



VLCC Tipi Bir Geminin Otopilot Modunda İstanbul Boğazı'nı Geçiş Simülasyonu

İsmail BAYEZİT¹, Rahman BİTİRGEN¹, Muhsin HANÇER², Ömer Kemal KINACI^{3,4}

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Türkiye

²Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Türkiye

³İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, Türkiye

⁴İstanbul Teknik Üniversitesi Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti Kampüsü, KKTC

bayezit@itu.edu.tr; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9345-5108>

bitirgen@itu.edu.tr; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1676-1192>

muhsin.hancer@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9599-8747>

kemalkinaci@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2956-9562>

Öz

Dünyanın en dar su yollarından biri olan İstanbul Boğazı'nda, Türk Boğazları Deniz Trafik Düzeni Tüzüğü uyarınca, gemi geçişi esnasında otopilot kullanımı yasaktır. Ancak son yıllarda bilgisayarların günlük hayatın her evresine dahil olması ve kontrol mühendisliğindeki kayda değer ilerlemeler emniyetli otopilotajın önünü açmıştır. Bu çalışmada 320m boyunda bir geminin otopilot modunda İstanbul Boğazı geçiş simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Gemi hareket denklemleri üç serbestlik dereceli ve nonlineer olarak ele alınmış ve geminin dümeni oransal ve türevsel kontrolör kullanılarak kontrol edilmiştir. Azami hız tüzüğe uygun olarak 10 knot alınmıştır. Boğaz'daki akıntı hesaplara dahil edilmemiştir. Kontrolör kazançları genetik algoritma kullanılarak optimize edilmiştir. Gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda geminin otopilot modunda İstanbul Boğazı'nı emniyetli bir şekilde geçtiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: KVLCC2, Oransal ve Türevsel Kontrolör, Manevra, Genetik Algoritma

Strait of İstanbul Crossing Simulation of a VLCC Type Ship in Autopilot Mode

Abstract

According to Maritime Traffic Regulations for the Turkish Straits, "steering shall always be by hand" and "automatic steering devices shall never be used". However, it is considered that recent technological boost in computer science and control engineering opened this regulation to discussion; as today, automatic steering devices are a lot more safer. In this study, navigation of a 320m long ship through the Strait of İstanbul in autopilot mode was simulated. Ship motion equations are nonlinear and have three degree-of-freedom. Rudder was controlled by PD controller. Maximum speed of the ship during navigation was 10 knots as per traffic regulations. It was assumed that there was no current in Strait of İstanbul during ship's passage. Proportional and derivative gains were optimized by genetic algorithm. Simulation results show that the ship can safely voyage through the Strait of İstanbul in autopilot mode.

Keywords: KVLCC2, PID, Ship Maneuvering, Genetic Algorithm

1. Giriş

Günümüzde halen geçerli olan Türk Boğazları Deniz Trafik Düzeni Tüzüğü [1] Madde 11'e göre, Türk Boğazları geçişinde "dümen elle tutulacak ve dümen tutmak için otomatik pilot aygıtı kullanılamayacaktır". Bu tüzüğün yürürlüğe girmiş olduğu 1998 yılından itibaren kontrol mühendisliği alanında çığır açıcı gelişmeler olmasına karşın bugün hala Boğaz geçişlerinde otopilot modülü kullanılamamaktadır. Bu yasağın altında "bilinmeyene karşı güvensizlik" yattığı düşünülmektedir. Otomatik pilotaj yasağı, bilgisayarlara güvenilemeyeceğini ve aksi durumlarda felakete yol açabileceği gerekçeleriyle savunulmaktadır. Ancak uçak gibi 6 serbestlik dereceli hareketin tümünün kontrol edilmesi gerektiği durumlarda bile on yıllardır hata yapmayan bilgisayarların, ticari gemilerin boğaz geçişlerindeki 3 serbestlik dereceli harekette hata yapması çok düşük ihtimaldir. Tek gerekli koşul, gemiyi kontrol eden bilgisayarın doğru kontrol mekanizmasıyla donatılmış olmasıdır. Buna rağmen 20 yıldan fazladır bu tüzük değişmemiştir. Çünkü birçok kişi tarafından denizcilik alanındaki kontrol sistemlerinin henüz yeterli olgunluğa ulaşmamış olduğu düşünülmektedir. Bu çalışma; alandaki bu eksikliği kapatmak için yapılmış olup, boyu 320m olan bir geminin İstanbul Boğazı'ndan (aslında tüzüğe aykırı bir biçimde) otopilot modunda geçiş simülasyonunu konu edinmektedir.

Literatürde, özellikle son yıllarda, gemi otopilot uygulaması konusunda birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda benzetim ve gerçek sistem üzerindeki uygulamalar olmak üzere farklı kontrol yöntemleri test edilmiştir. Zhang [2] sinir ağları destekli uyarlamalı kontrolör kullanarak belirtilen hedef noktaları takip edebilen bir gemi modeli üzerinde çalışmıştır. Ahmed ve Hasegawa [3] üç serbestlik dereceli bir gemi modeli üzerinde, önceden belirtilen koordinatlara

ulaşabilmek için, dış döngüde yönelme açısı kararını veren iki aşamalı kontrol benzetim çalışması yapmıştır. Dış kontrol döngüsünde yönelme açısının karar verilmesi için bulanık mantık tabanlı karar verme mekanizması ve koordinatlar arası mesafenin kontrolü için ise oransal ve türevsel kontrolör kullanmışlardır. Sandler ve diğerleri [4] farklı gemi çeşitlerinde deneysel olarak, farklı algılayıcıların bilgilerini birleştirilerek sık kullanılan gemi güzergâhlarındaki kazaları azaltmak amacıyla çalışmalar yapmışlardır. Perera [5] farklı dış etkenler altında uluslararası gemi yönetmeliğine bağlı olarak bulanık kontrolör yardımı ile karar verme metodu kullanarak çeşitli gemi çarpışma senaryoları üzerinde çalışmıştır. Reyhanoglu [6] iki bağımsız gemi motoru kullanarak düzlemsel otonom pozisyon kontrolü konulu benzetim çalışması yapmıştır. Caccia ve diğerleri [7] Kalman filtresi kullanarak PID (Oransal, İntegral ve Türevsel) temelli bir katamaran prototipi üzerinde pusula ve GPS bilgileri ile dümen, hız ve konum kontrolü denemeleri yapmışlardır. Sonnenburg ve Woolsey [8] bir insansız su üstü aracının modellenmesi, gerçek sistem üzerinde model parametrelerin elde edilmesi ve benzetimle birlikte gerçek zamanlı olarak kontrolü üzerinde çalışmıştır. Bu çalışmada, gerçek zamanlı konum kontrolü için iç içe PD (oransal ve türevsel) kontrol döngüleri kullanılarak farklı parametrelerin kontrol performansları kapsamlı olarak test edilmiştir. PD kontrolör ve geri adımlamalı kontrolör performansları kıyaslaması da yapılmıştır.

Son 10 yılda artan otonom gemilere yönelik çalışmaların, denizcilik ve özellikle gemi inşaat sektöründe bazı değişimlere yol açması kaçınılmazdır. Bu çalışmaların bir kısmı yalnızca otonom gemiler üzerine olmayıp, akıllı liman sistemleri üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu tip akıllı sistemlere geçişin kısa sürede tamamlanması beklenemez; kontrol mekanizmalarının

deniz sistemlerine kademeli olarak geçirilmesi ile akıllı sistemlere geçiş, ancak ileride nihai bir hedef olarak belirlenebilir. Bu çalışma, bu doğrultuda atılmış ilk adımlardan biri olarak değerlendirilebilir. Bu çalışmada, daha önce de belirtildiği üzere, boyu 200m'den büyük bir geminin İstanbul Boğazı'ndan otopilot modunda geçişinin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. İkinci bölümde İstanbul Boğazı'nın genel özelliklerinden bahsedilmiş ve simülasyonu yapılan geminin hidrostatik ve geometrik özellikleri tanımlanmıştır. Üçüncü bölümde aynı geminin literatürde bulunan hidrodinamik türevleri verilmiş, bunun yanında geminin pervanesinin ve dümeninin geometrik özelliklerinden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde simülasyonda kullanılan matematiksel model genel hatlarıyla izah edilmiştir. Gemiye ve takıntularına etkiyen kuvvet ve momentler ayrı olarak ele alınmıştır. Beşinci bölümde güdüm ve kontrol sistemi tasarımı anlatılmış; oransal ve türevsel kontrol mekanizmasında gerekli olan K_p ve K_d kazançlarından bahsedilmiştir. Genetik algoritma ile bulunan bu kazançların belirlenmesi altıncı bölümde izah edilmiştir. Yedinci bölümde gerçekleştirilen simülasyonlar özetlenmiş ve son olarak da bu çalışmada elde edilen sonuçlar sekizinci bölümde verilmiştir.

2. Problem Tanımı

İstanbul Boğazı dünyanın en zorlu su yollarından biri olarak kabul edilmektedir. Kuş uçuşu 31km uzunluğa sahip olan boğazın; haritada ilk olarak uzaktan bakıldığında Kuzey-Güney doğrultusu çizmesine karşın, aslında üç kısımdan oluştuğu söylenebilir [9]. Boğazın,

- Karadeniz girişinden Büyükdere'ye kadar olan kısım Kuzeydoğu-Güneybatı,
- Orta kısmı Kuzey-Güney,
- Hisarlardan sonraki kısmı ise Kuzeydoğu-Güneybatı, doğrultusu çizmektedir. Boğazın

Karadeniz giriş genişliği 3600m olmasına karşın, Hisarlar arasında genişlik 700m'nin altına iner. Gerek çizdiği doğrultu, gerek daralan genişliği sebebiyle İstanbul Boğazı geçişi özellikle büyük gemiler için problem teşkil edebilmektedir. Boğaz bu sebeple gemi kazalarının yoğunlukla yaşandığı bir bölgedir. Kazaların önemli bir kısmı kullanıcı kaynaklı olduğundan, bu tip su yollarında kontrollü geçişlerin sağlanması önem kazanmaktadır.

Gemi boylarının yıllar içerisinde artış göstermesiyle, günümüzde açık ve kapalı denizlerde daha büyük gemiler boy göstermektedir. Bunun bir sonucu olarak da İstanbul Boğazı'ndan geçen boyu 200m'den büyük gemilerin sayısı neredeyse her yıl artmaktadır [9]. Özellikle boyu 300m'den büyük gemilerin boğaz geçişi emniyet riski oluşturduğundan, Türk Boğazları Deniz Trafik Düzeni Tüzüğü'ne göre [1] bu tip gemilerin manevra kabiliyetleri de geçiş izni verilirken göz önünde bulundurulmaktadır.

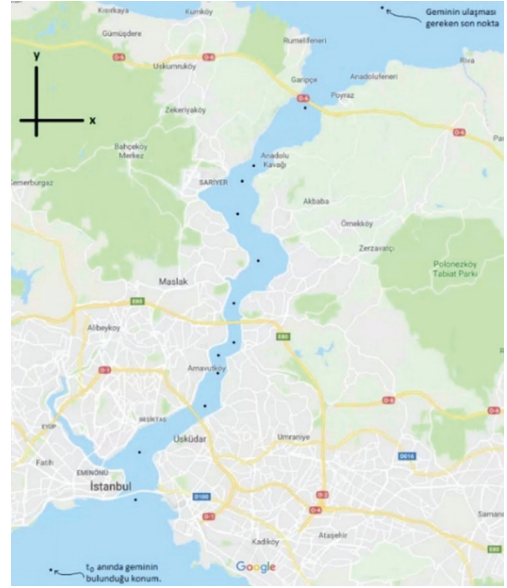
Tablo 1. KVLCC2 Gemisi Geometrik Özellikleri.

L_{pp}	m	320
B	m	58
T	m	20.8
∇	m^3	312,600
x_G	m	11.2
C_B	-	0.81

İstanbul Boğazı geçişinde gemi kazalarının azaltılması için en etkili yöntemlerden birisi günümüzde oldukça popüler bir başlık olan "akıllı sistemlerden" faydalanmaktır. Basit bir kontrol mekanizması tarafından kontrol edilen dümenle, geminin boğaz geçişi için çizilen rotayı riski en aza indirecek şekilde tamamlaması mümkündür. Bu çalışmada, bir vaka çalışması ele alınmış ve KVLCC2 (KRISO Very Large Crude Carrier 2) yük gemisinin İstanbul Boğazı'ndan geçiş simülasyonu gerçekleştirilmiştir. KVLCC2 tek pervane ve tek dümenli (SPSR – single propeller single rudder) bir gemidir.

Geminin geometrik özellikleri Tablo 1'de özetlenmiştir. Bu tablodaki x_G , geminin boyuna ağırlık merkezini temsil etmekte olup, geminin orta noktasından verilmiştir.

İstanbul Boğazı'nın özel hidrodinamik yapısı sebebiyle boğazda çift yönlü akım bulunmaktadır. Kuzey-Güney doğrultusundaki seviye, tuzluluk ve yoğunluk farkları sebebiyle akıntı yönü yüzeyde Karadeniz-Marmara doğrultusunda, tabanda Marmara-Karadeniz doğrultusundadır. Aydoğan [10], su yüzeyinden 1m derinlikte aldığı ölçümlerde ortalama akıntı hızını 1.1m/s olarak tespit etmiştir. Verilerin alındığı dönem içerisindeki en yüksek bileşke hız ise 2.55m/s ölçülmüştür. Ancak bu çalışmada boğazdaki akıntı ihmal edilmiştir. Geminin dinamiğini belirleyen manevra türevleri ile pervane ve dümen parametreleri literatürde bulunmaktadır [11]. Bu bilgiler ilerleyen bölümlerde verilmiştir. Bu çalışmada kurulan kontrol modeli ile, KVLCC2 gemisinin İstanbul Boğazı'ndan akıntısız durumdaki geçişi, dümeni kontrol ederek gerçekleştirilmiştir. İstanbul Boğazı'nın haritası ve geminin boğaz geçişini tamamlaması için geçmesi gereken çek noktaları Şekil 1'de gösterilmiştir. Gemi t_0 anında Marmara Denizi'nde İstanbul Boğazı girişinde x eksenine doğrultusunda (sürüklenme açısı $\beta=0$) bulunmaktadır. Başlangıç ve bitiş konumlarıyla beraber geminin geçmesi gereken toplam 14 adet çek noktası bulunmaktadır. Geminin ilk hızı $U_0=10$ knot'tır.



Şekil 1. İstanbul Boğazı Üzerinde Geminin Geçmesi Gereken Noktaların Gösterimi

3. Gemi Parametreleri

Bu çalışmada, literatürde yaygın olarak çalışılmış olan KVLCC2 gemisi örnek olarak ele alınmıştır. KVLCC2, 320m boyunda VLCC (very large crude carrier) tipinde bir tankerdir. Gemi ve takıntılarıyla (pervane ve dümen) ilgili bilgiler [11] çalışmasından alınmıştır. Simülasyonlarda kullanılan gemi ile ilgili deneysel olarak elde edilmiş boyutsuz hidrodinamik türevler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 3'teki w_{p0} değeri (gemi düz ilerlerken pervane iz katsayısı) model ölçeğinde yapılan çalışmada 0.40 olarak

Tablo 2. Simülasyonlarda Kullanılan KVLCC2 Gemisi Hidrodinamik Türevleri [11].

R'_0	0.022	Y'_v	-0.315	N'_v	-0.137
X'_{vv}	-0.040	Y'_r	0.083	N'_r	-0.049
X'_{vr}	0.002	Y'_{vvv}	-1.607	N'_{vvv}	-0.030
X'_{rr}	0.011	Y'_{vvr}	0.379	N'_{vvr}	-0.294
X'_{vvv}	0.771	Y'_{vrr}	-0.391	N'_{vrr}	0.055
		Y'_{rrr}	0.008	N'_{rrr}	-0.013

bulunmasına karşın tam ölçekte bu değer 0.35'e inmektedir. D_p , pervane çapını, n_p pervane devrini, t_p itme azalması katsayısını ve k_0 , k_1 ve k_2 ise açık su pervane performansını temsil eden parametrelerdir.

Tablo 3. KVLCC2 Gemisi Pervane Parametreleri [11]

D_p (m)	8.89	w_{p0}	0.35
n_p (rps)	1.13	k_0	0.2931
t_p	0.22	k_1	-0.2753
x_p	-0.48	k_2	-0.1385

Geminin tek dümeni ile ilgili simülasyonlarda kullanılan parametreler Tablo 4'te verilmiştir. Dümenin azami açısı her iki yönde 35° olup, azami açısal hızı $1.76^\circ/s$ 'dir. Tablo 3 ve Tablo 4'te verilen parametrelerin fiziksel karşılıkları ve bu değerlerin nasıl hesaplandığının detaylı açıklamaları için [11] makalesi incelenmelidir.

Tablo 4. KVLCC2 Gemisi Dümen Parametreleri [11]

H_R (m)	15.8	ε	1.09
A_R (m ²)	112.5	κ	0.5
a_H	0.312	I'_R	-0.710
x'_H	-0.464	γ_R^-	0.395
t_R	0.387	γ_R^+	0.640
		λ	1.827

4. Matematik Model

Geminin boğazdaki hareketi 3 serbestlik dereceli (3DOF) MMG matematik modeli kullanılarak modellenmiştir. Geminin,

- dikey hareketleri (dalıp-çıkma, yalpa, baş-kıç vurma) ihmal edilirse ve
- teknenin xz düzlemsel simetrisi olduğu kabul edilirse

6 serbestlik dereceli hareket denklemleri aşağıda verilmiş olan üç denkleme indirgenir. Bu denklemler ek su kütlesiyle ilgili terimler ayrıştırılarak yazıldığında,

$$\begin{aligned}
 & (m + m_x)\ddot{u} - (m + m_y)vr \\
 & \quad - x_G m r^2 \\
 & \quad = X_H + X_R \\
 & \quad + X_P \\
 & (m + m_y)\dot{v} + (m + m_x)ur \\
 & \quad + x_G m \dot{r} \\
 & \quad = Y_H + Y_R \\
 & (I_{zG} + x_G^2 m + J_z)\dot{r} \\
 & \quad + x_G m (\dot{v} \\
 & \quad + ur) \\
 & \quad = N_H + N_R
 \end{aligned} \tag{1}$$

elde edilir. Bu denklemlerde alt indis H gemi üzerine etkiyen kuvvet ve momenti, R dümen tarafından üretilen kuvvet ve momenti, P ise pervane tarafından üretilen kuvveti temsil etmektedir. Gemi üzerine etkiyen kuvvet ve momentler Taylor serisine açılarak MMG matematik modeli ile aşağıdaki bileşenlerine ayrılmıştır:

$$\begin{aligned}
 & X'_H \\
 & = -R'_0 + X'_{vv}v'^2 \\
 & + X'_{vr}v'r' + X'_{rr}r'^2 \\
 & + X'_{vvv}v'^4 \\
 & Y'_H \\
 & = Y'_v v' + Y'_{r} r' + Y'_{vv} v'^3 \\
 & + Y'_{vvr} v'^2 r' + Y'_{vrr} v' r'^2 \\
 & + Y'_{rrr} r'^3 \\
 & N'_H \\
 & = N'_v v' + N'_{r} r' + N'_{vv} v'^3 \\
 & + N'_{vvr} v'^2 r' + N'_{vrr} v' r'^2 \\
 & + N'_{rrr} r'^3
 \end{aligned} \tag{2}$$

Yukardaki denklem takımı boyutsuz olarak verilmiştir. Denklemleri boyutlandırmak için,

Kuvvet boyutsuzlaştırması:
 $F/(1/2 \rho L_d U_c^2)$

Moment boyutsuzlaştırması:
 $M/(1/2 \rho L^2 d U_c^2)$

Hız boyutsuzlaştırması:
 u/U_c

Açısal hız boyutsuzlaştırması:
 r_L/U_c

işlemleri yapılabilir. Pervane ve dümen tarafından üretilen kuvvet ve momentler aşağıdaki denklemlerle ifade edilmektedir:

$$\begin{aligned} X_P &= (1 - t_P)T \\ X_R &= -(1 - t_R)F_N \sin \delta \\ Y_R &= -(1 + a_H)F_N \cos \delta \\ N_R &= -(x_R \\ &+ a_H x_H)F_N \cos \delta \end{aligned} \quad (3)$$

Pervane ve dümen kuvvet ve momentlerinin detaylı hesabı için [11] çalışması incelenmelidir.

5. Güdüm ve Kontrol Sistemi Tasarımı

Güdüm ve kontrol sisteminin amacı gemiyi bir noktadan başka bir noktaya otonom olarak hareket ettirebilmektir. Bunu gerçekleştirirken geminin rotasında kararlı bir davranış sergilemesi beklenmektedir. Kararlı davranışı sergilemesi ve güdüm sistemi tarafından belirlenen rotayı takip edebilmesi için; bu çalışmada, geri beslemeli oransal-türevsel bir kontrolör kullanılmıştır. Geminin takip etmesi gereken rota noktasal olarak kullanıcı tarafından belirlenmekte; güdüm ve kontrol sistemi ise geminin kararlı bir şekilde rotayı takip etmesini sağlamaktadır.

Güdüm sisteminde, kullanıcı tarafından noktasal olarak belirlenen rota, geminin düzlemde takip etmesi gereken açısız forma dönüştürülmekte ve bu açı da referans olarak kontrol sistemine girdi olarak verilmektedir.

Geminin rota planlaması Şekil 2'de görüldüğü gibi yapılırken, geminin anlık takip ettiği rota ile varılacak noktaya ulaşabilmek için takip etmesi gereken rota arasındaki referans açısı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\psi_{ref} = \tan^{-1} \left(\frac{y_k - y_i}{x_k - x_i} \right) \quad (4)$$

Geminin gitmesi istenen noktaya

ulaşabilmesi için takip etmesi gereken referans giriş sapma açısı ψ_{ref} , her bir zaman adımında yenilenen konum vektörü için tekrar hesaplanmakta ve kontrolöre girdi olarak verilmektedir. Ayrıca x_k ve y_k planlanan hedef rota koordinatlarını, x_i ve y_i geminin anlık pozisyon bilgisini vermektedir. Konum ve açısız kontrolün şematik gösterimi Şekil 3'ten incelenebilir.

Güdüm sisteminin belirlediği açı (ψ_{ref}) ile anlık sapma açısı (ψ_i) arasındaki fark hata olarak belirlenmiş ve bu hatayı sıfırlamak için oransal-türevsel bir kontrolör önerilmiştir.

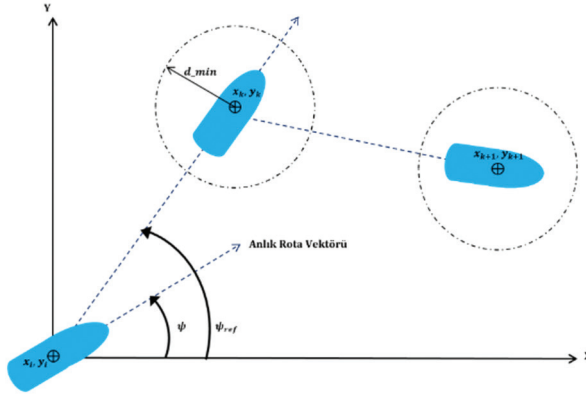
$$\begin{aligned} e_i &= (\psi_{ref} - \psi) \\ \delta_i &= K_p e_i + K_d \dot{e}_i \end{aligned} \quad (5)$$

Burada e_i anlık hatayı, δ_i PD kontrolörün çıktısı olan dümen açısını, K_p oransal kazancı, K_d ise türevsel kazancı ifade etmektedir. Güdüm ve kontrol gerçekleştirilmesi için oluşturulmuş olan yalancı (sözde) kod (pseudocode) Tablo 6'da verilmiştir.

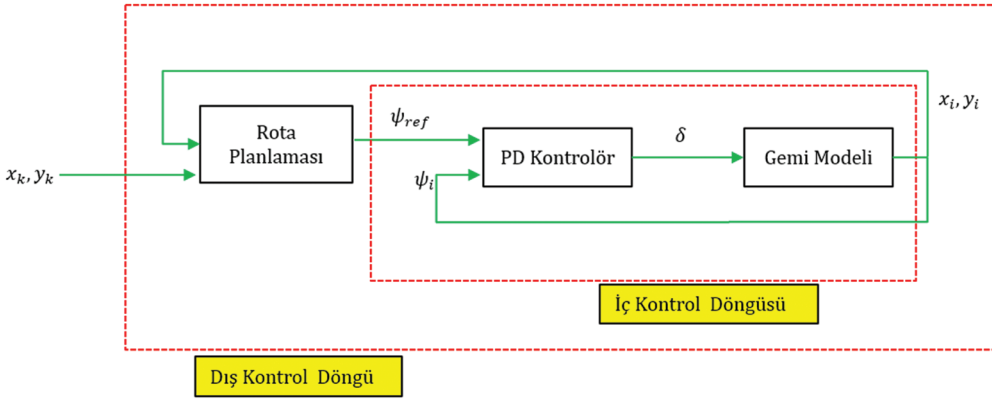
6. Genetik Algoritma Tabanlı Kontrolör Kazançlarının Belirlenmesi

Kontrolör tasarımında literatürde yerleşmiş tasarım yaklaşımlarının uygulanabilmesi için genellikle kullanılan sistemin lineer modeline ihtiyaç duyulur. Birçok sistem lineer olmayan matematiksel model ile ifade edilir ve kontrolör tasarımı için bazı ön kabuller yapılarak lineer hale indirgenir. Gemi dinamiğinin lineer olmayan yapısını lineer bir forma dönüştürmek, yüksek dönüş açılı manevralarda sağlıklı sonuç vermeyecektir. Ayrıca lineerleştirme yaparken yapılan ön kabuller nedeniyle geminin lineer olmayan dinamiğinden bazı sapmalar ortaya çıkacaktır.

Bu nedenlerle kazançların ayarlanması konusunda farklı bir yaklaşım izlenmiştir. Öncelikle bir performans kriteri belirlenmiş ve bu performans kriterini asgari seviyeye indirecek kazanç değerleri



Şekil 2. Geminin Rota Planlama Şeması



Şekil 3. Güdüm ve Kontrol Sisteminin Şematik Gösterimi

Tablo 5. Kontrolör Parametreleri

Popülasyon Sayısı	K_p	K_d	TMH	Popülasyon Sayısı	K_p	K_d	TMH
50	9.11	197.11	3707.48	160	6.80	111.44	3697.16
60	6.89	113.93	3697.37	170	6.78	111.27	3697.18
70	8.07	160.32	3705.20	180	7.40	131.01	3700.43
80	6.34	96.13	3697.76	190	6.69	106.09	3696.85
90	6.44	99.56	3697.17	200	6.68	106.42	3696.90
100	7.01	119.74	3698.17	210	6.38	96.24	3697.77
110	6.43	99.18	3697.10	220	6.66	104.71	3696.98
120	6.76	109.11	3697.07	230	6.65	105.53	3696.92
130	6.65	107.72	3696.73	240	6.64	104.40	3696.89
140	7.29	127.48	3699.81	250	6.84	110.05	3697.02
150	7.41	132.88	3700.91				

Tablo 6. GÜDÜM VE KONTROL GERÇEKLEMESİ İÇİN YALANCI (SÖZDE) KOD (PSEUDOCODE)

1	Takip edilecek noktaların koordinatları belirlenir. - $X=[x_1 \ x_2 \ \dots \ x_k \ x_{k+1}]$ - $Y=[y_1 \ y_2 \ \dots \ y_k \ y_{k+1}]$
2	Gidilmesi istenen noktaya varılıp varılmadığını kontrol etmek için bir mesafe belirlenir. - d_{\min}
3	Gemi, belirlenen ilk koşullar altında harekete başlar.
4	Geminin hareket denklemleri çözülür ve durumları (x_k, y_k, ψ_k) bulunur.
5	Geminin bulunduğu konum ile varması istenen ilk nokta arasındaki mesafe hesaplanır. . $d = \sqrt{((x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2)}$
6	IF $d < d_{\min}$ - $k=k+1$; Varılması istenen noktaya ulaşılmıştır, diğer nokta hedef olarak belirlenir. (Başka bir deyişle, varılması istenen nokta merkez olacak şekilde d_{\min} büyüklüğünde bir çember içine girildiğinde bir sonraki nokta hedef nokta olarak belirlenir.) ELSE - $\psi_{ref} = \tan^{-1}(y_k - y_i) / (x_k - x_i)$; istenen noktaya gitmek için gereken sapma açısı hesaplanır ENDIF
7	Geminin dümen açısı PD kontrol tabanlı olarak hesaplanır. - $e_i = (\psi_{ref} - \psi_i)$ - $\delta_i = K_p e_i + K_d \dot{e}_i$
8	Dördüncü adımdan itibaren son noktaya ulaşıncaya kadar adımlar tekrarlanır.

evrimsel algoritma kullanılarak bulunmaya çalışılmıştır.

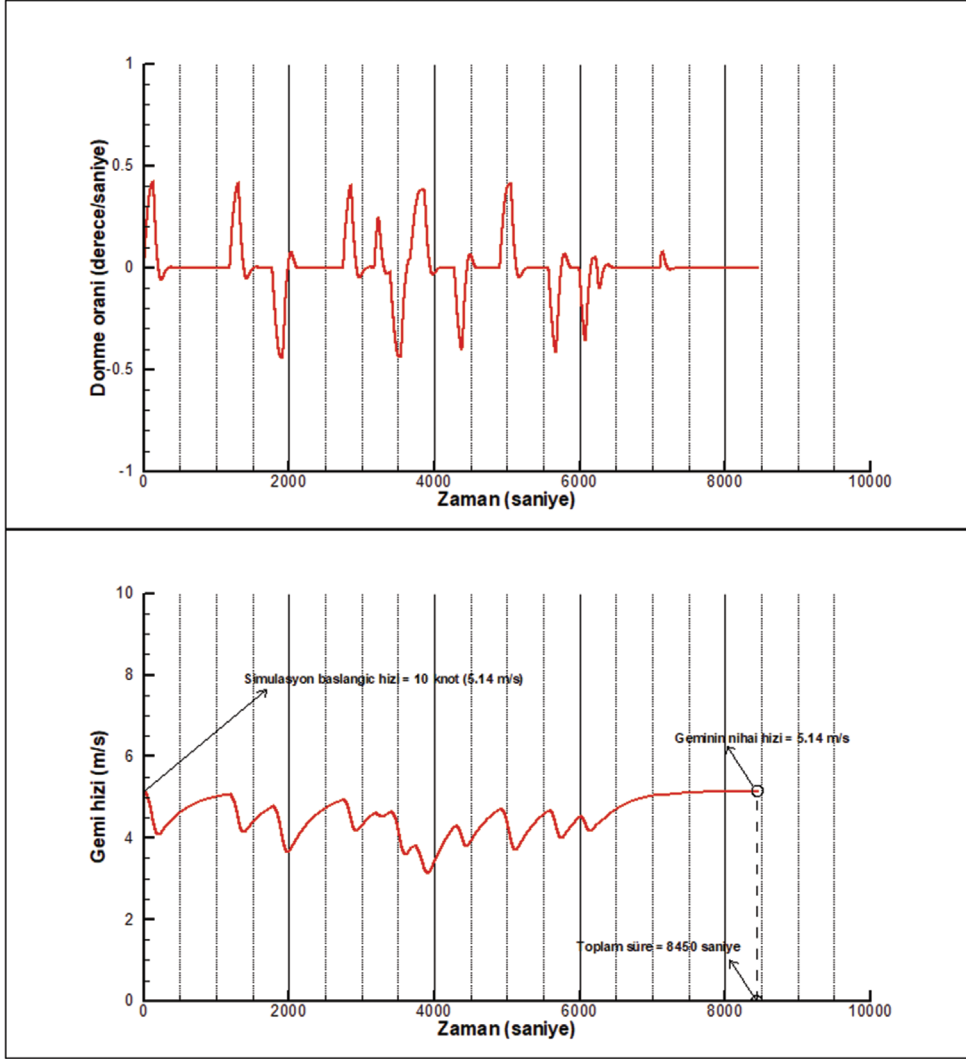
Performans kriteri olarak Toplam Mutlak Hata (TMH) seçilmiştir. Hata olarak ise rota planlama algoritmasının çıkışı olan referans sapma açısı ve gemi dinamiğinin çözdürülmesi sonucu anlık hesaplanan sapma açısı arasındaki fark alınmıştır. Her bir zaman adımında bu hatanın mutlak değeri alınmış ve benzetim çalışması için belirlenen süre tamamlanana kadar TMH hesaplanmıştır. TMH matematiksel olarak;

$$TMH = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N |\psi_{ref} - \psi_i| \quad (6)$$

denklemler ile ifade edilmiştir. Evrimsel bir optimizasyon yöntemi olarak genetik algoritma, global optimum sonuç bulma konusunda karmaşık problemlerde kullanılmaktadır. Çözüm süresi, türev kullanan optimizasyon yöntemlerine göre daha yüksektir ancak lokal optimum çözümünde takılı kalmamaları fark yaratan özellikleri arasındadır. Bu problemde performans kriteri optimize

edilirken belirlenmesi istenen parametreler oransal (K_p) ve türevsel (K_d) kontrolör kazançlarıdır. Genetik algortmada kullanıcı tarafından önceden ayarlanan popülasyon sayısı kadar K_p ve K_d ikilileri belirlenir. Her bir K_p ve K_d ikilisi için gemi dinamiğinin benzetimi oluşturulur ve performans kriteri hesaplanır. Bunun sonucunda en iyi sonucu veren değerlerden bir kısmı bir sonraki kuşağa aktarılır. Mevcut kuşağın üyeleri genetik değişim ve mutasyon işlemlerinden geçirilerek bir sonraki kuşak oluşturulur. Daha önceden belirlenen durma kriteri sağlanana kadar algoritma koşuturulur. Bunun sonucunda performans kriterini minimize edecek K_p ve K_d ikilisi bulunmuş olur.

Ancak, bulunan sonuç popülasyon sayısına ve belirlenen durma kriterine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Bu nedenle, çalışmada farklı popülasyon sayılarında optimizasyon algoritması koşuturulmuş ve bulunan sonuçlar Tablo 5'te belirtilmiştir. Popülasyon sayısı 50 ile 350 arasında değiştirilmesine karşın tabloda 250'ye kadar olan değerler verilmiştir. En



Şekil 4. Geçiş Esnasında Geminin Zamana Bağlı Dönme Oranı (Üstte) ve Hızı (Altta)

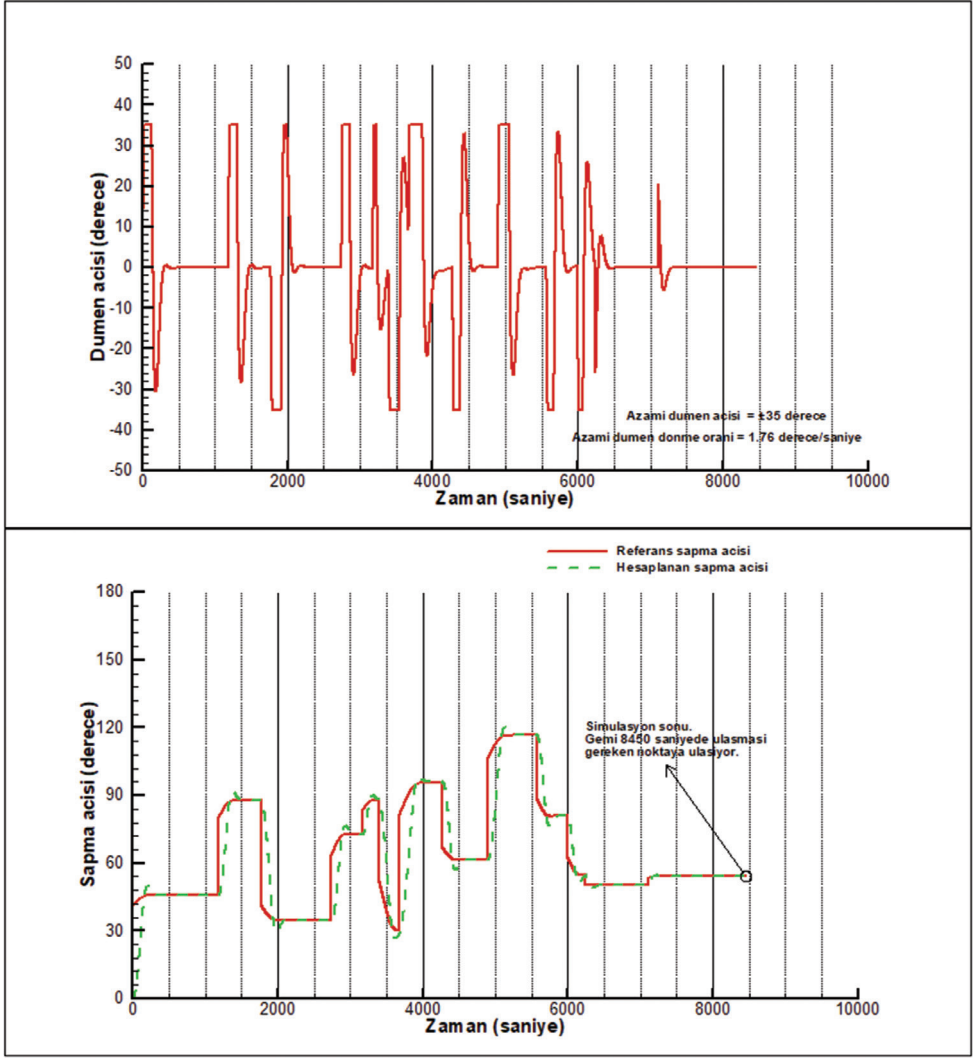
düşük TMH'yi veren K_p ve K_d seçilmiş ve simülasyon sonuçları bir sonraki kısımda sunulmuştur.

7. Simülasyon Sonuçları

Bu bölümde, KVLCC2 gemisinin İstanbul Boğazı geçiş simülasyonu sunulmuştur. Geminin geçmesi gereken çek noktaları Şekil 1'de verilmişti. Geminin takip ettiği rota ise Şekil 7'de verilmiştir.

Gemi, İstanbul Boğazı geçiş hızı olan 10

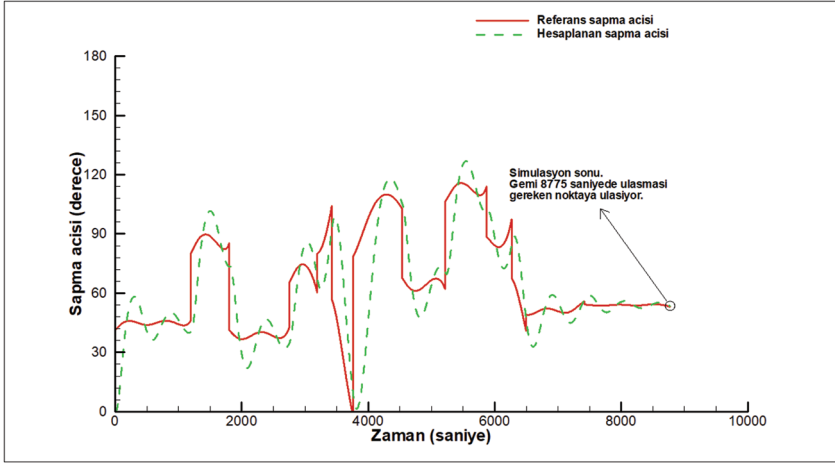
knot (5.14m/s) hız ile ilk çek noktasından hareketine başlamaktadır. Başlangıç ve bitiş çek noktaları arasında geminin geçirdiği süre 8450 saniye (yaklaşık 2 saat 21 dakika) olarak hesaplanmıştır. Bu iki nokta arasındaki kuş uçuşu mesafe yaklaşık olarak 35.6km'dir. Yani eğer gemi İstanbul Boğazı'nda 5.14m/s sabit hızla ileri hareket edebilseydi bu süre yaklaşık 1 saat 45 dakika olacaktı. Geminin boğazda izlediği rotadaki sapmalar



Şekil 5. Geçiş Esnasında Geminin Zamana Bağlı Dümen Açısı (Üstte) ve Sapma Açısı (Altta)

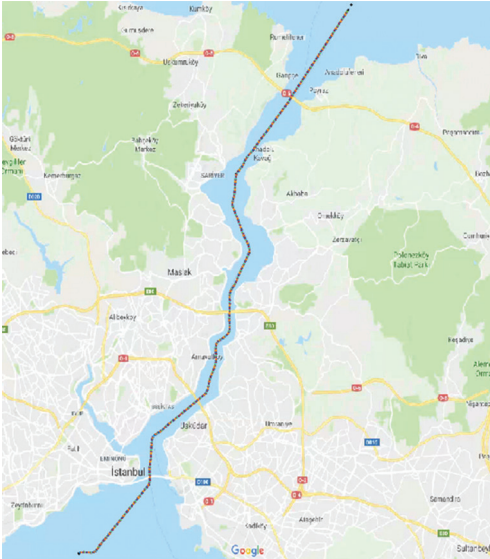
nedeniyle yolu bir miktar uzamış ve bunun yanında gemi ileri hızında zamana bağlı olarak düşüşler meydana gelmiştir. Bu iki sebepten dolayı gemi boğazdan geçişinde 36 dakika zaman kaybetmiştir. Geminin geçiş esnasındaki dönme oranı ve hızı Şekil 4'te verilmiştir. Şekilden de görülebileceği üzere, dönme oranının pik veya dip yaptığı noktalarda gemi hızı düşmektedir. Dönme oranının sıfır (veya sıfıra çok yakın) olduğu bölgelerde ise

gemi kendini toparlayarak seyir hızını tekrar yakalamaktadır. Geminin seyri esnasında dümen otopilot ile kontrol edilmiştir. Simülasyon boyunca oransal türevsel kontrolör ile kontrol edilen dümenin zamana bağlı açısı Şekil 5'te (üstte) verilmiştir. Dümen azami açısı ± 35 derecedir. Şekilde gösterilen dümen açılarında çok keskin artışlar görüne bile bu artışların saniyede 1.76 dereceden küçük olduğu teyit edilmiştir.



Şekil 6. Alelade Seçilmiş Kazanç Değerleri Kullanılarak Elde Edilmiş Referans ve Hesaplanan Sapma Açıları. $K_p=1$ ve $K_d=1$

Geminin, belirlenen rotayı takip edebilmesi için belirli bir referans sapma açısı bulunmaktadır. Bunun yanında geminin boğaz geçiş simülasyonu ile elde edilen sapma açısı da hesaplanmıştır. İki farklı sapma açısının karşılaştırması Şekil 5'te (altta) verilmiştir. Keskin sapmalarda gemi referans sapma açısını ilk başlarda kaçırır da hemen kendini toplayabildiği gözlenmiştir.



Şekil 7. Geminin İstanbul Boğazı'nı Geçerken İzlediği Rota

Referans ve hesaplanan sapma açısı arasındaki fark oransal ve türevsel kazanç değerlerinin seçimine bağlı olarak değişebilir. Alelade seçilecek kazanç değerleriyle gemi kararlı bir rota tutturmakta zorlanabilir. Şekil 5'te genetik algoritma yöntemiyle belirlenen optimum kazanç değerleri kullanılarak ($K_p=6.65$ ve $K_d=107.72$) geminin referans ve sapma açısı karşılaştırmalı olarak verilmişti. İkinci bir uygulama olarak, geminin aynı rotayı alelade seçilmiş kazanç değerleri ($K_p=1$ ve $K_d=1$) ile tamamlamasına çalışılmıştır. Şekil 6'da bu kazanç değerleri ile elde edilen referans ve sapma açıları karşılaştırılmıştır.

Şekil 6'dan da görülebildiği gibi gemi geçiş süresince doğrusal bir rota tutturmakta zorlanmaktadır. Bunun yanında referans ve hesaplanan sapma açıları arasındaki fark büyümüştür. Ayrıca yapılan simülasyon sonucunda alelade seçilmiş kazanç değerleriyle geminin boğaz geçişini başarıyla tamamlayamadığı gözlenmiştir. Geminin, Anadolu Hisarı ve Rumeli Hisarı arasındaki su yolunda iki defa kıyıya vurduğu tespit edilmiş; geçiş esnasındaki diğer bazı keskin dönüşlerde ise kıyıya çok yakın seyrettiği görülmüştür. Bu da kazanç değerlerinin optimum olarak seçilmesinin önemini göstermektedir.

8. Tartışma

Son senelerde kontrol mühendisliği alanında büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Günümüzde artık otonom gemiler, sualtı drone'ları veya akıllı limanlar gibi konulardan sıklıkla bahsedilebilmektedir. İlerleyen teknolojiyi sistemsel olarak benimseyebilmek için önce altyapının oluşturulmuş olması gerekir. Denizcilik alanındaki kontrol sistemlerinin en basitlerinden birisi de gemilerdeki otopilot modülüdür.

Yaklaşık 20 sene önce yürürlüğe girmiş olan Türk Boğazları Deniz Trafik Düzeni Tüzüğü'ne göre gemiler İstanbul Boğazı geçişi esnasında otopilot kullanamamaktadır. Ancak bugün gemi kontrol sistemleri belirli bir olgunluğa kavuşmuştur. Dolayısıyla otopilot modüllerinin gemiler için artık sıradanlaşmış olduğu rahatlıkla söylenebilir. Buna karşın yaklaşık 10 yıl kadar önce yapılmış bir çalışmada; orantısal türevsel kontrolör ile hareketinin simülasyonu yapılan bir geminin, simülasyon esnasında yapmış olduğu keskin dönüşleri gerçekte yapamayacağı belirtilmiştir [12]. Çalışma detaylı incelendiğinde bunun iki sebebinin olduğu düşünülmektedir:

- gemi hareket denklemleri lineer olarak ele alınmıştır;
- oransal ve türevsel kazançlar optimize edilmemiştir.

Bu iki sebepten dolayı, Şimşir'in [12] çalışmasında "PD kontrol ile çok kısa sürelerde gerçekleştirilmesi gereken hareketlerin gerçekte mümkün olmadığı" sonucuna varılmıştır. Kazanç değerlerinin doğru seçilmesi geminin keskin dönüşleri hafifletmesine yardımcı olacaktır ancak söz konusu çalışmada bu değerler optimize edilmemiştir. Ayrıca simülasyonlarda lineer gemi hareket denklemleri kullanılması diğer bir önemli etkidir. Lineer denklemler kullanılarak benzetimi yapılan geminin gerçek durumdan çok daha yavaş tepki verdiği bilinmektedir. Örneğin; lineer hareket denklemleri kullanılarak elde

edilen gemi dönme dairesi çapı, nonlinear hareket denklemleri kullanılarak elde edilen dönme dairesi çapından çok daha büyük olur. Yani nonlinear terimlerin hareket denklemlerinden çıkarılması, geminin çok daha geç tepki verdiği sanısına yol açacaktır. Halbuki bu durum yalnızca modellemedeki basitleştirmeden ibarettir.

9. Sonuçlar

Bu çalışmada 320m boyunda VLCC tipi bir geminin otopilot modülü kullanılarak İstanbul Boğazı geçiş simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Simülasyon esnasında Boğaz'da akıntı bulunmadığı kabulü yapılmıştır. Gemi hareket denklemleri 3 serbestlik dereceli ve nonlinear olarak ele alınmıştır. Gemi dinamiğiyle ilgili bilgiler (manevra türevleri) literatürde yayınlanmış bir çalışmadan alınmıştır. Geçiş süresince gemi azami hızı, Deniz Trafik Tüzüğü'nün izin verdiği azami hız olan 10 knot'ı geçmemektedir. Kontrol modülü olarak orantısal türevsel kontrolör kullanılmıştır. Kontrolör kazançları genetik algoritma kullanılarak optimize edilmiştir.

Yapılan simülasyonlar sonucunda geminin optimize edilmiş kazanç değerleriyle geçişini problemsiz tamamladığı görülmüştür. Daha sonra alelade kazanç değerleri ile aynı geçiş tekrar denemiş ancak geminin Arnavutköy ile ikinci köprü arasında kalan keskin dönüşlü bölgede kıyıya vurduğu gözlemlenmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda elde edilen modelin geliştirilerek,

- rüzgar, akıntı ve dalga gibi dış kuvvetlerin hesaplara dahil edilmesi ve
- kontrol sisteminin geliştirilerek çek noktalarının otonom olarak belirlenmesi hedeflenmektedir.

Teşekkürler

Bu çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: 41103.

Kaynakça

- [1] Denizcilik Müsteşarlığı, "Türk Boğazları Deniz Trafik Düzeni Tüzüğü," 1998. [Online]. Available: <http://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/2.5.9811860.pdf>.
- [2] G. Zhang and X. Z. Y. Zang, "Adaptive neural path-following control for underactuated ships in fields of marine practice," *Ocean Engineering*, pp. 104:558-567, 2015.
- [3] Y. A. Ahmed and K. Hasegawa, "Fuzzy reasoned waypoint controller for automatic ship guidance," in *IFAC PapersOnLine* 49-23, 2016.
- [4] M. Sandler, A. Wahl, R. Zimmermann, M. Faul, U. Kabatek and E. D. Gilles, "Autonomous guidance of ships on waterways," *Robotics and Autonomous Systems*, pp. 327-335, 1996.
- [5] L. P. Perera, "Autonomous guidance and navigation based on the COLREGs rules and regulations of collision avoidance," in *In Proc. Of the International Workshop "Advanced Ship Design for Pollution Prevention, Split, Croatia, 2009*.
- [6] M. Reyhanoglu, "Exponential stabilization of an underactuated autonomous surface vessel," *Automatica*, pp. 2249-2254, 1997.
- [7] M. Caccia, M. Bibuli, R. Bono and B. Gabriele, "Basic navigation, guidance and control of an Unmanned Surface Vehicle," *Autonomous Robots*, p. 349-365, 2008.
- [8] C. R. Sonnenburg and C. A. Woolsey, "Modeling, Identification, and Control of an Unmanned Surface Vehicle," *Journal of Field Robotics*, pp. 371-398, 2013.
- [9] N. Taşlıgil, "İstanbul Boğazı'nın Ulaşım Coğrafyası Açısından Önemi," *Marmara Coğrafya Dergisi*, pp. 1-18, 2004.
- [10] B. Aydoğan, İstanbul Boğazı akıntı yapısının istatistik ve belirsizlik yöntemleri ile modellenmesi, İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.
- [11] H. Y. Y. Yasukawa, "Introduction to MMG standart method for ship maneuvering predictions," *Journal of Marine Science and Technology*, pp. 37-52, 2015.
- [12] U. Şimşir, "Dar kanalda seyir yapan gemilerin otopilot ve manuel kumanda ile gerçekleştirilen manevra performanslarının incelenmesi," *Journal of Naval Science and Engineering*, pp. 17-29, 2009.