

**MRAC PD İLE GEMİ ROTA KONTROLÜ****Fuat ALARÇİN\****Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Gemi İnşaatı Mühendisliği Bölümü,  
Yıldız-İSTANBUL***Geliş/Received: 03.06.2003 Kabul/Accepted: 07.01.2004****MODEL REFERENCE ADAPTIVE PD DESIGN FOR SHIP COURSE AUTOPILOT****ÖZET**

Bu çalışmada gemi dümeninin Model Referans Adaptif metod ile kontrolü amaçlandı. Gemi dinamiği 1. dereceden Nomoto modeli ile ifade edildi. Kapalı çevrimli MRAC PD kontrol sistemi incelendi ve Lyapunov denklemleri ile kararlılık sağlandı. Gemi rota kontrolü gradyen metodu ile adapte edildi. Son olarak da, model alınan gemi baş açısı hem klasik hem de adaptif metod arasında karşılaştırma yapıldı.

**Anahtar Sözcükler:** Gemi otopilotu, Adaptif kontrol sistemi, PID kontrol, Gradient metod

**ABSTRACT**

Model Reference adaptive control scheme is considered in this study. We assumed that Nomoto's 1<sup>st</sup> order model can represent the steering dynamics of the ship. Model reference adaptive PD controller with close loop is adjusted by the Lyapunov approach. The ship course keeping controllers are adopted by the use of the Gradient method. Finally, we will be done an extensive simulation to compare the different controller.

**Keywords:** Ship autopilot, Adaptive control systems, PID control, Gradient method

**1. GİRİŞ**

Kontrol teorisinin amacı, verilen bir dinamik sistemin belirli değerler etrafında kalmasını ve istenen değişimler göstermesini sağlamaktır. Bu amaç üç ayrı göreve ayrılabilir. Sistem dinamiklerinin kararlı hale getirilmesi, kontrol edilmesi ve bozucuların yok edilmesi. Çevre şartlarının sistem parametrelerini büyük ölçüde değiştirdiği ve giriş değerlerinin önceden kestiremediği uygulamalarda klasik kontrol yetersiz kalmaktadır.

Adaptif kontrolcü belirsizliklerin var olduğu, yapısal bozukluklar ve çevre değişikliklerinin mevcut olduğu sistemlerin kontrolü ile ilgilenir. Adaptif kontrolün yaygın olarak kullanılan iki yaklaşım prensibi vardır. Bunlardan biri MRAC (Model Referans Adaptif Kontrol) diğeri de kendi kendini ayarlayan kontrol metodlarıdır, [1,2].

Klasik gemi dümen otopilotlarının çalışması genel olarak sabit parametrelili PD kontrol esasına dayanır, [3]. Bu kontrolcüler özel şartlarda oldukça iyi sonuçlar verir. Fakat koşulların, sevk hızı, yüklenme ve çevre etkilerinin (rüzgar, dalgalar, akıntılar vb.) değişimi ile geminin rotasında sapmalar meydana gelir. Bu nedenle sığ ve dar denizlerde doğru rota kontrolü oldukça

\* e-mail: [alarcin@yildiz.edu.tr](mailto:alarcin@yildiz.edu.tr) ; tel: (0212) 259 7070/2842

## MRAC PD ile Gemi Rota Kontrolü

büyük öneme sahiptir, [4]. PID kontrolcüsünün kullanımı ile düşük frekanslı bozucu etkiler ortadan kaldırılarak otopilotun performansında artış görüldü. Pratikte bu klasik kontrolcü kazançlarının hesaplanması ve uygun değerlerinin seçimindeki zorluklar kendi kendini ayarlayan kontrolcü dizaynına ilginin artışına neden olmuştur, [5, 9,11].

MRAC sistemleri için, sistemin dinamik performansını belirlemek gerekmediğinden, oldukça yüksek adaptasyon hızı ile gerçeklenmeleri kolaydır. Bu kontrol metodu ilk defa 1975' de Amerongen ve Ten Cate tarafından gemi baş açısının kontrolü için kullanıldı, [6,7]. MRAC sistemindeki amaç, bilinmeyen sistem çıkışı kontrol sisteminin bir parçası olan referans model çıkışına asimptotik olarak yaklaştırmaktır. Uygun yaklaşımın sağlanması için, kontrolcü parametreleri Gradyen metodu ile tanımlandı. Parametrelerin zamanla değişimi performansı etkilediğinden adaptasyon esnasında parametreler düzenli olarak güncellenmektedir. Ayrıca çevre etkileride performansın önemli miktarda azalmasına sebep olmaktadır. Kontrolcü bu etkileri dikkate almazsa istenen yaklaşımı sağlayamayacaktır, [8,10].

Bu çalışmada ilk olarak Nomoto modeli esas alınarak sabit parametrelili gemi dümen kontrolü, ikinci kısımda da adaptif metod olan MRAC ile PD kontrol birleştirilerek Gradyen yaklaşımı ile kontrolcü tasarımı yapıldı. Son olarak MRAC PD sistemi için Lyapunov kararlılık analizi yapıldı, [12].

### 2. SABİT PARAMETRELİ PD KONTROLCÜ TASARIMI

Otopilot kullanımında genel olarak iki farklı kontrolcü yapısı vardır. Bunlardan birincisi sürekli rejimde rota korunumu diğeri de rota değişimi. Gemi dinamiğinde oluşan sapmalar lineerleştirilmiş Nomoto modeli ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir, [4].

$$T \ddot{y} + \dot{y} = K d \quad (1)$$

$\ddot{y}$  - Savrulma açısal ivmelenmesi (rad / s<sup>2</sup>)

$d$  - Dümen açısı (rad)

$\dot{y}$  - Savrulma açısal hızı veya döme oranı (rad / s)

$K$  - Orantı kazancı (1/s)

$y$  - Savrulma açısı (rad)

$T$  - Zaman kazancı (s)

$T$  ve  $K$  kazançları 1. nci dereceden Nomoto parametreleridir. Her iki tarafın Laplace'sı alınırsa son durum aşağıdaki gibi olur.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{d(s)} = \frac{K}{s(1+Ts)} \quad (2)$$

$y$  gemi baş açısı,  $d$  dümen açısıdır.  $K$  ve  $T$  parametrelili yüklenme, su derinliği, gemi hızı faktörlerine bağlıdır. Kazanç ve zaman sabiti hız ile orantılıdır.

$$K = K_0 u \quad T = \frac{T_0}{u} \quad (3)$$

$u$  gemi hızı.

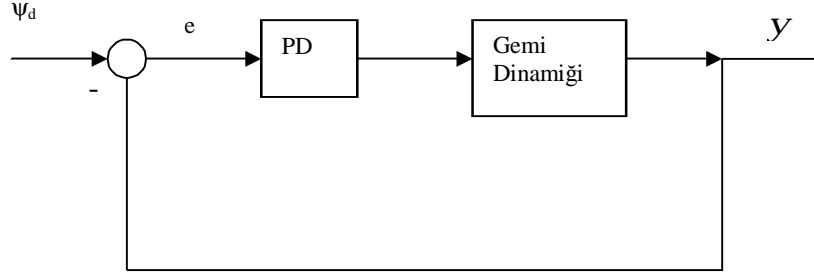
$$\dot{d} = K k_p (y_d - y) - k_d \dot{y} \quad (4)$$

$k_p > 0$  ve  $k_d > 0$  kontrolcü kazanç değerleridir. PD tipi düzenleyici kullanılırsa, kapalı çevrim transfer fonksiyonu, [10,12].

$$T s^2 + (1+k_d K) s + k_p K = 0 \quad (5)$$

Şekil 1 'de klasik PD kontrol uygulanmış gemi blok diyagramı gösterilmektedir.

$k_d$  türev etki kazanç değeri arttırıldığında sönüm değerinin arttığı ve böylece sistemin kararlı hale yaklaştığını gözlemleyebiliriz. Osilasyon olmayan sistemlerde sönüm  $z = 1$  ve doğal frekansı sistem hızından bağımsızdır. Bu kontrolcünün dezavantajı gemi hızı azaldığında performansı da azalmaktadır, [5].



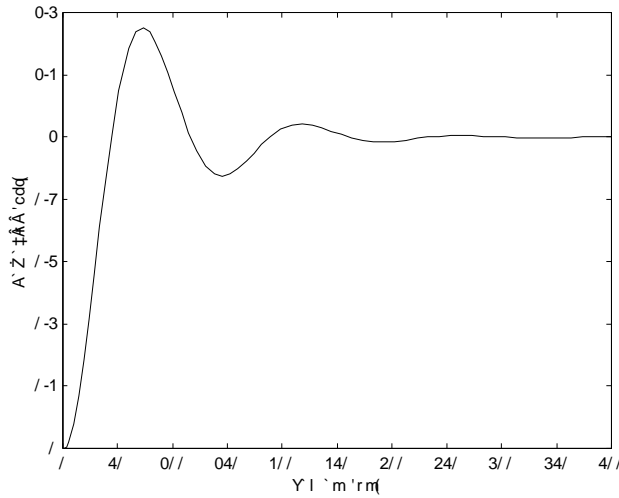
Şekil 1. PD kontrolcü ile gemi rota kontrolü

sönüm,

$$z = \frac{1}{2} \left( \frac{1 + K_d K}{\sqrt{K_p K T}} \right) \quad (6)$$

### 2.1. PD Kontrol Metoduna Göre Bilgisayar Simülasyonu

Gemi hareketi basamak referans esas alınarak kritik sönümlü biçimde 100 s ile 300 s arası sürede incelenmesi öngörülmüştür. Gereksinimlere göre tasarlanan PD kontrolcü parametreleri aşağıda verilmiş ve bu tasarıma ilişkin simülasyon çalışmaları Şekil 2 ve Şekil 3 'de sunulmuştur.

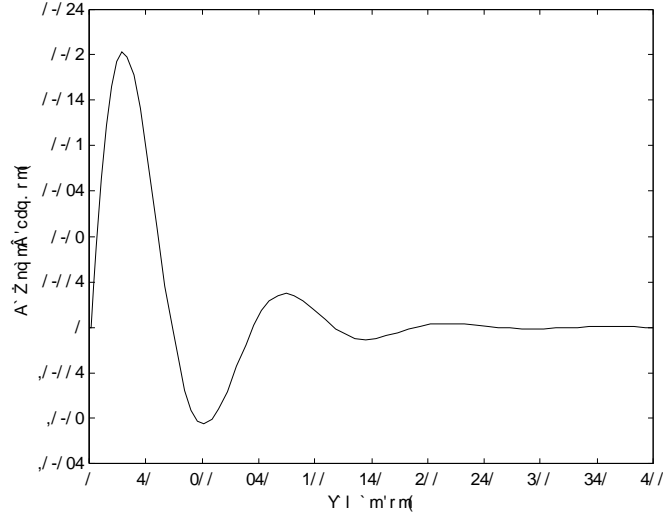


Şekil 2. Gemi baş açısının PD kontrol kuralı ile basamak cevapları

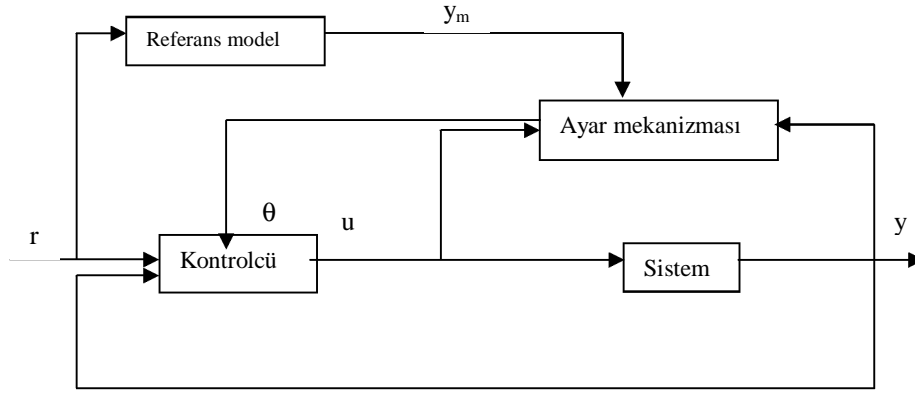
### 3. GRADIENT YAKLAŞIMI İLE MRAC UYGULAMASI

Model referans adaptive kontrolde amaç sistemin çıkışının referans model çıkışını takip etmesidir. Uygun bir takip olması için kontrolcü parametreleri ayarlanmalıdır. Bu kısımda parametrelerin ayarlanması MIT (Massachusetts Institute of Technology) kuralı ile açıklanacaktır. MRAC sisteminin genel yapısı Şekil 4'deki gibidir.

## MRAC PD ile Gemi Rota Kontrolü



Şekil 3. PD kontrolcü ile kontrol edilen geminin baş açısı oranı değişimi



Şekil 4. Model referans adaptif kontrol blok şeması

Literatürdeki bazı Model Referans Adaptif Kontrol çalışmaları, [6], [7], [9] şeklinde verilebilir.

### 3.1. MIT Kuralı

Düzenleyici parametresinin değişimi sistem çıkışı ile referans model çıkışı arasındaki hata miktarının sıfıra yaklaştıracak şekildedir. Gradient metodu ile yapılan parametre ayarında tanımlanan amaç fonksiyonu kontrolcü parametreleri ile ayarlanarak minimize edilmelidir, [1,8].

$$J(q) = \frac{1}{2} e^2(t) \quad (7)$$

'e' hata miktarı, 'q' ayar parametresidir. Amaç fonksiyonunun minimum olması için parametreler J'nin negatif gradyeni doğrultusunda kısmi türevleri alınarak elde edilir.

$$\frac{dq}{dt} = -g \frac{\partial J}{\partial q} = -g e \frac{\partial e}{\partial q} \quad (8)$$

Hatanın ayar parametresine göre kısmi türevi  $\frac{\partial e}{\partial q}$  duyarlılık parametresi olarak ifade edilir. Bu ifade ayar parametresinin, ufak değişimlerin hatayı nasıl etkilediğini gösterir.

### 3.2. Birinci dereceden sistemlere MRAC uygulaması

Model alınan denklem

$$\frac{dy}{dt} = -a y + b u \quad (9)$$

$u$  kontrolcü değişkeni  $y$  ölçülen çıkış değeridir. İdeal model olarak kapalı çevrimli bir sistem kabul edilirse.

$$\frac{dy_m}{dt} = -a_m y_m + b_m u_c \quad (10)$$

İstenen modeli takip edilmesi için kontrolcü değişimi aşağıdaki gibi olmalıdır.

$$u(t) = t_0 u_c(t) - s_0 y(t) \quad (11)$$

düzenleyici parametreleri,

$$t_0 = \frac{b_m}{b}, \quad s_0 = \frac{a_m - a}{b} \quad (12)$$

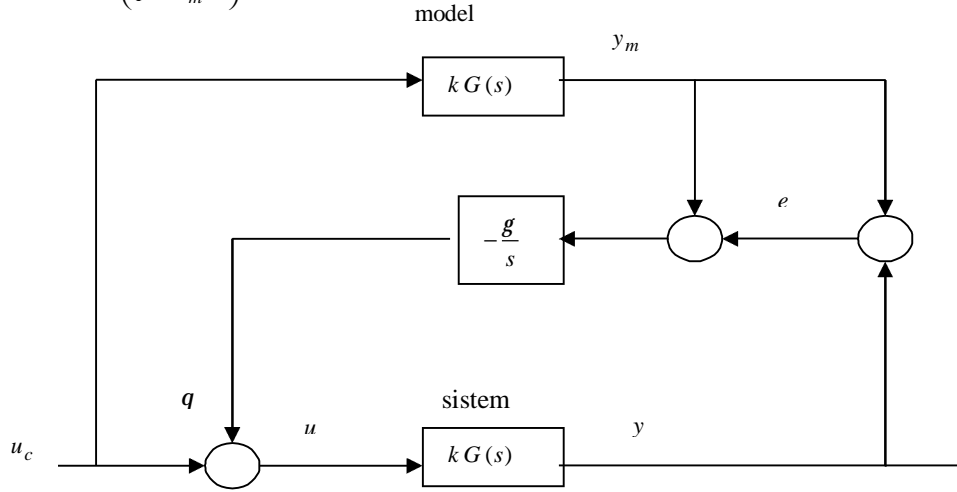
hata miktarı ifade edilirse,

$$e = y - y_m \quad (13)$$

düzenleyici parametre türevleri,

$$\frac{dt_0}{dt} = -g \left( \frac{1}{p + a_m} u_c \right) e \quad (14)$$

$$\frac{ds_0}{dt} = g \left( \frac{1}{p + a_m} y \right) e \quad (15)$$



Şekil 5. MIT kuralı blok diyagramı

#### 4. BİR KARGO GEMİSİNİN MRAC PD İLE ADAPTASYONU

Boyu  $L = 160$  m,  $U = 7.7$  m/s hızı ile seyir eden, bir pervane ve dümene sahip bir kargo gemisi model olarak alındı.

Otopilotun düzgün çalışması için çevre şartları, gemi dinamiği ve hızının bilinmesi gerekir. Klasik kontrolde yükleme şartları dikkate alınmadan kararlılık analizi yapılırken adaptif kontrolde bütün şartlardaki kararlılık ifade edilmektedir. Adaptif kontrol sistemleri zamanla değişen parametrelili sistemlerde uygulanabilir. Klasik kontrol ile karşılaştırıldığında kontrolcü daha hızlı ayar edilir, aynı zamanda daha doğru ve ekonomiktir, [11].

Gemi için amaç fonksiyonu,

$$J(q) = \frac{1}{2} y_e^2(t) \quad (16)$$

Gemi baş açısı hata miktarı,

$$y_e = Y - Y_m \quad (17)$$

(8) deki kısmi türev işlemi uygulandığında

$$\frac{dq}{dt} = -g y_e(t) \frac{\partial y_e(t)}{\partial q} \quad (18)$$

Lineerleştirilmiş gemi model denklemleri (Nomoto),

$$t \ddot{y}(t) + \dot{y}(t) = K d(t) \quad (19)$$

PD kontrol uygulandığında

$$t \ddot{y}(t) + \dot{y}(t) = K (k_p (y_r(t) - y(t)) - k_d \dot{y}(t)) \quad (20)$$

$k_p$  ve  $k_d$  sırasıyla oransal ve türev kazançlarıdır.  $y_r(t)$  geminin istenen baş açısıdır.

$$\ddot{y}(t) + \left( \frac{1 + K k_d}{t_1} \right) \dot{y}(t) + \left( \frac{K k_p}{t_1} \right) y(t) = \left( \frac{K k_p}{t_1} \right) y_r(t) \quad (21)$$

(21) denkleminin Laplace transformasyonu uygulanırsa

$$y(t) = \frac{\left( \frac{K k_p}{t_1} \right)}{s^2 + \left( \frac{1 + K k_d}{t_1} \right) s + \left( \frac{K k_p}{t_1} \right)} y_r(t) \quad (22)$$

#### Referans Model :

Referans model olarak lineer, ikinci dereceden zamanla değişmeyen bir sistem gözönüne alınacaktır. Böyle bir seçimin amacı, istenen model performansına ait yükselme zamanı, yüzde aşım, yerleşme zamanı gibi karakteristiklerin minimum sayıda parametre ile belirlenmesidir. Referans modelin kapalı çevrim biçimindeki dinamiği,

$$y_m(t) = \frac{w_n^2}{s^2 + 2z w_n s + w_n^2} y_r(t) \quad (23)$$

Gemi modeli ve referans model durum uzayı formuna dönüşüm yapıldı.

Referans model,

$$\frac{d y_m}{dt} = -a_m y_m + b_m u_c \quad (24)$$

sistem,

$$\frac{d y}{dt} = -a y + b u \quad (25)$$

kontrolcü,

$$u = q_1 u_c - q_2 y \quad (26)$$

hata

$$e = y - y_m \quad (27)$$

elde edilir.

#### 4.1. Lyapunov Kararlılık Teoremi

Diferansiyel denklemin kararlı olması için, oluşturulan Lyapunov fonksiyonunun aşağıdaki kurallara uygun olması,

1.  $t \in \mathbb{R}$  için  $V(0,t) = 0$
2.  $V$  pozitif tanımlı ve fonksiyonunun zamana göre türevi alınabilir olmalı
3.  $\dot{V} \leq 0$  olmalı,

Hata sıfır olursa fonksiyonda sıfır olur ve kontrolcü parametreleri optimal değere eşit olur. İkinci dereceden sistemin Lyapunov fonksiyonu,

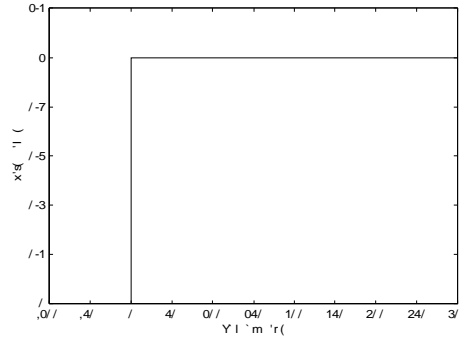
$$V(e, q_1, q_2) = \frac{1}{2} \left( e^2 + \frac{1}{\frac{K k_p}{t_1} g} \left( -\frac{K k_p}{t_1} q_1 + 2z w_n - \frac{1 + K k_d}{t_1} \right)^2 + \frac{1}{\frac{K k_p}{t_1} g} \left( \frac{K k_p}{t_1} t_0 - w_n^2 \right)^2 \right) \quad (28)$$

Lyapunov fonksiyonunun türevi 3. maddeye uygun olduğundan, negatif tanımlı ve modelimiz asimtotik kararlıdır.

#### 5. MODEL REFERANS ADAPTİF KONTROL METODUNA GÖRE BİLGİSAYAR SİMÜLASYONU

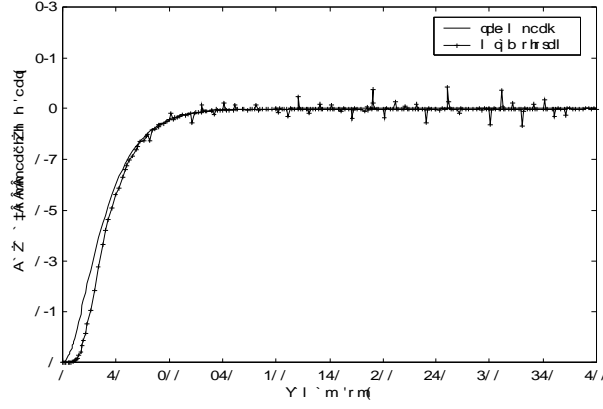
Gemi dinamiği 2. dereceden Nomoto modeli ile ifade edildi. Gemi baş açısının sönüm oranı  $\zeta = 1$  (kritik sönümlü) ve doğal frekans  $w_n = 0.05$  olan sabit katsayılı ikinci dereceden sistemin çıkışı gibi değişmesi öngörülerek inceleme yapılmıştır. Giriş fonksiyonu olarak basamak giriş kabul edildi. Referans model, kontrolcü ve uyarlama parametreleri aşağıdaki gibi kabul edilerek simülasyonlar yapılmıştır. Model Referans Adaptif kontrol başarımını gösteren simülasyon sonuçları Şekil 8 Şekil 9, Şekil 10 'da sunulmuştur.

Her iki kontrol yöntemi için oluşturulan simülasyon programları ile iki serbestlik dereceli gemi modelinin baş açısı dümen arasındaki davranışın değişimi incelendi. Analiz sırasında geminin basamak şeklinde 1 m. yüksekliğindeki bir dalgaya girdiği düşünülmüştür. Şekil 7' de dalga giriş fonksiyonu gösterilmiştir.

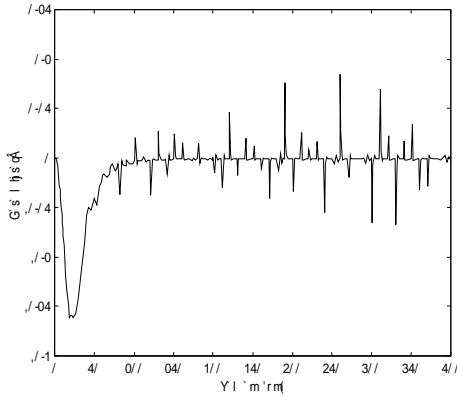


Şekil 7. Dalga giriş fonksiyonu

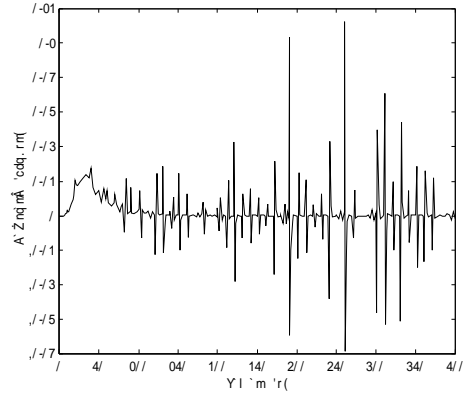
## MRAC PD ile Gemi Rota Kontrolü



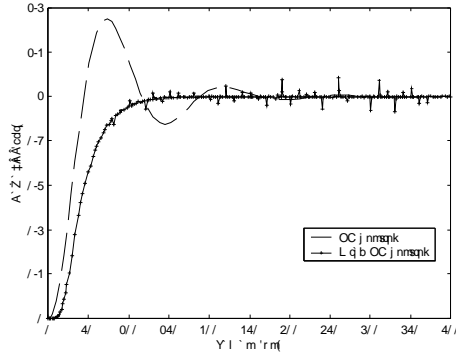
Şekil 8. Gemi baş açısının değişimi



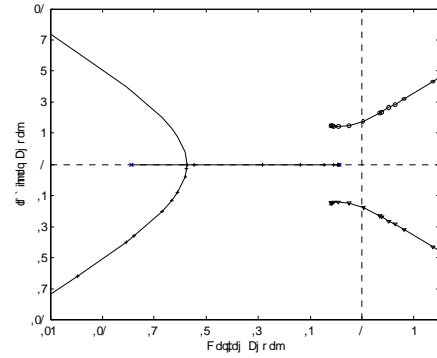
Şekil 9. MRAC sistemde hata değişimi



Şekil 10. Gemi baş oranının değişimi



Şekil 11. Klasik PD ve MRAC PD Kontrol



Şekil 12. Köyery diyagramı

Nomoto modeli esas alınan geminin PD kontrolcü ile yapılan bilgisayar simülasyon sonuçlarından da görüldüğü gibi, incelemede ön görülen sonuçlar elde edilmiştir. Gemi baş açısı



250 sn.'de aşım yapmaksızın referans değere yerleşmektedir, Şekil 2. Bilindiği gibi PD kontrol kuralı, dış bozuculara ve modellenmemiş belirsizliklere karşı dayanıklı değildir.

J.V.Amerongen, J.U. Cate, 'in literatürde ilk kez uyguladıkları bu Model Referans Adaptif kontrol metodu bir gemi baş açısına uygulanmış ve elde edilen simülasyon sonuçları, Şekil 8 ve Şekil 11 'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan da öngörüldüğü üzere bu metodun gemilere uygulanabilirliği mevcuttur. Lyapunov kararlılık analizi ve kök yeri diyagramından da görüldüğü üzere baş açısının kararlı bir davranışa sahip olduğu belirlenmiştir .

## 6. SONUÇ

Bu çalışmada, bir gemi için farklı kontrol yöntemleri uygulanarak PD ve MRAC PD kontrol metodlarının baş açısının kontrol açısının sönmülmesi amaçlandı. MRAC PD kontrol sisteminin kararlılığı Lyapunov yaklaşımı ile elde edildi. Simülasyon sonucunda, performansın istenen amaca uygun olduğu görüldü.

## KAYNAKLAR

- [1] B.M. Vinagre, I. Petras, 'Using Fractional Order Adjustment Rules and Fractional Order Reference Models in Model-Reference Adaptive Control', Nonlinear dynamics Vol. 29, 269-279, 20002.
- [2] C.J. Harris, S.A. Billings, 'Self-Tuning and Adaptive Control Theory and Applications', Peter Peregrinus Ltd., London, 1981.
- [3] Erkal, M., 'Adaptive and Nonadaptive Control Schemes for Ship Steering', Y.Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, 1998.
- [4] Fossen, Thor I., 'Guidance and Control of Ocean Vehicles', Norway,1994.
- [5] H. Rasmussen, 'Automatic Tuning of PID Regulators', Denmark, Sept. 6, 2002.
- [6] J.V.Amerongen, J.U. Cate, 'Model Reference Adaptive Autopilots for Ships', Automatica, Vol.11, 441-449, 1975.
- [7] J.V.Amerongen, 'Adaptive Steering of Ships- A model Reference Approach', Automatica, Vol.20, 3-14, 1984.
- [8] K.J.Aström, B.Wittenmark, 'Adaptive Control',Lund Inst.of Tech., 105-159, 1989
- [9] R. Grahanan, 'Adaptive PID Control of Nonlinear Systems', Msc,
- [10] S. Nejm, 'Design of Limited Authority Adaptive Ship Steering Autopilots', Int.J. Adapt. Control Signal Process, V 14, 381-391, 2000. of Illinois, October 14, 1999.
- [11] T.Y. Kuc, W.G. Han, 'An Adaptive PID Learning Control of Robot Manipulators', Automatica 36, 717-725, 2000.
- [12] P. Smith, D.W.Jordan, 'Nonlinear Ordinary Differential Equations', Oxford University Press, 1977.