



Bir Yolcu Gemisinin Düşey İvmelerinin Azaltılması için Statik Çıkış Geri Beslemeli Kontrolör Tasarımı

Hakan YAZICI¹, Ferdi ÇAKICI²

¹Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Türkiye

²Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Türkiye

hyazici@yildiz.edu.tr; ORCID ID: orcid.org/0000-0001-6859-9548

fcakici@yildiz.edu.tr; ORCID ID: orcid.org/0000-0001-9752-1125

Öz

Karışık deniz durumlarında bir gemi formunun düşey ivmelenmelerin kontrol edilebilmesi denizcilik açısından önemli ve güncel bir konudur. Bu çalışmada, seçilen bir yolcu gemisinin baş kısmında bulunan yolcular için, baştan gelen düzenli dalgalar senaryosu incelenmiş ve hesaplanan düşey ivme değerlerinin belirli bir üst limitin altında kalmasını garanti edecek bir kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Karışık deniz için gemi hareketleri hesaplamaları Lineer Süperpozisyon tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma hareketlerinin birleşik olarak düşünüldüğü iki serbestlik dereceli lineer bir matematiksel model kullanılmıştır. Operasyon anında, geminin tüm durum değişkenlerinin ölçülmesi pratikte uygun olmadığından, bu çalışmada, kolayca ölçüm alınabilen durum değişkenlerinin kullanıldığı statik çıkış geri-beslemeli kontrolör bozucu dalga etkisinde modellenen geminin düşey ivmelerinin azaltılması için tasarlanmıştır. Çalışmanın sonunda, önerilen kontrol yaklaşımının etkinliğinin gösterilmesi için nümerik benzetim çalışmaları yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Gemi Hareketleri, Statik Çıkış Geri-Beslemeli Kontrolör, Lineer Matris Eşitsizlikleri, Deniz Tutması.

A Static Output Feedback Controller Design for Reducing Vertical Acceleration of a Passenger Ship

Abstract

Being able to control vertical accelerations of a ship form in irregular seas is an important and current issue in terms of maritime. In this study, head waves scenario has been investigated for the passengers sitting at the bow part of the ship and a controller design has been implemented to guarantee that the calculated vertical acceleration values are below an upper limit. Ship motion calculations in irregular seas have been examined by using the Linear Superposition Principle. A linear mathematical model has been used to simulate 2-DOF coupled heave and pitch motions. In this study, considering that state variables for a ship in operation are not measurement available in practice, a static output feedback controller which uses easily measurable state variables are designed to mitigate the vertical accelerations of modeled disturbance waves induced ship. Finally, numerical simulation studies have been done to illustrate the effectiveness of the proposed control approach.

Keywords: Ship Motions, Static Output-Feedback Controller, Linear Matrix Inequalities, Sea Sickness.

To cite this article: Yazıcı, H. and Çakıcı, F. (2017). Bir yolcu gemisinin düşey ivmelerinin azaltılması için statik çıkış geri beslemeli kontrolör tasarımı. *Journal of ETA Maritime Science*, 5(4), 322-332.

To link to this article: <https://dx.doi.org/10.5505/jems.2017.18209>

1. Giriş

Düzenli veya karışık deniz ortamında altı serbestlik dereceli gemi hareketlerinin hesaplanması denizcilik disiplinleri arasında en zor olanlarından [1]. Bunun nedeni, akışın türbülanslı olması, serbestlik derecesinin fazlalığı, hareketlerin birbirlerini etkilemeleri ve dalga etkileşimleridir. Fakat, viskoz etkilerin ihmal edilebileceği ve serbestlik derecesinin ikiye düşürülebileceği gemi düşey hareketleri (dalıp çıkma ve baş kıç vurma) için hesaplama yükleri göreceli olarak daha azdır. Elde edilen hareket denklemlerinde yer alan bilinmeyen katsayılar, serbest su yüzeyinde salınım yapan bir kesitin hidrodinamik davranışlarının çeşitli yöntemlerle hesaplanması ve dilim teorisi [2] yardımı ile bütün gemi boyunca entegre edilerek toplanması ile elde edilir. Dilim teorisi, viskoz etkiler tamamen ihmal edildiği için ve akışın rotasyonel olmaması sebebi ile potansiyel bir teoridir. Bu teorinin geçerli olabilmesi için yapılan en büyük kabul geminin boy/en oranının göreceli olarak yüksek olması ve gemi hızının düşük olmasıdır.

Bir geminin denizcilik performansının belirlenebilmesi için geminin tipi ve görev tanımı doğru belirlenmelidir. Bir yolcu gemisi için taşıyabildiği yolcu sayısının yanında, sahip olduğu hız da çok önemli bir parametredir. Fakat dalga temelli hareketler yüksek gemi hızlarında rahatsız edici boyuta ulaştığı için denizde konfor parametresinin de hesaba katılması gerekmektedir. Bir geminin şiddetli bir deniz durumunda hareketlerinin azaltılması için yapılan eylem, genellikle gemi kaptanın hız kesmesi ve geminin hareketlerini yumuşatmasıdır. Gemi hareketlerin azaltılamaması yolcularda yorgunluğa ve deniz tutması olarak adlandırılan olaya sebep vermektedir. Bu sebeple, yolcuları olumsuz etkileyecek düşey ivmelerin belirli bir eşik değerine kadar azaltılması için kontrol tabanlı bir model sunulabilir.

probleme çözüm bulunabilir.

Gemi düşey hareketlerinin insan üzerindeki etkilerini keşfetmek amacı ile yapılan ilk çalışmalar O'Hanlon ve McCauley'in deneysel çalışmasıdır [3]. Bu çalışma ABD ordusu desteği ile kalabalık bir grup gönüllü öğrencinin katılımı ile yapılmıştır. Maruz kalınan hareketin frekansları, şiddetleri ve süreleri göz önünde bulundurularak bazı grafikler elde edilmiştir. Düşey ivme kriter değerinin yolculuk süresi ile ters orantılı olarak değişirken rahatsız edici frekansın 0.17 Hz civarında olduğu gözlemlenmiştir. Uluslararası Standartlar Teşkilatı (ISO) bu grafikleri lineer hale getirerek Tablo 1'de verilen seyahat sürelerine karşılık gelen düşey ivmelenme üst limit değerlerini elde etmiştir [4, 5].

Tablo 1. Seçilen İvmelenme Seviyeleri

Yolculuk Süresi	RMS Düşey İvmelenme Kriter Değeri [m/s ²]
4 saat	0.315
2 saat	0.500
1 saat	0.707
30 dakika	1.00

Yapılan bu çalışmaların ardından dalga bozucusu etkisiyle oluşan gemi düşey hareketlerinin aktif kontrolü için çok sayıda kontrolör tasarımı içeren çalışma literatüre kazandırılmıştır. Esteban ve diğerleri (2000) yapmış oldukları çalışmada yüksek hızlı bir feribot formu için dalıp-çıkma ve baş-kıç vurma ivmelenmelerinin azaltılması amacı ile PID (Proportional-Integral-Derivative) tabanlı kontrolcü tasarlamışlardır. Çalışmalarında önerdikleri eyleyicilerle (Aktif kanat ve T-foil) ivmelenmeleri ortalama % 26.5 oranında azaltmışlardır [6]. Lopez ve diğerleri (2002) yaptıkları çalışmada hızlı bir gemi formunun bulanık modeline dayanarak tasarladıkları bulanık kontrol sistemi ile deniz tutmasının ana sebebi olan düşey ivmeleri başarılı bir şekilde azaltmışlardır [7]. Bu çalışmanın

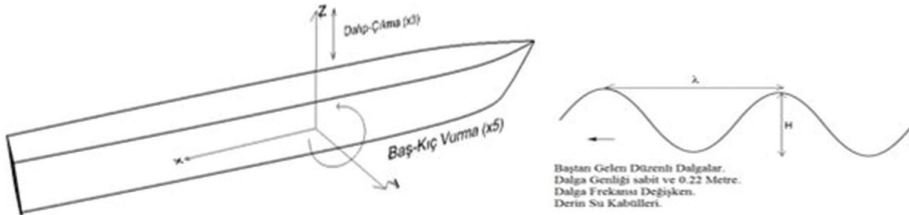
sonunda literatürde var olan temel modellere göre gemi kaptanlarına, gemi tasarlayıcılarına ve eyleyici mühendislerine bazı kriter değerler sunmuşlardır. Esteban ve diğerleri (2005) çalışmalarında 120 metre boyunda derin V formunda ve üç su jeti ile sevk eden alüminyum bir teknenin farklı hızlarda farklı deniz durumlarında ve farklı karşılaşma rotalarında denizcilik deneylerini yapmışlardır. Elde ettikleri deneysel verilere dayanarak kontrolcü tasarlamışlardır [8]. Giron-Sierra ve diğerleri (2005) İspanya'daki armatörlerin de desteği ile deniz tutması tahmini, navigasyon, deneysel modellemesi kontrol tasarımı ve deneysel gerçekleştirme gibi kavramlar üzerinde bir makale yayınlamışlardır [9]. Giron-Sierra ve Esteban (2008) yapmış oldukları çalışmada yüksek hızlı bir tekne formu için frekans düzlemindeki düzenli dalgalar içindeki hareketlerinden yola çıkarak eyleyici doyumlu ve limitsiz durumdaki kontrol kuvvetlerini hesaplamışlardır [10]. Bir başka çalışmalarında Esteban ve diğerleri (2004) optimal kontrol yaklaşımı ile bozucu dalga etkisindeki gemi hareketlerini sönmülemeyi başarmışlardır [11].

Bu çalışmanın amacı, incelenecek yolcu gemisinin baştan gelen karışık dalgalarda Deniz Durumu 3 (DD3) için hesaplanan ve $1,30 \text{ m/s}^2$ olan RMS (Kareler Ortalaması Karekökü) düşey ivme değerinin 1 m/s^2 civarına indirip yolcular için konforlu bir yolculuğu sağlayacak bir kontrolör tasarlamaktır. Tablo 1'de gösterildiği gibi 1 m/s^2 RMS düşey ivme değeri otuz dakikalık bir gemi yolculuğu için deniz tutması açısından üst limittir. Çalışmada

dalga etkisinde modellenen geminin düşey ivmelerinin azaltılması için tüm durum değişkenlerinin ölçülmesi yerine, sadece pratikte ölçülmesi daha kolay durum değişkenlerinin kullanıldığı statik durum geri beslemeli kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Önerilen kontrolörün tasarımında, dışbükey optimizasyon temelinde Lineer Matris Eşitsizlikleri (LME) yaklaşımı kullanılmıştır. Tasarımda ilk olarak lineer zamanla değişmeyen sistemin kararlılığı uygun Lyapunov aday fonksiyonu seçimi ile LME formunda elde edilmiştir. Daha sonra kontrolörün performansı kapalı çevrim sistemin bozucu girişlerinden performans çıkışlarına olan transfer fonksiyonları matrisinin L_2 kazancını minimize edecek şekilde tasarıma eklenmesi ile statik çıkış geri-beslemeli kontrolörün sentez denklemleri elde edilmiştir. Yapılan benzetim çalışmaları ile önerilen çıkış geri-beslemeli kontrolörün tatmin edici bir bozucu bastırma performansına sahip olduğu gösterilmiştir.

2. Matematiksel Model

Çalışmada kullanılan yolcu gemisi 42.5 metre boy, 4.80 metre genişlik ve 200 ton kütle sahiptir. Ayrıca, geminin baş kıç vurma kütle atalet momenti 22380 tonm^2 olup seyir hızı 20 knots'dır. Hareketi incelenen konum, yolcuların baş tarafta bulunduğu kabulü ile, gemi orta eksen üzerinde ve gemi ağırlık merkezinden baş tarafa doğru 15 metre mesafededir. Şekil 1'de, genliği sabit, frekansı değişken, baştan gelen düzenli dalgalar ile zorlanan gemi global koordinat sisteminde gösterilmiştir.



Şekil 1. Fiziksel Modelin Tanıtılması

Çalışmada, x_3 notasyonu dalıp çıkma hareketini, x_5 notasyonu ise baş-kıç vurma hareketini göstermektedir.

2.1. Düzenli Dalgalar İçindeki Gemi Hareketleri

Bu çalışmada sadece düşey hareketler dikkate alındığı için Denklem (1) ve (2)'de yer alan düşey hareket denklemleri kullanılmıştır.

$$(M + A_{33})\ddot{x}_3(t) + B_{33}\dot{x}_3(t) + C_{33}x_3(t) + A_{35}\ddot{x}_5(t) + B_{35}\dot{x}_5(t) + C_{35}x_5(t) = F_3 \cos(\omega_e t + \beta_3) \quad (1)$$

$$(I_5 + A_{55})\ddot{x}_5(t) + B_{55}\dot{x}_5(t) + C_{55}x_5(t) + A_{53}\ddot{x}_3(t) + B_{53}\dot{x}_3(t) + C_{53}x_3(t) = F_5 \cos(\omega_e t + \beta_5) \quad (2)$$

Burada, \ddot{x}_3 dalıp çıkma hareketin ivmesini, \dot{x}_3 dalıp çıkma hareketin hızını, x_3 dalıp çıkma hareketini, \ddot{x}_5 baş kıç vurma hareketin ivmesini, \dot{x}_5 baş kıç vurma hareketin hızını, x_5 baş kıç vurma hareketini, F_3 dalga kaynaklı dalıp çıkma kuvvetin büyüklüğünü, F_5 dalga kaynaklı baş kıç vurma momentinin büyüklüğünü, β_3 dalıp çıkma kuvveti faz farkını, β_5 baş kıç vurma momenti faz farkını, M geminin kütesini, I_5 geminin baş kıç vurma hareketi atalet momentini, C_{33} dalıp çıkma doğrultma katsayısını, C_{55} baş kıç vurma doğrultma katsayısını ifade etmektedir. Dalıp çıkma hareketi için elde edilen ek kütle ve sönüm katsayıları Denklem (3)'te yer verildiği gibi

$$A_{33} = \int_{-L/2}^{L/2} a_{33} dx - \frac{V}{\omega^2} b_{33}^A, \quad B_{33} = \int_{-L/2}^{L/2} b_{33} dx + Va_{33}^A \quad (3)$$

dilim teorisi ile hesaplanabilir [2].

Burada, A_{33} üç boyutlu gemi formu için dalıp çıkma ek kütesini, L gemi boyunu, a_{33} geminin enine kesitleri için dalıp çıkma ek kütesini, v geminin ilerleme hızını, ω gemi enine kesitinin salınım frekansını, b_{33}^A geminin en kıç tarafındaki kesitin dalıp çıkma sönümünü, B_{33} üç boyutlu gemi formu için dalıp çıkma sönümünü, b_{33} geminin enine kesitleri için dalıp çıkma

sönümünü ve son olarak a_{33}^A geminin en kıç tarafındaki kesitin dalıp çıkma ek kütesini ifade etmektedir. Denklem (3)'te yer alan a_{33} ve b_{33} katsayıları Fortran dili ile yazılmış bir denizcilik kodu yardımı ile bulunmuştur. Denklem (1) ve Denklem (2)'de yer alan diğer katsayıların ifadesi Salvesen ve diğerlerinin (1970) makalesinde bulunabilir [2]. Enerjileri göreceli olarak yüksek olan karşılaşma frekansları için Denklem (1) ve Denklem (2)'de yer alan katsayılar Tablo 2'de verilmiştir. Dilim teorisi ile hesaplanan dalga yükleri, 1 metre genlikli düzenli dalga içindir. DD3'te RMS dalga genliği 0.22 metre olduğu için, birim metre cinsinden hesaplanan dalga kuvvet ve momentleri bu bilgi göz önüne alınarak güncellenmiştir.

Tablo 2. Düşey Hareket Denklemlerinde Kullanılan Katsayılar

	$\omega_e = 2,09$ (rad/s)	$\omega_e = 2,21$ (rad/s)	$\omega_e = 2,347$ (rad/s)	$\omega_e = 2,51$ (rad/s)	$\omega_e = 2,702$ (rad/s)
M (ton)	203,00	203,00	203,00	203,00	203,00
A_{33} (ton)	146,37	145,35	145,432	146,85	149,86
B_{33} (ton/s)	315,25	299,28	280,29	257,95	232,00
C_{33} (ton/s ²)	1567,56	1567,56	1567,56	1567,56	1567,56
A_{35} (tonm)	-271,63	-158,60	-47,87	59,86	163,73
B_{35} (tonm/s)	2007,45	1958,81	1914,32	1875,43	1843,98
C_{35} (tonm/s ²)	1173,99	1173,99	1173,99	1173,99	1173,99
A_{53} (tonm)	1217,80	1104,76	999,04	902,53	817,47

./..

Tablo 2. Düşey Hareket Denklemlerinde Kullanılan Katsayılar (Cont')

	$\omega_e = 2,09$ (rad/s)	$\omega_e = 2,21$ (rad/s)	$\omega_e = 2,347$ (rad/s)	$\omega_e = 2,51$ (rad/s)	$\omega_e = 2,702$ (rad/s)
B_{53} (tonm/s)	947,46	-975,00	-1021,20	-1089,38	-1182,69
C_{53} (tonm/s ²)	1173,99	1173,99	1173,99	1173,99	1173,99
I_5 (tonm ²)	22380,00	22380,00	22380,00	22380,00	22380,00
A_{55} (tonm/m ²)	17923,40	17358,90	16936,40	16676,80	16602,25
B_{55} (tonm/s)	39180,90	36556,40	33678,00	30517,40	27056,33
C_{55} (tonm ² /s ²)	172215,00	172215,00	172215,00	172215,00	172215,00
F_{3R} (kN)	126,98	107,62	85,81	61,71	35,97
F_{3I} (kN)	25,88	22,09	17,81	13,15	8,32
F_{3A} (kN)	129,59	109,86	87,64	63,10	36,93
β_3 (rad.)	0,201	0,202	0,205	0,210	0,227
F_{5R} (kNm)	287,62	306,23	317,84	320,08	310,96
F_{5I} (kNm)	-1989,39	-1937,34	-1843,31	-1691,06	-1461,19
F_{5A} (kNm)	2010,09	1961,40	1870,51	1721,09	1493,92
β_5 (rad.)	-1,427	-1,414	-1,405	-1,383	-1,361

Denklem (1) ve Denklem (2), durum-uzay formunda,

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_w w(t) + B_u u(t) \quad (4)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada, $x(t) \in R^n$ sistemin durum vektörünü, $w(t) \in R^{m^w}$ bozucu giriş vektörünü, $u(t) \in R^{m^u}$ kontrol giriş vektörünü göstermektedir. A , B_w , B_u matrisleri ise sistemin bilinen uygun boyutlu durum-uzay matrisleridir. Durum -uzay vektör ve matrisleri,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ xh_1/P_1 & xh_2/P_1 & xh_3/P_1 & xh_4/P_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ xp_1/P_2 & xp_2/P_2 & xp_3/P_2 & xp_4/P_2 \end{bmatrix}, B_w = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1/P_1 & H/P_1 \\ 0 & 0 \\ P/P_2 & 1/P_2 \end{bmatrix}, B_u = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/P_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, w(t) = \begin{bmatrix} F_{3A} \\ F_{5A} \end{bmatrix},$$

$$u(t) = [U_3], x(t) = [z_1 \ z_2 \ z_3 \ z_4]^T$$

olarak yazılabilir. Burada,

$$P_1 = (M + A_{33}) - (A_{35} A_{53}) / (I_{yy} + A_{55}), \quad P_2 = (I_{yy} + A_{55}) - (A_{53} A_{33}) / (M + A_{33}), \quad xh_1 = -C_{33} + (A_{35} C_{53}) / (I_{yy} + A_{55}),$$

$$xh_2 = -B_{33} + (A_{35} B_{53}) / (I_{yy} + A_{55}), \quad xh_3 = -C_{35} + (A_{35} C_{55}) / (I_{yy} + A_{55}),$$

$$xh_4 = -B_{35} + (A_{35} B_{55}) / (I_{yy} + A_{55}), \quad xp_1 = -C_{53} + (A_{53} C_{33}) / (M + A_{33}), \quad xp_2 = -B_{53} + (A_{53} B_{33}) / (M + A_{33}),$$

$$xp_3 = -C_{55} + (A_{53} C_{55}) / (M + A_{33}), \quad xp_4 = -B_{55} + (A_{53} B_{55}) / (M + A_{33}), \quad H = -A_{15} / (I_{yy} + A_{55}), \quad P = -A_{33} / (M + A_{33})$$

şeklinde ifade edilmiştir. Sistemin durum vektörü olan $x(t)$ 'de, z_1 dalıp çıkma hareketini, z_2 dalıp çıkma hızını, z_3 baş

kıç vurma hareketini, z_4 ise baş kıç vurma hızını tanımlamaktadır. Sistemin kontrol giriş vektörü $u(t)$ 'deki U_3 ise, sisteme uygulanacak olan aktif kontrol kuvvetini ifade etmektedir.

2.2. Karışık Deniz Durumundaki Gemi Hareketleri

İncelenen gemi formunun karışık deniz ortamındaki hareketlerinin tahmini için Pierson ve Moskowitz tarafından önerilen lineer süperpozisyon ilkesi kullanılmıştır [12].

DD3'e ait olan ve Şekil 2'de verilen Pierson-Moskowitz dalga spektrumu ile ifade edilen deniz sahası geminin düşey

ivme Response Amplitude Operator (RAO) grafiği (Transfer fonksiyonu) ile Denklem (5)'te yer alan ifade ile süperpoze edilmiştir.

$$S_{av}(\omega_e) = S_{\zeta}(\omega_e) \times |RAO_{av}(\omega_e)|^2 \quad (5)$$

Burada, S_{av} , DD3 için hesaplanan düşey ivme spektral enerjisini, S_{ζ} dalga spektrumu enerjisini ve RAO_{av} düşey ivmelenme transfer fonksiyonunu ifade etmektedir. Elde edilen $\omega_e - S_{av}$ eğrisi altında kalan alanın karekökü RMS değerini vermektedir. İncelenen deniz durumu Tablo 3'te, S_{ζ} formasyonu ise Denklem (6)'da verilmiştir.

$$S_{\zeta}(\omega) = A\omega^{-5} \exp\left(-\frac{B}{\omega^4}\right) \quad (6)$$

$$\text{Burada, } A = 0.0081 \times g^2, \quad B = \frac{0.032 \times g^2}{H_{1/3}^2}$$

olarak ifade edilmektedir. Burada verilen $H_{1/3}$ karakteristik dalga yüksekliğini, g ise yerçekimini ifade etmektedir. Süperpozisyonda kullanılacak olan bütün frekanslar geminin dalgalarla karşılaşma frekansıdır ve baştan gelen dalgalar için Denklem (7) kullanılarak elde edilmektedir.

$$\omega_e = \omega + \left(\frac{\omega^2 V}{g}\right) \quad (7)$$

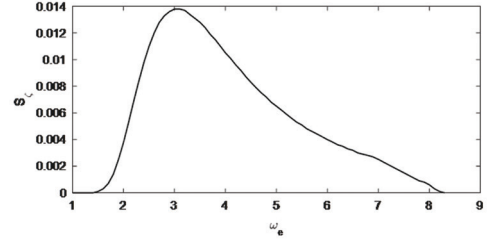
$$\omega^2 = (gk), \quad k = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \quad (8)$$

Burada V gemi ilerleme hızını ifade etmektedir. Denklem (8)'de yer alan denklem derin su için dispersiyon denklemidir ve burada k dalga sayısını gösterir. λ ise dalga boyudur. Gemi V hızına sahipken baştan gelen dalgalar için dalga spektrumu enerjisi Denklem (9)'daki gibi yazılabilir.

$$S_{\zeta}(\omega_e) = \frac{S_{\zeta}(\omega)}{1 + \frac{2\omega V}{g}} \quad (9)$$

Tablo 3. İncelenen Deniz Durumu

Deniz Durumu	Karakteristik Dalga Yüksekliği $H_{1/3}$ (m.)
DD3	0.88



Şekil 2. Pierson-Moskowitz Dalga Spektrumu

Denklem (5)'te yer alan süperpozisyon ifadesine göre transfer fonksiyonu, karesi ile orantılı olarak karışık deniz durumundaki cevabı etkilemektedir. Bu nedenle transfer fonksiyonunda rezonans bölgesindeki azalma karışık deniz ortamındaki cevabı ciddi biçimde azaltacaktır. Geminin baştan gelen düzenli dalgalarda ve 20 knots hıza sahipken elde edilen dalıp çıkma RAO , baş kış vurma RAO , düşey ivme RAO ve düşey ivme cevap fonksiyonu grafiği kontrollü ve kontrolsüz olarak sayısal benzetim çalışmaları kısmında verilmiştir.

3. Statik Çıkış Geri-Beslemeli Optimal Kontrolör Tasarımı

Bu bölümde, karışık deniz durumunda bir geminin baştan gelen düzenli dalga bozucusu etkisi ile oluşan düşey ivmelerinin azaltılması için statik çıkış geri-beslemeli optimal kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımın en önemli aracı dışbükey optimizasyon temelindeki LME olmuştur.

Bilindiği gibi bozucu azaltma problemlerinde durum geri-beslemeli kontrolör tasarımları sıklıkla kullanılmaktadır. Bu tip kontrolörleri çalışması, sistemin tüm durumlarının ölçülebilmesine bağlıdır ve kontrol kanunu tüm durum değişkenlerinin geri-beslenmesi ile hesaplanır. Bozucu azaltma problemlerinde geri-besleme bilgisi için ivme ölçerlerin kullanılmasıyla hız sinyallerinin hesaplanması yaygın olsa da, deplasman yanıtlarını aynı hassasiyetle elde edilemeyeceği bilinmektedir [13].

Bu nedenle tüm durum değişkenlerinin geri-beslemeli kontrolör tasarımları pratikte uygulanabilirlik açısından yeterince elverişli değildir. Dinamik çıkış geri-beslemeli kontrolörler kullanılarak tüm durum değişkenleri yerine sadece ölçülebilir sinyalleri geri-besleyen kontrolör tasarımı ile probleme çözüm getirmek mümkündür. Fakat dinamik çıkış geri-beslemeli kontrolörler ile yüksek bozucu bastırma performansı elde etmek için sistemin bozucu girişleri ile performans çıkışları için filtre tasarımı işlemi gerçekleştirilir. Bu da kapalı çevrim sistemin mertebesini arttırarak tasarlanan kontrolörün uygulanabilirliğini azaltır. Yine, dinamik çıkış geri-beslemeli kontrolörlerin yüksek maliyetleri tasarım açısından bir diğer problemidir. Fakat, statik çıkış geri-beslemeli kontrolörlerin, kolayca ölçülebilen sinyalleri geri-besleyebilme özellikleri ile pratikte uygulanabilirlikleri yüksektir. Bununla birlikte dinamik çıkış geri-beslemeli kontrolörlere göre daha ucuz maliyetleri ile bozucu bastırma problemleri için büyük bir potansiyele sahiptirler [14, 15]. Bu nedenle, bu çalışmada, bozucu dalga etkisindeki bir geminin düşey ivmelerinin azaltılması için LME tabanlı statik çıkış geri beslemeli kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Ele alınan kontrol probleminin açık çevrim durum-uzay formu,

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B_w w(t) + B_u u(t) \\ z(t) &= C_z x(t) \\ y(t) &= C_y x(t) \end{aligned} \quad (10)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada, $x(t) \in \mathbb{R}^n$ durum vektörünü, $z(t) \in \mathbb{R}^m$ performans çıkış vektörünü, $y(t) \in \mathbb{R}^p$ ölçüm vektörünü, $w(t) \in \mathbb{R}^{m_w}$ bozucu giriş vektörünü, $u(t) \in \mathbb{R}^{m_u}$

kontrol giriş vektörünü göstermektedir. A , B_w , B_u , C_z , C_y matrisleri ise sistemin bilinen uygun boyutlu durum-uzay matrisleridir.

Sistemin kontrol girişinin $u(t) = Ky(t) = KC_y x(t)$ gibi ölçülen çıkışların bir fonksiyonu olduğu kabulünden yola çıkarak kapalı çevrim sistem

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= (A + B_u KC_y)x(t) + B_w w(t) \\ z(t) &= C_z x(t) \end{aligned} \quad (11)$$

şeklinde elde edilir. Burada, K statik çıkış geri beslemeli kontrol kazancını, C_y ise sistemin geri-beslenen (ölçülen) durum değişkenlerini göstermektedir. Önerilen kontrolörün sentez denklemlerinin elde edilebilmesi için ilk olarak, yeterli kararlılık kısıtlarının elde edilmesinde kullanılacak olan Lyapunov fonksiyonu $P = P^T > 0$ kısıtı altında,

$$V(x(t)) = x(t)^T P x(t) \quad (12)$$

olarak tanımlanır [16]. Lyapunov fonksiyonun türevinin Denklem (11) ile birleştirilmesi ile,

$$\begin{aligned} \dot{V}(x(t)) &= \dot{x}(t)^T P x(t) + x(t)^T P \dot{x}(t) \\ &= [(A + B_u KC_y)x(t) + B_w w(t)]^T P x(t) \\ &\quad + x(t)^T P [(A + B_u KC_y)x(t) + B_w w(t)] \end{aligned} \quad (13)$$

elde edilir. Buradan,

$$\begin{aligned} \dot{V}(x(t)) &\leq x(t)^T (A^T P + PA + C_y^T K^T B_u^T P + PB_u KC_y)x(t) \\ &\quad + w(t)^T B_w^T P x(t) + x(t)^T P B_w w(t) \\ &= x(t)^T \Pi x(t) + w(t)^T B_w^T P x(t) + x(t)^T P B_w w(t) \end{aligned} \quad (14)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $\Pi = (A^T P + PA + C_y^T K^T B_u^T P + PB_u KC_y)$ dir. Kararlılık koşullarına, performans indeksi, $\gamma > 0$ olmak üzere $z^T(t)z(t) - \gamma^2 w^T(t)w(t)$ şeklinde eklenmesi ile kapalı çevrim sistemin kararlılık ve performans kısıtları

$$\begin{aligned} \dot{V}(x(t)) + z^T(t)z(t) - \gamma^2 w^T(t)w(t) &\leq \begin{bmatrix} x(t)^T & w(t)^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Pi + C_y^T C_y & PB_w \\ B_w^T P & -\gamma^2 I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} x(t)^T & w(t)^T \end{bmatrix} \Psi \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

şeklinde elde edilir. (15) Eşitsizliğinden, eğer $\Psi < 0$ ise, $\dot{V}(x(t)) + z^T(t)z(t) - \gamma^2 w^T(t)w(t) < 0$ olur ve sistemin bozucu girişlerinden performans çıkışlarına olan L_2 kazancı, $x(0)=0$ başlangıç koşulu için, $\|T_{zw}\|_{\infty} < \gamma$ olur. Burada, bozucu dalga girişi $w=0$ olursa Eşitsizlik (15)'ten eğer $\Psi < 0$ ise o halde $\dot{V}(x(t)) < 0$ olur ve kapalı-çevrim sistem $u(t)=K C_y x(t)$ kontrol işareti ile kararlı olur. Ψ 'nın $\text{diag}(P^{-1}, I)$ ile sağından, $(\text{diag}(P^{-1}, I))^T$ ile ise solundan çarpılması ve $Q=P^{-1}$ ve $Y=KQ$ tanımlamaları ile $\Psi < 0$ kısıtı,

$$\begin{bmatrix} \Omega & B_w \\ B_w^T & -\gamma^2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (16)$$

matris eşitsizliği şeklinde elde edilir. Burada, $\Omega = QA^T + AQ + QC_y^T K^T B_u^T + B_u K C_y Q + QC_y^T C_y Q$ dir. Elde edilen matris eşitsizliğinin lineer olmayan terimlerinin ortadan kaldırılması için $WC_y = C_y Q$ ve $Y=KW$ kabulleri altında (16) matris eşitsizliği yeniden düzenlenirse,

$$\begin{bmatrix} \Theta & B_w \\ B_w^T & -\gamma^2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (17)$$

matris eşitsizliği elde edilir.

Burada $\Theta = QA^T + AQ + C_y^T Y^T B_u^T + B_u Y C_y + QC_y^T C_y Q$ 'dir. Schur tümleyen [17] ile matris eşitsizliği (17),

$$\begin{bmatrix} QA^T + AQ + C_y^T Y^T B_u^T + B_u Y C_y & B_w & QC_z^T \\ B_w^T & -\gamma^2 I & 0 \\ C_z Q & 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (18)$$

lineer matris eşitsizliği şeklinde elde edilir. Burada, önerilen kontrolörün nümerik çözümünde yaşanabilecek varlık probleminin giderilmesi için, $WC_y = C_y Q$ eşitliği,

$$\text{iz} [(WC_y - C_y Q)^T (WC_y - C_y Q)] = 0 \quad (19)$$

şeklinde yazılabilir. Tanımlanan koşul, $[(WC_y - C_y Q)^T (WC_y - C_y Q)] \leq \mu I$ şeklinde düzenlenmesi ve burada $\mu > 0$ bir skaler

olmak üzere Schur tümleyen ile,

$$\begin{bmatrix} -\mu I & (WC_y - C_y Q)^T \\ (WC_y - C_y Q) & -I \end{bmatrix} \leq 0 \quad (20)$$

LME şeklinde elde edilebilir [18, 14]. (20) Eşitsizliğindeki μ , 10^{-7} gibi çok küçük skaler bir pozitif sayı olduğu kabulü ile statik çıkış geri beslemeli kontrolör kazancı,

$$\begin{aligned} \min \gamma^2 \\ \text{koşul LME (18), (20)} \\ Q > 0, W, Y \end{aligned} \quad (21)$$

minimizasyon probleminin yarı tanımlı programlama çözücüsü yardımıyla (18) ve (19) LME'ni birlikte çözen uygun boyutlu $Q > 0$, W ve Y matrislerinin bulunması ile $K=YW^{-1}$ olarak hesaplanır.

4. Sayısal Benzetim Çalışmaları

Bu bölümde, mevcut yolcu gemisinin 20 knots sabit hızda baştan gelen karışık dalgalandaki düşey ivme cevaplarının azaltılması için yapılan benzetim çalışmalarının sonuçları grafikler yardımı ile ortaya konulmuştur. Bilindiği gibi, Denklem 1 ve Denklem 2'nin sağ tarafında yer alan zorlayıcı kuvvet/momentler gerçek ve sanal kısımdan oluşmaktadır. Bu sebeple zorlayıcı dalga kuvveti ve momenti, hesaplanan faz açısı göz önüne alınarak Matlab- Simulink ortamına dahil edilerek, başlangıç konum ve hızlarının sıfır olarak alınması ile çözümlene gerçekleştirilir. Çözücü olarak ODE45 (Ordinary Differential Equation 45) kullanılmış olup zaman adımı 0.01 saniye olarak seçilmiştir. Kontrolsüz ve kontrollü cevapların gösterimi için Şekil 5'te verildiği gibi en yüksek enerjiyi içeren ω_e , karşılaşma frekansı=2,21 rad/s olarak seçilmiştir. Çalışmada tasarlanan kontrolörün performans çıkış vektörü $z(t)=C_z x(t)$ şeklindedir ve burada C_z matrisi $C_z = \alpha [I_{4 \times 4}]$ olarak belirlenmiştir. Kontrolör tasarımında α , 0,014 olarak seçilmiştir.

Çalışmada tasarlanan statik çıkış geri-

beslemeli kontrolör kazancı, (21) ile verilen optimizasyon probleminin çözümünden,

$$K = [-159,6115]$$

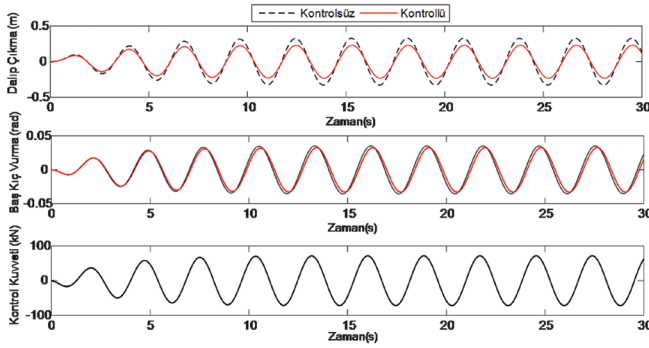
olarak hesaplanmıştır. Söz konusu LME'nin çözümünde MATLAB paket programı altında YALMIP ayrıştırıcısı ve SEDUMI çözücüsü kullanılmıştır [19, 20].

Şekil 3'te analiz edilen 2,21 rad/s frekansı için dalıp çıkma ve baş kış vurma hareketlerinin kontrolsüz ve kontrollü cevapları ve bu zorlayıcı frekans için hesaplanan kontrol kuvveti gösterilmiştir. Şekil 3'ten görüldüğü gibi çalışmada tasarlanan kontrolör ile dalıp çıkma ve baş kış vurma hareketleri için tatmin edici bir

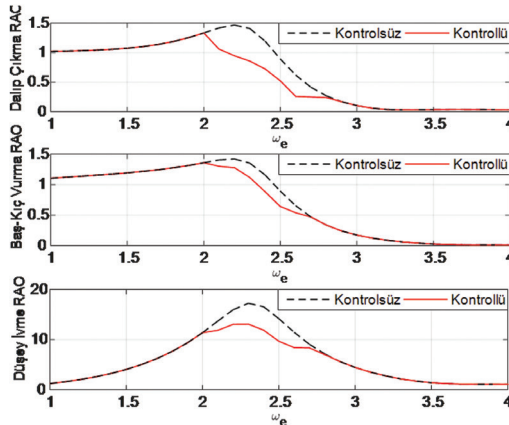
bozucu azaltma elde edilmiştir.

Frekans cevapları incelendiğinde ise Şekil 4 kontrollü ve kontrolsüz durumdaki dalıp çıkma transfer fonksiyonunu, baş kış vurma transfer fonksiyonunu ve gemi baş kısmındaki düşey ivme transfer fonksiyonunu göstermektedir.

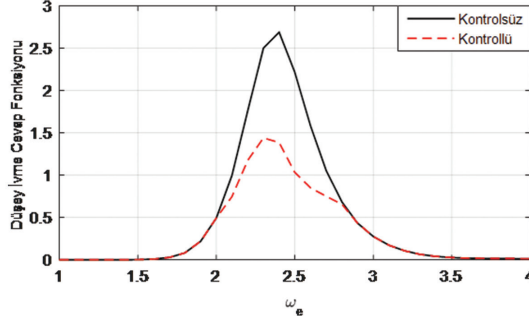
Şekil 5'te ise lineer süperpozisyon ilkesi ile elde edilen düşey ivme cevap fonksiyonu kontrollü ve kontrolsüz olarak verilmiştir. Bu grafiğin kontrollü yanıtının varyans değerinden yola çıkılarak hesaplanan RMS değerinin, tasarlanan kontrolör ile geminin baş kısmında seyahat eden yolcular için düşey ivme değerinin azaltılarak RMS 1 m/s² üst limitinin altına indirildiğini göstermiştir.



Şekil 3. $\omega_e=2,21$ rad/s için Dalıp Çıkma Hareketi, Baş Kış Vurma Hareketi (Kontrolsüz/Kontrollü) ve Kontrol Kuvveti Grafiği



Şekil 4. Kontrollü ve Kontrolsüz Elde Edilen Transfer Fonksiyonları



Şekil 5. Kontrollü ve KontROLSÜZ Elde Edilen Düşey İvme Cevap Fonksiyonu

Yapılan benzetim çalışmalarından, önerilen kontrolörün sistemin kapalı çevrim kararlılığını garanti ederek arzu edilen kontrol performansını sağladığı gözlemlenmektedir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, seçilen gemi formunun DD3 için 20 knots sabit ilerleme hızında ve dalgaları baştan aldığı senaryoda denizcilik analizleri yapılmış; transfer ve cevap fonksiyonları elde edilmiştir. Daha sonra statik çıkış geri beslemeli kontrolör tasarımı ile karışık deniz durumunda mutlak düşey ivmelenmelerin azaltılması hedeflenmiştir. Tasarlanan kontrolcü sayesinde düşey ivme cevap fonksiyonu altındaki alan ortalama % 35 oranında azaltılmıştır. Böylelikle 30 dakikalık gemi yolculuğu için ISO'nun tavsiye ettiği üst limit olan 1 m/s^2 RMS ivme değeri aşılmayarak deniz tutması açısından güvenli bölgede kalınmıştır. Bu sonuçlar önerilen statik çıkış geri beslemeli kontrolörün, gemi gibi operasyon anında üzerinden ölçüm alınması zor olan sistemlerin dalga bozucusu etkisindeki hareketlerinin kontrolünde önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Makalede ele alınan problem gemi modelindeki belirsizliklerin ve eyleyici dinamiğinin kapalı çevrim sisteme eklenmesi ile dayanıklı kontrolör tasarımı çalışmaları ile genişletilebilir. Bir başka

husus ise, gemi ilerleme hızı değiştiğinde düşey hareket denklemlerinde yer alan katsayılar da değişecektir. Bu nedenle, gemi ilerleme hızına bağlı değişen katsayıları da sisteme dahil edebilecek bir kontrolcü tasarlanabilir.

Teşekkür

Bu çalışmanın ikinci yazarı ASELSAN doktora bursuyla desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Peşman, E. (2016). Influence of Variable Acceleration on Parametric Roll Motion of a Container Ship. Journal of ETA Maritime Science, 2016:4(3):205-214.
- [2] Salvesen, N., Tuck, O. ve Faltinsen, O. (1970). Ship Motions and Sea Loads. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1970:78:250-287.
- [3] O'Hanlon, J. F. ve McCauley, M. E. (1974). Motion Sickness Incidence as a function of acceleration of vertical sinusoidal motion. Aerospace Medicine, 1974:45:366-369.
- [4] ISO. (1985). Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration-Part 3: Evaluation of Whole-body z-axis. Vertical Vibration in the Frequency Range 0.1 to 0.63 Hz.
- [5] ISO. (1997). Mechanical Vibration and Shock Evaluation of Human Exposure

- to Whole Body Vibration-Part 1: General Requirements.
- [6] Esteban, S., Cruz, J. M., Giron Sierra, J. M., Andres, B., Martinez, J. M. D. ve Almansa, J. A. (2000). Fast Ferry Vertical Accelerations Reduction With active Flaps and T-foil. Proceedings from 5th IFAC Conference Aalborg, Denmark.
- [7] Lopez, R., Santos M., Polo, O. ve Esteban, S. (2002). Experimenting a fuzzy controller on a fast ferry. Control Applications, Proceedings of the 2002 International Conference on, Volume:2.
- [8] Esteban, S., Giron Sierra, J. M, Piorno, J.R. ve Cruz J. M (2005). Frequency-Domain Analysis for Prediction of Seasickness on Ships. Marine technology, 2005:42(4):192-198.
- [9] Giron Sierra, J.M, Esteban, S., Piorno, J.R. ve Velasco, F. (2005). Overview of a research on actuators control for better seakeeping in fast ships. Proceedings of the 16th Ifac World Congress. Elsevier Science.
- [10] Giron Sierra, J. M. ve Esteban S. (2008). Frequency Domain Study of Longitudinal Motion Attenuation of a Fast Ferry Using a T-Foil. Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control Seoul, Korea.
- [11] Esteban S., Giron-Sierra, J. M., Toro, B. A. ve Cruz, J. M. (2004). Development of a Control-Oriented Model of the Vertical Motions of a Fast Ferry. Journal of Ship Research. 2004:48(3).
- [12] Denis, M. ve Pierson, W. (1957). On the motions of ships in confused seas. Trans .Soc. Nav. Archit.Mar.Eng. 1957:61:280-354.
- [13] Abdelaziz, T. H. S. ve Valasek, M. (2005). State Derivative Feedback by LQR for Linear Time Invariant Systems. IFAC Proceedings Volumes, 2005:38(1):435-440.
- [14] Du, H., Li, W. ve Zhang, N. (2012). Integrated Seat and Suspension Control for a Quarter Car With Driver Model. IEEE Trans. Veh. Technol. 2012:61(9):3893-3908.
- [15] Yazici, H. ve Sever, M. (2016). Observer Based Optimal Vibration Control of a Full Aircraft System Having Active Landing Gears and Biodynamic Pilot Model. Shock and Vibration ,1-20.
- [16] Dullerud, G-E. ve Paganini, F. (2005). A course in robust control theory: a convex approach, Springer-Verlag, 1. Baskı.
- [17] Boyd, S., El Ghaoui, L., Feron, E. ve Balakrishan, V. (1994). Linear matrix inequalities in system and control theory. Society for Industrial and applied mathematics, 1. Baskı.
- [18] Ho, D. W. C. ve Niu, Y. (2007). Robust fuzzy design for nonlinear uncertain stochastic systems via sliding-mode control. IEEE Trans. Fuzzy Syst. 2007:15(3):350-358.
- [19] Löfberg, J. (2004). YALMIP: A toolbox for modelling and optimization in MATLAB. IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design, Taipei-Taiwan, 2-4.
- [20] Strum, J-F. (1999). Using SeDuMi 1.02, a MATLAB toolbox for optimization over symmetric cones. Optimization Methods and Softwares, 1999:11(4):625-653.