\dot{\varphi}$  açısal hızıyla döndürüldüğünde esnek uzvun B ucunda oluşan çizgisel hızdır.  $V_{ba}$  hız vektörü esnek uzva B noktasında diktir.  $V_{bo}$  : Esnek uzuv sabitlenip birinci uzuvla birlikte O noktası etrafında sadece  $\dot{\theta}$  açısal hızıyla döndürüldüğünde esnek uzvun B ucunda oluşan çizgisel hızdır.  $V_{bo}$  hız vektörü OB doğrusuna B noktasında diktir.



Şekil 2. Her iki uzvun birlikte O noktası etrafında  $\dot{\theta}$  açısal hızıyla dönmesi durumunda uzuvlara etkiyen hidrodinamik kuvvet profilleri



Şekil 3. Esnek uzvun A noktası etrafında  $\dot{\varphi}$  açısal hızıyla dönmesi durumunda uzuvlara etkiyen hidrodinamik kuvvet profilleri

## 2. Esnek Uzuvlu Robot Kolların Kontrolü

Esnek uzuvlu robot kolların kontrolünde ana yaklaşım, esnek uzvun uç noktasının verilen görevi titreşimler en az olacak şekilde, mümkün olduğunca hızlı yerine getirebilmesidir.

### 3.1. Orantılı + Türevli (PD) Kontrol

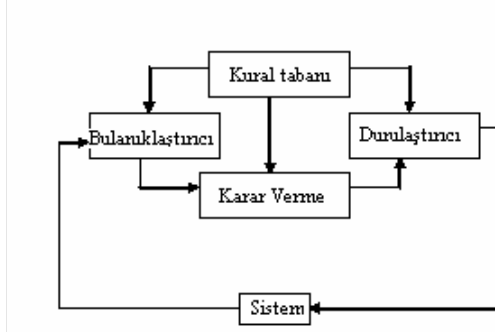
Klasik kontrol kanunlarından olan PD kontrolde kontrol sinyali, hatayla ve aynı zamanda hatanın zamana göre değişimiyle orantılıdır.

$$\tau(s) = (K_p + K_D s) E(s)$$

(14)

### 3.2. Bulanık Mantık Denetleyicisi (BMD)

Bulanık mantık ile klasik mantık arasındaki temel fark bilinen anlamda matematiğin sadece aşırı uç değerlerine izin vermesidir. Klasik matematiksel yöntemlerle karmaşık sistemleri modellemek ve kontrol etmek zordur, çünkü veriler tam bir değer ifade etmemektedir. Bulanık mantık kişiyi bu zorunluluktan kurtarır ve daha niteliksel bir tanımlama olanağı sağlar. Bulanık kuramının merkez kavramı bulanık kümelerdir. Bir bulanık küme kendi aitlik fonksiyonu ile açık olarak temsil edilebilir. Bulanık mantıkta bulanık kümeler kadar önemli bir diğer kavramda linguistik değişkenlerdir. Linguistik değişken *sıcak* veya *soğuk* gibi kelimeler ve ifadelerle tanımlanabilen değişkenlerdir. Bir linguistik değişkenin değerleri bulanık kümeler ile ifade edilir. Şekil 4' de görülen bulanık mantık ünitesi; bulanıklaştırıcı, bulanık kural tabanı, karar verici ve bir durulaştırıcıdan oluşur. İlk olarak bulanıklaştırıcı üyelik fonksiyonlarını kullanarak mevcut değerleri bulanıklaştırır. Sonra, karar verici, bulanık kural tabanından yararlanarak, bulanık bir değer elde etmek amacıyla bir çıkartım yapar. Son olarak elde edilen bulanık değerler, durulaştırıcı tarafından kesin değerlere dönüştürülür.



Şekil 4. Bulanık Mantık ünitesi

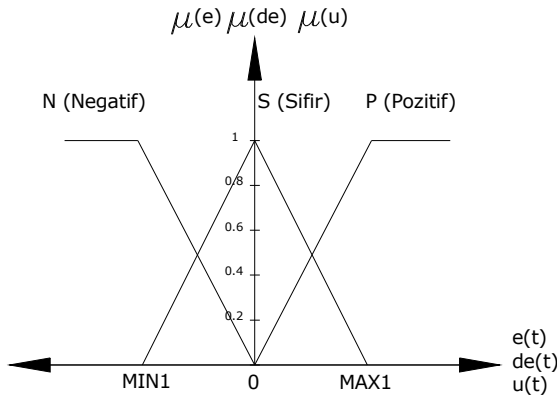
BMD lerin tasarımında genel olarak  $e(k)$  hata, ve  $de(k)$  hatanın değişimi gibi iki değişken seçilir. Sistemi tanıma ve kural tablosunu hazırlamak için sisteme bir dizi test yapılır. Bu çalışmada giriş değişkenleri olan  $e(k)$  hata,  $de(k)$  hatanın değişimi ile çıkış değişkeni olan  $u(k)$  kontrol değişkeni Şekil 5'ten de görüldüğü gibi 3 alt kümeye ayrılmış ve bu değişkenlerin max. ve min. değerleri olarak katı kol için;

$$\begin{aligned} EMAX1 &= tetar1/16; & EMIN1 &= -EMAX1; & DEMAX1 &= 2*EMAX1; & DEMIN1 &= -DEMAX1; \\ DUMAX1 &= 0.01; & DUMIN1 &= -0.01; \end{aligned}$$

ve esnek kol için;

$$\begin{aligned} EMAX2 &= fiir/10; & EMIN2 &= -EMAX2; & DEMAX2 &= 2*EMAX2; & DEMIN2 &= -DEMAX2; \\ DUMAX2 &= 0.01; & DUMIN2 &= -0.01; \end{aligned}$$

en uygun değerler olarak seçilmiştir.



Şekil 5. Üyelik fonksiyonların dağılımı.

Tablo 1: Kural tablosu

de \ e	N	S	P
N	N	N	S
S	N	S	P
P	S	P	P

### 3.3. Sistemin Benzetimi

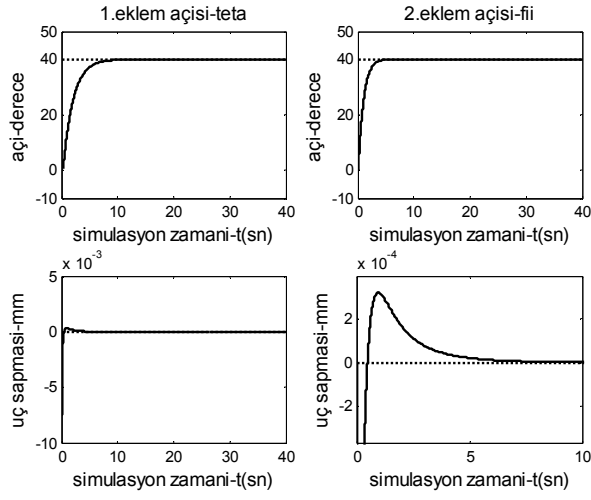
Modellemesi yapılan ilk uzvu katı ikincisi esnek olan robot kol sisteminin benzetimi hem "kara robotu" hem de "su altı robotu" olarak yapılmıştır. Benzetimi yapılan sistemin parametre değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Sistem parametreleri

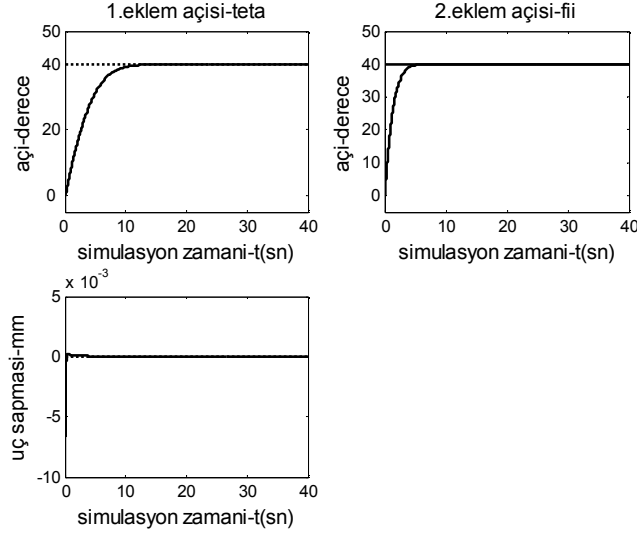
	Katı Uzuv	Esnek Uzuv
Young modülü $E$ , (kg/mm <sup>2</sup> )		$7 \cdot 10^{10}$
Yüzey Atalet Momenti $I_a$ , (mm <sup>4</sup> )		$10^{-10}$
Uzuv Uzunluğu $L_i$ (mm)	600	600
Kesitin Eni $a_i$ (mm)	10	3
Kesitin Boyu $b_i$ (mm)	37	37
Çizgisel Yoğ. $\rho_i$ , (kg/m)	1	0.5
Viskoz Sürtün. Kat. $\beta$	0.1	0.01
Motor Kütlesi (kg)	0.25	
$m_a, m_b$		
Yük (kg) $m_{yük}$		0 - 0.25

Sisteme yüksüz durumda önce PD kontrol uygulanmıştır. Sisteme  $K_p$  [ 1, 1 ] kazanç değerleriyle eş çalışan  $K_D$  [ 2, 1 ] değerleri alınarak benzetim çalışmaları yapılmıştır. Elde edilen açıl konum değişimi ve esnek kolun uç sapma değerleri kara robotu için Şekil 6' da ve su altı robotu için Şekil 7' de verilmektedir.



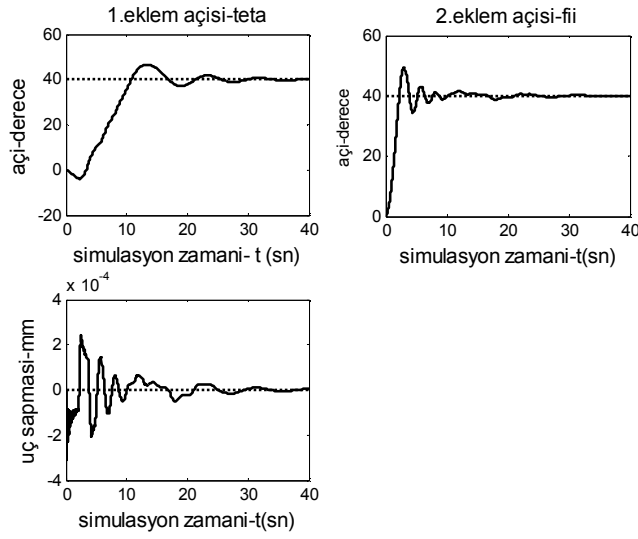


Şekil 6.  $m_{yük} = 0$  kg durumunda kara robotunun PD kontrole verdiği cevap

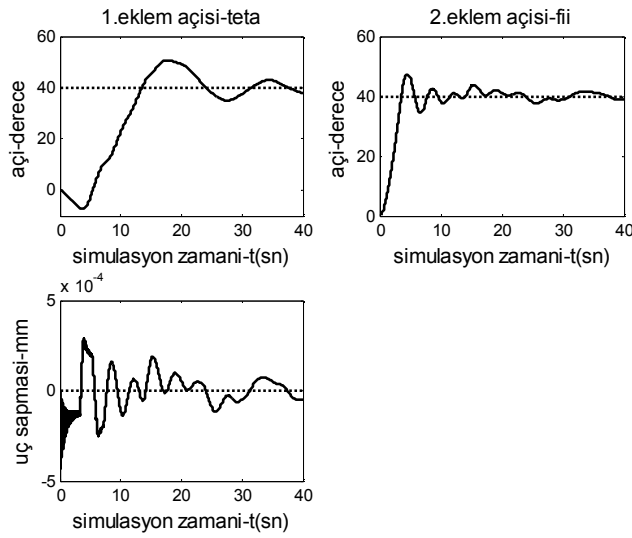


Şekil 7.  $m_{yük} = 0$  kg durumunda su altı robotunun PD kontrole verdiği cevap

Kara robotuna yüksüz durumda ve 0.25 kg yük taşıması durumunda BMD uygulanarak sırasıyla Şekil 8 ve 9 elde edilmiştir.

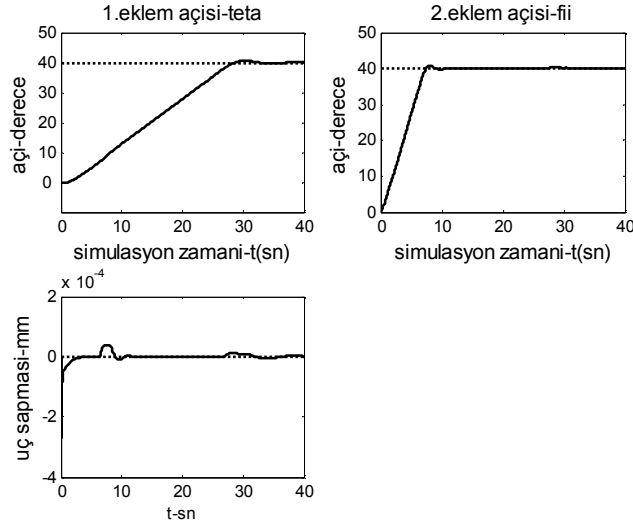


Şekil 8.  $m_{yük} = 0$  kg durumunda kara robotunun BMD kontrole verdiği cevap

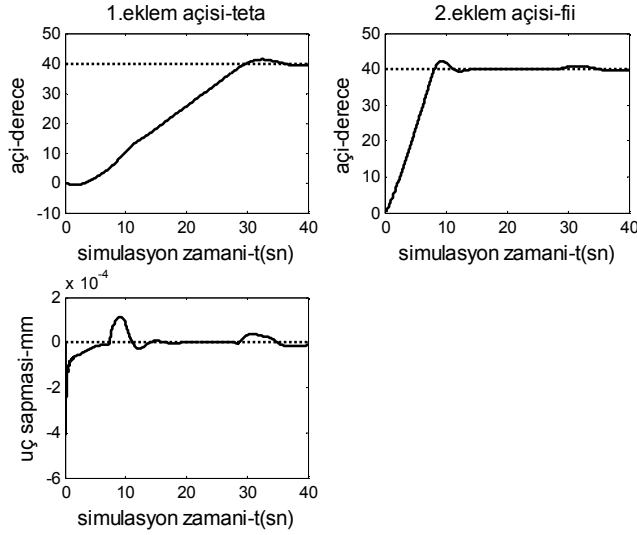


Şekil 9.  $m_{yük} = 0.25$  kg durumunda kara robotunun BMD kontrole verdiği cevap

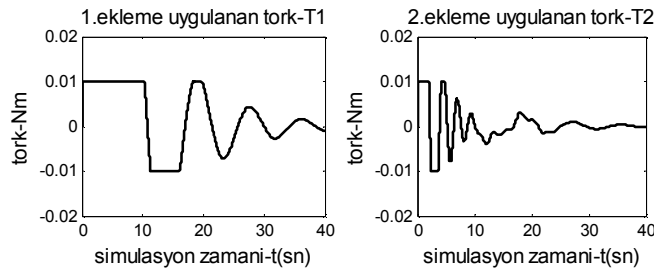
Su altı robotuna yüksüz durumda ve 0.25 kg yük taşıması durumunda BMD uygulanarak sırasıyla Şekil 10 ve 11 elde edilmiştir.



Şekil 10.  $m_{yük} = 0$  kg durumunda su altı robotunun BMD kontrole verdiği cevap



Şekil 11.  $m_{yük} = 0.25$  kg durumunda su altı robotunun BMD kontrole verdiği cevap



Şekil 12.  $m_{yük} = 0$  kg durumunda kara robotuna BMD kontrol uygulandığında  $u(k)$  kontrol çıkışının (tork) değişimi

Şekil 12' de ise kara robotunun BMD kontrol uygulanması durumunda  $u(k)$  kontrol çıkışı olan sisteme uygulanan torkdaki değişim verilmektedir.

## 4. Sonuçlar ve Öneriler

Şekil 6 ve 7' den görüleceği gibi PD kontrol BMD kontrole nazaran daha kısa sürede ve aşım yapmadan referans değeri olan 40° 'ye ulaşmaktadır. BMD kontrolde, yüksüz durumda katı kol yaklaşık 6 derece aşımla, esnek kol ise yaklaşık 8 derecelik bir aşımla referans değerine ulaşmakta ve sönümlü serbest titreşim karakterine uygun bir davranış sergilemektedir. Sonuçta BMD kontrolde de referans değerine ulaşmaktadır. Her iki kontrol metodunda da her ne kadar uç noktasının titreşim genliği aynı mertebede olsa bile PMD kontrolde bu titreşimlerin esnek kolun hareketi boyunca devam ettiği görülmektedir. Robotun su altında çalışması durumunda, ortamın titreşimleri sönümleyici etkisi nedeniyle her iki kolun çok az bir salınımla referans değerine ulaştığı gözlenmektedir. Şekil 12' de üç üyelik fonksiyonu kullanılarak BMD kontrol uygulanması durumunda kontrol sinyalinin keskin ani değişimler sergilediği görülmektedir. Bu da salınımların başlıca nedenidir. BMD kontrolde üyelik sayısının artırılması durulaştırıcı ünitesindeki çıkış değerleri arasında daha yumuşak bir geçişe imkan vereceğinden salınımların azalacağı beklenmektedir. Ayrıca bu çalışmada durgun su altı ortamında robot kolların hareketlerinin benzetimi yapılmıştır. Akıntılı, sürekli değişken bir ortamın BMD kontrolün PD kontrole olan üstünlüğünü ortaya çıkaracağı tahmin edilmektedir. Bu öneriler çalışmanın devamını teşkil etmektedir.

## 5. TEŞEKKÜR

Yazarlar, 2003.112.003.3 no'lu proje kapsamında yapılan çalışmaya gösterdiği destekten ötürü KTÜ Bilimsel Araştırma Proje Birimi'ne teşekkür eder.

## 6. KAYNAKÇA

- [1] Cannon, R.H., E. Schmitz, "Initial Experiments on the End-Point Control of a Flexible One-Link Robot", International Journal of Robotic Research, 3 (3), Fall1984, 62-75.
- [2] Somolinos, J.A., Feliu, V. ve Sanchez,L., Design, Dynamic Modelling and Experimental Validation of a New Three-Degree-of-Freedom Flexible Manipulator, Mechatronics, 12, 2002, 919-948.
- [3] Sakawa, Y., Matsuno, F. ve Fukushima, S., Modelling and Feedback Control of A Flexible Arm, Int. Journal Robotics, 2, 1985, 435-456.
- [4] İftar, A., Robust Controller Design for Flexible Robot Manipulators: An Optimal Output Feedback Controller Design Approach, In Proceedings of 3rd IEEE Conference on Control Applications, August 1994, Glasgow, Scotland, 1323-1328
- [5] Bernzen, W., Active vibration control of flexible robots using virtual spring-damper systems Journal of Intelligent and Robotic Systems 24: 69–88, 1999.
- [6] Takagi, T. and Sugeno, M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control, IEEE Trans. Systems Man Cybernet. 15(1) (1985), 116–132.
- [7] Zadeh, L. A.: Fuzzy sets, Information and Control 8 (1965), 338–353.
- [8] Nguyen, H. T. and Prasad, N. R., Fuzzy Modeling and Control, CRC Press, New York, 1999
- [9] Tzes, A., Kyriakides, K., A hybrid frequency–time domain adaptive fuzzy control scheme for flexible link manipulators, Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol. 10, N. 3 ,July 1994, 283 – 300.
- [10] Kanakakis, V. , Valavanis, K. P. ,\_ and Tsourveloudis, N. C., Fuzzy-Logic Based Navigation of Underwater Vehicles, Journal of Intelligent and Robotic Systems 40, 2004,45–88.
- [11] Gürsel, N., Karada ve Su Altında Çalışan Esnek Kollu Robotların Modellenmesi ve Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2004.